



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**

im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INŻYNIERII MECHANICZNEJ**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Tomasz Cierlicki

**EFEKTYWNE STEROWANIE CYKLEM ISTNIENIA
WYBRANEGO OBIEKTU TECHNICZNEGO
ENERGETYKI ODNAWIALNEJ**

***Effective control of the life cycle of a selected
renewable energy technical object***

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. IZABELA PIASECKA, PROF. UCZELNI
POLITECHNIKA BYDGOSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

PROMOTOR POMOCNICZY

DR HAB. INŻ. PATRYCJA BAŁDOWSKA-WITOS, PROF. UCZELNI
POLITECHNIKA BYDGOSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

Bydgoszcz, 2025

Podziękowania

*Zakochałem się w niej za młodu,
Zapragnąłem jej ponad wszystko,
szukałem sposobu, aby ją poślubić,
gdyż zachwyciłem się jej pięknem (Mdr 8, 2).*

Szczególne podziękowania kieruję wobec Boga, który mnie ukształtował i dał mi sposobność spotkania na swej drodze ludzi, dzięki którym jestem kim jestem.

Dlatego na samym początku dziękuję tym, których spotkałem na samym początku swej drogi życiowej, a więc moim najbliższym i przyjaciółom za wsparcie i wiarę w podejmowane przez mnie decyzję. Następnie dziękuję wszystkim nauczycielom i profesorom, którzy dzielili się swoją wiedzą o otaczającym nas świecie.

Szczególne podziękowania i wyrazy uznania kieruję wobec Pani Promotor – dr hab. inż. Izabeli Piaseckiej, prof. uczelni, za inspiracje w podjęcie tematu oraz ogromne wsparcie w napisanie niniejszej pracy oraz Pani Promotor Pomocniczej dr hab. inż. Patrycji Bałdowskiej-Witos, prof. uczelni, za pomoc udzieloną w redagowaniu pracy.

Nie mogę zapomnieć o profesorach, doktorach i pracownikach, byłych i obecnych, Katedry Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii i Systemów Technicznych, którzy podczas studiów zaszczepili we mnie zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii oraz pomagali mi przejść przez drogę zdobywania wiedzy.

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW, SYMBOLI I JEDNOSTEK

- BAT** – najlepsza dostępna technika (ang. *best available technique*)
- CED** – skumulowane zapotrzebowanie na energię (ang. *cumulative energy demand*)
- CVD** – proces chemicznego osadzania z fazy gazowej (ang. *chemical vapour deposition*)
- DALY** – lata życia skorygowane niesprawnością (ang. *disability adjusted life years*)
- D_{OZE}** – destrukcyjność obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- E_{OZE}** – efektywność obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- EPBT** – czas zwrotu inwestycji
- EVA** – etyleno-octan winylu (ang. *ethylene-vinyl acetate*)
- GHG** – gaz cieplarniany (ang. *greenhouse gas*)
- GWP** – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (ang. *global warming potential*)
- IOE** – Instytut Energetyki Odnawialnej
- IPCC** – Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- IRENA** – Międzynarodowa Agencja Energetyki Odnawialnej (ang. *International Renewable Energy Agency*)
- k** – kategoria wpływu w metodzie LCA
- K_{OZE}** – konstrukcja obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- LCA** – ocena cyklu istnienia (ang. *life cycle assessment*)
- LCI** – analiza zbioru wejść i wyjść (ang. *life cycle inventory*)
- LCIA** – ocena wpływu cyklu istnienia (ang. *life cycle impact assessment*)
- LCT** – myślenie w kategoriach cyklu istnienia (ang. *life cycle thinking*)

- LPE** – proces epitaksji z fazy ciekłej (ang. *liquid-phase epitaxy*)
- MC** – analiza Monte Carlo
- μ_{OZE}** – obciążenie środowiska w cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- MG-Si** – krzem klasy metalurgicznej (ang. *metallurgical-grade silicon*)
- OT_{OZE}** – obiekt techniczny energetyki odnawialnej
- OZE** – odnawialne źródła energii
- R2R** – technika wytwarzania „z rolki na rolkę” (ang. *roll-to-roll*)
- SOG-Si** – tzw. krzem solarny, o odpowiedniej jakości dla przemysłu fotowoltaicznego (ang. *solar-grade silicon*)
- Soz_{Ek}** – poziom oddziaływania na otoczenie obiektu technicznego energetyki odnawialnej dla danej kategorii wpływu (w metodzie LCA)
- STC** – standardowe warunki testowe fotowoltaicznego procesora energii (ang. *standard test conditions*), tj. nasłonecznienie: 1000 W/m², temp. ogniwa 25°C, masa powietrza 1,5
- T_{OZE}** – okres eksploatacji obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- U_{OZE}** – użyteczność obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- WEEE** – dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ang. *Waste Electrical and Electronic Equipment*)
- W_p** – watópik (ang. *watt-peak*) – jednostka mocy fotowoltaicznych procesorów energii określana w warunkach STC
- y_{OZE}** – sygnał sterujący obiektem technicznym energetyki odnawialnej
- Z_k** – założenia konstrukcyjne
- ZU_{OZE}** – zasoby użytkowe obiektu technicznego energetyki odnawialnej
- Ω_{OZE}** – emisje w cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	9
1.1. Geneza	9
1.2. Zakres pracy	12
2. Analiza aktualnego stanu wiedzy i techniki	14
2.1. Cykl istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej	14
2.1.1. Definicja cyklu istnienia	15
2.1.2. Sformułowanie potrzeby	17
2.1.3. Projektowanie i konstruowanie	18
2.1.4. Wytwarzanie	20
2.1.5. Eksploatacja	22
2.1.6. Zagospodarowanie użytkowe	28
2.1.7. Podstawowe założenia cyklu istnienia w obiegu (możliwe) zamkniętym	30
2.1.8. Sterowanie cyklem istnienia obiektu technicznego	33
2.2. Identyfikacja jakości oraz efektywności maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej	37
2.2.1. Wstęp	37
2.2.2. Efektywność	39
2.2.3. Destrukcyjność	42
2.2.4. Zdatność	45
2.2.5. Funkcjonalność	47
2.2.6. Użyteczność	49
3. Cel, problem, hipoteza badawcza	51
4. Procedura oceny możliwości sterowania cyklem istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej w kontekście gospodarki w obiegu zamkniętym rozwoju zrównoważonego	54
4.1. Obiekt i przedmiot badań	54
4.2. Plan i program badań	59
4.3. Podstawowe założenia metodyczne stosowanej procedury analitycznej	62
4.3.1. Główne założenia metody oceny cyklu istnienia (LCA)	62
4.3.2. Określenie celu i zakresu analizy	66

4.3.3. Zasady analizy zbioru wejść i wyjść (LCA)	68
4.3.4. Ocena wpływu cyklu istnienia (LCA)	71
4.3.4.1. Model IMPACT World+	73
4.3.4.2. Model IPCC	74
4.3.4.3. Model CED	75
4.3.5. Analiza Monte Carlo	75
4.3.6. Reguła interpretacji uzyskanych wyników	78
5. Zastosowanie procedury na przykładzie wybranego obiektu energetyki odnawialnej	80
5.1. Elektrownia fotowoltaiczna oparta na modułach monokrystalicznych	80
5.1.1. Model IMPACT World+	80
5.1.1.1. Charakteryzowanie	80
5.1.1.2. Normalizowanie	86
5.1.1.3. Grupowanie i ważenie	87
5.1.2 Model IPCC 2021	93
5.1.3 Model CED	94
5.2. Elektrownia fotowoltaiczna oparta na modułach polikrystalicznych	96
5.2.1. Model IMPACT World+	96
5.2.1.1. Charakteryzowanie	96
5.2.1.2. Normalizowanie	102
5.2.1.3. Grupowanie i ważenie	102
5.2.2. Model IPCC 2021	108
5.2.3. Model CED	110
5.3. Elektrownia fotowoltaiczna oparta na modułach amorficznych	112
5.3.1. Model IMPACT World+	112
5.3.1.1. Charakteryzowanie	112
5.3.1.2. Normalizowanie	117
5.3.1.3. Grupowanie i ważenie	118
5.3.2. Model IPCC 2021	124
5.3.3. Model CED	125
5.4. Elektrownia fotowoltaiczna oparta na modułach perowskitowych	127
5.4.1. Model IMPACT World+	127
5.4.1.1. Charakteryzowanie	127

5.4.1.2. Normalizowanie	133
5.4.1.3. Grupowanie i ważenie	133
5.4.2. Model IPCC 2021	139
5.4.3. Model CED	141
5.5. Podsumowanie wyników badań dla analizowanych obiektów technicznych	143
5.5.1. Model IMPACT World+	143
5.5.1.1. Charakteryzowanie	143
5.5.1.2. Grupowanie i ważenie	159
5.5.2. Model IPCC 2021	178
5.5.3. Model CED	185
5.5.4. Ocena wpływu na otoczenie w odniesieniu do powierzchni ogniw PV oraz wielkości produkcji energii elektrycznej	195
5.5.4.1. Oddziaływanie cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznej na otoczenie w przeliczeniu na 1 m ² powierzchni ogniw PV	195
5.5.4.2. Oddziaływanie cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznej na otoczeniu w przeliczeniu na 1 MWh wytworzonej energii elektrycznej	199
5.6. Analiza Monte Carlo	203
5.6.1. Porównanie cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i amorficznych	203
5.6.1.1. Model IMPACT World+	204
5.6.1.2. Model IPCC 2021	207
5.6.1.3. Model CED	209
5.6.2. Porównanie cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i perowskitowych	211
5.6.2.1. Model IMPACT World+	211
5.6.2.2. Model IPCC 2021	214
5.6.2.3. Model CED	216
5.7. Autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.....	218
5.7.1. Wskaźnik zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE _{en})	218
5.7.2. Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE _{ek}).....	220

5.7.3. Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec})	221
5.7.4. Porównanie wartości wskaźników zrównoważonej efektywności dla analizowanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej.....	222
5.7.5. Współczynnik wydłużenia cyklu istnienia (Φ_{ci})	224
6. Podsumowanie i wnioski	231
Bibliografia	248
Streszczenie w języku polskim	265
Streszczenie w języku obcym	267
Załączniki	269

1. WPROWADZENIE

1.1. GENEZA

Człowiek jest istotą, której potrzeby stale rosną, również pod względem zróżnicowania. Wzrost potrzeb powoduje, że powstają coraz to nowe środki i obiekty techniczne. Zwiększanie potrzeb jest związane nie tylko ze zmieniającym się poziomem życia ludzi, ale należy także w nich upatrywać czynnik biologiczny bądź metafizyczny warunkujący istnienie potrzeb twórczych. Potrzeby człowieka mogą mieć charakter biologiczny, zdrowotny, kulturowy, energetyczny, technologiczny czy religijny. Jednak najczęściej są one związane z zaspokojeniem sfery materialnej i zostają zrealizowane dzięki działalności inżynierskiej. Działalność ta rozpoczyna się od rozpoznawania bodźców, ich identyfikacji, a następnie przez projektowanie, wytwarzanie i eksploatację zmierza do zaspokojenia powstałej potrzeby. Problem identyfikacji potrzeb jest ważny w kontekście metodologii projektowania obiektów technicznych [54, 70, 85, 227].

Obiekty techniczne są wytworami stworzonymi dla ludzi. Za ich istnienie odpowiada inżynier-projektant, inżynier-konstruktor lub inżynier-wytwórca. Z kolei za właściwe ich wykorzystanie odpowiada inżynier zajmujący się eksploatacją. Obiekty techniczne są wytwarzane przez człowieka, jednocześnie oddziałując zarówno na niego, jak i na środowisko. Ludzie, środowisko i technosfera stanowią sfery, które konsekwentnie stają się oddziałującym na siebie nawzajem układem zamkniętym [53, 227, 240].

Dotychczas, ogólnymi wymaganiami stawianymi podczas projektowania obiektów technicznych były wymagania eksploatacyjne, ekonomiczne, technologiczne oraz produkcyjne. Uznawano, że konstrukcja spełniająca te warunki jest prawidłowa. Obecnie, w obszarze projektowania technicznego charakterystyczne jest zjawisko projektowania takiego obiektu, który będzie w jak najmniejszym stopniu negatywnie oddziaływał na otoczenie i człowieka. Ten stan rzeczy jest spowodowany m.in. niekontrolowanym w przeszłości, nadmiernym eksploatowaniem zasobów naturalnych. Problem ten został szczególnie podkreślony podczas sesji Zgromadzenia Ogólnego ONZ w 1968 roku. Wtedy zauważono, że zasoby środowiska są ograniczone, w związku z czym należy je chronić i reglamentować. Aby zmniejszyć wpływ społeczeństwa na otoczenie koniecznym jest zapobieganie powstawaniu zanieczyszczeń. Dlatego podejmowane są liczne działania mające na celu nie dopuszczanie do powstania odpadów, a jeżeli nie jest to możliwe, należy dopełnić wszelkich starań, aby odpady powstały w jak najmniejszej ilości, a ich szkodliwość była jak najniższa. Koncepcja ta stanowi podstawowe założenie gospodarki w obiegu (możliwie) zamkniętym, czyli zwiększenia poziomu recyklingu tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych powstałych obiektów technicznych, zamiast wyłącznego zużywania surowców pierwotnych. Kolejnym sposobem zmniejszenia uciążliwości środowiskowej jest przeprowadzenie oceny

oddziaływania na otoczenie projektowanego obiektu oraz wybranie wariantu bardziej przyjaznego dla środowiska. Stanowiło to podstawę do podjęcia próby sformułowania zasad i metod przygotowania bilansu ekologicznego cyklu istnienia maszyn w XX wieku. Zauważono, że dalszy rozwój gospodarczy jest możliwy dzięki utworzeniu właściwych relacji między gospodarką a otoczeniem. Pod koniec ubiegłego wieku zaczęto opracowywać normy prawne uznające strategię zrównoważonego rozwoju jako naczelną rolę polityki ekologicznej poszczególnych państw. Rozwój gospodarek krajów rozwiniętych zaczął zmierzać w stronę utworzenia bardziej ekologicznej relacji maszyna-otoczenie. Nie byłoby to możliwe bez zwiększenia świadomości i wrażliwości społeczeństw państw rozwiniętych na potrzebę poszanowania środowiska oraz jego zasobów [76, 106, 126, 147, 158, 160, 161].

Zmiana relacji obiekt techniczny-otoczenie odbywa się na wielu poziomach cyklu istnienia obiektu. Już w pierwszym jego etapie projektanci i konstruktorzy zwracają szczególną uwagę, aby projektowany obiekt w jak najmniejszym stopniu negatywnie wpływał na otoczenie. Biorą również pod uwagę, by w kolejnych etapach istnienia obiektu technicznego zminimalizować niezbędne zasoby materii i energii (do jego wytworzenia oraz eksploatacji). Analizowane są także potencjalne możliwości jego zagospodarowania poużytkowego. Aby móc określić wartość ekologiczną obiektów technicznych opracowano metodologię oceny cyklu istnienia LCA (*Life Cycle Assessment*). Pozwala ona na analizę niezwykle szerokiego spektrum jego oddziaływań środowiskowych. Jej założenia opierają się na ustaleniu i ocenieniu wpływu na otoczenie wszystkich oddziaływań występujących podczas całego cyklu istnienia obiektu od pozyskania surowców, poprzez proces wytwarzania i eksploatacji, aż do jego zagospodarowania poużytkowego. Dzięki temu możliwym jest ustalenie potencjalnych następstw środowiskowych, jakie wywołuje obiekt techniczny w poszczególnych etapach cyklu istnienia. W konsekwencji pozwala to na dokonanie oceny i hierarchizację zidentyfikowanych oddziaływań na otoczenie, celem ich minimalizacji w przyszłości [16, 122, 133, 177, 229, 248, 257].

W związku z powyższym, uznano za zasadne wykorzystanie głównych założeń metodologii oceny cyklu istnienia w odniesieniu do analiz realizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

W ostatnich latach rynek OZE, w tym fotowoltaicznych procesorów energii, odnotował znaczące przyspieszenie, a prognozy wskazują na jego dalszą, dynamiczną ekspansję. Jak wynika z danych Instytutu Energetyki Odnawialnej (IEO), moc zainstalowana w systemach fotowoltaicznych w roku 2024 przekroczyła poziom jednego terawata. Z kolei według Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA) łączna moc instalacji PV w krajach Unii Europejskiej wyniosła ponad 300 GW. Wśród największych producentów energii w tym sektorze znalazły się Niemcy (82 GW), Hiszpania (61 GW), Włochy (35 GW), Francja (27 GW), Holandia (23 GW) oraz Polska (18 GW). Zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii w mikсах elektroenergetycznych krajów i regionów nabiera coraz większego tempa, co

wynika nie tylko z konieczności przeciwdziałania zmianom klimatycznym, ale także z potrzeby zmniejszenia zależności energetycznej od importu paliw kopalnych. W ramach strategii REPowerEU Europa wyznaczyła ambitne cele na rok 2030, zakładające osiągnięcie 45% udziału OZE w unijnym miksie elektroenergetycznym. Rozwój systemów fotowoltaicznych jest również wspierany przez Komisję Europejską poprzez uruchamianie nowych programów, takich jak PV IPCEI, które dążą do odtworzenia przemysłowej produkcji modułów PV w Europie w ramach REPowerEU. Dodatkowo wdrażane są inicjatywy mające na celu ochronę europejskiego rynku przed napływem tańszych produktów z Azji. W Polsce Ministerstwo Klimatu i Środowiska zapowiedziało intensyfikację działań na rzecz rozwoju odnawialnych źródeł energii, stawiając za cel osiągnięcie ich 47% udziału w zużyciu energii elektrycznej do roku 2030. Kluczową rolę w budowie gospodarki opartej na OZE przypisuje się wykorzystaniu fotowoltaicznych procesorów energii. Z danych przedstawionych przez Agencję Rynku Energii (ARE) wynika, że w roku 2024 polska energetyka odnawialna wygenerowała 42 TWh energii elektrycznej, z czego około 15 TWh pochodziło z instalacji fotowoltaicznych [92, 94, 140].

Technologia systemów fotowoltaicznych przez długi czas była postrzegana jako „czysta” i przyjazna dla środowiska, stanowiąc jedno z rozwiązań wspierających ochronę zarówno przyrody, jak i zdrowia ludzi. Jednakże w ostatnich latach coraz większą uwagę zaczęto zwracać na kwestie związane z wpływem środowiskowym tego rodzaju obiektów technicznych, głównie w kontekście rosnącej liczby modułów PV, które po zakończeniu eksploatacji stają się trudnym do zagospodarowania odpadem. W odpowiedzi na ten problem Unia Europejska objęła urządzenia fotowoltaiczne regulacją dotyczącą zużytego sprzętu elektronicznego i elektrycznego na mocy dyrektywy 2012/19/UE. W ramach tych przepisów określono wymóg odzysku materiałów, z których je zbudowano na poziomie co najmniej 85%. Dyrektywa ta nakłada na producentów paneli fotowoltaicznych obowiązek dostarczania szczegółowych informacji dotyczących właściwego zarządzania odpadami powstałymi z instalacji PV zarówno dla użytkowników końcowych, jak i firm zajmujących się ich przetwarzaniem. Jej wdrożenie stało się impulsem do opracowania normy EN 50625-2-4, która określa wymagania związane z gromadzeniem, logistyką oraz przetwarzaniem sprzętu elektrycznego, w tym fotowoltaicznych procesorów energii. Przyjęcie tych standardów ma na celu zwiększenie efektywności recyklingu oraz minimalizację wpływu tej technologii na otoczenie. Powyższe uwarunkowania doprowadziły do pojawienia się na rynku różnych generacji ogniw fotowoltaicznych, cechujących się niższymi kosztami produkcji oraz uproszczonymi procesami technologicznymi na etapie wytwarzania, podczas którego oddziaływanie na otoczenie jest największe [45, 46, 93, 110, 151, 170, 186, 213, 251].

Wobec powyższego, jako obiekt techniczny odnawialnych źródeł energii, który poddany zostanie szczegółowym analizom wybrano elektrownię fotowoltaiczną opartą na modułach PV wytworzonych w czterech odmiennych

technologiach (od klasycznych, najczęściej stosowanych, po najnowsze, innowacyjne rozwiązania) monokrystalicznej, polikrystalicznej, amorficznej i perowskitowej.

W niniejszej rozprawie dokonano analizy dwóch alternatywnych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznych: składowania oraz recyklingu. Pomimo że składowanie odpadów pochodzących z instalacji fotowoltaicznych jest obecnie prawnie niedopuszczalne (zgodnie z Dyrektywą 2012/19/UE (WEEE) oraz ustawą o zużytym sprzęcie elektrycznym i elektronicznym w Polsce, tego typu odpady podlegają obowiązkowi zbiórki, odzysku i recyklingu), jego uwzględnienie w badaniach miało charakter celowy i wynikało z przesłanek metodologicznych. Po pierwsze, scenariusz składowania stanowi istotny punkt odniesienia, pozwalający na wyraźne ukazanie korzyści środowiskowych, energetycznych i ekonomicznych osiąganych dzięki recyklingowi. Po drugie, uwzględnienie tego wariantu umożliwia pełniejsze zobrazowanie potencjalnych konsekwencji braku wdrożenia działań związanych z gospodarką o obiegu zamkniętym, a tym samym pozwala na silniejsze uzasadnienie potrzeby rozwoju technologii odzysku surowców. Wreszcie, scenariusz składowania spełnia funkcję scenariusza porównawczego (tzw. *baseline*), niezwykle istotnego w badaniach LCA, które wymagają zdefiniowania alternatywnego układu odniesienia dla pełnej interpretacji wyników i wnioskowania.

1.2. ZAKRES PRACY

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów uzupełnionych o spis treści, wykaz najważniejszych skrótów, symboli i jednostek, spis literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym przybliżono genezę pracy oraz jej zakres. Uzasadniono także podjęcie tematyki zawartej w tytule.

Drugi rozdział poświęcony zostanie analizie aktualnego stanu wiedzy i techniki z zakresu cyklu istnienia obiektów technicznych od sformułowania potrzeby przez projektowanie, konstruowanie, eksploatację, aż po ich zagospodarowanie poużytkowe (ze szczególnym uwzględnieniem odnawialnych źródeł energii). Opisane zostaną podstawowe założenia cyklu istnienia obiektu technicznego oraz relacje występujące pomiędzy jego poszczególnymi etapami. Omówione będą również podstawowe założenia cyklu istnienia w obiegu (możliwie) zamkniętym oraz istota sterowania cyklem istnienia obiektu technicznego. Dokonany zostanie również opis podstawowych miar (wskaźników) służących do oceny maszyn i urządzeń przetwórczych, a w szczególności przetwarzających energię (w tym: efektywność, destrukcyjność, zdatność, funkcjonalność, użyteczność).

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury, w rozdziale trzecim sformułowany zostanie cel i problem pracy, hipoteza oraz zadania szczegółowe, niezbędne do ich realizacji.

Rozdział czwarty obejmował będzie aspekty metodologiczne pracy. Przedstawione w nim zostaną główne założenia autorskiej procedury oceny możliwości sterowania cyklem istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej w kontekście gospodarki w obiegu zamkniętym. Scharakteryzowany będzie obiekt i przedmiot badań. Omówiony zostanie także plan oraz program badań, jak również podstawowe założenia metodyczne stosowanej procedury analitycznej.

W rozdziale piątym przybliżone zostaną najważniejsze wyniki badań uzyskanych dzięki zastosowaniu opracowanej procedury badawczej na przykładzie wybranego obiektu energetyki odnawialnej. Analizy będą zrealizowane dla czterech elektrowni fotowoltaicznych opartych na modułach fotowoltaicznych wykonanych w odmiennych technologiach monokrystalicznej, polikrystalicznej, amorficznej i perowskitowej. Otrzymane rezultaty zostaną omówione zgodnie z zastosowanymi modelami LCA IMPACT World+, IPCC i CED, oddzielnie dla etapu charakteryzowania, normalizowania oraz grupowania i ważenia. Wyniki będą obejmowały zarówno całkowite oddziaływanie cykli istnienia badanych obiektów technicznych (z uwzględnieniem dwóch scenariuszy zagospodarowania poużytkowego składowania na wysypisku odpadów lub recyklingu), jak również ich poszczególnych elementów (konstrukcja wsporcza, panele fotowoltaiczne, stacja inwerterowa, instalacja elektryczna, transformator). Zaprezentowane zostaną również kluczowe rezultaty wykonanej analizy Monte Carlo. Na zakończenie rozdziału piątego przybliżone zostaną kluczowe założenia autorskich wskaźników zrównoważonej efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, których wartości będą wyznaczone dla cykli istnienia analizowanych elektrowni fotowoltaicznych (z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego). Dodatkowo opracowany zostanie współczynnik wydłużenia cyklu istnienia (Φ_{ci}), którego definicja i zastosowanie umożliwią szczegółową ocenę wpływu długości okresu eksploatacji obiektów technicznych na wartości wskaźników zrównoważonej efektywności. Na tej podstawie przeprowadzona zostanie pogłębiona analiza zmian badanych parametrów dla ocenianych elektrowni, przy założeniu długości cyklu istnienia w przedziale od 25 do 50 lat.

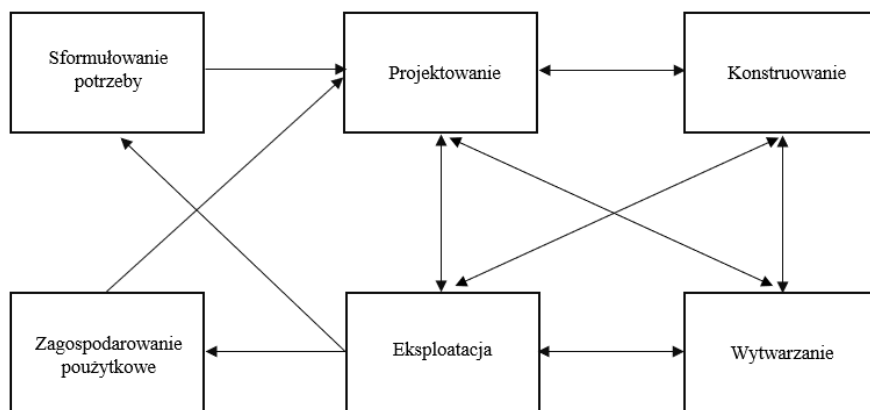
Rozdział szósty będzie obejmował podsumowanie całej pracy. Zawarte w nim zostaną najważniejsze wnioski z niej wypływające, jak również sformułowane będą zalecenia w kierunku efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

2. ANALIZA AKTUALNEGO STANU WIEDZY I TECHNIKI

2.1. CYKL ISTNIENIA OBIEKTÓW TECHNICZNYCH ENERGETYKI ODNAWIALNEJ

Zintensyfikowany rozwój obiektów technicznych i wzrost świadomości społeczeństwa w zakresie poszanowania środowiska, spowodował powstanie metod oceny ich wpływu na otoczenie. Podstawowym narzędziem do tego celu jest metoda LCA. Obejmuje ona pełen cykl istnienia obiektu, uwzględniając jego oddziaływanie zarówno na zdrowie człowieka, jakość środowiska, jak i na wyczerpywanie zasobów surowców. Metoda ta znalazła uznanie na arenie międzynarodowej, a w konsekwencji powstały specjalne normy regulujące zakres i sposób dokonywania oceny wpływu na otoczenie. Dokonując tego rodzaju analiz odpowiada się na pytanie, jakie potencjalne zagrożenia lub szanse oraz negatywne lub pozytywne następstwa środowiskowe może nieść ze sobą etap wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego danego obiektu? Aby móc zrealizować rzetelne badania, należy zatem rozpocząć od uporządkowania wiedzy z zakresu cyklu istnienia obiektów technicznych [114, 122, 142, 143].

Każdy obiekt techniczny w tym maszyna, urządzenie lub instalacja energetyki odnawialnej podczas całego cyklu istnienia może być rozpatrywana jako sekwencja zadań (celów) jakie należy wykonać, aby móc eksploatować dany obiekt techniczny. Na rysunku 2.1 przedstawiono etapy cyklu istnienia maszyn, urządzeń i instalacji odnawialnych źródeł energii. Aby móc stworzyć dowolny obiekt techniczny z obszaru OZE, należy wykorzystać zasoby dóbr w postaci energii, materii i informacji. Zasoby dobór materialnych, surowcowych i energetycznych są jednak ograniczone [76, 196, 227, 233].



Rys. 2.1. Etapy cyklu istnienia środka technicznego (opracowanie własne)

Istotą obiektów technicznych jest działanie związane z zaspokojeniem określonej potrzeby. Sformułowanie potrzeb jest zatem pierwszym krokiem do

podjęcia działań mających na celu stworzenie maszyny, urządzenia lub instalacji energetyki odnawialnej. Formalny opis obiektu technicznego odbywa się podczas projektowania. Czynnikiem, który determinuje tworzenie koncepcji rozwiązania oraz jej optymalizacji, jest sposób zaspokojenia potrzeby. Rezultat projektowania staje się podstawą konstruowania, którego efektem jest z kolei dobór cech konstrukcyjnych (materiałowych, geometrycznych i dynamicznych) oraz opis konstrukcji za pomocą dokumentacji technicznej. Po konstruowaniu następuje wytwarzanie, a powstały wytwór musi posiadać własności odpowiadające wymaganiom konstrukcyjnym. Gotowy obiekt techniczny jest przekazywany do eksploatacji, w wyniku czego jest wykorzystywany do zrealizowania zadania (celu), do którego został przeznaczony. Ostatnim etapem cyklu istnienia maszyn, urządzeń lub instalacji energetyki odnawialnej jest ich wyłączenie z eksploatacji, a następnie zagospodarowanie poużytkowe (np. w formie spalania, recyklingu, składowania, itd.). Prawo entropii dotyczy każdego konkretnego, ponieważ w pewnym momencie obiekt techniczny przestaje być użyteczny i należy rozpatrzyć istotność cech konkretnego w stosunku do jego poprzedniego stanu. Podczas tego etapu obiekt zostaje zatem wyłączony z użytkowania, a jego tworzywa, materiały, elementy i zespoły robocze są zagospodarowywane, często w różny sposób. Powstaje zatem problem końca obiektu technicznego, który utracił pożądane cechy eksploatacyjne. Powinien on być rozwiązany już w projekcie technicznym, zgodnie z dwiema podstawowymi zasadami użytkowania tworzyw, materiałów oraz elementów, polegającymi na minimalizacji ilości materiałów wykorzystywanych na wytwarzanie i eksploatację oraz ograniczanie ich rozpraszania. Te zabiegi mają na celu niedopuszczenie do występowania (lub jeśli to niemożliwe minimalizację) negatywnych konsekwencji dla człowieka, gospodarki i środowiska [207, 237, 238, 247].

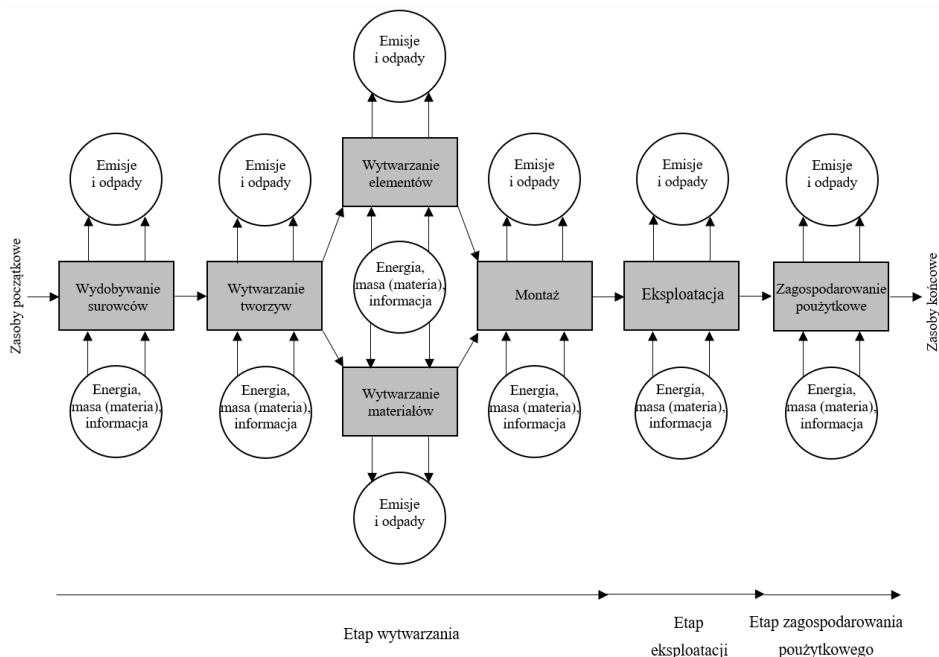
Pomiędzy poszczególnymi etapami cyklu istnienia obiektu technicznego istnieją sprzężenia zwrotne. Charakteryzują one przepływ informacji, energii i masy (materii) pomiędzy poszczególnymi etapami. Zatem w obiegu można wyróżnić współsystem informacyjny, energetyczny i masowy. Pozyskiwanie informacji umożliwia identyfikację potrzeby, a bez masy (materii) i energii żaden obiekt nie powstałby. Idealny przepływ w obiegu zamkniętym odbywałby się bez start ubocznych, jednak taki stan nie może zaistnieć z przyczyn fizycznych. Dlatego obecnie ważne jest, aby powiększać wiedzę z zakresu oszczędności materii i energii. Jest to możliwe dzięki ciągłemu doskonaleniu wiedzy w obszarze własności i właściwości układów materialnych, czyli dzięki informacji [231, 260, 259, 261].

2.1.1. Definicja cyklu istnienia

Zaistnienie obiektu technicznego w postaci materialnego bytu, następuje poprzez przejście przez szereg etapów cyklu istnienia: sformułowanie potrzeby, projektowanie i konstruowanie oraz wytwarzanie, co w konsekwencji umożliwia jego eksploatację, a cały proces kończy się w momencie zagospodarowania

pożytkowego. Przedstawiony zbiór następujących po sobie działań jest nazywany cyklem istnienia obiektu technicznego. Takie uporządkowanie pozwala na wyróżnienie kluczowych czynności i zadań w nim realizowanych [1438, 173, 206].

W każdym z etapów cyklu istnienia obiektu technicznego następuje zużywanie materii, energii, wody i gruntu oraz powstanie określonej ilości zanieczyszczeń oraz odpadów, stanowiących obciążenie dla otoczenia. Zasoby pobierane ze środowiska w poszczególnych etapach cyklu istnienia obiektu, są przetwarzane aż do momentu kiedy stają się zasobami nienadającymi się do ponownego wykorzystania czyli są deponowane w otoczeniu. Na rysunku 2.2 przedstawiono schemat przebiegu cyklu istnienia obiektu technicznego, z uwzględnieniem przepływu materii, energii i odpadów w poszczególnych jego etapach. Na rysunku nie uwzględniono sformułowania potrzeby, projektowania i konstruowania, ponieważ zakłada się, że w tych obszarach stosunek pobieranej masy, energii oraz generowanych odpadów jest nieproporcjonalnie mały w porównaniu do kolejnych etapów cyklu istnienia obiektu [76, 80, 132].



Rys. 2.2. Model obiegu masy (materii), energii, informacji i odpadów podczas wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania pożytkowego obiektu technicznego. Opracowanie własne na podstawie [76, 122]

Obiekt zaspokajający sformułowaną potrzebę musi przejść przez proces wytwarzania. W jego ramach następuje zużycie materii, energii i informacji. Dzięki temu powstaje strumień wytworów użytecznych, który ma znaczenie dla nabywców oraz strumień niepożądanych produktów ubocznych, w postaci

odpadów i zanieczyszczeń. Podczas wytwarzania realizowana jest duża ilość procesów cząstkowych, niezbędnych do prawidłowego wytworzenia obiektów technicznych. W każdym procesie składowym powstaje określony półprodukt, który jest poddawany dalszemu przetwarzaniu w technologicznym ciągu procesów oraz tworzy się określona ilość odpadów i emisji. Gotowe obiekty techniczne opuszczają zakład produkcyjny i zostają przetransportowane do nabywców, gdzie są użytkowane i podawane zabiegom eksploatacyjnym, mającym na celu utrzymanie ich zdolności. Po utracie pożądanych cech, obiekt jest traktowany jako odpad lub co zdarza się coraz częściej, jako zasób poużytkowy podlegający przekształceniu np. na surowce wtórne. Regulacje prawne zawarte m.in. w ustawie o ochronie środowiska oraz główne założenia zrównoważonego rozwoju wymagają, aby obiekt techniczny po zakończeniu eksploatacji, został wykorzystany w takim zakresie, w jakim jest to możliwe zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. W praktyce można znaleźć wiele sposobów działań, mających za celu zagospodarowanie poużytkowe otrzymanych odpadów. Jednak nadal pozostaje pewien ich zasób, który trudno jest zagospodarować z powodu braku techniki, wiedzy lub z powodów finansowych. Dlatego warto podejmować czynności, aby tę lukę zapełnić oraz wykorzystać jak największą ilość tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych obiektów technicznych, które nie nadają się do dalszej eksploatacji [2, 227, 237].

2.1.2. Sformułowanie potrzeby

Ciągle rosnące potrzeby społeczeństwa oraz wymagania stawiane obiektom technicznym (w tym urządzeniom i maszynom energetyki odnawialnej), w kontekście zmniejszenia ich negatywnego oddziaływania na otoczenie, skłaniają inżynierów, naukowców, projektantów do opracowywania nowych, pro-środowiskowych rozwiązań. Jest to spowodowane uświadomieniem braku czegoś, gdzie przez brak rozumie się przede wszystkim stan związany z niedomiarem rzeczy lub działania. Identyfikacja tego, co jest możliwe i konieczne, nie jest procesem łatwym, ale duży udział w rozwiązaniu tego problemu ma projektant-inżynier, który zazwyczaj jako pierwszy, zauważa lukę w danym obszarze technosfery. Posiada on umiejętność operowania materią oraz nabył podstawy naukowe, które umożliwiają mu uprzedmiotowienie zasobów materii, energii, informacji i czasu. Nie byłoby to możliwe bez sformułowania zarysu problemu w postaci koncepcji. Koncepcja w działaniach technicznych stanowi wynik pomysłowości inżyniera, która wiąże się z zaprezentowaniem zarysu działania obiektu technicznego i jego postacią konstrukcyjną. Istotę koncepcji stanowi opracowanie jej wieloelementowego zbioru. Dzięki temu możliwym jest wybór koncepcji optymalnej, na podstawie wcześniej przyjętych kryteriów. Porównaniu podlegają przede wszystkim właściwości i własności obiektów. Poszukiwanie optymalnej koncepcji wynika z przekonania, że istnieje „rozwiązanie idealne”. Tworzenie wielu rozwiązań, możliwe jest dzięki intuicji i zdrowemu rozsądkowi. Przyjmuje się, że nie należy ograniczać się w procesie

koncypowania. Brak ograniczeń na tym etapie zmniejsza prawdopodobieństwo pominięcia koncepcji, która może okazać się najlepszą. Podstawowym narzędziem polegającym na zebraniu wszystkich dostępnych i nieodzownych środków formalnych, koniecznych do opisu formalnego obiektu technicznego jest formalizacja. Dzięki niej możliwym jest uzyskanie zbioru wartości ilustrujących dany obiekt, celem opracowania struktury materializacji sformułowanego wcześniej braku [24, 39, 258].

W obszarze obiektów technicznych energetyki odnawialnej, widocznym jest pewien wyraźny deficyt nowych, bardziej pro-środowiskowych rozwiązań. Technologie z gałęzi maszyn i urządzeń OZE, które oferuje rynek, niewątpliwie wytwarzają „czystsza” energię niż elektrownie konwencjonalne, ale ich podstawowym mankamentem jest istotny negatywny wpływ na otoczenie podczas etapu wytwarzania oraz zagospodarowania poużytkowego. Z tego powodu pojawiała się potrzeba opracowania sprawniejszych, wydajniejszych i bardziej przyjaznych dla środowiska obiektów technicznych energetyki odnawialnej. W świecie, w którym zasoby naturalne nieuchronnie się wyczerpują, w którym toczą się konflikty zbrojne zagrażające bezpieczeństwu energetycznemu państw, w którym jakość środowiska ulega drastycznemu obniżeniu powodując m.in. szereg negatywnych konsekwencji dla zdrowia ludzi, niezbędnym jest tworzenie nowych technologii maszyn i urządzeń przetwarzających energię, zwłaszcza ze źródeł odnawialnych [163, 214, 236].

2.1.3. Projektowanie i konstruowanie

Istotnym elementem działalności inżynierskiej jest projektowanie. Na tym etapie podejmuje się decyzje operacyjne, rozwija się koncepcje dotyczące działania obiektu technicznego, dobiera się optymalne układy przetwarzające energię, masę i informacje, przy adekwatnym wykorzystaniu właściwości materii oraz zjawisk fizycznych, w konsekwencji wpływających na niezawodność, skuteczność, ekonomiczność, użyteczność, wydajność, diagnozowalność, funkcjonalność, sprawność i bezpieczeństwo. Zatem projektowanie stanowi swego rodzaju opracowanie informacji o sposobie zaspokajania potrzeb [35, 125].

Wynikiem projektowania obiektów technicznych energetyki odnawialnej jest dokumentacja projektowa, zawierająca rysunki, opis, instrukcje oraz zestawienie tworzyw, materiałów i elementów, jak również ich kosztorys. Dokumentacja projektowa zawiera opis całego obiektu, umożliwiając tym samym jego wykonanie oraz przygotowanie procesów eksploatacji. Przedmiot projektowania obejmuje zatem środki techniczne, stosunki między środkami i cele wytwórcze [110].

W cyklach istnienia maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej można również wyróżnić etap konstruowania, polegający na doborze cech konstrukcyjnych (materiałowych, dynamicznych i geometrycznych) projektowanych obiektów technicznych. Konstruowanie cechuje precyzyjne, jednoznaczne i szczegółowe wyznaczenie geometrii poszczególnych elementów oraz całego obiektu, z uwzględnieniem własności dynamicznych,

kinematycznych, statycznych i materiałowych oraz wszystkich innych, koniecznych do jego prawidłowego działania. Podczas konstruowania obiektów realizuje się wartościowanie i wizualizację [101].

Wartościowanie jest związane z dokonywaniem obliczeń konstrukcyjnych mających na celu ukonkretnienia, uszczegółowienia i zilustrowanie obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Podczas tego procesu wyznaczane są zbiory wartości liczbowych, które opisują dany obiekt, jego elementy, otoczenie i relacje zachodzące między nimi (we wszystkich możliwych warunkach eksploatacyjnych). Wartościowanie jest ukierunkowane na utworzenie matematycznej wersji obiektu technicznego, która po wizualizacji stanowić będzie jego materializację. W tej fazie wyznaczane są parametry geometryczne, dynamiczne, kinematyczne, materiałowe oraz wytrzymałościowe poszczególnych tworzyw, materiałów i elementów [143, 239].

Podczas wizualizacji tworzony jest natomiast graficzny czyli rysunkowy obraz obiektu technicznego energetyki odnawialnej, ułatwiający zrozumienie działania zarówno poszczególnych elementów, jak i całego obiektu. Obecnie do wizualizacji wykorzystuje się narzędzia grafiki komputerowej, które umożliwiają precyzyjne zobrazowanie zaprojektowanego obiektu technicznego [177, 227].

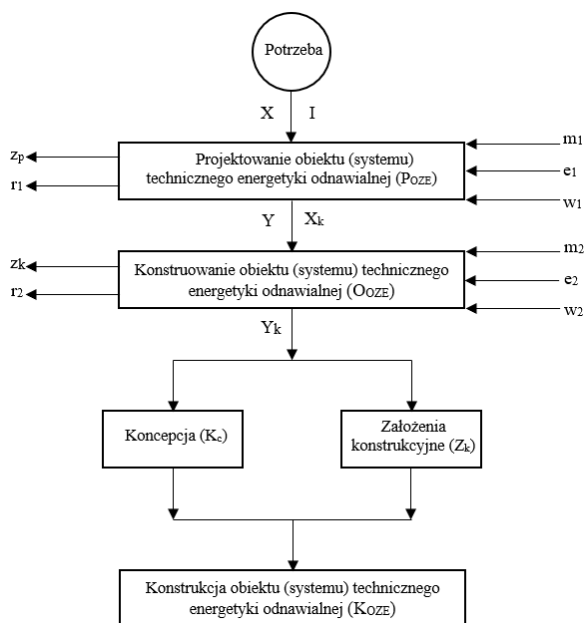
Projektowanie poprzedza konstruowanie, jednak w pewnym momencie projektowanie i konstruowanie zaczynają przebiegać równocześnie. Wcześniejsze ustalenia projektowe mogą być weryfikowane lub korygowane w celu uzyskania optymalnej konstrukcji. Dlatego projektowanie i konstruowanie może być rozumiane jako całość prac projektowo-konstrukcyjnych, które odbywają się według określonego algorytmu działań zmierzających do otrzymania najlepszego rozwiązania [16, 53].

Model procesu projektowo-konstrukcyjnego obiektów technicznych energetyki odnawialnej, które mają spełnić wcześniej określone potrzeby, można przedstawić w sposób graficzny, co zobrazowano na rysunku 2.3.

Aby dany obiekt techniczny mógł zostać wytworzony, na samym początku, zgodnie z cyklem istnienia, musi zostać zauważona potrzeba. Sformułowanie potrzeby jest wejściem, informacją (I) niezbędną do projektowania (P_{OZE}). Wyjściem (W_p) jest wizja obiektu, której działanie ma odbywać się poprzez przekształcenie wejścia X w wyjście Y , odpowiednio do sformułowanej potrzeby. W zaprezentowanym na rysunku 2.3 modelu rozgraniczono projektowanie i konstruowanie ze względu na fakt, że tylko w stosunkowo prostych przypadkach występuje możliwość ograniczenia projektu tylko do samego procesu projektowania. Podczas tworzenia nowych konstrukcji maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej, etap ten odbywa się na drodze projektowania (P_{OZE}) i konstruowania (O_{OZE}). Zapis projektu (Y_p) jest wejściem (X_k) konstruowania. Wyjściem konstruowania jest natomiast koncepcja (K_c) i założenia konstrukcyjne (Z_k) dające określoną konstrukcję (K_{OZE}), której w procesie wytwarzania nadaje się pewne struktury i stany (S_{OZE}) [139, 227].

Tworzenie obiektów technicznych energetyki odnawialnej podczas etapu projektowania i konstruowania jest związane z dopływem energii (e), masy (m),

wiedzy (w) oraz z pewnymi rozproszeniami (r). Zapisy konstrukcji i projekty wywołują określone strumienie masy (m_1, m_2), energii (e_1, e_2) i wiedzy inżynierskiej z zakresu projektowania i konstruowania obiektów technicznych (w_1, w_2). Zarówno podczas projektowania, jak i konstruowania zachodzą pewne rozproszenia (r_1, r_2). Rozproszenia mogą być powodowane przez niszczenie komunikatów, które stanowią przekaz informacji lub przez starty powodowane złym ich opracowaniem. Aby proces projektowania i konturowania maszyn oraz urządzeń energetyki odnawialnej mógł odbywać się bez żadnych przeszkód, muszą występować pewne operatory projektowania (z_p) oraz operatory konstruowania (z_k). Są one zaimplementowane przez obiekt lub jego element oraz własności obiektów technicznych, a więc wszystko to, co ma wywołać pożądany efekt. Istnienie obiektu odbywa się w czasie (T). Działania podejmowane już w początkowych etapach cyklu istnienia przyczyniają się zatem do poziomu oddziaływania obiektu technicznego energetyki odnawialnej na otoczenie w pozostałych etapach [138, 227, 257].



Rys. 2.3. Model procesu projektowo-konstrukcyjnego obiektów technicznych energetyki odnawialnej. Opracowanie własne na podstawie [76, 227, 257]

2.1.4. Wytwarzanie

Wytwarzanie polega na przekształcaniu układów materialnych po to, aby powstał z nich określony obiekt techniczny, stanowiący wynik pożądanego procesu konstytuowania materialno-energetycznego. Na kształtowanie obiektu technicznego energetyki odnawialnej składają się dwie fazy konstytuowania: materializacja i agregacja. W procesie wytwarzania nie powinno się zmieniać

własności obiektu, bez uprzedniego poinformowania projektanta, konstruktora, ponieważ każda zmiana może istotnie wpłynąć na jakość, trwałość oraz bezpieczeństwo [192].

Materializacja polega na energo-materialnym przekształceniu projektu technologicznego do postaci konkretnego obiektu technicznego energetyki odnawialnej o określonej geometrii i własnościach. Podczas materializacji nadaje się wytworom odpowiednią proporcję i wymiary geometryczne, celem uzyskania konkretnego elementu. Niektóre elementy posiadają pewne cechy i własności dzięki, którym niewymagane jest ich kolejne przekształcanie, dzięki czemu można je od razu wykorzystać w fazie kompletacji niezbędnych elementów tworzących obiekt techniczny, czyli podczas agregacji. Agregacja jest zatem etapem występującym po materializacji i polega na łączeniu poszczególnych funkcjonalnych elementów w całość. Technika oraz procedura agregacji różni się w zależności od rodzaju obiektu [153].

Proces wytwarzania jest kluczowy podczas analizy cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, ponieważ jest to etap, w którym znacząco wykorzystuje się zasoby środowiska (masy, energii, informacji). Podczas jego trwania charakterystycznym jest powstanie produktów ubocznych i/lub odpadów oraz emisji. Zgodnie z ideą obiegu zamkniętego produkty uboczne i odpady powinny być traktowane jako potencjalne surowce, które można ponownie wykorzystać jako uzupełnienie surowców pierwotnych, powiększając dzięki temu możliwości wytwarzania [53, 227, 257].

Charakterystycznym dla procesów wytwarzania jest fakt, że gotowy obiekt techniczny energetyki odnawialnej, nim będzie gotowy do użytkowania, musi przejść przez wiele jednostkowych faz, podczas których wykorzystywane są surowce, materiały energetyczne, nieenergetyczne, powietrze, woda i inne zasoby środowiska. Na podstawie danych zebranych podczas analizy całego procesu wytwórczego można stworzyć model obciążenia środowiska procesu wytwarzania obiektu. Pierwszym krokiem koniecznym do opracowania takiego modelu jest stworzenie schematu procesu wytwórczego. W jego ramach należy uwzględnić wszystkie operacje technologiczne jakie zachodzą podczas wytwarzania. Na rysunku 2.4 przedstawiono przykładowy schemat przebiegu takiego procesu [259, 260].

Produkt wytworzony podczas każdej operacji procesu technologicznego został oznaczony literą λ . Wierzchołek oznaczony λ_{OZE} reprezentuje gotowy obiekt techniczny energetyki odnawialnej. Ilość wierzchołków w danym procesie technologicznym będzie zależała od ilości wykonanych procesów technologicznych oraz zużytych surowców i materiałów. Do poszczególnych operacji technologicznych, wytwarzających produkt należy dostarczyć surowiec, materiał oraz nośnik energii w ilościach koniecznych do wytworzenia określonej ilości półproduktów (ζ). Ponadto w każdym procesie powstają obciążenia (odpady, emisje), oddziałujące na środowisko (μ). Krawędzie skierowane od jednego wierzchołka do drugiego oznaczają kierunek przenoszenia obciążeń. Pomiędzy procesami technologicznymi występuje mnożnik wagowy (α)

przenoszenia obciążeń z półproduktu do innego półproduktu. Określany jest on na podstawie całkowitego zużycia materiałów i półproduktów w poszczególnych procesach technologicznych danego obiektu technicznego. Iloczyn $\alpha \cdot \lambda$ wyraża stopień obciążenia przenoszonego między wierzchołkami. Dzięki temu modelowi możliwym jest opis procesu wytwarzania obiektów technicznych energetyki odnawialnej na podstawie następującego równania:

$$\sum_{i \neq j} \alpha_{ij} \cdot \lambda_i + \zeta_j + \mu_j = \lambda_j \quad (2.1)$$

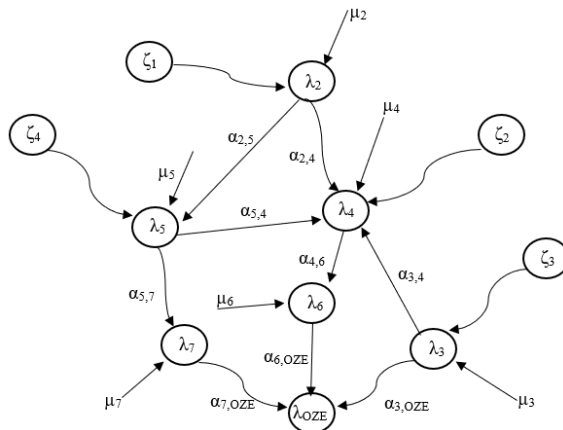
gdzie:

α_{ij} – mnożnik wagowy,

λ_i, λ_j – jednostkowe procesy technologiczne,

ζ_j – materiał, surowiec oraz nośnik energii dostarczony do jednostkowego procesu technologicznego.

μ_j – obciążenie środowiska powstające w j -tym procesie technologicznym [76, 227].



Rys. 2.4. Schemat analizy wpływu na otoczenie procesów wytwarzania obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Opracowanie własne na podstawie [76]

2.1.5. Eksploatacja

Eksploatacją nazywa się etap cyklu istnienia obiektu technicznego, podczas którego wydobywa się wartość jaką nadano mu podczas projektowania i wytwarzania. Jest ona ostatnim elementem w procesie zaspokajania potrzeb, na którą składa się użytkowanie, obsługiwanie, zasilanie oraz zarządzanie obiektami technicznymi energetyki odnawialnej. Ten etap można przedstawić jako sekwencję pewnych zdarzeń, określających stany obiektu z jego zmianami, odbywające się w sposób kontrolowany aż do momentu wyczerpania zasobów użytkowych obiektu technicznego energetyki odnawialnej ZU_{OZE} w poniższym przedziale:

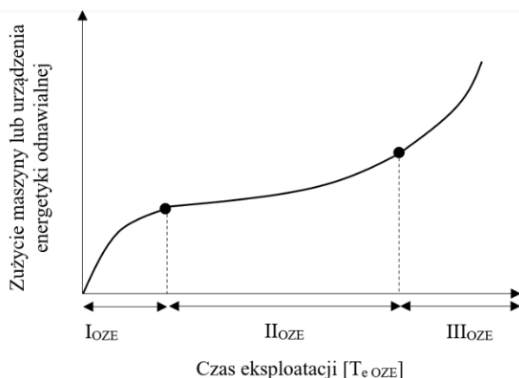
$$ZU_P \geq ZU_{OZE} > ZU_K \quad (2.2)$$

gdzie:

ZU_P , ZU_K – początkowa i krytyczna wartość zasobów użytkowych obiektu technicznego energetyki odnawialnej [49, 175].

W tak rozumianej eksploatacji należy wziąć pod uwagę wartość zasobów, opis zapotrzebowania na te zasoby, opis stanów obiektu i czynności sprawiających by dany obiekt techniczny energetyki odnawialnej był w pożądanym stanie. Każdy obiekt posiada zasób użytkowy, niezbędny do zaspokojenia wymaganego zapotrzebowania. W obiektach technicznych energetyki odnawialnej tym zasobem jest możliwość dokonywania przemian energetycznych, czyli zdolność do wykonywania pracy użytecznej. W układach tego rodzaju dokonuje się transformacja energii wraz z jej dyssypacją wewnętrzną i zewnętrzną. Wejściowy strumień masy, energii i informacji jest przekształcany na dwa strumienie wyjściowe. W pierwszym z nich energia wejściowa jest zamieniana na inną, pożądaną jej formę będącą celem projektowania danego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Drugim strumieniem jest energia dyssypowana, częściowo akumulowana w środowisku, a częściowo gromadzona w samej maszynie lub urządzeniu energetyki odnawialnej, jako skutek szeregu procesów zużyciowych zachodzących w czasie pracy. Szybkość i zaawansowanie procesów zużycia określa jakość funkcjonowania obiektu technicznego oraz jego stan [139, 191, 262].

Przedział czasu, w którym dany obiekt jest poddawany eksploatacji, określa potencjał użytkowy danej maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej, czyli zasób materialno-energetyczny niezbędny do jej użytkowania (rys. 2.5). W tym przedziale ustalić można co najmniej trzy okresy zużycia obiektu technicznego energetyki odnawialnej (I_{OZE} – okres starzenia wstępnego obiektu technicznego OZE, II_{OZE} – okres zużycia normalnego obiektu technicznego OZE, III_{OZE} – okres zużycia przejściowego obiektu technicznego OZE [260]).



Rys. 2.5. Graficzne przedstawienie zmian zużycia maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej na etapie eksploatacji. Opracowanie własne na podstawie [257]

Okres eksploatacji obiektu technicznego energetyki odnawialnej można zapisać za pomocą równania:

$$T_{eOZE} = t_{kOZE} - t_{pOZE} \quad (2.3)$$

gdzie:

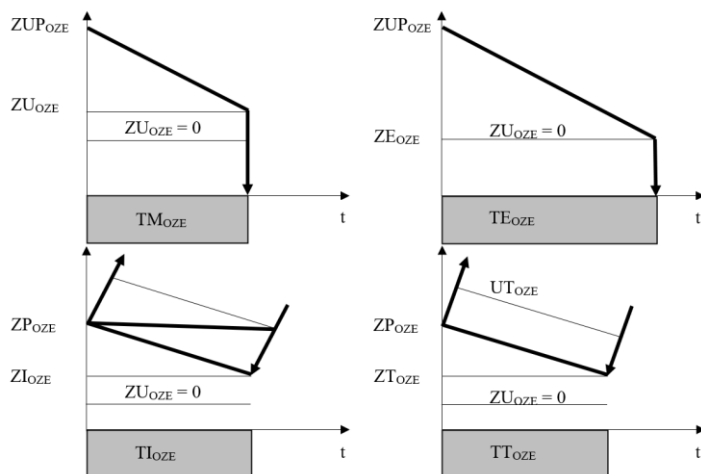
t_{kOZE} , t_{pOZE} – końcowy i początkowy czas eksploatacji, czyli zakończenie i rozpoczęcie eksploatacji obiektu technicznego energetyki odnawialnej [173].

Początek eksploatacji maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej $t_{OZE} = t_{pOZE} = 0$, cechuje również pewna początkowa wartość zasobów użytkowych:

$$ZU_{OZE}(t_{OZE}) = ZU_{OZE}(t_{pOZE}) = ZU_{pOZE} \quad (2.4)$$

Zgodnie z rysunkiem 2.5, potencjał użytkowy maleje w czasie eksploatacji obiektu technicznego energetyki odnawialnej na rzecz potencjału obsługowego, aż do momentu wykorzystania zasobów użytkowych obiektu, czyli wyłączenia go z eksploatacji. Końcowy czas eksploatacji równa się końcowej wartości zasobów użytkowych [173]:

$$ZU_{OZE}(t_{kOZE}) = ZU_{kOZE} \quad (2.5)$$



Rys. 2.6. Przyczyny wycofania z eksploatacji obiektów technicznych energetyki odnawialnej: TM_{OZE} – śmierć fizyczna, TE_{OZE} – śmierć energetyczna, TI_{OZE} – śmierć ekonomiczna, TT_{OZE} – śmierć generacyjna. Opracowanie własne na podstawie [191]

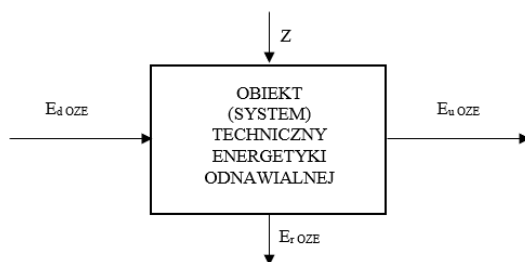
Wycofanie obiektu technicznego energetyki odnawialnej z eksploatacji ma miejsce jeżeli występują następujące przypadki (rys. 2.6):

- skończenie zasobów ogólnych, gdy obiekt techniczny przestaje istnieć w sensie materialnym. Okres eksploatacji wynosi w tym przypadku TM_{OZE} ;

- b) skończenie zasobów użytkowych ($ZU_{OZE} = 0$), pomimo posiadanej części zasobów ogólnych Z_{OZE} (śmierć użytkowa lub energetyczna). Okres eksploatacji wynosi TE_{OZE} ;
- c) koszty eksploatacyjne przekraczają wartość uznaną za dopuszczalną w danych warunkach (śmierć ekonomiczna). Okres eksploatacji wynosi wtedy TT_{OZE} ;
- d) efektywność obiektu technicznego energetyki odnawialnej podczas eksploatacji spada poniżej wartości jaką posiada inny porównywalny obiekt. Zostaje on zatem wycofany z eksploatacji pomimo, że jego zasób nie został w pełni wykorzystany, a nakłady nie przekroczyły wartości krytycznej. Okres eksploatacji wynosi TT_{OZE} [138, 164, 175].

Zanim wyłączy się z eksploatacji daną maszynę lub urządzenie energetyki odnawialnej z powodu powyżej wymienionych przyczyn, dokonuje się pewnych czynności mających na celu odnowienie jej potencjału użytkowego, czyli stosuje się odpowiednią obsługę organizacyjno-techniczną [260].

Przekształcanie energii jakie zachodzi w każdym obiekcie technicznym energetyki odnawialnej na skutek zużycia się jego elementów, odbywa się z coraz mniejszą sprawnością, skutkując wzrostem poziomu energii rozproszonej (E_{rOZE}). Podczas doprowadzenia energii (E_{dOZE}), wraz z upływem czasu, wartość energii użytecznej (E_{uOZE}) będzie malała na rzecz energii rozproszonej (E_{rOZE}) (rys. 2.7) [10].



Rys. 2.7. Schemat działania obiektu technicznego energetyki odnawialnej: Z – zakłócenia, E_{dOZE} – energia doprowadzona, E_{rOZE} – energia rozproszona, E_{uOZE} – energia użyteczna. Opracowanie własne na podstawie [10]

W czasie swojej pracy obiekty techniczne energetyki odnawialnej są obciążone cieplnie i mechanicznie, co powoduje ich zużycie oraz związane z tym straty energii. Tę sytuację można przedstawić graficznie za pomocą wykresu przebiegu działania (rys. 2.8). Pole działania $D_m OZE$ maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej jest obszarem, który charakteryzuje możliwe jej działanie w czasie $[t_1, t_2]$. Z kolei pole działania $D_r OZE$ jest obszarem prezentującym działanie rozproszone, czyli utracone na wskutek zużycia maszyny lub urządzenia. Działanie to narasta wraz z czasem użytkowania [21, 38, 216].

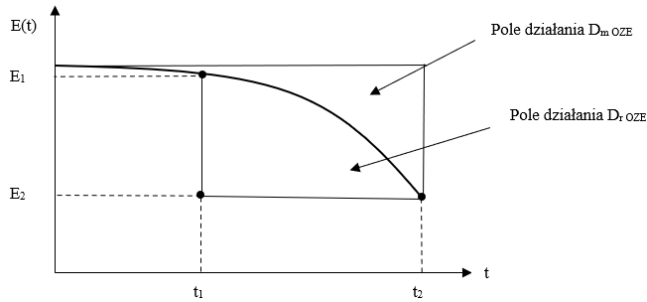
W czasie gdy energia obiektu technicznego energetyki odnawialnej jest oddawana do odbiornika w przedziale czasu $[t_1, t_2]$, to jej działanie można interpretować następująco:

$$D_{OZE} = \int_{t_1}^{t_2} E_{OZE}(t) dt \quad (2.6)$$

$$E_{OZE}(t) = f(t) - E_2 \quad (2.7)$$

gdzie:

D_{OZE} – działanie obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
 E_{OZE} – energia przetwarzana, która umożliwia wykonanie zadania
w przedziale czasu $[t_1, t_2]$,
 t – czas zużycia energii E [138, 257].



Rys. 2.8. Przebieg działania obiektów technicznych energetyki odnawialnej: E_1 , E_2 – przetwarzana energia pozwalająca na realizację zadania przez obiekt techniczny energetyki odnawialnej, t_1 , t_2 – przedział czasu, w którym zużywana jest energia, $D_{m OZE}$ – pole działania możliwe do wykonania przez obiekt techniczny energetyki odnawialnej, $D_{r OZE}$ – pole działania tracone przez obiekt techniczny energetyki odnawialnej. Opracowanie własne na podstawie [257]

Jeżeli przyjmie się zapis $E_{OZE}(t) = f(t) - E_2$ i wstawi się go do całki, to działanie maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej może być zapisane w następującej formie:

$$D_{OZE} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt - E_2(t_2 - t_1) \quad (2.8)$$

Zakładając, że przekazywana do odbiorników energia obiektu technicznego energetyki odnawialnej jest stała ($E_{OZE} = \text{const}$) w przedziale czasu $[t_1, t_2]$, to działanie maszyny lub urządzenia tego rodzaju można wyrazić w następujący sposób:

$$D_{WOZE} = \int_{t_1}^{t_2} W_{OZE}(t) dt = W_{OZE} \int_{t_1}^{t_2} dt = W_{OZE} t \Big|_{t_1}^{t_2} = W_{OZE} (t_2 - t_1) \quad (2.10)$$

$$D_{QOZE} = \int_{t_1}^{t_2} Q_{OZE}(t) dt = Q_{OZE} \int_{t_1}^{t_2} dt = Q_{OZE} t \Big|_{t_1}^{t_2} = Q_{OZE} (t_2 - t_1) \quad (2.11)$$

Korzystając ze wzorów 2.10 i 2.11 można wyznaczyć działanie wymagane ($D_{k\ OZE}$) oraz działania możliwe ($D_{m\ OZE}$) maszyn i urządzeń odnawialnych źródeł energii, uzyskując w ten sposób informację na temat możliwości wykonania określonego zadania. Działania wymagane są to procesy, do których dany obiekt techniczny został przystosowany podczas projektowania i wytwarzania, natomiast działania możliwe to takie, które może zrealizować, będąc w określonym stanie technicznym [138, 257].

Aby maszyna lub urządzenie energetyki odnawialnej mogło wykonać zadania powierzone jej podczas projektowania i wytwarzania, musi zostać spełniona następująca nierówność:

$$D_{m\ OZE} \geq D_{k\ OZE} \quad (2.12)$$

Obiekt techniczny energetyki odnawialnej należy uznać za uszkodzony, gdyż nie może wykonać powierzonego zadania. W takim przypadku nierówność (2.12) przyjmuje postać:

$$D_{m\ OZE} < D_{k\ OZE} \quad (2.13)$$

Działanie maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej jest związane z generowaniem przez nią energii (E_{OZE}) w określonym czasie (t). Ulega ono pogorszeniu z powodu narastania zużycia obiektu technicznego w określonym czasie, wskutek zmniejszenia generowanej przez niego energii. Rozumiane w ten sposób działanie zależy od stanu technicznego obiektu w funkcji energii przez niego przetworzonej i czasu jej generacji [215, 225, 226].

Na przebieg procesu eksploatacji mają wpływ przede wszystkim oddziaływania procesu roboczego, w którym uczestniczy dany obiekt techniczny energetyki odnawialnej, środowisko oraz system eksploatujący. Relacje jakie występują między otoczeniem i obiektem można podzielić na te obejmujące:

- a) konstruktywny wpływ obiektu technicznego na otoczenie i obiekt techniczny,
- b) destruktywny wpływ obiektu technicznego na otoczenie i obiekt techniczny,
- c) konstruktywny wpływ otoczenia na obiekt techniczny i otoczenie,
- d) destruktywny wpływ otoczenia na obiekt techniczny i otoczenie [21, 193, 215].

Zadaniem działań eksploatacyjnych jest konstruktywne generowanie w obiekcie technicznym energetyki odnawialnej procesów, których celem jest ograniczenie bądź zapobieganie destrukcyjnym skutkom, na rzecz utrzymania obiektu w stanie generowania zasobu użytkowego. Działania eksploatacyjne zależą od oddziaływań destrukcyjnych, a ich realizacja wymuszona jest przebiegiem procesu eksploatacji. Działania te mają charakter energo-materialny i informacyjny np. obsługa operatorska, uzdatniająca i zasileniowa (informacyjna, materialna i energetyczna). Wszystkie działania eksploatacyjne tworzą całokształt zabiegów i czynności, które realizowane w okresie eksploatacji decydują o zakwalifikowaniu obiektu do eksploatacji, wycofaniu go z niej, bądź dokonaniu czynności mających przywrócić go do stanu użyteczności. W metodologii badania ewolucji stanu obiektów technicznych można wyróżnić diagnozowanie,

genezowanie i prognozowanie, a w ramach obsługi energo-materialnej – profilaktykę oraz regenerację [226, 229, 257].

Diagnozowanie polega na stałej, odbywającej się w sposób ciągły lub dyskretny, kontroli stanu maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej, na podstawie porównywania ze stanem uznawanym za nominalny [230, 257, 263].

Genezowanie charakteryzuje się natomiast ustalaniem przyczyn diagnozowanego stanu obiektu technicznego energetyki odnawialnej w kontekście efektywnej, oczekiwanej zmiany. Jest ono podejmowane w następstwie diagnozowania [230, 257, 263].

Prognozowanie jest z kolei procesem, którego celem jest określenie przyszłych stanów maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej, np. po to by móc ustalić termin kolejnego obsługiwanie. Dzięki nowym technologiom komputerowym prognozowanie staje się efektywniejsze poprzez jego automatyzację. Rozwój metod symulacyjnych, technik obliczeniowych oraz pomiarowych, przyczynił się do zawężenia błędu oszacowania czasu niezawodnego eksploataowania obiektów technicznych [230, 257, 263].

Profilaktyka polega na podejmowaniu działań zaradczych mających na celu zapobieganie sytuacji, w której obiekt techniczny energetyki odnawialnej byłby w stanie nieużyteczności. Podejmowanie działań profilaktycznych jest konkretyzowane poprzez diagnozowanie i prognozowanie. Obecnie część działań profilaktycznych realizowana jest w sposób zautomatyzowany. Do czynności profilaktycznych zalicza się remonty planowo-zapobiegawcze, przeglądy oraz obsługę bieżącą (kontrolę, konserwację, regulację, smarowanie, oględziny) [127, 128, 230, 257, 263].

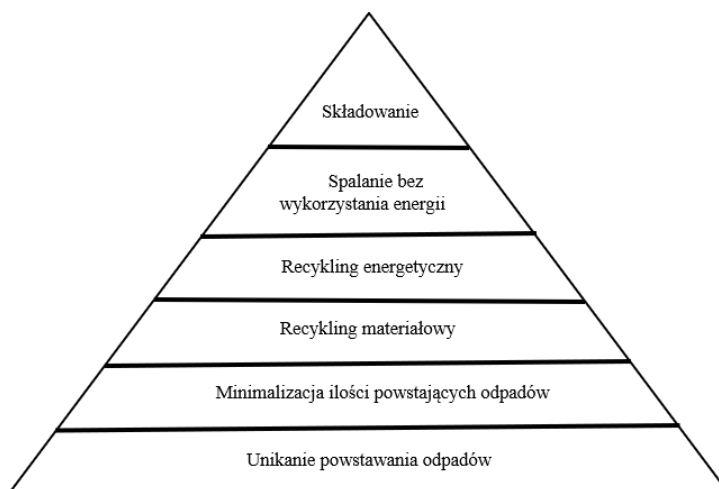
Regeneracja jest to proces mający za zadanie przywrócenie stanu początkowego lub oczekiwanego obiektu technicznego. Czynnościami podejmowanymi podczas regeneracji są przede wszystkim naprawa lub odnowa realizowana z powodu awarii, uszkodzenia lub innej przyczyny powodującej stan niezdatności maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej [230, 257, 263].

Wycofanie z eksploatacji obiektów technicznych, po stwierdzeniu, że nie realizują już oczekiwanego zadania, powinno się odbywać zgodnie z procedurą opracowaną podczas konstyтуowania. W trakcie zagospodarowania użytkowego maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej powinno dążyć się do jak największego poziomu recyklingu ich tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych.

2.1.6. Zagospodarowanie użytkowe

Ostatnim etapem cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej jest zagospodarowanie użytkowe. Jest to etap, w którym jakość obiektu nie pozwala na kontynuowanie jego eksploataowania lub dalsze jego użytkowanie jest nieopłacalne, czyli następuje fizyczne, ekonomiczne, socjologiczne lub ergonomiczne zużycie. Charakterystycznymi czynnościami dla tego etapu jest demontaż i selekcja [53, 166].

Do niedawna zagospodarowanie poużytkowe nie było traktowane jako odrębny etap cyklu istnienia. Zauważono jednak szereg zagrożeń i uciążliwości spowodowanych nie tylko niemożliwością dalszej eksploatacji niezdatnych maszyn lub urządzeń energetyki odnawialnej, ale również problemów związanych z ich składowaniem. Zaczęto się zastanawiać w jaki sposób ponownie wykorzystać tworzywa, materiały, elementy i zespoły robocze składające się na obiekty techniczne oraz z jakich tworzyw, materiałów i elementów je budować, aby ich wpływ na otoczenie podczas zagospodarowania poużytkowego był jak najmniejszy. Pojawiły się również ogólne normy prawne regulujące politykę odpadami wraz z zalecaną hierarchią postępowania z nimi, którą zobrazowano na rysunku 2.9 [17, 200].



Rys. 2.9. Hierarchia postępowania z odpadami. Opracowanie własne na podstawie [200]

Zaprezentowana hierarchia ma za główny cel wykorzystanie surowców naturalnych w możliwie najefektywniejszy sposób, tyle razy ile jest to dopuszczalne, przy jednoczesnym minimalizowaniu ich negatywnego wpływu na otoczenie. Założenia przedstawione w ramach piramidy postępowania obejmują przede wszystkim zapobieganie i ograniczenie powstawania odpadów, czyli wykorzystanie w większym stopniu surowców, a jeżeli nie jest możliwym całkowite wykluczenie powstania odpadów, zaleca się aby poddawać je recyklingowi poprzez ponowne użycie lub odzysk. Z hierarchii postępowania wynika obowiązek polegający na tym, że należy najpierw spróbować zastosować recykling, przed przystąpieniem do odzysku energii, za wyjątkiem przypadków, w których odzysk energii przynosi większe korzyści dla środowiska [115, 130, 168].

Można wyróżnić dwie formy recyklingu – produktowy i materiałowy. Recykling produktowy jest formą bezpośredniego, ponownego wykorzystania części maszyn lub urządzeń, będących w dobrym stanie technicznym, czyli w stanie zdatności. Jest to najbardziej opłacalna forma zagospodarowania

poużytkowego. Recykling materiałowy (surowcowy), polega na przetworzeniu konkretnego elementu na surowiec, ponieważ nie może on być bezpośrednio wykorzystany podczas recyklingu produktowego. Recykling materiałowy jest najtrudniejszą formą recyklingu pod względem technicznym, ekonomicznym i organizacyjnym [115, 129, 162, 168].

Jeżeli dane tworzywo, materiał, element lub zespół roboczy trudno jest ponownie wykorzystać, powinno się dążyć do odzyskania energii w nim zawartą poprzez zastosowanie procesów odzysku energetycznego, który definiuje się jako proces odzysku energii zawartej w odpadach. Jeżeli nie ma takiej możliwości odpad można składować. Z tego powodu, już podczas procesu projektowania należy wziąć pod uwagę kwestie związane z możliwościami zagospodarowania poużytkowego danego obiektu technicznego energetyki odnawialnej, po utracie jego zdolności. Stanowi to jedno z głównych założeń cyklu istnienia obiektu technicznego w obiegu (możliwie) zamkniętym [115, 130, 168].

2.1.7. Podstawowe założenia cyklu istnienia w obiegu (możliwie) zamkniętym

W związku z faktem ograniczoności zasobów naturalnych, potrzebne są działania oraz opracowanie metod mających na celu ponowne wykorzystanie materii, energii i informacji poprzez odzysk lub recykling, czyli mające za zadanie (możliwe) zamknięcie obiegu cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Działania te są zgodne z polityką europejską, która zmierza w kierunku zrównoważonego rozwoju. Rozwoju, który jest możliwy do osiągnięcia dzięki działaniom polegającym na jak największym „domykaniu” cykli istnienia obiektów technicznych. Prawo zachowania materii zakłada, że możliwym jest kontrolowanie jej nieodwracalnego rozproszenia. Dlatego prowadzone są liczne działania mające, w jak największym stopniu odzyskać materiał, energię i informacje na poszczególnych etapach cyklu istnienia [100, 129, 201].

W każdym etapie cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej można wykorzystać różne techniki i narzędzia pozwalające na ograniczenie negatywnego wpływu na otoczenie. Zapobieganie powstawaniu odpadów nie jest proste, wymaga zaangażowania oraz kooperacji wielu grup, przede wszystkim rządzących, producentów i konsumentów, jak również wsparcia odpowiednimi regulacjami prawnymi. Współpraca tych trzech filarów może doprowadzić do zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów pierwotnych (przede wszystkim nieodnawialnych), zmniejszenia masy powstających odpadów oraz odejścia od ich składowania na rzecz recyklingu. Przedłużanie czasu użytkowania obiektów technicznych poprzez naprawy, wymiany części oraz powrót do obiegu odpadów jako wysokiej jakości surowców wtórnych, to działania mające na celu zmniejszenie popytu przedsiębiorstw na surowce pierwotne, co z kolei powoduje np. oszczędności finansowe dla firm. Kolejnym ważnym założeniem obiegu (możliwie) zamkniętego jest zmniejszenie

w stanie środowiska naturalnego. Model ten, określany jako „otwarty”, w niewielkim stopniu przyczynia się do efektywnego wykorzystania powstających odpadów i zasobów użytkowych, jednocześnie zwiększając emisję zanieczyszczeń. Przyszłe działania na rzecz zwiększenia szeroko rozumianej efektywności obiektów technicznych energetyki odnawialnej powinny skupić się zatem na radykalnej zmianie modelu gospodarowania – transformacji w kierunku modelu (możliwie) zamkniętego, czyli charakteryzującego się jak najbardziej zbliżonym do zamkniętego obiegiem energii i materii. Taka zmiana pozwoli na lepsze wykorzystanie zasobów surowcowych przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na otoczenie [76, 154, 155].

System „otwarty” polega na pozyskiwaniu surowców naturalnych z otoczenia i przekształcaniu ich w określone obiekty techniczne, które po zakończeniu użytkowania w całości stają się odpadami deponowanymi w otoczeniu. Natomiast (możliwie) zamknięty system gospodarowania naśladuje naturalne ekosystemy, ponieważ odpady powstające we wszystkich procesach oraz obiekty, które nie nadają się do dalszej eksploatacji, są w maksymalnym stopniu odzyskiwane, a następnie wracają do punktu wejścia do systemu. Na składowiskach umieszcza się jedynie te odpady, których nie można ponownie wykorzystać. Cykl istnienia obiektów technologii energetyki odnawialnej oparty na systemie (możliwie) zamkniętym będzie wymagał znacznie mniejszej ilości energii i zasobów pozyskiwanych z otoczenia niż system „otwarty” [76, 154, 155].

Funkcjonowanie naturalnych ekosystemów opiera się na długotrwałych cyklach przekształceń, których efektem jest tworzenie ograniczonej ilości odpadów trudnoprzerabialnych, a jedynym zewnętrznym źródłem energii jest promieniowanie słoneczne. Nieznaczna obecność trudnoprzerabialnych odpadów skutkuje bardzo powolnymi zmianami w środowisku, które nie naruszają jego równowagi ani nie szkodzą ekosystemom, które same również ulegają transformacjom. Naśladowanie zasad funkcjonowania ekosystemów naturalnych skutkuje ograniczaniem zużycia surowców oraz redukcją emisji szkodliwych substancji w cyklach istnienia obiektów technicznych [76, 154, 155].

Sterowanie cyklem istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej powinno zmierzać do upodobnienia jego funkcjonowania do funkcjonowania naturalnych ekosystemów poprzez zwiększenie samowystarczalności. Kluczową rolę odgrywa tutaj bardziej efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych. Dotychczasowe modele cyklu istnienia, zakładające generowanie zanieczyszczeń i odpadów oraz ich składowanie, powinny być zastąpione strategiami eliminującymi ich powstawanie. Realizacja systemu o wysokim poziomie samowystarczalności może być osiągnięta przez stopniowe implementowanie zintegrowanego modelu, w którym jak największa liczba procesów będzie przekształcała masę krążącej materii z jednej formy w drugą, przy minimalnym jej ubytku i jak najmniejszym zużyciu energii. Tego rodzaju system optymalizowałby wykorzystanie surowców naturalnych, jednocześnie ograniczając ilość produkowanych odpadów oraz negatywne skutki

środowiskowe. Takie podejście wpisuje się w zasady zrównoważonego rozwoju, charakteryzującego się racjonalnymi, zoptymalizowanymi relacjami pomiędzy obiektem technicznym energetyki odnawialnej a jego otoczeniem [55, 154, 220].

2.1.8. Sterowanie cyklem istnienia obiektu technicznego

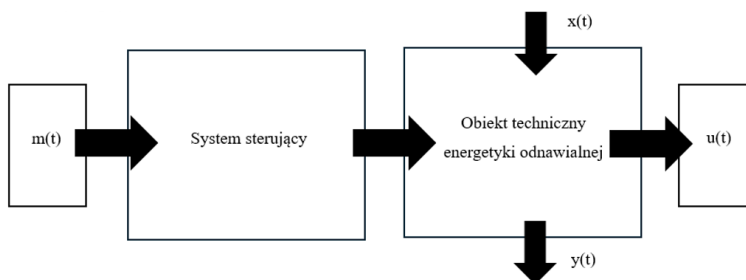
Kształtowanie obiektów technicznych energetyki odnawialnej wiąże się z ich projektowaniem przy jednoczesnym uwzględnieniu procesów sterowania wytwarzaniem, eksploatacją i zagospodarowaniem poużytkowym. Proces sterowania można zdefiniować jako sekwencje działań oraz stanów obiektu technicznego, tworzące łańcuch zdarzeń w nim zachodzących dla przedziału czasowego $[t_{pOZE}, t_{pOZE} + T]$, gdzie $p = 0, 1, 2, 3, \dots$. W następujących po sobie momentach czasowych koniecznym jest wybranie lub wdrażanie takiego wektora sterującego, aby pomimo zakłóceń obiekt techniczny wykonał zadanie określone w przedziale czasowym $[t_{pOZE}, t_{pOZE} + T]$, przy osiągnięciu w tym przedziale maksymalnej wartości zysku $Q_{OZE}(t_{pOZE}, t_{pOZE} + T)$, który jest rozumiany jako jakość realizacji zadań przez obiekt techniczny energetyki odnawialnej, z uwzględnieniem ograniczeń (zewnętrznych i wewnętrznych) oraz warunków bezpieczeństwa i specyfiki środowiska. W związku z tym celem sterowania jest zapewnienie maksymalnie efektywnych warunków pracy maszyn, urządzeń oraz systemów OZE, przy jednoczesnym ograniczeniu nakładów do minimum. W kontekście definiowania problemu sterowania obiektem technicznym energetyki odnawialnej, konieczne jest określenie długości przedziału czasu T dla pełnego cyklu jego istnienia. Niemniej jednak, precyzyjne ustalenie wartości T nie jest ani wykonalne, ani zasadne, ponieważ powinna być ona równa wartości granicznej, przy której wartość zysku wyrażona poprzez wskaźnik Q_{OZE} , spowodowana zmianami parametrów sterowania, jest zbliżona do zakresu błędów w jej oszacowaniu. Jednocześnie, długość czasu T objętego procesem sterowania nie może być krótszy od wartości minimalnej T_{min} . Zbyt krótki okres uniemożliwiłby rzetelną ocenę jakości przeprowadzonego sterowania obiektem technicznym. Wartość T_{min} jest zatem zależna od charakterystycznych stałych czasowych procesów sterowania na poszczególnych etapach cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej [108, 135, 171, 185, 219].

Zwiększenie efektywności obiektów technicznych w całym cyklu ich istnienia związane jest z wykorzystaniem w procesie sterowania modeli decyzyjnych przygotowanych na podstawie modeli uwzględniających procesy zachodzące podczas wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania poużytkowego. Należy jednak dokonać wyraźnego rozróżnienia między opisem idealnego obiektu sterowania, który precyzyjnie odwzorowuje wszystkie matematyczne relacje zjawisk zachodzących w obiekcie sterowanym, a matematycznym modelem obiektu sterowania energetyki odnawialnej, który w mniejszym lub większym stopniu odzwierciedla te idealne właściwości. W związku z tym, możliwe staje się tworzenie wielu modeli matematycznych, które w różnym stopniu odpowiadają rzeczywistemu opisowi obiektu technicznego. Wyższy poziom zgodności modelu z rzeczywistością wiąże się

z większymi kosztami oraz trudnościami w jego realizacji. Stopień zgodności z opisem idealnym jest zazwyczaj określany przy użyciu miar błędów modelu. Budowa modelu matematycznego opiera się na odpowiednim doborze wielkości wejściowych i wyjściowych, a także na decyzji dotyczącej rodzaju modelu i poziomu szczegółowości relacji między jego elementami [108, 135, 171, 184, 185, 219, 221, 235].

W celu zapewnienia wysokiej efektywności działania należy zidentyfikować poszczególne procesy zachodzące w obiekcie technicznym energetyki odnawialnej w całym jego cyklu istnienia oraz dokonać ich analizy i oceny. Opracowane modele matematyczne oraz symulacyjne mogą stanowić podstawę do zbudowania decyzyjnego modelu sterowania efektywnością istnienia złożonych obiektów technicznych. Odpowiedni dobór metody optymalizacji jest procesem trudnym, który powinien opierać się na rzetelnym zidentyfikowaniu badanego obiektu energetyki odnawialnej wraz z procesami w nim zachodzącymi oraz na selekcji i opisie zmiennych decyzyjnych w danym procesie optymalizacyjnym. Opracowanie matematycznego modelu sterowania cyklem istnienia obiektu technicznego stanowi podstawę do oceny oraz rzeczywistego sterowania całym jego cyklem istnienia. Jednak zastosowanie metod analitycznych do rozwiązania problemów sterowania jest często niemożliwe lub nieopłacalne, dlatego zazwyczaj wykorzystuje się do tego celu metody i techniki symulacyjne. Umożliwiają one testowanie i ocenę obiektów technicznych energetyki odnawialnej w warunkach symulacji poszczególnych etapów cyklu istnienia. W celu budowy systemu symulacyjnego cyklu istnienia należy wyznaczyć zmienne, na podstawie których istnieje możliwość zbudowania modelu symulacyjnego [108, 135, 169, 171, 184, 185, 219].

Model sterowania obiektem technicznym energetyki odnawialnej przedstawia rysunek 2.11. Po przetworzeniu sygnału wejściowego, przy jednoczesnym uwzględnieniu sygnałów zakłócających, które mogą wpływać na sygnał sterujący $m(t)$, otrzymuje się sygnał wyjściowy $y(t)$, który może być opisany z wykorzystaniem wektora wyjściowego n -wymiarowego [108, 135, 171, 184, 185, 219].



Rys. 2.11. Schemat procesu sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej: $m(t)$ – wielkości wejściowe systemu sterowania, $x(t)$ – wielkości wejściowe obiektu technicznego energetyki odnawialnej, $y(t)$ – zbiór wielkości wyjściowych obiektu technicznego energetyki odnawialnej, $u(t)$ – zbiór wielkości wyjściowych systemu sterowania. Opracowanie własne na podstawie [185]

W skład wektora sterującego wchodzi wielkości sterujące wybierane na podstawie wielkości kształtujących poszczególne etapy cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Wielkości te powinny być regulowane oraz posiadać istotny wpływ na zadania wykonywane przez obiekt techniczny. Każda stała sterująca jest istotna w danym przedziale czasowym ważności sterowania $[t_{d1}, t_{d2}]$ o długości Δt_d . Natomiast decyzje sterowania (nazywane strategią sterowania) powinny być podjęte z określonym wyprzedzeniem Δt_w [108, 135, 171, 184, 185, 219].

Sygnał wyjściowy sterujący obiektem technicznym energetyki odnawialnej y_{OZE} uwzględnia charakterystyki przetwarzania sygnału, które mogą mieć charakter liniowy lub nieliniowy w całym cyklu sterowania:

$$y_{OZE} = \{y_1; y_2; \dots; y_n\} \quad (2.14)$$

Każdy obiekt techniczny jest zaopatrywany w informacje, materiały i energię w całym cyklu istnienia. Sygnały wejściowe $x(t)$, jak i sygnały wyjściowe uwzględniają charakterystykę przetwarzania systemu sterowania. System sterowania w cyklu istnienia obiektu wypracowuje sygnały sterujące na podstawie sygnału $m(t)$ i sygnału wyjściowego procesu zaopatrywania $u(t)$. Każdy ze składowych wektorów $m(t)$ i $y(t)$ jest funkcją czasu t , emisji Ω , odpadów μ , parametrów niezbędnych w danym etapie cyklu istnienia $\bar{e}$ i zakłóceń z , zatem:

$$z_i = z_i\{t, \Omega, \mu, \bar{e}, z\}, \quad (2.15)$$

$$y_i = y\{t, \Omega, \mu, \bar{e}, z\}, \quad (2.16)$$

przy czym $i = 1, 2, 3, \dots, n$ [135, 185].

Charakterystyki opisujące właściwości obiektu technicznego energetyki odnawialnej determinują zależności pomiędzy kluczowymi zmiennymi, takimi jak wielkości sterujące, czynniki zakłócające, zysk, zadania oraz ograniczenia. Zależności te występują zarówno w kontekście wielkości wejściowych oraz wyjściowych, jak i w odniesieniu do ograniczeń pojawiających się na poszczególnych etapach cyklu istnienia obiektu. Ponadto, relacje wejściowo-wyjściowe obejmujące cały cykl istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej, pozostają także w interakcji z otoczeniem, uwzględniając ograniczenia wynikające z wymagań eksploatacyjnych, ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa i zdrowia ludzkiego [135, 185].

Jeżeli przyjmie się, że wektory $u_1, u_2, \dots, u_N, u_{N+1}$ tworzą ciąg stanów procesów zachodzących w obiekcie technicznym energetyki odnawialnej, a wektory $m_1, m_2, \dots, m_N$ stanowią ciąg decyzji nazywanych ciągiem sterowań, to wektory u_k można również nazwać wektorami stanu, ciąg $\{u_k\}$ – trajektorią procesu, a ciąg decyzji $m_1, m_2, \dots, m_N$ – strategią. Z kolei jeśli pewna funkcja f początkowemu stanowi u_k i decyzji m_k przyporządkowuje stan kolejny u_{k+1} :

$$u_{(N+1)} = f(u_k, m_k) \quad (2.17)$$

to poprzez przejście ze stanu u_k do u_{k+1} w wyniku decyzji m_k pojawia się pewna wielkość q , która jest zyskiem lub etapową funkcją celu dla obiektu energetyki odnawialnej:

$$q_k = q(u_k, m_k) \quad (2.18)$$

W związku z tym, dla N-etapowego procesu decyzyjnego obiektu energetyki odnawialnej, należy wyznaczyć taką strategię $m_1, m_2, \dots, m_N$, dla której całkowity zysk lub wskaźnik jakości, określony wzorem:

$$Q_N = \sum_{k=1}^N q(u_k, m_k) \quad (2.19)$$

osiągnie maksimum, czyli:

$$Q_N^0 = \max_{m_1, m_2, \dots, m_N} \in \Omega_N \left\{ \sum_{k=1}^N q(u_k, m_k) \right\} \quad (2.20)$$

przy czym Ω_N jest zbiorem dopuszczalnych decyzji dla obiektu technicznego energetyki odnawialnej [108, 135, 171, 184, 219].

Ciąg decyzji $m_1^0, m_2^0, \dots, m_N^0$ dla których funkcja wskaźnika jakości Q_N przyjmuje maksimum, nazywa się ciągiem optymalnym lub strategią optymalną dla obiektu energetyki odnawialnej, natomiast ciąg stanów $u_1^0, u_2^0, \dots, u_N^0, u_{N+1}^0$ które odpowiadają optymalnej strategii – optymalną trajektorią procesu [108, 135, 171, 184, 219].

Biorąc pod uwagę zasadę optymalności, która mówi, że stan początkowy i decyzja początkowa warunkuje pozostałe decyzje, muszą one tworzyć strategię optymalną z punktu widzenia stanu wynikającego z pierwszej decyzji. Maksymalną wartość zysku dla procesu N-etapowego energetyki odnawialnej można zatem zapisać jako [108, 135, 171, 184, 219]:

$$Q_N^0 = \max_{m_1} \left\{ q(u_1, m_1) + \max_{m_{N-1}} [f(u_1, m_1)] \right\} = \max_{m_1} \left\{ q(u_1, m_1) + f_{N-1}(u_1) \right\} \quad (2.21)$$

Znając funkcję $f_{k-1}(x_1)$, która wyraża maksymalny zysk dla Q_{N-1}^0 w procesie N-1 etapowym dla obiektów energetyki odnawialnej, otrzymuje się:

$$m_1^0 = \varphi_N(x_1) \quad (2.22)$$

W związku z powyższym, maksymalny zysk dla procesu N-etapowego obiektu energetyki odnawialnej przyjmuje wartość:

$$Q_N^0 = q(u_1^0, m_1^0) + f_{N-1}[f(u_1^0, m_1^0)] = f_N(x_1) \quad (2.23)$$

Wykorzystując wzory (2.17) dla $k = 1, 2, \dots, N$ oraz (2.22) można wyznaczyć optymalną trajektorię $\{u_k^0\}$ badanego procesu oraz optymalną strategię $\{m_k^0\}$. Rozpoczynając od punktu u_1 , otrzymuje się [118, 135, 171, 184]:

$$\left. \begin{array}{l} u_1 \quad m_1^0 = \varphi_N(u_1) \\ u_2^0 = f(u_1^0, m_1^0) \quad m_2^0 = \varphi_{N-1}(u_2^0) \\ u_3^0 = f(u_2^0, m_2^0) \quad m_3^0 = \varphi_{N-2}(u_3^0) \\ \vdots \\ u_N^0 = f(u_{N-1}^0, m_{N-1}^0) \quad m_N^0 = \varphi_{N-2}(u_N^0) \\ u_{N+1}^0 = f(u_N^0, m_N^0) \end{array} \right\} \quad (2.24)$$

Sterowanie cyklem istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej jest realizowane w oparciu o informacje pozyskiwane zarówno na etapie projektowania, jak i podczas fizycznej eksploatacji obiektu. Dane te obejmują między innymi masę oraz energię wprowadzane do systemu, jak również emisje i odpady, które go opuszczają. W układzie sterowania często występuje opóźnienie reakcji w łańcuchu działania człowiek-maszyna. Wobec tego, wraz z rozwojem w dziedzinie technologii elektronicznych, systemy sterowania są wzbogacane o rozwiązania umożliwiające bardziej precyzyjne monitorowanie i sterowanie parametrami obiektów technicznych energetyki odnawialnej [118, 135, 174-184].

2.2. IDENTYFIKACJA JAKOŚCI ORAZ EFEKTYWNOŚĆ MASZYN I URZĄDZEŃ ENERGETYKI ODNAWIALNEJ

2.2.1. Wstęp

Właściwości eksploatacyjne maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej są realizowane w różnych fazach ich cykli istnienia. Ocena oraz kształtowanie jakości obiektów technicznych wiąże się z koniecznością utrzymywania ich cech użytkowych na odpowiednim poziomie w ustalonych warunkach eksploatacyjnych. Cechy te powinny być zadane na samym początku wartościowania, a następnie uszczegółowione podczas projektowania i konstruowania. Na etapie wytwarzania oraz eksploatacji, dzięki zastosowaniu metod diagnostyki technicznej, są one poddawane weryfikacji przydatności i skuteczności [117, 119].

Działania, które wykonuje maszyna lub urządzenie energetyki odnawialnej na poszczególnych etapach cyklu istnienia, celem zrealizowania zbioru zadań do jakich została zaprojektowana, nazywane są procesem realizacji obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Do ich oceny używa się terminu jakości (Q_{OZE}), który charakteryzuje stopień spełnienia oczekiwanych wymagań względem obiektu. Na jakość maszyny, urządzenia energetyki odnawialnej, składa się zbiór charakterystyk składowych, opisanych poniższym równaniem:

$$Q_{OZE} = \{Q_{OZE}; a = \overline{1, A}\} \quad (2.25)$$

gdzie:

$Q_{OZE} = \{Q_{OZE}; a = \overline{1, A}\}$ – zbiór charakterystyk składowych systemu energetyki odnawialnej, wspólnie definiujących jakość [191, 236].

Są to charakterystyki ogólne, które należy wyodrębnić po to, aby określić właściwości obiektu technicznego energetyki odnawialnej względem oczekiwań, zgodnie z którymi został zaprojektowany. By móc to uczynić należy zidentyfikować relacje między obiektem technicznym a otoczeniem, ponieważ zwykle obiekty tego rodzaju posiadają charakter systemów otwartych i nie należy pomijać wymiany materii, informacji oraz energii zachodzącej pomiędzy otoczeniem a obiektem. Relacje między nimi mogą być konstruktywne lub destruktywne. Z tego względu można wyróżnić poniższe charakterystyki ogólne jakości obiektu technicznego energetyki odnawialnej:

- a) efektywność, która opisuje obiekt techniczny pod względem wydajności;
- b) funkcjonalność, opisującą poziom realizowanych funkcji dla danego obiektu;
- c) zdatność, będącą zdolnością obiektu do pełnienia funkcji wynikających z przeznaczenia w danym czasie;
- d) destrukcyjność, która stanowi miarę wyrażającą poziom szkodliwego oddziaływania obiektu technicznego na elementy otoczenia;
- e) użyteczność, wyrażającą poziom konstruktywnego oddziaływania obiektu na elementy otoczenia [247, 257].

W diagnostyce powyższe wskaźniki powinny kształtować skuteczne narzędzie do wartościowania charakterystycznych miar pozwalających na kompleksową ocenę obiektów technicznych energetyki odnawialnej, porównywanie skuteczności działań oraz podejmowanie czynności udoskonalających (w oparciu o wyniki przeprowadzonych analiz) [50, 167].

Zbudowanie modelu wyrażającego jakość maszyny lub urządzenia nie jest proste. Koncepcja tworzenia miar obiektu technicznego energetyki odnawialnej (OT_{OZE}) polega przede wszystkim na zidentyfikowaniu obiektu, jego elementów i relacji zachodzącymi między wyszczególnionymi elementami:

$$OT_{OZE} = \langle X, R \rangle \quad (2.26)$$

gdzie:

$X = \{X_k; k = \overline{1, K}\}$ – zbiór zmiennych opisujących obiekt techniczny energetyki odnawialnej,

$R = \{R_b; b = \overline{1, B}\}$ – zbiór relacji pomiędzy elementami obiektu technicznego (relacji istotnych) [53, 191].

Obiekt techniczny energetyki odnawialnej OT_{OZE} przyjmuje jako miary charakterystyk zbiór relacji istotnych R_a^w , ze zbioru wszystkich relacji R jakie mogą wystąpić $R_a^D \subset R$ gdzie:

$$R_a^D = \{R_a^d; d = \overline{1, D}\} \quad (2.27)$$

przy czym za istotne uznaje się relacje między elementami obiektu:

$$\frac{R_a^d}{W^{kl}} = \frac{X_k}{X_l} \quad (2.28)$$

gdzie:

$k, l = 1, \dots, K$ [53, 191].

Wskaźnikiem charakterystyk obiektu technicznego energetyki odnawialnej nazywa się relacje W^{kl} . Po uporządkowaniu wyodrębnionych wskaźników według ich indeksów otrzymuje się macierz obiektu energetyki odnawialnej [53, 191 262]:

$$W = [W_{OZE}^{kl}]_{K \times K} = \begin{bmatrix} W_{OZE}^{11} & W_{OZE}^{12} & \dots & W_{OZE}^{1K} \\ W_{OZE}^{21} & W_{OZE}^{22} & \dots & W_{OZE}^{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{OZE}^{31} & W_{OZE}^{32} & \dots & W_{OZE}^{3K} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Między wyznaczonymi wskaźnikami obiektu technicznego energetyki odnawialnej można wyróżnić następujące relacje:

$$1) \quad k = \overline{1 \in (1, K)} \quad W^{kl} = 1 \quad (2.30)$$

$$2) \quad W^{kc} \cdot W^{cl} = W^{kl} \quad (2.31)$$

gdzie:

gdzie: $c = 1, \dots, K$.

$$3) \quad k \neq 1 \in \overline{(1, K)} \quad W^{kl} = (W^{kl})^{-1} \quad (2.32)$$

2.2.2. Efektywność

Efektywność obiektów technicznych energetyki odnawialnej wyraża się jako stosunek uzyskanego efektu w wyniku działania maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej $A_{OZE}(t)$ do nakładów $I_{OZE}(t)$ poniesionych na uzyskanie pożądanego efektu w czasie t . Pojęcie to można zapisać w postać równania:

$$E_{OZE}(t) = \frac{A_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t)} \quad (2.33)$$

gdzie:

$E_{OZE}(t)$ – efektywność obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$A_{OZE}(t)$ – uzyskany efekt w wyniku działania obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$I_{OZE}(t)$ – nakłady poniesione celem uzyskania pożądanego efektu [16, 53].

Podczas racjonalnego gospodarowania, osiągnięcie maksymalnego poziomu realizacji celu może odbyć się na dwa sposoby:

- a) zgodnie z zasadą maksymalnego efektu (największej wydajności) – przy odpowiednim nakładzie środków I_{OZE} otrzymuje się maksymalny stopień realizacji ustalonego celu A_{OZE} :

$$E_{OZE}(t) = \frac{A_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t)} \quad (2.34)$$

$$I_{OZE}(t) = \text{const} \quad (2.35)$$

$$A_{OZE}(t) \rightarrow \max \quad (2.36)$$

- b) zgodnie z zasadą najmniejszego nakładu (oszczędności środków) – aby uzyskać ustalony poziom realizacji celu $A_{OZE}(t)$ należy użyć minimalnego nakładu środków $I_{OZE}(t)$:

$$E_{OZE}(t) = \frac{A_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t)} \quad (2.37)$$

$$I_{OZE}(t) \rightarrow \min \quad (2.38)$$

$$A_{OZE}(t) = \text{const} \quad (2.39)$$

Funkcje $I_{OZE}(t)$ i $A_{OZE}(t)$ w każdym z elementarnych przedziałów czasu można przedstawić za pomocą pochodnej funkcji do czasu:

$$i_{OZE}(t) = \frac{dI_{OZE}(t)}{dt} \quad (2.40)$$

$$a_{OZE}(t) = \frac{dA_{OZE}(t)}{dt} \quad (2.41)$$

W zależności od tego czy funkcje $I_{OZE}(t)$ i $A_{OZE}(t)$ są ciągłe czy dyskretne, można je wyznaczyć z zależności:

$$I_{OZE}(\tau) = \int_0^{\tau} i_{OZE}(t) dt \quad (2.42)$$

$$I_{OZE}(\tau) = \sum_i^{\tau} i_{OZE} \cdot \Delta t \quad (2.43)$$

$$A_{OZE}(\tau) = \int_0^{\tau} a_{OZE}(t) dt \quad (2.44)$$

$$A_{OZE}(t) = \sum_i^{\tau} a_{OZE} \cdot \Delta t \quad (2.45)$$

W czasie działania maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej ważny jest efekt użyteczny, rozumiany jako skutek działania, który ma przydatność użytkową i którego uzyskanie stanowiło kluczowy cel [53, 101, 216].

Zakładając, że rozpatrywany przedział czasu działania obiektów technicznych jest nieskończenie mały i dąży do zera ($\Delta t \rightarrow 0$), to stosunek zmiany efektów $A_{OZE}(t)$ do przyrostów nakładów $I_{OZE}(t)$, gdy $\Delta t \rightarrow 0$, nazywa się efektywnością chwilową obiektu technicznego energetyki odnawialnej:

$$E_{OZE}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{A_{OZE}(t + \Delta t) - A_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t + \Delta t) - I_{OZE}(t)} \quad (2.46)$$

Zakładając, że efekty oraz nakłady zależą od X zmiennych niezależnych, to nakłady i efekty całkowite stanowią sumę nakładów oraz efektów bezpośrednich i pośrednich, które można zapisać za pomocą poniższych równań:

$$A_{OZEj} = A_{OZEjP}(y_i) + A_{OZEjB}(y_i) \quad (2.47)$$

$$I_{OZEj} = I_{OZEjP}(y_i) + I_{OZEjB}(y_i) \quad (2.48)$$

Ze względu na j -ty czynnik, efektywność chwilowa całkowita E_{OZEc} równa się:

$$E_{OZEc} = E_{OZEc}(y_i) = \frac{\sum_i^X \frac{\delta a(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}}{\sum_i^X \frac{\delta i(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}} \quad (2.49)$$

Z kolei efektywność chwilowa pośrednia E_{OZEjP} wynosi:

$$E_{OZEjP} = E_{OZEjP}(y_i) = \frac{\sum_i^X \frac{\delta a_p(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}}{\sum_i^X \frac{\delta i_p(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}} \quad (2.50)$$

Natomiast efektywność chwilowa bezpośrednia E_{OZEjB} jest równa:

$$E_{OZEjB} = E_{OZEjB}(y_i) = \frac{\sum_i^X \frac{\delta a_b(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}}{\sum_i^X \frac{\delta i_b(y_j)}{\delta y_i} \cdot \frac{dy_i}{dt}} \quad (2.51)$$

Powyższe wyrażenia umożliwiają badanie wpływu poszczególnych zmiennych na efektywność całkowitą. Dzięki nim zachodzi również możliwość oceny w jakim stopniu oddziałują one na efektywność bezpośrednią [191, 262].

Jeżeli założyć się, że przedział $\Delta t = T > 0$, to równanie (2.46) przyjmie postać:

$$E_{OZE}(t) = \frac{A_{OZE}(t+T) - A_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t+T) - I_{OZE}(t)} = \frac{\Delta A_{OZE}}{\Delta I_{OZE}} = \frac{A_{OZE}(T)}{I_{OZE}(T)} \quad (2.52)$$

Stosunek osiągniętych efektów do nakładów w skończonym przedziale czasu T nazywa się efektywnością średnią. Analogicznie, całkowita efektywność średnia jest sumą efektywności średniej pośredniej i bezpośredniej, przy czym zależą one od X zmiennych niezależnych:

$$E_{OZEc}^s = E_{OZEc}^s(y_i) = \frac{\sum_i^X \Delta A_{OZEi}(y_i)}{\sum_i^X \Delta I_{OZEi}(y_i)} \quad (2.53)$$

$$E_{OZEp}^s = E_{OZEp}^s(y_i) = \frac{\sum_i^X \Delta A_{OZEpi}(y_i)}{\sum_i^X \Delta I_{OZEpi}(y_i)} \quad (2.54)$$

$$E_{OZEb}^s = E_{OZEb}^s(y_i) = \frac{\sum_i^X \Delta A_{OZebi}(y_i)}{\sum_i^X \Delta I_{OZebi}(y_i)} \quad (2.55)$$

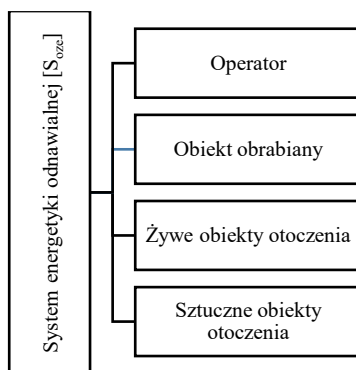
2.2.3. Destrukcyjność

Współczesne podejście do projektowania obiektów technicznych, w tym także energetyki odnawialnej, wymaga szczególnej dbałości o minimalizację ich wpływu na otoczenie. Realizacja tego celu zależy w głównej mierze od poziomu ich destrukcyjnego oddziaływania. Stopień szkodliwego wpływu maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej na otoczenie jest wyrażany za pomocą charakterystyki destrukcyjności, która odzwierciedla całokształt oddziaływania obiektu technicznego na jego otoczenie. Wpływ obiektów tego typu może przebiegać na różne sposoby i za pośrednictwem odmiennych czynników materialnych, energetycznych czy informacyjnych. Stopień destrukcyjnego oddziaływania zależy od poziomu emisji wymienionych czynników oraz od tego, jak wrażliwe są poszczególne elementy otoczenia na ich działanie. W związku z tym destrukcyjność obiektu technicznego należy definiować jako zbiór

charakterystyk wyrażających szkodliwe interakcje między maszyną lub urządzeniem energetyki odnawialnej a poszczególnymi elementami ich otoczenia [48, 177].

Aby ocenić destrukcyjność obiektu technicznego energetyki odnawialnej, koniecznym jest zidentyfikowanie jego elementów, które niosą potencjał destrukcyjny, uwzględniając wzajemne oddziaływania między tymi elementami a samym obiektem. Z tego względu można wyróżnić:

- a) operatorów czyli osoby, które obsługują obiekt energetyki odnawialnej;
- b) obiekt obrabiany, czyli część otoczenia obiektu, na którą bezpośrednio wpływa obiekt;
- c) żywe elementy otoczenia, czyli przyrodnicze elementy znajdujące się w otoczeniu obiektu;
- d) sztuczne elementy otoczenia, czyli infrastruktura techniczna obiektu energetyki odnawialnej oraz inne martwe elementy znajdujące się w jego otoczeniu (rys. 10) [18, 177].



Rys. 2.12. Relacje obiektu technicznego energetyki odnawialnej i elementów jego otoczenia. Opracowanie własne na podstawie [53]

Biorąc pod uwagę wymienione elementy otoczenia obiektu technicznego energetyki odnawialnej, można wyodrębnić odpowiadające im charakterystyki destrukcyjności: destrukcyjność ergonomiczną, destrukcyjność sozologiczną, destrukcyjność ekologiczną oraz destrukcyjność funkcjonalną [18, 48].

Destrukcyjność ergonomiczna wyraża stopień szkodliwego oddziaływania, jaki obiekt techniczny energetyki odnawialnej wywiera na operatora. Jej poziom zależy przede wszystkim od ilości i postaci emitowanej przez obiekt materii, energii i informacji w kierunku operatora. Z kolei destrukcyjność ekologiczna jest spowodowana nadmierną, szkodliwą emisją czynników materialnych lub energetycznych w kierunku organizmów żyjących w otoczeniu maszyn lub urządzeń energetyki odnawialnej. W konsekwencji ma miejsce zachwianie procesów biologicznych, które prowadzi do dewastacji środowiska. Jej wielkość zależy od ilości strumieni masy i energii uwalnianych w danej jednostce czasu na określoną powierzchnię, od podatności poszczególnych elementów ekosystemu oraz od zagęszczenia czynników szkodliwych. Destrukcyjność sozologiczna

oznacza natomiast stopień niepożądanego oddziaływania obiektu technicznego energetyki odnawialnej na sztuczne struktury techniczne, które znajdują się w jego otoczeniu. Ponadto maszyny i urządzenia energetyki odnawialnej mogą charakteryzować się jeszcze jedną formą destrukcyjności – defunkcyjnością. Odnosi się ona do stopnia uszkodzenia obrobionego materiału (np. gleby, wody, roślin czy produktów), a także strat powstałych na skutek funkcjonowania danego obiektu technicznego [215, 262].

Poziom destrukcyjności obiektu technicznego energetyki odnawialnej ocenia się na podstawie zagrożeń i skutków jakie powoduje poprzez emitowanie czynników destrukcyjnych, którymi są strumienie materii, energii i informacji. Aby ocenić stopień szkodliwego oddziaływania obiektu należy ustalić model jego działania, w którym uwzględnione zostaną wszystkie rodzaje wpływów. O destrukcyjności maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej decyduje strumień strat emitowany przez obiekt w jednostce czasu, dlatego destrukcyjność można zdefiniować jako stosunek strat obiektu technicznego energetyki odnawialnej do nakładów przez niego poniesionych:

$$D_{OZE}(t) = \frac{S_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t)} \quad (2.56)$$

gdzie:

D_{OZE} – destrukcyjność obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
 S_{OZE} – straty obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
 I_{OZE} – nakłady obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
 t – czas destrukcyjnej emisji [262].

Tworzenie wskaźnika destrukcyjności obiektu technicznego obejmuje przede wszystkim ustalenie zbioru zmiennych wpływających na jego oddziaływanie destrukcyjne:

$$X_{OZE} = \{X_{OZE}; k = \overline{1, K}\} \quad (2.57)$$

gdzie:

X_{OZE1} – straty obiektu technicznego energetyki odnawialnej S_{OZE} ,
 X_{OZE2} – czas t ,
 X_{OZE3} – charakterystyka obiektu technicznego energetyki odnawialnej G_{OZE} ,
 X_{OZE4} – nakłady obiektu technicznego energetyki odnawialnej I_{OZE} [110, 191].

Następnie należy ustalić dla każdej zmiennej X_{OZE_k} zbiór zmiennych $\{X_{OZE_{kn}}\}$ ją charakteryzujących:

$$X_{OZE_k} = \{X_{OZE_{kn}}; n = \overline{1, N}\} \quad (2.58)$$

Po ustaleniu ww. zmiennych koniecznym jest zdefiniowanie zmiennej $X_{OZE_{K,N+1}}$:

$$X_{OZE\ K,N+1} = \sum_1^N X_{OZEkn} \quad (2.59)$$

W kolejnym korku należy określić $K^2(N+1)^2$ ilorazów:

$$p_{nj}^{kl} = \frac{X_{OZEkn}}{X_{OZElj}} \quad (2.60)$$

gdzie:

$k, l = 1, \dots, K,$

$n, j = 1, \dots, (N+1)$ [167, 216, 262].

Potem należy uporządkować p_{nj}^{kl} wskaźników według indeksów k, l, n, j w macierzy:

$$p^{kl} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{OZE}^{kl} \\ C_{OZE}^{kl} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} B_{OZE}^{kl} \\ Z_{OZE}^{kl} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Gdzie:

Z_{OZE}^{kl} – wskaźnik ogólny,

H_{OZE}^{kl} – wskaźnik szczegółowy,

$B_{OZE}^{kl}, C_{OZE}^{kl}$ – wskaźnik główny,

p – macierz wskaźników destrukcyjnych [167, 216, 262].

Podczas tworzenia szczegółowych miar destrukcyjności ergonomicznej, ekologicznej, sozologicznej czy defunkcyjności obiektów technicznych energetyki odnawialnej należy wziąć pod uwagę wpływ takich destrukcyjnych czynników jak: emisje pyłów, spalin, toksyn, środków chemicznych, natężenie drgań, hałasu, emisje ciepła, światła, ciśnienia, nacisk, zgniot czy wibracje [216].

2.2.4. Zdatność

Zdatność to miara, która wyraża zdolność, niezawodność obiektu technicznego energetyki odnawialnej do pełnienia w określonym czasie funkcji do jakich został zaprojektowany. Zdatność umożliwia poprawne użytkowanie maszyny czy urządzenia energetyki odnawialnej. Składa się na nią zbiór charakterystyk niezdatniałości i uzdatniałości, które ujawniają konstruktywne i destruktywne relacje między otoczeniem a obiektem technicznym [149, 228].

Dany obiekt techniczny energetyki odnawialnej może znajdować się w jednym z trzech podstawowych stanów: pełnej zdatności, częściowej zdatności (sytuacja, w której możliwe jest dalsze użytkowanie, jednak jego pewne parametry odbiegają od oczekiwań użytkownika) oraz niezdatności (stan uniemożliwiający realizację funkcji i zadań przewidzianych na etapie projektowania) [26, 101].

Na bieżący stan obiektu technicznego energetyki odnawialnej mają wpływ różnorodne czynniki, obejmujące uwarunkowania konstrukcyjne, charakterystyki procesu produkcyjnego oraz (w trakcie eksploatacji) czynniki zewnętrzne. Do najważniejszych zewnętrznych determinacji zaliczyć można wymuszenia robocze, oddziaływania antropotechniczne oraz zmienne warunki meteorologiczne. W wielu przypadkach wartości tych czynników mają charakter losowy, co sprawia, że dwa obiekty tego samego typu, które znajdują się na podobnym etapie użytkowania i przepracowały porównywalny czas, mogą wykazywać odmienny stan techniczny. Stan obiektu technicznego energetyki odnawialnej można wyrazić za pomocą równania:

$$\frac{dw_{OZE}}{dt} = f[w_{OZE}(t_0), B(t)_{OZE}, C(t)_{OZE}, F(t)_{OZE}, t] \quad (2.62)$$

Rozwiązując powyższe równanie otrzymuje się:

$$W(t)_{OZE} = g[t_0, w_{OZE}(t_0), B(t)_{OZE}, C(t)_{OZE}, F(t)_{OZE}, t] \quad (2.63)$$

gdzie:

$B(t)_{OZE}$ – czynniki robocze obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$C(t)_{OZE}$ – czynniki zewnętrzne obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$F(t)_{OZE}$ – czynniki antropotechniczne obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$W(t)_{OZE}$ – stan obiektu technicznego energetyki odnawialnej w chwili t ,

$w_{OZE}(t_0)$ – stan obiektu technicznego energetyki odnawialnej w chwili t_0 [149, 191, 260].

Równanie (2.63) opisuje stan obiektu technicznego energetyki odnawialnej $W(t)_{OZE}$ w chwili t , w zależności od chwili t , chwili początkowej t_0 oraz czynników $B(t)_{OZE}$, $C(t)_{OZE}$, $F(t)_{OZE}$. Obiekt techniczny może znajdować się w nieskończonej i nieprzeliczalnej liczbie stanów, jednak z praktycznego punktu widzenia niepotrzebnym jest wyróżnianie takiej ich ilości, dlatego wyróżnia się stan zdatności, częściowej zdatności i niezdatności:

$$W_{OZE} = \{w_{OZE}^I, w_{OZE}^{Ic}, w_{OZE}^0\} \quad (2.64)$$

gdzie:

w_{OZE}^I – stan zdatności obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

w_{OZE}^{Ic} – stan częściowej zdatności obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

w_{OZE}^0 – stan niezdatności obiektu technicznego energetyki odnawialnej [149, 191, 260].

Obiekt techniczny energetyki odnawialnej znajduje się w stanie zdatności, jeżeli wartości wszystkich jego cech spełniają założone lub dopuszczalne wymagania:

$$\overline{x_{OZE_{Em}}} \in X_{OZE_{Enz}} \overset{w^1_{OZE}}{\epsilon} \left(x_{OZE_{Emmin}}(t) < x_{OZE_{Em}}(t) < x_{OZE_{Emmax}}(t) \right) \Rightarrow w_{OZE_i}(t) \quad (2.65)$$

gdzie:

- $x_{OZE_{Em}}$ – zbiór możliwych stanów obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
- $X_{OZE_{Enz}}$ – zbiór niezależnych i zupełnych cech stanu obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
- w_{OZE_i} – poszczególne stany obiektu technicznego energetyki odnawialnej w czasie t ;
- w^1_{OZE} – stan zdatności obiektu technicznego energetyki odnawialnej [149, 191, 260].

W przypadku gdy wartość choć jednej z cech jest niespełniona lub przekracza wyznaczone normy, to obiekt techniczny energetyki odnawialnej znajduje się w stanie niezdatności:

$$\overset{\vee}{x_{OZE_{Em}}} \in X_{OZE_{Enz}} \left(x_{OZE_{Em}}(t) < x_{OZE_{Emmin}}(t) \right) \cup \left(x_{OZE_{Em}}(t) > x_{OZE_{Emmax}}(t) \right) \Rightarrow w_{OZE_i}(t) \in w^0_{OZE} \quad (2.66)$$

2.2.5. Funkcjonalność

Funkcjonalność obiektów technicznych energetyki odnawialnej definiowana jest jako zdolność do realizacji zadanych, niezbędnych funkcji użytkowych na poziomie nie gorszym niż założono podczas etapu projektowania. Jest ona jedną z najważniejszych cech tego typu obiektów, określającą ich jakość oraz relacje z użytkownikiem. Funkcjonalność maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej musi być realizowana w sposób bezwzględny, przy czym niewykonanie jakiegokolwiek przypisanej funkcji oznacza, że dany obiekt nie spełnia zakładanych wymagań (funkcji). Funkcjonalność można przedstawić za pomocą wektora:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (2.67)$$

gdzie poszczególne współrzędne mogą reprezentować następujące cechy:

- w_1 – własności ergonomiczne,
- w_2 – estetyka obiektu technicznego,
- w_3 – łatwość sterowania,
- w_4 – łatwość transportu,
- w_5 – łatwość naprawy [216, 247, 257].

Każda z funkcji obiektu technicznego energetyki odnawialnej może być realizowana na różnym poziomie jakości, przy czym działania te mogą zarówno zachowywać, jak i obniżać jego inne walory użytkowe. Ocena funkcjonalności wymaga zatem odniesienia się do stopnia zaspokajania potrzeb użytkowników. W zależności od charakteru pełnionych ról, funkcje obiektu można podzielić na następujące kategorie:

- a) funkcje podstawowe – niezbędne dla prawidłowej realizacji zadania;
- b) funkcje pomocnicze – wspomagające działanie funkcji podstawowych;

- c) funkcje zabezpieczające – zapewniające ochronę przed niepożądanymi sytuacjami;
- d) funkcje informacyjne – związana z przesyłaniem sygnałów sterujących, ostrzegawczych oraz alarmowych [216, 247, 257].

Obiekt techniczny energetyki odnawialnej składa się ze skończonej liczby elementów E_{OZE} połączonych ze sobą relacjami konstruktywnymi R_{OZE}^K i funkcjonalnymi R_{OZE}^F . Realizuje on funkcje główne ψ_{OZE}^F , które stanowią sumę poszczególnych funkcji składowych danych elementów tworzących obiekt φ_{OZE}^k :

$$\psi_{OZE}^F = \langle E_{OZE}, W_{OZE}^F, R_{OZE}^F \rangle \quad (2.68)$$

gdzie:

ψ_{OZE}^F – struktura funkcjonalna obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – zbiór poszczególnych elementów obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

W_{OZE}^F – zbiór cech funkcjonalnych obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$W_{OZEi}^F = \{w_{OZEi1}^F, w_{OZEi2}^F, \dots, w_{OZEin}^F\} \in W_{OZE}^F$ – zbiór funkcji i-tego elementu obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$R_{OZE}^F = \{R_{OZE1}^F, R_{OZE2}^F, \dots, R_{OZE_n}^F\}$ – zbiór relacji funkcjonalnych obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

$R_{OZEj}^F \subseteq \{W_{OZE1}^F \cdot W_{OZE2}^F \cdot \dots \cdot W_{OZE_n}^F\}$ – relacja funkcjonalna w obiekcie technicznym energetyki odnawialnej [216, 247, 257].

W zależności od zadań określonych w fazie projektowania, obiekt techniczny energetyki odnawialnej realizuje zarówno funkcje użytkowe, jak i poboczne. Stan obiektu określający jego zdolność do spełnienia funkcji użytkowych jest nazywany stanem zdatności. Zdolność ta wynika z zespołu funkcji użytkowych przypisanych poszczególnym komponentom danego obiektu:

$$f(W_{OZE}^F) = 1 \Leftrightarrow \psi_{OZE}^F(W_{OZE}^F) \in \varphi_{OZE}^F \quad (2.69)$$

gdzie:

$f(W_{OZE}^F)$ – funkcja zdatności obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

W_{OZE}^F – zbiór funkcji poszczególnych elementów obiektu technicznego energetyki odnawialnej,

φ_{OZE}^F – zbiór zaprojektowanych funkcji użytkowych obiektu technicznego energetyki odnawialnej [216, 247, 257].

2.2.6. Użyteczność

Użyteczność obiektów technicznych energetyki odnawialnej wyraża skuteczność ich działania. Jest ona cechą mierzalną, wykorzystywaną podczas porównywania obiektów tej samej kategorii. Istnieje wiele definicji użyteczności w zależności od specyfiki analizowanej maszyny czy urządzenia. Użyteczność obiektów technicznych energetyki odnawialnej $U_{OZE}(t)$ można zdefiniować jako iloczyn efektywności $A_{OZE}(t)$ i bezpośrednio poniesionych nakładów $I_{OZE}(t)$ w danym przedziale czasu t [138, 156, 191, 234]:

$$U_{OZE}(t) = A_{OZE}(t) \cdot I_{OZE}(t) \quad (2.70)$$

Wartości użyteczności $U_{OZE}(t)$ oraz nakładów $I_{OZE}(t)$ są wielkościami mierzonymi od początku działania obiektu do chwili t . Funkcja poniesionych nakładów jest niemalejącą funkcją czasu, co oznacza, że w każdej chwili t wartość nakładów jest większa bądź równa zero:

$$i_{OZE}(t) = \frac{I_{OZE}(t)}{dt} \geq 0 \quad (2.71)$$

Wartość funkcji $I_{OZE}(t)$ w zależności od tego czy funkcja $i_{OZE}(t)$ jest ciągła czy dyskretna, wyznacza się korzystając z zależności:

$$I_{OZE}(\tau) = \int_0^{\tau} i_{OZE}(t) dt \quad (2.72)$$

$$I_{OZE}(\tau) = \sum_i^{\tau} i_{OZE} \cdot \Delta t \quad (2.73)$$

Nakłady $I_{OZE}(t)$ poniesione przez obiekt techniczny energetyki odnawialnej należy rozumieć jako zasoby, nośniki energii, maszyn, środowiska czy wody, zużyte do poprawnego działania obiektu. Można je wyrażać w różnych jednostkach [138, 156, 191].

Funkcja użyteczności obiektów technicznych energetyki odnawialnej $U_{OZE}(t)$ może zatem przyjmować w określonym przedziale czasu wartości dodatnie oraz ujemne:

$$u_{OZE}(t) = \frac{dU_{OZE}(t)}{dt} \quad (2.74)$$

Wykorzystując wartości funkcji $u_{OZE}(t)$ w zależności od tego czy są to funkcje ciągłe czy dyskretne, można wyznaczyć wartość funkcji $U_{OZE}(t)$:

$$U_{OZE}(\tau) = \int_0^{\tau} u_{OZE}(t) dt \quad (2.75)$$

$$U_{OZE}(\tau) = \sum_i^{\tau} u_{OZEi} \cdot \Delta t \quad (2.76)$$

W kontekście powyższego, użyteczność działania maszyny lub urządzenia energetyki odnawialnej należy interpretować jako uzyskane korzyści, które są zgodne z podstawowym celem ich działania. Jeżeli analizowany przedział czasu Δt , w którym rozpatrywane jest działanie obiektu, dąży do zera, to wartość zysków ΔU przez przyrost nakładów ΔI w tym samym przedziale czasu Δt , również dążącym do zera, nazywa się efektywnością obiektu technicznego energetyki odnawialnej [137, 156, 191, 234]:

$$E_{OZE}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{U_{OZE}(t + \Delta t) - U_{OZE}(t)}{I_{OZE}(t + \Delta t) - I_{OZE}(t)} \quad (2.77)$$

3. CEL, PROBLEM, HIPOTEZA BADAWCZA

Współczesne obiekty techniczne energetyki odnawialnej, takie jak np. elektrownie fotowoltaiczne, funkcjonują w otoczeniu, które oddziałuje na nie oraz one same wpływają na środowisko w szerokim zakresie energetycznym, ekonomicznym, ekologicznym i technologicznym. Ich cykle istnienia obejmują etapy od projektowania i wytwarzania, przez eksploatację, aż po procesy zagospodarowania poużytkowego. Współcześnie ogromne wyzwanie stanowi zintegrowane zarządzanie tymi cyklami, które w sposób spójny uwzględniałoby aspekty energetyczne (w tym zarówno zapotrzebowanie na energię, jak i wielkość jej produkcji), środowiskowe (np. emisje szkodliwych substancji, destrukcyjne oddziaływanie procesów), ekonomiczne (m.in. koszty środowiskowe) oraz techniczne (np. efektywność eksploatacji).

W pracach naukowych wskazać można dwa zasadnicze rodzaje celów – poznawcze oraz użyteczne. Cele poznawcze tworzą podstawy teoretyczne i naukowe pracy badawczej, z kolei cele użyteczne odpowiadają na potrzeby praktyki. Z tego względu opracowania naukowe, zwłaszcza w obszarze nauk technicznych, powinny łączyć te oba wymiary, aby jednocześnie poszerzać wiedzę oraz dostarczać praktycznych narzędzi jej wykorzystania [123].

Cele poznawcze (teoretyczne) są ukierunkowane na wyjaśnianie mechanizmów zjawisk i pogłębianie rozumienia badanego problemu. Ich zadaniem jest dążenie do generowania nowej wiedzy o rzeczywistości, poszerzanie horyzontów poznawczych oraz systematyzacja dotychczasowych ustaleń teoretycznych. W badaniach inżynierskich mają one przyczynić się do zrozumienia funkcjonowania obiektów technicznych, określenia ich ograniczeń oraz wypracowania podstaw teoretycznych, które mogą być punktem wyjścia dla zastosowań praktycznych [123].

W związku z powyższym jako cel poznawczy rozprawy doktorskiej przyjęto analizę aktualnego stanu wiedzy i techniki z obszaru budowy oraz eksploatacji elektrowni fotowoltaicznych.

Cele użyteczne (praktyczne, aplikacyjne) odnoszą się natomiast do wdrożenia, zastosowania i przełożenia wyników badań na praktykę techniczną, gospodarczą czy społeczną. Są one ukierunkowane na rozwiązywanie konkretnych problemów praktycznych, inżynierskich, usprawnianie istniejących procesów, projektowanie nowych technologii lub narzędzi, jak również na podnoszenie efektywności (energetycznej, ekonomicznej, ekologicznej) funkcjonowania obiektów technicznych. Cele użyteczne powinny wynikać z potrzeb otoczenia społeczno-gospodarczego. Badania o charakterze aplikacyjnym mają za zadanie przekładać wyniki poznawcze na praktyczne rozwiązania lub rekomendacje, które mogą zostać wdrożone w gospodarce czy praktyce inżynierskiej. W przypadku inżynierii mechanicznej oznacza to m.in. opracowanie nowych metod projektowania, optymalizacji, monitorowania czy sterowania obiektami technicznymi [123].

W konsekwencji powyższego, za cel użyteczny dysertacji przyjęto analizę efektywnego sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Obiekt ten stanowiły cztery elektrownie fotowoltaiczne opierające się na modułach PV wykonanych w odmiennych technologiach – mono- i polikrystalicznej, amorficznej oraz perowskitowej. Uwzględniono zatem zarówno klasyczne, najczęściej stosowane rozwiązania, jak i najnowocześniejsze technologie, w których upatrywana jest przyszłość sektora fotowoltaicznego.

Problem badawczy stanowi swoistą lukę w wiedzy lub praktyce, która wymaga naukowego wyjaśnienia bądź rozwiązania, sytuację poznawczą, w której istnieje różnica pomiędzy stanem wiedzy aktualnie posiadanej a stanem wiedzy pożądanej, umożliwiającej rozwiązanie określonego zagadnienia. W naukach technicznych zwykle dotyczy on optymalizacji procesów, poprawy efektywności działania obiektów technicznych, zwiększenia ich niezawodności czy ograniczenia negatywnego oddziaływania na otoczenie. Przybiera zatem formę konkretnego zagadnienia inżynierskiego, którego rozwiązanie wymaga zastosowania zarówno metod teoretycznych, jak i narzędzi empirycznych. W obszarze inżynierii mechanicznej wiąże się to z koniecznością poszukiwania nowych metod obliczeniowych, projektowych czy eksploatacyjnych, które pozwolą na bardziej efektywne wykorzystanie dostępnych zasobów materiałowych i energetycznych. W naukach stosowanych problem badawczy ma zwykle charakter praktyczno-teoretyczny, łącząc potrzebę wyjaśnienia zjawiska z koniecznością opracowania rozwiązania możliwego do wdrożenia. Zidentyfikowany problem nie jest zatem abstrakcyjnym pytaniem badawczym, lecz odpowiada na rzeczywistą potrzebę wynikającą z praktyki inżynierskiej [123].

W nawiązaniu do powyższego zasadniczy problem pracy sformułowano w postaci pytania: jakie metody sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej umożliwią poprawę ich efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, przy jednoczesnym zachowaniu głównych założeń zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki w obiegu (możliwie) zamkniętym?

Hipotezy badawcze stanowią naukowo uzasadnione przypuszczenia dotyczące zależności między zmiennymi lub oczekiwanymi rezultatami badań, które poddawane są weryfikacji za pomocą metod badawczych. Są to zatem tymczasowe stwierdzenia przewidywane na podstawie wcześniejszej wiedzy lub obserwacji, których prawdziwość można potwierdzić lub odrzucić w wyniku badań empirycznych. W naukach technicznych hipotezy pełnią funkcję instrumentów projektowania eksperymentów lub analiz systemowych, umożliwiając precyzyjne określenie celów badań i kierunków zbierania danych. W kontekście inżynierii mechanicznej hipoteza może dotyczyć zarówno efektów wdrożenia nowych metod projektowania, sterowania czy monitorowania, jak i przewidywanych korzyści energetycznych, ekonomicznych, ekologicznych czy technicznych. Pozwala ona na przeprowadzenie systematycznej analizy oraz

uzyskanie wyników, które są zarówno weryfikowalne, jak i praktycznie użyteczne. Hipotezy badawcze w pracy naukowej o charakterze technicznym obejmują zatem tymczasowe, logicznie uzasadnione przypuszczenia dotyczące zależności między parametrami obiektu technicznego lub przewidywanych efektów zastosowania określonych metod sterowania/eksploatacji, które podlegają empirycznej weryfikacji za pomocą analizy danych, eksperymentów lub modelowania komputerowego [123].

W związku z powyższym w niniejszej rozprawie doktorskiej postawiono następującą hipotezę badawczą: zastosowanie zintegrowanych metod sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej pozwala na jednocześnie obniżenie zapotrzebowania na energię, wielkości ponoszonych kosztów środowiskowych, jak również redukcję obciążeń ekologicznych, przy jednoczesnym zachowaniu głównych założeń zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki w obiegu (możliwie) zamkniętym.

Cele pracy zostaną osiągnięte, kluczowy problem badawczy rozstrzygnięty, a postawiona hipoteza zweryfikowana, pod warunkiem skutecznej realizacji następujących zadań szczegółowych:

- 1) analiza aktualnego stanu wiedzy i techniki z zakresu cykli istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej oraz koncepcji efektywnego sterowania nimi. Dzięki realizacji tego zadania możliwym stało się umiejscowienie problematyki badawczej w szerszym kontekście naukowym i technicznym;
- 2) charakterystyka wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej, stanowiącego studium przypadku (elektrownia fotowoltaiczna). To zadanie pozwoli na praktyczne odniesienie zagadnień teoretycznych do konkretnego przykładu technologii odnawialnej;
- 3) opracowanie autorskiej metodyki badań oraz wybór narzędzi analitycznych. Realizacja zadania umożliwi przejrzyste przedstawienie podstaw zaplanowanych analiz i przyjętych kryteriów oceny;
- 4) wykonanie analizy możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia ocenianego obiektu technicznego w oparciu o autorską metodologię badań. Zadanie to pozwoli na przybliżenie wyników oceny energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, które bezpośrednio odpowiadają na postawiony problem badawczy. Ma ono również kluczowe znaczenie dla weryfikacji hipotezy badawczej, gdyż pozwala na porównanie różnych scenariuszy sterowania i wskazanie najbardziej efektywnych rozwiązań;
- 5) podsumowanie wyników, ostateczne rozstrzygnięcie problemu badawczego, końcowe zweryfikowanie hipotezy oraz sformułowanie wniosków teoretycznych i praktycznych zaleceń. Realizacja tego zadania umożliwi krytyczną ocenę uzyskanych rezultatów oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

4. PROCEDURA OCENY MOŻLIWOŚCI STEROWANIA CYKLEM ISTNIENIA OBIEKTU TECHNICZNEGO ENERGETYKI ODNAWIALNEJ W KONTEKŚCIE GOSPODARKI W OBIEGU ZAMKNIĘTYMI ROZWOJU ZEÓWNOWAŻONEGO

4.1. OBIEKT I PRZEDMIOT BADAŃ

Pierwszym etapem w procesie identyfikacji problemu analiz było precyzyjne określenie obiektu badań. Obejmowało ono wyodrębnienie konkretnego fragmentu rzeczywistości, który miał zostać poddany analizie i ocenie, a także zdefiniowanie najbliższego otoczenia, czyli elementów mających kluczowy wpływ na kształtowanie rozważanego obszaru. Tak wyznaczony system przedmiotowy tworzą zbiory elementów oraz sieci relacji między nimi. Obiekt badań stanowiły cztery elektrownie fotowoltaiczne (o mocy zainstalowanej wynoszącej 1 MW) oparte na modułach PV wykonanych w odmiennych technologiach (od tradycyjnych, powszechnie wykorzystywanych, po najnowocześniejsze i najbardziej innowacyjne rozwiązania) – monokrystalicznej, polikrystalicznej, amorficznej i perowskitowej. Przedmiotem analiz były zarówno zależności wewnętrzne w obrębie wyznaczonego obiektu, jak i jego relacje z otoczeniem technologicznym i naturalnym.

Pod względem konstrukcyjnym ogniwa fotowoltaiczne można podzielić na trzy zasadnicze generacje. Pierwsza z nich opiera się na wykorzystaniu krzemu krystalicznego i obecnie dominuje na rynku, stanowiąc ponad 80% globalnego udziału. Mimo ciągłego rozwoju technologicznego, w tym przypadku koszty produkcji wynoszą w przybliżeniu od 200 do 500 USD/m². Znacząca redukcja nakładów finansowych obecnie wydaje się mało prawdopodobna, ponieważ ponad połowa wydatków jest związana z zastosowanymi materiałami oraz energochłonnymi procesami produkcyjnymi, które dodatkowo wpływają na wysoki poziom szkodliwych emisji w perspektywie całego ich cyklu istnienia. Druga generacja obejmuje ogniwa wykonane w technologii cienkowarstwowej, takie jak heterozłączone ogniwa CIS (CuInSe₂), ich odmiany z domieszką galu (CIGS), siarki (CIGSS), ogniwa bazujące na tellurku kadmu (CdTe), wysokosprawne ogniwa z monokrystalicznego arsenku galu oraz ogniwa wykonane z amorficznego krzemu. Koszty produkcji w tej grupie wynoszą od 30 do 110 USD/m², dzięki ograniczeniu zużycia materiałów i zastosowaniu tańszych technologii wytwarzania, takich jak naparowywanie czy napyłanie katodowe. Sprawność tego rodzaju ogniw jest niższa niż krzemowych, jednak gdyby dorównywała lub przewyższała wartości osiągnięte dla ogniw pierwszej generacji, współczynniki destrukcyjnych emisji w perspektywie ich całego cyklu istnienia byłyby znacznie niższe, ponieważ procesy wytwarzania w tej grupie są mniej energochłonne. Ostatnia generacja obejmuje innowacyjne technologie

niezawierające krzemu, takie jak ogniwa organiczne, barwnikowe hybrydowe czy perowskitowe. Postęp w zakresie ich sprawności i technologii produkcji może przyczynić się do znaczącego obniżenia kosztów wytwarzania w porównaniu do wcześniejszych generacji, a także zmniejszenia negatywnego wpływu na otoczenie m.in. dzięki niższej energo- i materiałochłonności procesów produkcyjnych. Obecnie głównym wyzwaniem w tym względzie jest poprawa stabilności oraz zwiększenie efektywności pracy [15, 29, 75, 76].

Podstawowym zadaniem fotowoltaicznych procesorów energii jest przekształcanie energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Jednak ich produkcja wymaga znacznych nakładów energetycznych i surowcowych na każdym etapie cyklu istnienia. Zatem choć w trakcie eksploatacji dostarczają one „darmowej” energii, to pozostałe etapy cyklu wiążą się z pewnymi kosztami zarówno energetycznymi, ekonomicznymi i ekologicznymi. Procesy takie jak wydobywanie, rafinacja czy oczyszczanie materiałów półprzewodnikowych są energochłonne, podobnie jak wytwarzanie innych komponentów składowych paneli PV, np. szkła, polimerów, stali, aluminium, miedzi, itd. Konstrukcje systemów fotowoltaicznych nie ograniczają się jednak jedynie do samych paneli. Składają się na nie również elementy wsporcze, inwertery, transformatory, okablowanie oraz systemy zabezpieczeń, które w trakcie swoich cykli istnienia także wymagają wykorzystania zasobów materialnych i energetycznych. Co więcej, zużycie energii następuje również w trakcie transportu elementów niezbędnych do budowy elektrowni fotowoltaicznej oraz podczas jej montażu. To sprawia, że w trakcie analizy cyklu istnienia tego typu obiektów technicznych należy porównać ilość energii i surowców wykorzystanych na poszczególnych jego etapach do ilości energii wytworzonej podczas eksploatacji [4, 159].

Krzemowy moduł fotowoltaiczny składa się ze szkła, warstwy laminującej EVA, krzemowych ogniw PV, aluminiowej ramy, polimerowej folii tylnej (zwykle jest to Tedlar) i skrzynki przyłączeniowej. Wymienione elementy tworzą strukturę, która ma za zadanie chronić ogniwa przed uszkodzeniami mechanicznymi i czynnikami atmosferycznymi. Są one również pokrywane powłoką antyrefleksyjną oraz metalową elektrodą, celem zwiększenia efektywności konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Porównując poszczególne etapy cyklu istnienia, widocznym jest, że procesy wytwarzania generują najwięcej oddziaływań na otoczenie. Najbardziej energochłonnym procesem jest produkcja krzemu o wysokiej czystości [12, 32, 40, 47, 66, 86, 91, 180, 181, 211].

Wytwarzanie ogniw krzemowych rozpoczyna się od przetopu piasku kwarcowego o czystości wynoszącej około 98,5%. W wyniku tego procesu powstaje krzem metalurgiczny (MG-Si), który uzyskuje się poprzez karbotermiczną redukcję krzemianów w piecu łukowym, w temperaturze przekraczającej 1900°C. Znajduje on zastosowanie w przemyśle chemicznym i odlewnictwie aluminium, jednak jego wykorzystanie do produkcji ogniw PV wymaga dalszej rafinacji oraz przetwarzania. W tym celu stosuje się m.in. proces

Simensa lub proces w reaktorze ze złożem fluidalnym, aby wytworzyć krzem odpowiedni do zastosowania w fotowoltaice (SOG-Si). Dalszy proces produkcji ogniw wiąże się z krystalizacją w procesach monokrystalicznych (najczęściej wykorzystuje się metodę Czochralskiego) lub w procesach polikrystalicznych (realizowaną w piecach typu Bridgman, umożliwiającą krzepnięcie kierunkowe). W metodzie Czochralskiego do powierzchni czołowej trzpienia przytwierdza się mały monokryształ krzemu (tzw. zarodek krystalizacji). Następnie jest on opuszczany do wnętrza tygla, w którym znajduje się czysty krzem w postaci płynnej, podgrzany do temperatury powyżej 1410°C. Trzpień jest stopniowo podnoszony w tempie odpowiadającym szybkości krystalizowania się materiału. Rozrastanie się monokryształu odbywa się z prędkością ok. 0,025 mm/h, dzięki czemu powstaje walec o długości do kilkuset centymetrów i masie do kilkuset kilogramów. W celu uzyskania pożądanego typu półprzewodnika do płynnego krzemu dodaje się pierwiastki domieszujące z grupy III lub IV układu okresowego. Bor, aluminium, gal czy ind działają jako akceptory, prowadząc do uzyskania półprzewodników typu p, natomiast pierwiastki takie jak fosfor, arsen czy antymon, pełniąc funkcję donorów, pozwalają na otrzymanie półprzewodników typu n. Proces ten charakteryzuje się wolnym tempem i wysokim zużyciem energii potrzebnej do przetapiania krzemu, co wpływa negatywnie na otoczenie oraz zwiększa koszty produkcji. Kolejnym mankamentem jest nadmierna utrata materiału – podczas wycinania z walca płytek o kształcie zbliżonym do prostokąta powstają znaczne ilości odpadów. Jest to jeden z powodów, dla których coraz częściej zastosowanie znajdują technologie oparte na strukturze polikrystalicznej. Ogniwa tego typu są zbudowane z wielu połączonych ze sobą ziaren krzemu. Proces ich produkcji jest szybszy, łatwiejszy i mniej energochłonny niż w przypadku ogniw monokrystalicznych. Wykorzystuje się w tym celu różne procesy technologiczne, takie jak odlewanie (ang. *casting*), chemiczne osadzanie z fazy gazowej (CVD, ang. *chemical vapour deposition*), epitaksję z fazy ciekłej (LPE, ang. *liquid-phase epitaxy*) czy metodę wstęgową (ang. *ribbon*). Tradycyjny sposób wytwarzania polega na wzroście struktury polikrystalicznej w piecu, co umożliwia formowanie pionowo narastających kryształów o wysokości do 25 cm. Alternatywę stanowi natomiast technika wstęgowa, w której warstwy krzemu ulegają krystalizacji na taśmie lub pomiędzy pionowo przesuwającymi się strunami. Dzięki temu rozwiązaniu można wyeliminować niektóre etapy produkcji ogniw, takie jak trawienie powierzchni płytek czy odcinanie podłoża zarodkowych. Kluczową zaletę stanowi w tym przypadku minimalizacja strat materiału bazowego, co przekłada się na bardziej efektywne wykorzystanie surowców [33, 57, 75, 104, 148, 187, 205, 213, 250, 252].

Po zakończeniu procesu krystalizacji, sztabki krzemowe są poddawane precyzyjnemu cięciu za pomocą pił taśmowych w celu uzyskania wafli krzemowych. Etap ten obejmuje dodatkowo procesy mycia, fazowania, czyszczenia oraz suszenia wafli, które mają im zapewnić odpowiednią jakość. Aby zwiększyć zdolność absorpcji światła słonecznego oraz zminimalizować

straty spowodowane odbiciem, na powierzchnię wafla nanoszona jest powłoka antyrefleksyjna. Proces ten jest realizowany poprzez zastosowanie dwutlenku tytanu lub selenu i amoniaku, techniką osadzania chemicznego z fazy gazowej pod ciśnieniem atmosferycznym w temperaturze nieprzekraczającej 450°C. Ogniwa są następnie zamykane pomiędzy dwoma arkuszami – kopolimeru etylenu i octanu winylu (EVA). Utwardzanie, odbywające się w temperaturze około 150°C, ma za zadanie zabezpieczenie przed uszkodzeniami zewnętrznymi. Dodatkowo, na przednią warstwę ogniwa nakładane jest szkło hartowane o grubości od 2 do 3 mm, również pełniące funkcję ochronną oraz zapewniające odpowiednią sztywność mechaniczną. Z kolei tylna część zostaje wzmocniona płytą Tedlar. Kompletny moduł fotowoltaiczny jest zamykany w aluminiowej ramie zapewniającej ochronę przed obciążeniami środowiskowymi, takimi jak wiatr czy śnieg. W ostatnim kroku, na tylnej powierzchni instalowana jest skrzynka przyłączeniowa, która umożliwia efektywne przesyłanie wytworzonej energii elektrycznej [25, 109, 171, 242].

Produkcja ogniwa amorficznych (α -Si), zapoczątkowana w latach 70. XX wieku, była alternatywną metodą wytwarzania, mającą na celu redukcję zarówno kosztów produkcji, jak i ceny modułów, w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań krzemowych. Proces wytwarzania warstw krzemu amorficznego opiera się na rozkładzie silanu w wyładowaniu jarzeniowym i składa się z kilku kluczowych etapów: dyfuzji gazu źródłowego, dysocjacji uderzeniowej elektronów, reakcji chemicznej w fazie gazowej, dyfuzji rodników oraz osadzania. Osadzanie krzemu amorficznego odbywa się w precyzyjnie kontrolowanych warunkach, w specjalnych komorach wypełnionych mieszaniną gazów. Na ogrzewane podłoże, którym może być szkło, stal nierdzewna lub tworzywo polimerowe, w temperaturze wynoszącej od 150 do 500°C (w zależności od rodzaju materiału), nakłada się cienkie warstwy uwodornionego krzemu amorficznego. Na powierzchnię nanoszona jest powłoka tlenku indy i cyny, a następnie podłoże poddawane jest polerowaniu i czyszczeniu, aby umożliwić dokładne rozmieszczenie srebrnych szyn zbiorczych. Końcowe procesy wytwarzania obejmują wykończenie modułu z wykorzystaniem folii EVA oraz, w zależności od przeznaczenia, zamknięcie go w aluminiowej ramie. Główną zaletą modułów amorficznych jest niskie zapotrzebowanie na materiały oraz znacznie mniejsze zużycie energii i niższe temperatury procesów produkcyjnych w porównaniu do rozwiązań krzemowych monokrystalicznych. Dodatkowo krzem amorficzny może być наносzony na tanie, elastyczne materiały. Do podstawowych wad należy jednak ich niska sprawność oraz niestabilność pracy wynikająca z efektu Staeblera-Wrońskiego [14, 24, 87, 136].

Perowskitowe ogniwa fotowoltaiczne to nowe rozwiązanie technologiczne, bazujące na krystalicznym mineralu zbudowanym z tytanianu wapnia (CaTiO_3), odkrytym w XIX wieku przez Lwa Perowskiego. Składają się one z trzech głównych warstw: PVK (poli(9-winylokarbazol)), ETL (ang. *electron transport layer*) i HTL (ang. *hole transport layer*). Warstwa PVK odpowiada za pochłanianie promieniowania słonecznego, ETL (warstwa transportująca

elektrony) oddziela elektrony od PVK, a HTL (warstwa transportująca „dziury”) – separuje „dziury” od warstwy PVK. Najczęściej wykorzystywanym absorberem jest trójhalegenek ołowiu metyloamoniowy ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, gdzie X oznacza jon jodowy, bromkowy lub chlorkowy). Istnieje kilka metod produkcji ogniw perowskitowych (głównie opartych na osadzaniu z roztworu), takich jak: powlekanie wirowe, szczelinowe lub natryskowe, druk atramentowy, sitodruk oraz techniki osadzania z fazy gazowej i elektroosadzanie. Obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą wytwarzania jest powlekanie taśmowe (ang. *doctor blade coating*). Proces krystalizacji foli perowskitowych reguluje się poprzez zwiększanie temperatury wyżarzania w zakresie 90-130°C w czasie 10 minut, a następnie dalsze wyżarzanie w temperaturze 130°C. W celu ochrony ogniw przed wilgocią, stosuje się hermetyzację z uszczelnieniem krawędziowym bazującym na gumie butylowej lub żywicy epoksydowej. Istotnym problem w cyklu istnienia modułów PV opartych na ogniwach perowskitowych jest obecność ich strukturze ołowiu i innych toksycznych metali ciężkich, które budzą obawy środowiskowe oraz zdrowotne. Toksyczne rozpuszczalniki, takie jak dimetyloformamid (DMF) i dimetylosulfotlenek (DMSO), używane podczas ich produkcji, stanowią dodatkowe, potencjalne zagrożenie dla otoczenia. Z tego względu trwają badania w obszarze możliwości wykorzystania nietoksycznych substancji w procesach wytwarzania ogniw perowskitowych, zwłaszcza w skali komercyjnej [67, 69, 71, 178, 202, 212].

Aby kompleksowo ocenić cykl istnienia elektrowni fotowoltaicznej, należy wziąć pod uwagę wszystkie jej komponenty, a więc nie tylko same panele fotowoltaiczne. Jednym z nich, o szczególnym znaczeniu technicznym, jest inwerter fotowoltaiczny. Jego kluczową funkcję stanowi zmiana prądu stałego (DC) generowanego przez panele w prąd przemienny (AC). Inwerter składa się z układu tranzystorowego, który pełni kluczową rolę w przekształcaniu prądu i napięcia. Jest wyposażony w układ wejściowy opierający się na kondensatorach, przekształtnikach, rozłącznikach, bezpiecznikach i ogranicznikach przepięć oraz w układ wyjściowy, zbudowany z dławików i kondensatorów. W elektrowniach fotowoltaicznych wykorzystywane są także stacje transformatorowe. Ich głównym zadaniem jest dostosowanie parametrów przesyłu energii elektrycznej (prąd przemienny) do wymagań sieci elektroenergetycznej. Transformator składa się z minimum dwóch galwanicznie odseparowanych uzwojeń wykonanych z miedzi lub aluminium. Są one nawinięte na kolumny rdzenia zbudowanego z blach stalowych z dodatkiem krzemu, co umożliwia efektywną transmisję strumienia magnetycznego. W systemach fotowoltaicznych o mocy 1 MW i więcej, wykorzystuje się transformatory kontenerowe, które nie tylko dostosowują parametry wytworzonego prądu elektrycznego, ale także zapewniają bezpieczną współpracę systemu z infrastrukturą energetyczną. Poszczególne elementy składowe elektrowni PV są połączone przewodami, które zwykle wykonuje się z miedzi. Ich wierzchnia warstwa pokryta jest tworzywem polimerowym, zapewniającym odpowiednią izolację oraz ochronę mechaniczną. Panele fotowoltaiczne sytuowane są na systemach montażowych produkowanych

głównie ze stopów aluminium. Konstrukcje te spełniają istotną rolę w ochronie instalacji przed niekorzystnymi czynnikami atmosferycznymi, takimi jak wiatr, deszcz, śnieg czy wilgoć. Wytwarzanie elementów aluminiowych stanowi energochłonny proces, wymagający zastosowania wysokich temperatur rzędu 500°C, co również należy uwzględnić przy ocenie wpływu na otoczenie fotowoltaicznego procesora energii [31, 82, 190, 210, 213, 244, 250].

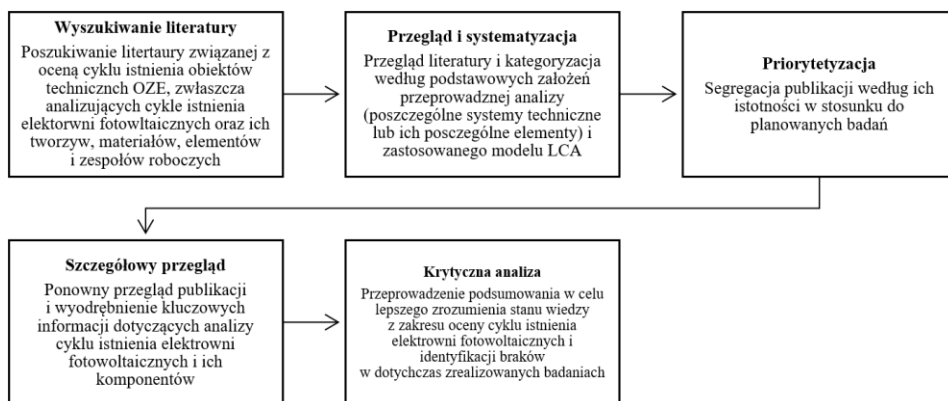
Szczegółowe informacje nt. wykorzystywanych tworzyw, materiałów, elementów, zespołów roboczych oraz procesów wytwarzania badanych elektrowni fotowoltaicznych zamieszczono w podrozdziale 4.3.3.

Kluczowym elementem sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej jest precyzyjna identyfikacja obszarów o największym szkodliwym wpływie na otoczenie. Każdy etap cyklu, a zwłaszcza charakterystyka procesów w ramach poszczególnych jego faz, wymaga indywidualnego podejścia i analizy. Podejście to stanowi fundamentalną zasadę myślenia w kategoriach cyklu istnienia (LCT, ang. *life cycle thinking*), które szczególną uwagę poświęca różnicom pomiędzy kolejnymi jego etapami. Kluczowym narzędziem stosowanym w analizach cyklu istnienia obiektów technicznych jest metoda LCA (ang. *life cycle assessment*). Choć jest ona standardem w tego rodzaju badaniach, nie umożliwia dokładnej oceny rozmiaru szczegółowych, niepożądanych oddziaływań. W odpowiedzi na tę lukę zrodziła się potrzeba opracowania autorskiej metodyki oceny możliwości sterowania cyklem istnienia maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej, opierającej się na fundamentach LCA. Poprzez identyfikację procesów charakteryzujących się najwyższym wskaźnikiem oddziaływań destrukcyjnych lub konstruktywnych na poszczególnych etapach cyklu istnienia, możliwym stanie się bardziej zrównoważone sterowanie całym procesem.

4.2. PLAN I PROGRAM BADAŃ

Myślenie kategoriami cyklu istnienia obiektów technicznych (LCT) jest podejściem o charakterze holistycznym. Oceniane jest jego oddziaływanie na otoczenie dla każdego etapu cyklu. Polega ono na kompleksowej analizie wpływu, od momentu wytworzenia, przez fazę eksploatacji, aż po zagospodarowanie poużytkowe. Kluczowym założeniem tej metody jest najpierw określenie poziomu oddziaływania obiektów technicznych, a następnie podjęcie działań sterujących, ukierunkowanych na ograniczenie ich negatywnego i maksymalizację pozytywnego wpływu. Jest to możliwe dzięki identyfikacji potencjalnych zagrożeń z wykorzystaniem podejścia o charakterze jakościowym lub ilościowym, w zależności od specyfiki danego obiektu. W celu usystematyzowania oraz oceny możliwego oddziaływania wykorzystuje się narzędzia takie jak LCA, które pozwalają na kwantyfikację i priorytetyzację czynników wpływających na otoczenie w perspektywie całego cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej [76, 82, 142].

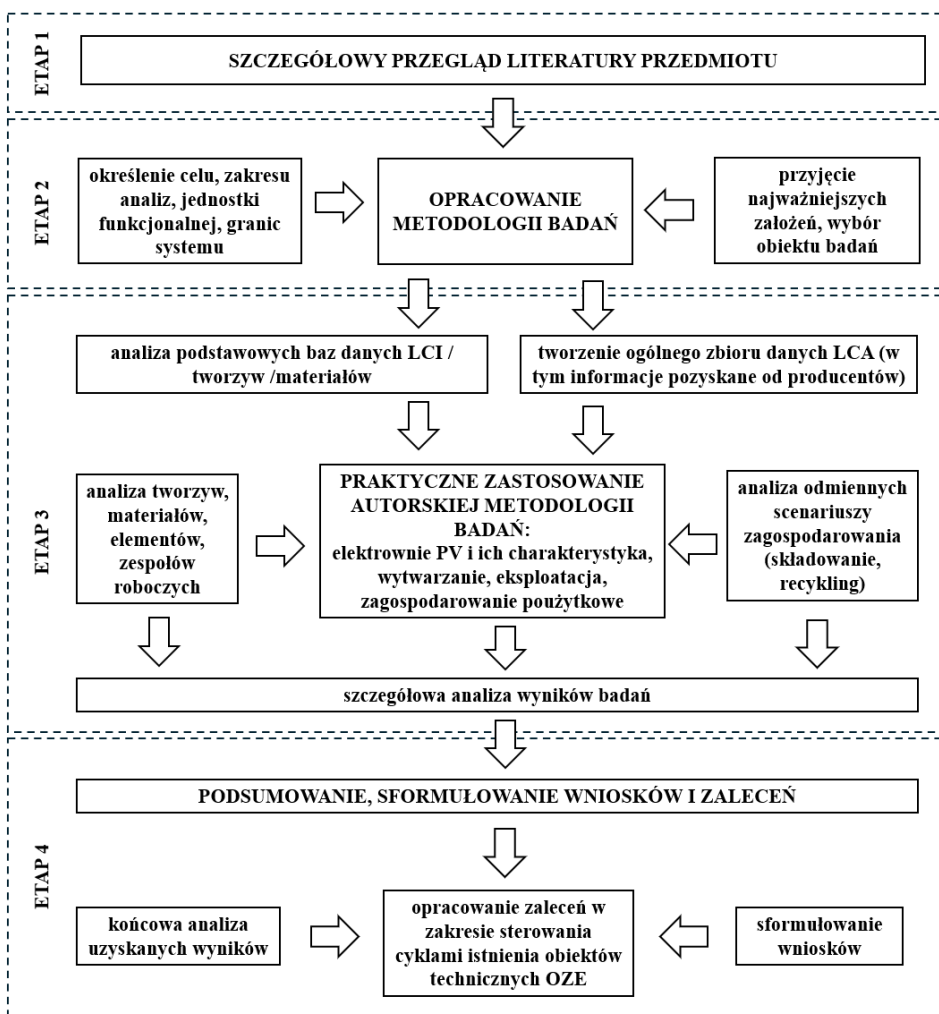
Realizację analiz cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych poprzedzono opracowaniem autorskiego programu badawczego. W pierwszym etapie dokonano szczegółowego przeglądu literatury, mającego na celu zebranie, analizę i syntezę informacji związanych z obszarem badawczym. Jego podstawowe zadanie stanowiło precyzyjne sformułowanie założeń oraz ustalenie metodologii badań. Systematyczne podejście do analizy literatury, oparte na rozważaniach teoretycznych, miało stanowić przygotowanie do kluczowego etapu, jakim była ocena możliwości sterowania cyklem istnienia rozważanych elektrowni fotowoltaicznych. Dokonano przeglądu zarówno polskich, jak i zagranicznych publikacji z zakresu oceny cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, a w szczególności elektrowni PV. Ważnym aspektem tego procesu była identyfikacja wpływu na otoczenie elektrowni fotowoltaicznych oraz ich poszczególnych tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych na każdym etapie cyklu istnienia. Zgromadzone i przeanalizowane artykuły zostały usystematyzowane według zawartej w nich treści, ze szczególnym uwzględnieniem badań dotyczących kompletnych systemów PV oraz ich poszczególnych zespołów elementów, takich jak panele, inwertery, okablowanie czy stacje transformatorowe. Krytyczna analiza treści pozwoliła na zidentyfikowanie luk w istniejących badaniach naukowych zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym, co pomogło w opracowaniu autorskiej metodologii analiz. Schemat przeglądu literatury przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Schemat struktury zrealizowanego przeglądu literatury (opracowanie własne)

Kolejnym krokiem było określenie celu, zakresu i poziomu szczegółowości badań realizowanych zgodnie z metodologią LCA. Następny etap, czyli analiza zbioru, koncentrował się na identyfikacji ilościowych danych wejściowych oraz wyjściowych cykli istnienia rozważanych obiektów technicznych. Dane wejściowe obejmowały strumienie materiałowe i energetyczne docierające do obiektów, a dane wyjściowe uwzględniały generowane odpady oraz emisje zanieczyszczeń trafiające do otoczenia. Proces selekcji danych był oparty na bilansach materiałowo-energetycznych dla poszczególnych procesów

jednostkowych. Wymagał on precyzyjnego pozyskiwania danych od producentów poszczególnych tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych (dzięki nawiązaniu kontaktów z firmami, analizowaniu udostępnionej dokumentacji technicznej oraz przeprowadzaniu własnych pomiarów) (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Struktura planu badań (opracowanie własne)

Następnie przystąpiono do oceny potencjalnego wpływu na otoczenie poszczególnych etapów cyklu istnienia elektrowni PV opartych na różnych generacjach ogniów. Badania zrealizowano przy wykorzystaniu metody IMPACT World+, IPCC 2021 i CED oraz specjalistycznego oprogramowania SimaPro, umożliwiającego przeprowadzenie kompleksowej, ilościowej analizy oddziaływania na otoczenie. Dane zebrane w trakcie inwentaryzacji zostały pogrupowane według rodzaju oddziaływania na otoczenie i przypisywane

odpowiednim kategoriom wpływu. Ostatni etap polegał na interpretacji otrzymanych wyników poprzez ich szczegółową analizę i sformułowanie ostatecznych wniosków z przeprowadzonych badań. Na bazie zrealizowanej oceny sformułowano wnioski i zalecenia w kierunku zwiększenia efektywności, udoskonalenia procesu sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej. Plan badań został przedstawiony na rysunku 4.2. [188].

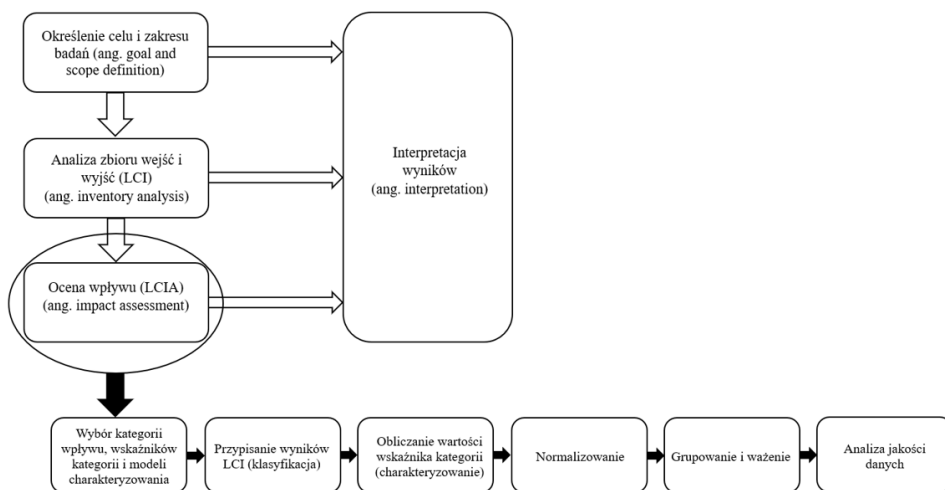
4.3. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA METODYCZNE STOSOWANEJ PROCEDURY ANALITYCZNEJ

4.3.1. Główne założenia metody oceny cyklu istnienia (LCA)

Problematyka związana z ochroną środowiska i zdrowia człowieka przyczyniły się do opracowania metodologii oceny cyklu istnienia (LCA). Stanowi ona wieloaspektową metodę analityczną, która umożliwia badanie oddziaływań obiektów technicznych na otoczenie w ich całym cyklu istnienia. Nadrzędnym celem jej stosowania jest zidentyfikowanie oraz ilościowe określenie wpływu danego obiektu na środowisko, począwszy od etapu pozyskiwania surowców niezbędnych do produkcji, poprzez procesy wytwarzania wymagające wykorzystania zarówno zasobów materiałowych, jak i energetycznych (ciepłych bądź elektrycznych), aż po fazę eksploatacji oraz końcowego zagospodarowania użytkowego. Dzięki temu możliwym staje się nie tylko szczegółowe określenie oddziaływań generowanych przez dany obiekt na poszczególnych etapach jego cyklu istnienia, lecz także identyfikacja oraz hierarchizacja tych wpływów w celu zmniejszenia ich negatywnych następstw poprzez odpowiednie sterowanie. Podstawowe zasady i wymagania metodologiczne związane z LCA zostały ustandaryzowane w serii norm ISO 14040-14044. Definiują one cztery kluczowe fazy wykonywania analiz: określenie celu i zakresu badań, przeprowadzenie inwentaryzacji, ocenę oddziaływania na otoczenie oraz interpretację uzyskanych wyników (rys. 4.3). Tak kompleksowy model znajduje szerokie zastosowanie, zarówno przy podejmowaniu decyzji projektowych na wczesnych etapach cyklu istnienia obiektów technicznych (projektowanie, konstruowanie), jak i w celu polepszania już istniejących rozwiązań. Umożliwia zatem wybór optymalnych założeń projektowych, cechujących się mniejszym destrukcyjnym oddziaływaniem na otoczenie, co jednocześnie wspiera rozwój bardziej zrównoważonych technologii. Szczególnym znaczeniem cechuje się faza projektowania, która jest kluczowym etapem w całym procesie tworzenia nowego obiektu technicznego. Podczas niej podejmowane są decyzje dotyczące wyboru surowców i materiałów, sposobu ich wykorzystania, a także przewidywanej trwałości obiektu. Ponadto określana jest łatwość i częstotliwość przeprowadzania napraw, możliwości demontażu elementów oraz wymienialność kluczowych komponentów konstrukcyjnych. Decyzje podjęte w tej fazie mają fundamentalne znaczenie nie tylko dla funkcjonalności obiektu technicznego energetyki odnawialnej, ale również dla

jego wpływu na otoczenie w całym cyklu istnienia [8, 13, 51, 74, 81, 95, 96, 97, 116, 131].

Określenie celu i zakresu badań (ang. *goal and scope definition*) stanowi kluczowy element oceny cyklu istnienia obiektów technicznych. W jego ramach dokonuje się wyboru optymalnej techniki oceny, definiuje powody przeprowadzania analizy oraz wyznacza granice analizowanego systemu obiektu, a także ustala rodzaj danych, które należy zgromadzić i poddać ocenie. Zakres badań, stanowiący kolejną składową pierwszej fazy LCA, obejmuje opracowanie modelu uwzględniającego zasadnicze elementy rozważanego systemu oraz identyfikację zależności między obiektem technicznym energetyki odnawialnej a otoczeniem. Uwzględniane są wszystkie procesy jednostkowe mające miejsce w cyklu istnienia. Na tym etapie konieczne jest również zdefiniowanie samego systemu obiektu, jego granic oraz jednostki funkcjonalnej [34, 51, 76, 83, 141].



Rys. 4.3. Kluczowe etapy analizy LCA (opracowanie własne)

System obiektu technicznego jest rozumiany jako zespół wzajemnie powiązanych procesów jednostkowych, które łączą się poprzez przepływy materii i energii, prowadząc do powstania obiektu spełniającego określone funkcje. Procesy te obejmują strumienie wejściowe, takie jak surowce, wodę czy energię oraz strumienie wyjściowe, np. emisje zanieczyszczeń, które są następnie analizowane pod kątem ich wpływu na otoczenie (w tym m.in. na jakość środowiska i zdrowie człowieka). Wyznaczenie granic systemu pozwala określić obszar interakcji pomiędzy systemem obiektu technicznego energetyki odnawialnej a jego otoczeniem. Wymaga to zdefiniowania przedziału czasowego, obszaru geograficznego i zakresu technologicznego oraz ustalenia dokładności i kompletności danych zapewniających powtarzalność badań. W trakcie wyznaczania granic systemu konieczne jest zidentyfikowanie źródeł surowców oraz energii składających się na poszczególne procesy, co czyni szczegółowe określenie procesów jednostkowych kluczowym elementem całej analizy. Aby

odnieść dane wejścia i wyjścia systemu obiektu technicznego do uzyskanych wyników badań, definiuje się jednostkę funkcjonalną. Umożliwia ona porównywanie analizowanych obiektów lub procesów, musi zatem być mierzalna oraz precyzyjnie określona, aby zapewnić odpowiednią interpretację i jakość prowadzonych analiz [34, 51, 76, 83].

Drugi etap oceny cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej czyli analiza zbioru wejść i wyjść (LCI) (ang. *inventory analysis*), polega na zbieraniu danych oraz ich wstępnej ocenie. Obejmuje pozyskiwanie informacji niezbędnych do ilościowego określenia zasobów wejściowych i wyjściowych badanego obiektu. Zgromadzone dane stanowią podstawę do realizacji celów badawczych oraz opracowania modelu cyklu istnienia danego obiektu technicznego. W jego ramach przeprowadza się proces identyfikacji oraz kwantyfikacji danych wejściowych, obejmujących materiały i energię, a także danych wyjściowych, takich jak emisje czy odpady. Równocześnie prowadzona jest analiza wszystkich zebranych informacji w celu oceny ich wiarygodności, kompletności oraz dokładności, co zapewnia ich odpowiednią jakość i użyteczność w dalszych etapach analizy LCA [34, 51, 76, 84].

Trzeci etap oceny cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej czyli ocena wpływu (LCIA) (ang. *impact assessment*) obejmuje badanie jego potencjalnego wpływu na otoczenie za pomocą wybranych modeli analitycznych. Jego głównym celem jest możliwie precyzyjne określenie zależności między obiektem a skutkami, jakie wywiera na środowisko jego cykl istnienia. Z tego względu, kluczowy element LCA stanowi sklasyfikowanie i scharakteryzowanie emisji spowodowanych poszczególnymi etapami cyklu, a następnie powiązanie ich z efektami jakie mogą wywołać w odniesieniu do otoczenia. Wyniki są przedstawiane w postaci wskaźników kategorii, które stanowią ilościowe przedstawienie poszczególnych obszarów oddziaływania. W ramach tego etapu oceny realizowanych jest wiele czynności, które można podzielić na elementy obowiązkowe i opcjonalne, uwzględniające zarówno lokalne, regionalne, jak i globalne uwarunkowania. Działania te pomagają ustalić priorytety oraz hierarchię ocenianego wpływu. Do elementów obowiązkowych należą wybór kategorii wpływu, wskaźników kategorii i modeli charakteryzowania, przypisywanie wyników LCI do odpowiedniej kategorii (klasyfikacja) oraz obliczanie wartości wskaźnika kategorii (charakteryzowanie). Uzyskane wartości wskaźników tworzą pełny profil oddziaływania obiektu technicznego energetyki odnawialnej na otoczenie [34, 51, 76, 83, 124].

Dla obiektów technicznych OZE wyznaczanie wartości wskaźnika kategorii realizowane jest poprzez określenie poziomu wszystkich oddziaływań na otoczenie, a następnie ich przyporządkowanie do adekwatnej kategorii wpływu k i pomnożenie przez odpowiedni współczynnik charakteryzowania, co opisuje wzór:

$$S_{OZE_k} = \sum_i (CF_i \cdot E_{i_{OZE}}) [DALY \text{ lub } PDF \cdot m^2 \cdot \text{rok lub MJ}] \quad (4.1)$$

gdzie:

k – kategoria wpływu,

i – oddziaływanie środowiskowe obiektu technicznego energetyki odnawialnej,
 E_{iOZE} – elementarne przepływy dla obiektu technicznego energetyki odnawialnej, sklasyfikowane w ramach kategorii wpływu,
 CF_i – współczynnik charakteryzowania,
 S_{OZE_k} – wielkość oddziaływania na otoczenie obiektu technicznego energetyki odnawialnej dla danej kategorii wpływu [9, 76, 198].

Opcjonalne kroki, które można wykonać na etapie oceny wpływu (LCIA) to normalizowanie, grupowanie i ważenie. Normalizowanie umożliwia określenie udziału cyklu istnienia badanego obiektu technicznego w całkowitym stopniu oddziaływania na poszczególne kategorie wpływu na wcześniej przyjętym obszarze (np. kraj, świat) i w określonym czasie:

$$NF_{OZE_k} = \left(\frac{\sum_i CF_i \cdot E_{iOZE}}{P_r} \right) [\text{DALY lub PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rok lub MJ}] \quad (4.2)$$

gdzie:

P_r – całkowita populacja w danym regionie,
 E_{iOZE} – elementarne przepływy dla obiektu technicznego energetyki odnawialnej, sklasyfikowane w ramach kategorii wpływu [9, 76, 198].

Ważenie pozwala ustalić, która kategoria wpływu odgrywa kluczową rolę na danym obszarze pod względem skutków oddziaływania na otoczenie. Po zsumowaniu wszystkich wyników ważenia dla poszczególnych kategorii możliwe jest określenie wskaźnika środowiskowego, który obrazuje całkowite oddziaływanie badanego obiektu technicznego energetyki odnawialnej na otoczenie:

$$S_{OZE} = \sum_k w_k \cdot S_k \quad (4.3)$$

gdzie:

w_k – współczynnik ważenia szkód c ,
 S_k – znormalizowany wynik kategorii szkody [9, 76, 198].

Podczas oceny wpływu (LCIA) obiektów technicznych, ostatni krok stanowi grupowanie, które polega na przyporządkowaniu kategorii wpływu do określonych grup według zasad sprecyzowanych w celu i zakresie analizy, np. w zależności od obszaru emisji lub skali przestrzennej [34, 51, 83].

Zgodnie z rysunkiem 4.3 czwartym i zarazem ostatnim etapem oceny LCA jest interpretacja rezultatów badań. W tej fazie dokonuje się przeglądu i podsumowania zebranych wyników analiz, które obejmują dane wejściowe i wyjściowe cyklu istnienia rozważanego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Zostają również sformułowane wnioski, wskazujące na stopień i charakter oddziaływania badanego obiektu technicznego na otoczenie. Interpretacja wyników pozwala zatem na identyfikację obszarów o najwyższym

poziomie negatywnego i pozytywnego wpływu, jak również ocenę uzyskanych informacji. Na tej podstawie można określić rekomendacje, zalecenia, sposoby sterowania obiektem w kierunku w redukcji jego niepożądanego oddziaływania na otoczenie [13, 51, 76, 95, 96, 97].

Prawidłowa realizacja wymienionych powyżej etapów oceny wpływu cyklu istnienia obiektu technicznego na otoczenie, wymaga nie tylko szczegółowej wiedzy, ale także dogłębnego zrozumienia relacji między nimi a środowiskiem. Aby rzetelnie przeprowadzić tego rodzaju analizy, stosuje się specjalistyczne oprogramowania komputerowe, np. SimaPro. Jest to zaawansowane narzędzie umożliwiające modelowanie i analizowanie skomplikowanych cykli istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej przy użyciu wielu różnych modeli badawczych, dopasowanych do specyfiki ocenianego obszaru [9, 34, 83, 197].

Proces zbierania danych w ramach analiz LCA musi odbywać się zgodnie z międzynarodowymi standardami ISO 14040-14044. Wszystkie zgromadzone informacje należy dokładnie przeanalizować przed rozpoczęciem analizy LCA, aby zapewnić wiarygodność uzyskanych wyników [34, 76].

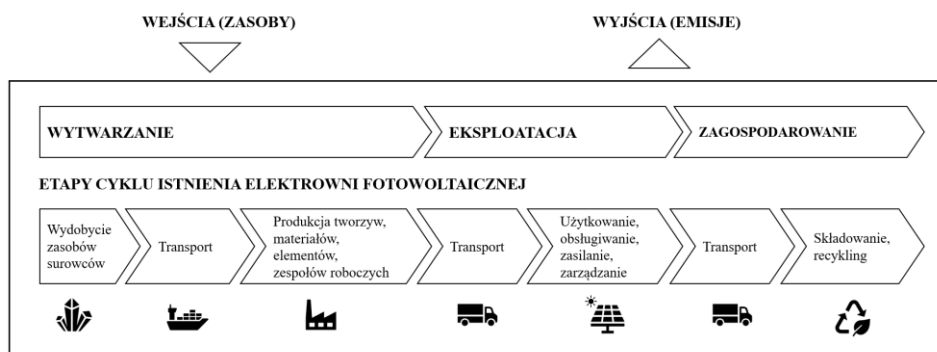
4.3.2. Określenie celu i zakresu analizy

Cele analizy cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej są definiowane jeszcze przed rozpoczęciem samej oceny, ponieważ kolejne etapy badań oraz sformułowane wnioski zależą od wcześniej przyjętych celów analiz. Przekładają się one bezpośrednio na precyzję oceny LCA oraz określenie jakości i ilości danych wymaganych do rzetelnego przeprowadzenia badania. Te ustalenia stanowią podstawę do wytyczenia zakresu pracy, obejmującego granice systemu, jednostkę funkcjonalną, oceniane kategorie oddziaływań, wymagania dotyczące jakości danych oraz interpretację wyników. Porównanie wyników oceny odmiennych elektrowni fotowoltaicznych wymaga ustalenia jednolitej jednostki funkcjonalnej oraz wspólnych granic systemu. Jednak przed przystąpieniem do wymienionych czynności, konieczne jest hierarchiczne zestawienie komponentów składowych elektrowni PV, z uwzględnieniem wszystkich tworzyw, materiałów, elementów, zespołów roboczych i procesów [9, 34, 76, 197].

Zasadniczym celem analiz realizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej było wskazanie, która z rozważanych elektrowni fotowoltaicznych, opartych na różnych rodzajach ogniw PV, wywiera najmniejszy destrukcyjny wpływ na otoczenie w całym cyklu istnienia oraz na jego poszczególnych etapach. Aby zrealizować przyjęte cele, opracowano autorskie podejście metodologiczne. Wykonane oceny cykli istnienia elektrowni pozwoliły nie tylko na porównanie poziomu ich oddziaływania na otoczenie, ale także na identyfikację etapów cyklu istnienia oraz zachodzących w nich procesów, generujących największe obciążenie dla środowiska. Dodatkowo analiza umożliwiła sformułowanie rekomendacji mających na celu sterowanie ich cyklami istnienia w kierunku minimalizacji negatywnego oddziaływania [62, 65, 256].

Istotnym założeniem prowadzonych analiz było zrozumienie charakteru wpływu na otoczenie elektrowni fotowoltaicznych opartych na ogniwach PV wykonanych w różnych technologiach, w perspektywie ich 25-letniej eksploatacji na obszarze Europy. Ocenie podlegały obiekty techniczne oparte na ogniwach monokrystalicznych, polikrystalicznych, amorficznych i perowskitowych wraz ze wszystkimi pozostałymi komponentami budującymi elektrownie fotowoltaiczne, czyli inwerterami, konstrukcjami wsporczymi, instalacjami elektrycznymi oraz transformatorami [107, 157].

Zakres zrealizowanej oceny obejmował cały materialny cykl istnienia elektrowni – od momentu wydobywania surowców aż po etap końcowego zagospodarowania użytkowego formie składowania lub recyklingu (rys. 4.4). Prowadzone analizy obejmowały procesy wytwarzania wszystkich elementów i zespołów roboczych wchodzących w skład rozważanych elektrowni, uwzględniając poziom zużycia tworzyw, materiałów, wody, energii elektrycznej oraz ciepłej. Podczas oceny etapu eksploatacji uwzględniono zapotrzebowanie na energię i materie niezbędne do realizacji zabiegów konserwacyjnych, czyszczenia paneli PV, napraw, itd. W metodologii badań ujęto również dwa scenariusze postępowania z tworzywami, materiałami, elementami i zespołami roboczymi nienadającymi się do dalszej eksploatacji, uwzględniając procesy związane z recyklingiem i składowaniem na wysypisku odpadów. W wielu badaniach naukowych pomijano etap eksploatacji fotowoltaicznych procesorów energii, ze względu na niski poziom negatywnych oddziaływań na otoczenie. Jednak w niniejszej pracy postanowiono go uwzględnić, aby zwiększyć dokładność uzyskanych wyników [3, 42, 68, 88, 146, 183, 224].



Rys. 4.4. Etapy cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej (opracowanie własne)

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej badanych elektrowni fotowoltaicznych koniecznym było zdefiniowanie parametru pozwalającego na dokonanie porównań, czyli tzw. jednostki funkcjonalnej, w odniesieniu do której zaprezentowano rezultaty oceny. W związku z tym, po uwzględnieniu wytycznych dotyczących formułowania takiego parametru, jako jednostkę funkcjonalną przyjęto 1 MW mocy zainstalowanej [60, 62].

4.3.3. Zasady analizy zbioru wejść i wyjść (LCA)

Analiza zbioru wejść i wyjść zrealizowana w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej opierała się na systematycznym zbieraniu, porządkowaniu i interpretowaniu danych dotyczących wszystkich wykorzystanych zasobów materialnych oraz energetycznych, jak również emisji generowanych w trakcie cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych. Dane inwentaryzacyjne bazowały przede wszystkim na informacjach pozyskanych od producentów oraz z bezpośrednich pomiarów przeprowadzonych w ramach procesów jednostkowych, w mniejszej ilości – z publikacji naukowych, baz danych i raportów z badań. Jakość oraz kompletność zebranych danych stanowią kluczowy element oceny wpływu obiektów technicznych na otoczenie. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO 14040, dane powinny uwzględniać takie aspekty jak obszar geograficzny i technologiczny, kompletność, przedział czasowy oraz umożliwiać odtwarzanie i powtarzalność metod wykorzystywanych podczas analiz. Proces gromadzenia oraz wartościowania danych powinien być realizowany w sposób iteracyjny. Oznacza to działania obejmujące pozyskiwanie danych, a następnie ich walidację poprzez wykonanie obliczeń i porównań z wynikami innych badań (jeżeli są dostępne), w celu zapewnienia maksymalnej wiarygodności oraz poprawności analiz. Proces ten wymaga zatem identyfikacji wszystkich procesów jednostkowych oraz związanych z nimi elementów wejściowych, które mają istotny wpływ na otoczenie. W normie ISO można znaleźć szczegółową procedurę gromadzenia danych, która obejmuje następujące kroki:

- a) szczegółowy opis poszczególnych procesów jednostkowych oraz określenie kategorii danych występujących w każdym z tych procesów;
- b) stworzenie diagramów ilustrujących procesy jednostkowe oraz ich wzajemne powiązania (jeśli zachodzą takie zależności);
- c) określenie metodologii zbierania danych;
- d) przygotowanie planu gromadzenia danych [76, 81, 82, 95, 96].

Powyższe działania umożliwiają systematyczne i kompleksowe przygotowanie danych, stanowiących fundament rzetelnej analizy oddziaływań elektrowni fotowoltaicznej na otoczenie. Proces zbierania informacji to najbardziej wymagający i pracochłonny etap analizy cyklu istnienia, ponieważ obejmuje pozyskiwanie zarówno danych jakościowych, jak i ilościowych dotyczących wszystkich procesów jednostkowych. Kluczowym jest pozyskanie wszystkich dostępnych informacji od momentu wydobycia surowców potrzebnych do produkcji poszczególnych komponentów elektrowni fotowoltaicznej, przez procesy ich wytwarzania i eksploatacji, aż po zagospodarowanie użytkowe. Precyzja w realizacji tego etapu niewątpliwie stanowi fundament poprawności wykonanej analizy LCA oraz wiarygodności uzyskanych wyników badań.

Dane zebrane podczas przygotowań do realizacji części badawczej niniejszej rozprawy doktorskiej (pozyskane od producentów, z pomiarów własnych, baz danych i literatury przedmiotu), wykorzystano do procesów obliczeniowych

zrealizowanych przy użyciu oprogramowania SimaPro, które wspomaga proces oceny oddziaływania badanego obiektu technicznego na otoczenie. Tworzenie bilansu materiałowo-energetycznego dla tak skomplikowanych obiektów technicznych jak elektrownie fotowoltaiczne, jest w praktyce bardzo trudnym zadaniem. Wynika to z ich złożonej budowy oraz bardzo licznych procesów zachodzących na poszczególnych etapach ich cyklu istnienia, zwłaszcza podczas wytwarzania i zagospodarowania poużytkowego w formie recyklingu.

Faza inwentaryzacji obejmowała cały materialny cykl istnienia każdej badanej elektrowni fotowoltaicznej i była rozpatrywana w następujących obszarach:

- a) procesy pozyskiwania surowców energetycznych i nieenergetycznych;
- b) procesy wytwarzania poszczególnych tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznej;
- c) procesy eksploatacji;
- d) procesy zagospodarowania poużytkowego dla dwóch scenariuszy – składowania i recyklingu.

W załącznikach do niniejszej rozprawy (tab. od Z.1 do Z.5) zaprezentowano uproszczone (ze względu na zawarte umowy poufności) tabele inwentaryzacyjne dla cykli istnienia rozważanych elektrowni fotowoltaicznych, z podziałem na podsystemy. Zestawione dane obejmują procesy produkcji krzemu, jego oczyszczenia, wytwarzania ogniw PV, a następnie paneli oraz produkcji innych komponentów (stacji inwerterowej, transformatora, instalacji elektrycznej, konstrukcji wsporczej), jak również procesy związane z eksploatacją tych obiektów technicznych. Ponadto uwzględniono transport materiałów i wykorzystane nośniki energii.

Proces wytwarzania modułu monokrystalicznego rozpoczyna się od pozyskania krzemu z piasku kwarcowego. Surowiec ten jest redukowany w specjalistycznych piecach w temperaturze dochodzącej do 2000°C, co prowadzi do otrzymania krzemu metalurgicznego. Następnie krzem poddawany jest procesowi oczyszczania, realizowanemu metodą Siemens. Polega ona na rozpuszczeniu krzemu w kwasie solnym w temperaturze ok. 300°C, a następnie destylacji otrzymanej cieczy i zmieszaniu jej z wodorem w temperaturze ok. 1100°C. W dalszym etapie wytwarzania stosuje się metodę Czochralskiego. Kluczowym elementem tej techniki jest zarodkowanie kryształu krzemu w tyglu utrzymywanym w temperaturze do 1410°C, z dodatkiem określonych substancji domieszkowych. Zapotrzebowanie na materię i energię na etapie wytwarzania modułu monokrystalicznego zestawiono w tabeli Z.1, zamieszczonej w załączniku do niniejszej pracy [75, 252].

Proces produkcji modułu polikrystalicznego odbywa się z wykorzystaniem metody odlewu, która opiera się na procesie topnienia oraz kontrolowanego krzepnięcia krzemu w tyglu. W efekcie powstaje jednolity blok krzemowy, który następnie poddawany jest precyzyjnemu cięciu na cienkie wafle. Dane materiałowe i energetyczne dla etapu wytwarzania modułu polikrystalicznego przedstawiono w tabeli Z.2 (załącznik do rozprawy) [104, 205].

Moduły amorficzne i perowskitowe wytwarzane są w niższych temperaturach oraz przy mniejszych nakładach finansowych w porównaniu do technologii mono- i polikrystalicznych. Krzem amorficzny uzyskuje się poprzez dekompozycję krzemowodoru w temperaturze poniżej 200°C, a następnie osadza się jego cienką warstwę na podłożu wykonanym z materiałów takich jak szkło, metal lub tworzywo polimerowe. Z kolei produkcja ogniw perowskitowych może opierać się na różnych technologiach, jednak na skalę przemysłową stosuje się dwie główne metody. Pierwsza z nich to technika „arkusz do arkusza” (ang. *sheet-to-sheet*), polegająca na osadzaniu warstwy materiału na sztywnej podstawie, a druga to metoda R2R (ang. *roll-to-roll*), która umożliwia osadzanie materiału na elastycznym podłożu. W obu przypadkach wszystkie warstwy składowe ogniwa perowskitowego, za wyjątkiem elektrod, są nanoszone za pomocą technik drukowania. Procesy te charakteryzują się mniejszym zużyciem surowców. Jednakże istotną barierą szerszego wykorzystania modułów opartych na ogniwach perowskitowych pozostaje obecność ołowiu w ich składzie, co skutkuje pracami nad ulepszaniem tej technologii. Kluczowym celem jest ograniczenie ich negatywnego wpływu na otoczenie. Zapotrzebowanie na materiały i energię na etapie wytwarzania modułu amorficznego i perowskitowego przybliżono w tabelach Z.3 i Z.4, stanowiących załączniki do pracy [23, 67, 87, 212].

Zestawienie materiałów i energii potrzebnych do wytworzenia pozostałych komponentów elektrowni fotowoltaicznych (stacja inwerterowa, transformator, konstrukcja wsporcza, instalacja elektryczna) zamieszczono w tabeli Z.5 (załącznik do rozprawy). Badane elektrownie, każda o mocy 1 MW, zostały zainstalowane na gruncie przy użyciu pionowych profili konstrukcyjnych, które zakotwiono na głębokość przekraczającą 1,5 metra. Przyjęto, że okres eksploatacji tych obiektów technicznych będzie wynosił około 25 lat. W trakcie użytkowania koniecznym będzie prowadzenie regularnych prac serwisowych (co najmniej dwa razy do roku), które obejmą kontrolę połączeń i instalacji elektrycznej. Dodatkowo, niezbędnym będzie także cykliczne czyszczenie modułów PV, skutkujące rocznym zużyciem ok. 20 kg wody na każdy metr kwadratowy powierzchni [3].

Nie jest możliwą rzetelną oceną wpływu elektrowni fotowoltaicznej na otoczenie bez uwzględnienia okresu po zakończeniu ich eksploatacji. W związku z tym, końcową fazę analizy LCA stanowiło modelowanie scenariuszy końca ich istnienia, oparte na dotychczasowym stanie wiedzy i techniki z zakresu zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów oraz zespołów roboczych tych obiektów technicznych. Przyjęto, że etap zagospodarowania rozpoczyna się po ok. 25 latach eksploatacji. Jak już wcześniej wspomniano, w Europie opracowano dyrektywę WEEE w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ang. *Waste Electrical and Electronic Equipment*), która określa udział producentów paneli fotowoltaicznych w finansowaniu działań związanych ze zbieraniem, transportem, przetwarzaniem, zarządzaniem i monitorowaniem urządzeń wycofanych z eksploatacji. W efekcie w Europie rozwijane są coraz nowsze metody recyklingu paneli, zwłaszcza tych

opartych na krzemie monokrystalicznym i polikrystalicznym. Szacuje się, że w tym przypadku odzysk materiałów może osiągać poziom około 96%. Szczególnie szkło, aluminium, krzem oraz przewody miedziane stanowią cenne surowce, które mogą być ponownie wykorzystane [45, 46, 145, 170, 223].

Współczesne technologie recyklingu modułów fotowoltaicznych obejmują różnorodne podejścia, wśród których dominują metody mechaniczne, chemiczne oraz hybrydowe, łączące elementy obu tych podejść. Proces recyklingu zazwyczaj rozpoczyna się od odzysku aluminiowej ramy i szkła, przy czym szacuje się, iż możliwym jest ponowne wykorzystanie około 90% szkła zawartego w panelach PV. Dzięki temu znacząco ogranicza się zapotrzebowanie na energię podczas etapu wytwarzania nowych elementów (nawet o 40%). Oprócz przetwarzania aluminium i szkła, inne procesy recyklingu paneli skoncentrowane są na odzysku półprzewodników oraz srebra, co umożliwia ich ponowne wykorzystanie. W przypadku paneli fotowoltaicznych drugiej i trzeciej generacji technologie recyklingu wciąż pozostają mniej rozwinięte względem obiektów opartych na ogniwach pierwszej generacji. Kluczowymi komponentami poddawanych ponownemu przetwarzaniu są szkło oraz aluminiowe ramy, które stanowią istotny udział w bilansie materiałowo-energetycznym. Pozostałe elementy elektrowni fotowoltaicznych, takie jak inwertery, konstrukcje wsporcze, transformatory czy instalacje elektryczne, są poddawane recyklingowi z wykorzystaniem lepiej poznanych technologii. Dzięki temu możliwe jest ich efektywne zagospodarowanie w sposób dopasowany do specyfiki poszczególnych materiałów i komponentów, przyczyniając się do poprawy efektywności ekologicznej całego obiektu technicznego [5, 182, 245].

4.3.4. Ocena wpływu cyklu istnienia (LCA)

Wraz z rozwojem metody LCA zaczęto opracowywać nowe procedury obliczeniowe, znane jako modele oceny wpływu cyklu istnienia (LCIA). Umożliwiają one ilościowe scharakteryzowanie oddziaływań badanych obiektów technicznych na otoczenie. Modele LCIA można podzielić na:

- modele skupiające się na identyfikacji poszczególnych rodzajów oddziaływań na otoczenie. Ich głównym zadaniem jest określenie poziomu zużycia surowców, generowanych odpadów oraz emisji na różnych etapach cyklu istnienia obiektu, jednak nie uwzględniają one związków przyczynowo-skutkowych;
- modele służące do analizy wpływu cyklu istnienia, mające na celu zobrazowanie związków przyczynowo-skutkowych zidentyfikowanych oddziaływań. Ich zasadnicze zadanie stanowi wyznaczenie wartości wpływu na środowisko, przy jednoczesnym określeniu rzeczywistych skutków występujących w ekosystemach [44, 199].

Modele LCIA różnią się zatem od siebie sposobem wartościowania oddziaływań na otoczenie. Powszechnie wykorzystuje się te oparte na zasadzie „odległości do celu” (ang. *distance-to-target models*), monetarne (ang. *monetary models*) oraz panelowe (ang. *panel models*). Pierwsze z nich polegają na

określaniu różnicy między oddziaływaniem obiektu technicznego na otoczenie a poziomem uznanym za akceptowalny (np. maksymalnym poziomem emisji danej substancji). Im dalej dany wpływ jest „od celu” (tj. im jest większy od wartości dopuszczalnej), tym wyższa jest przypisywana mu waga. Metody monetarne skupiają się na oszacowaniu kosztów finansowych, jakie społeczeństwo musiałoby ponieść, aby zredukować wpływ analizowanego obiektu na otoczenie lub naprawić wyrządzone szkody środowiskowe. Natomiast metody panelowe bazują na wynikach ankiet przeprowadzanych wśród naukowców, których zadaniem jest uszeregowanie lub ocena różnych oddziaływań na otoczenie na podstawie postrzegania przez nich ich znaczenia, a następnie przypisanie wartości liczbowych poszczególnym kategoriom oddziaływania (wyniki z panelu są wykorzystywane do określania współczynników ważenia) [44, 84, 106, 137].

Jednym z pierwszych modeli pozwalających na ocenę wpływu obiektu technicznego na środowisko był CML (nazwa pochodzi od Centrum Nauk o Środowisku – Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden). Umożliwiał on analizę oddziaływania z uwzględnieniem określonych kategorii wpływu (np. emisja gazów cieplarnianych, substancji o charakterze eutrofizującym czy zakwaszającym środowisko), jednak nie dawał możliwości wartościowania następstw dla otoczenia, co mogłoby zostać osiągnięte poprzez zastosowanie odpowiednich współczynników wagowych. W odpowiedzi na te ograniczenia opracowano model EPS (ang. *Environmental Priority Strategies*), w ramach którego kategorie wpływu na otoczenie zostały pogrupowane w pięciu obszarach oddziaływania: zdrowie ludzkie, zdolności produkcyjne ekosystemów (m.in. wpływ na rośliny, zwierzęta, zasoby wody), zasoby abiotyczne (surowców mineralnych i paliw kopalnych), bioróżnorodność (wpływ na stopień zaniku gatunków) oraz wartości społeczne i rekreacyjne (np. wpływ na krajobraz). Rozwój kolejnych modeli odegrał kluczową rolę w bardziej kompleksowym podejściu do oceny oddziaływania obiektów technicznych na otoczenie. Zaczęły one uwzględniać pełną agregację na poziomie szkód powodowanych w środowisku, umożliwiając dokładniejsze określenie wpływu obiektów na zdrowie człowieka, jakoś ekosystemów i wyczerpywanie zasobów surowców. Wraz z rozwojem metodologii LCA opracowywano nowe modele obliczeniowe, w których rozszerzano punkty środkowe kategorii (ang. *midpoint indicators*) o dodatkowe efekty oddziaływania na otoczenie, przyporządkowując je do odpowiednich kategorii szkód. W ten sposób powstał między innymi model ReCiPe, stanowiący kolejny kamień milowy w doskonaleniu oceny wpływu obiektów technicznych na środowisko [27, 44, 81, 106].

Większość istniejących modeli LCIA pozwala na zbadanie oddziaływania obiektów na otoczenie w perspektywie określonego obszaru, np. TRACI (USA), ReCiPe oraz IMPACT 2002+ (Europa), LIME (Japonia), LUCAS (Kanada). W odpowiedzi na rosnącą potrzebę stworzenia narzędzia do oceny wpływu na środowisko, które umożliwia analizę emisji oraz wykorzystania zasobów niezależnie od lokalizacji na świecie, a jednocześnie wykorzystującej

zaawansowane techniki modelowania, opracowano model IMPACT World+ [27, 44, 81, 106].

4.3.4.1. Model IMPACT World +

Model IMPACT World+ stanowi zaktualizowaną wersję metodologii IMPACT 2002+, LUCAS i EDIP, integrując różne podejścia w celu stworzenia systemu oceny zorientowanego na punkt środkowy kategorii. Uwzględnia on 27 kategorii wpływu, które są grupowane w dwa kluczowe obszary oddziaływania: zdrowie człowieka oraz jakość ekosystemów. Do każdej kategorii wpływu (punktu środkowego) przyporządkowany jest współczynnik, który umożliwia przeliczenie ilości emitowanych związków chemicznych na równoważne ilości substancji odniesienia. Dzięki temu podejściu możliwe jest opracowanie kompleksowego profilu obciążenia środowiska. Model klasyfikuje wszystkie kategorie oddziaływań na szkody krótkoterminowe, występujące w okresie do 100 lat po emisji oraz szkody długoterminowe, zachodzące po upływie tego czasu. Analizy realizowane w ramach modelu IMPACT World+ koncentrują się na ocenie globalnych potencjalnych szkód dla każdej kategorii wpływu, opierając się na uśrednionych wartościach całkowitych rocznych emisji antropogenicznych oraz poziomów eksploatacji zasobów naturalnych. Taka struktura umożliwia bardziej precyzyjną ocenę wpływu cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej na środowisko [20, 90, 105, 106, 118, 197].

Wartość oddziaływania na otoczenie w punkcie środkowym oznaczonym jako I^k , czyli dla określonej kategorii wpływu, jest wyrażana jako suma interakcji wywołanych przez elementarne przepływy oraz emisje występujące w cyklu istnienia danego obiektu technicznego. Obliczenia wymagają uwzględnienia wartości współczynnika charakteryzowania CF^{sk} , który przypisany jest każdemu elementarnemu przepływowi s i odpowiadającej mu kategorii wpływu k . Wartość ta jest następnie mnożona przez parametr M_i^s , reprezentujący ilościową miarę przepływu elementarnego s , ustaloną na podstawie wyników inwentaryzacji cyklu istnienia:

$$I^k = \sum_s \sum_i CF_i^{sk} M_i^s \quad (4.4)$$

Współczynnik charakteryzowania CF^{sk} dla kategorii oddziaływań k i dla elementarnego przepływu s emitowanego do otoczenia, jest wyrażony jako macierz współczynnika losu (FF), współczynnika nasilenia (SF), współczynnika narażenia (XF) i współczynnika narażenia-reakcji (ERF):

$$\overrightarrow{CF^{sk}} = \overrightarrow{SF^{sk}} \cdot \overrightarrow{ERF^{sk}} \cdot \overrightarrow{XF^{sk}} \cdot \overrightarrow{FF^{sk}} \quad (4.5)$$

Z kolei wskaźnik normalizowania NF^{AOP} wyraża względny udział określonej jednostki funkcjonalnej w całkowitej szkodzie dla otoczenia w danej kategorii wpływu, na poziomie globalnym, umieszczając oddziaływanie wybranej jednostki funkcjonalnej w perspektywie całkowitych globalnych wpływów:

$$NF^{AOP} = \frac{\sum_{k \in AOP} I^k_{world\ annual}}{N_{world\ pop}} = \frac{S^{AOP}_{world\ annual}}{N_{world\ pop}} \quad (4.6)$$

gdzie:

$S^{AOP}_{world\ annual}$ – wartość oddziaływania wynikająca z poziomu całkowitej emisji danej substancji na świecie w ciągu jednego roku,
 $N_{world\ pop}$ – światowa populacja [20, 43, 90, 105, 106, 117, 241].

4.3.4.2. Model IPCC

Do najniebezpieczniejszych gazów pogłębiających efekt cieplarniany zlicza się m.in. CO₂, N₂O, CH₄ i CFCs. Istotnym aspektem w ocenie wpływu na środowisko jest określenie czasu ich przebywania w atmosferze. W niniejszej rozprawie wykorzystano model IPCC (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming Potential*), oparty na wskaźniku globalnego potencjału ocieplenia, czyli GWP (ang. *Global Warming Potential*). Model ten został opracowany przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu. Wartością referencyjną dla oceny potencjału tworzenia efektu cieplarnianego jest ditlenek węgla IV (CO₂), dlatego otrzymane wyniki są prezentowane w kg CO₂ eq (kilogramach równoważnika CO₂). W ramach zrealizowanych badań przyjęto stuletni okres wpływu poszczególnych związków na efekt cieplarniany. Zastosowanie modelu IPCC 2021 umożliwiło dokonanie oceny oddziaływania na otoczenie w ramach trzech kategorii wpływu: emisja gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych, wykorzystywaniem surowców biogenych oraz przekształceniem gruntów [41, 1179, 195].

Dla systemu fotowoltaicznego równoważne obciążenie dla otoczenia, które określa globalny potencjał tworzenia się efektu cieplarnianego w całym cyklu istnienia można przedstawić za pomocą poniższego równania:

$$\Omega_{GWPPV} = \sum_{i=1}^m GWP_i O_{iPV} \quad (4.7)$$

gdzie:

GWP_i – równoważnik i-tej substancji w odniesieniu do ditlenku węgla (IV) [kg CO₂ eq],

O_{iPV} – masa i-tej substancji emitowana do otoczenia przez system fotowoltaiczny [kg] [41, 179, 195].

Natomiast równoważnik poszczególnych obciążeń względem efektu cieplarnianego GWP_{iPV} jest określony wzorem:

$$GWP_{jPV} = \frac{\int_0^t \alpha_{iPV} c_{iPV}(t) dt}{\int_0^t \alpha_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (4.8)$$

gdzie:

- a_{iPV} – gęstość energii promieniowania i-tej substancji [$W \cdot (m^2 \cdot kg)^{-1}$],
- c_{iPV} – zmiana stężenia i-tej substancji w czasie [$kg \cdot m^{-3}$],
- α_{CO_2} – gęstość energii promieniowania CO_2 [$W \cdot (m^2 \cdot kg)^{-1}$],
- c_{CO_2} – zmiany stężenia CO_2 w czasie [$kg \cdot m^{-3}$],
- t – rozpatrywany horyzont czasowy oddziaływania [lata] [41, 179, 195].

4.3.4.3. Model CED

Ostatnim modelem wykorzystanym podczas analiz cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznych był CED (ang. *Cumulative Energy Demand*), pozwalający na ilościowe określenie wartości skumulowanego zapotrzebowania na energię. Umożliwia on obliczenie ilości energii pierwotnej zużywanej podczas całego cyklu istnienia, z uwzględnieniem energii niezbędnej do wydobywania surowców, wykorzystywanej w procesach wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych. Otrzymywane wyniki wyrażane są w jednostkach energii – megadżulach (MJ) lub megawatogodzinach (MWh). W ramach prowadzonych badań dokonano analizy wszystkich kategorii wpływu charakterystycznych dla modelu CED czyli trzech obejmujących źródła nieodnawialne (energia jądrowa, paliwa kopalniane, nieodnawialna biomasa) oraz trzech odnawialnych (odnawialna biomasa, energia wody oraz sumarycznie energia słoneczna, wiatru i geotermalna). Skumulowane zapotrzebowanie na energię w ramach modelu CED można opisać za pomocą podanego poniżej równania [61, 194]:

$$CED_{PV} = \sum_{i=1}^m A_i \cdot CF_i \quad (4.9)$$

gdzie:

- A_i – ilość paliwa/energii zużytych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej [kg lub m^3],
- CF_i – współczynnik charakteryzujący rodzaj paliwa/energii [MJ/kg lub MJ/m^3] [61, 194].

4.3.5. Analiza Monte Carlo

Optymalizacja jako dziedzina matematyki umożliwia poszukiwanie najlepszego rozwiązania (minimum lub maksimum) pewnej funkcji celu. W życiu codziennym w celu poszukiwania najlepszego rozwiązania zadań praktycznych, wykorzystuje się zdobyte doświadczenie, na bazie prób i błędów. Jest to proces kosztowny i często długotrwały, dlatego bardziej efektywne wydaje się

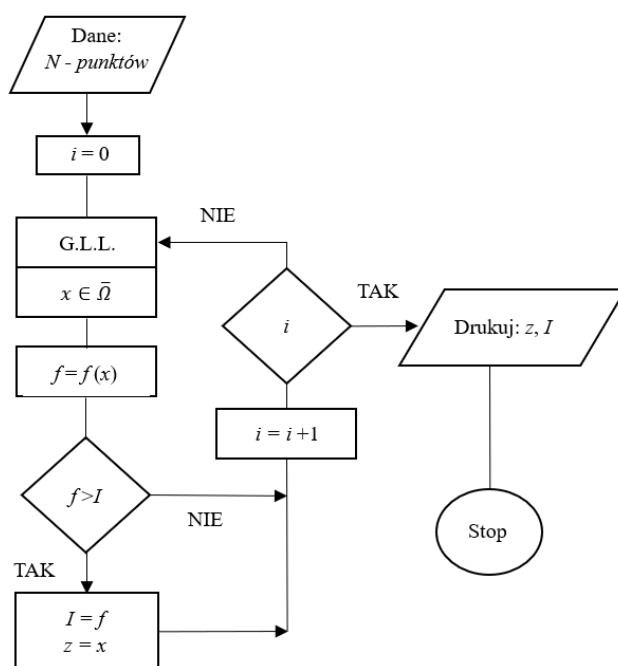
wykorzystanie metod optymalizacji ukształtowanych już wcześniej. Metody te umożliwiają analityczne lub numeryczne znalezienie rozwiązań optymalnych, bez rozpatrywania wszystkich możliwych rozwiązań. Punkt wyjścia powinno zatem stanowić zdefiniowanie w sposób matematyczny problemu optymalizacji, zbioru poszukiwań oraz funkcji celu (całkowity zysk lub wskaźnik jakości). Poszukiwanie rozwiązań optymalnych związane jest zarówno z opracowaniem modelu matematycznego, sformułowaniem funkcji celu (m.in. kryterium jakości i optymalizacji, funkcjonału jakości, itp.), jak i ze znalezieniem optymalnego rozwiązania z wykorzystaniem jednej ze znanych metod optymalizacji [103, 134, 243].

W analizowanym obszarze często znajduje się nie tylko minimum (maksimum) globalne ale również minima (maksima) lokalne, w których funkcja przyjmuje odpowiednio (większą) mniejszą wartość w stosunku do rozwiązań globalnych. Ta sytuacja utrudnia poszukiwanie prawidłowego minimum (maksimum) globalnego. Dlatego aby odnaleźć minimum globalne dla funkcji celu, w której znajduje się wiele minimów lokalnych, wykorzystuje się metody niedeterministyczne (znalezienie minimum globalnego poprzez zastosowanie metod deterministycznych może być bardzo trudne, a niekiedy nawet niemożliwe). Szczególnie w problemach inżynierskich, funkcja celu często przyjmuje skomplikowaną postać z licznymi minimami lokalnym, dlatego znalezienie minimum globalnego jest zazwyczaj utrudnione. Wykorzystywane są zatem metody niedeterministyczne, które stosują w swych założeniach czynnik losowy, który umożliwia wyznaczenie minimum globalnego [103, 134, 222, 243].

Jedną z metod niedeterministycznych jest metoda Monte Carlo, która wykorzystuje do rozwiązywania złożonych problemów rachunek prawdopodobieństwa i analizę statystyczną. Metoda ta opiera się na poszukiwaniu optymalnego punktu x_0 funkcji $F(x) \in C(\bar{\Omega})$, gdzie $\bar{\Omega} \in E^n$ jest obszarem ograniczonym na podstawie generowania realizacji x zmiennej losowej X o zadanym rozkładzie w obszarze Ω i zakodowaniu najlepszego rozwiązania w wyniku porównywania wartości funkcji $F(x)$. Na rysunku 4.5 przedstawiono schemat blokowy algorytmu określenia maksymalnej wartości funkcji $F(x)$ z wykorzystaniem generatora liczb losowych (G.L.L.) [103, 134, 135, 222, 243].

Zwykle generator liczb losowych losuje liczby z przedziału $[0, 1]$, więc aby uzyskać generator liczb losowych w przedziale $[a, b]$, należy przeskalować liczbę $x \in [0, 1]$ zgodnie ze wzorem $y = a + (b - a)x$, co implikuje, że $y \in [a, b]$, jeśli konieczne jest wylosowanie wektora np. $(y_1, y_2) \in [a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$, to ważne jest wylosowanie dwóch liczb, jednej z przedziału $[a_1, b_1]$, a drugiej z przedziału $[a_2, b_2]$ i na tej podstawie utworzenie wektora. Jeśli $X \subset [a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$ to dowolny zbiór, wtedy najprostszym sposobem postępowania jest losowanie $(y_1, y_2) \in [a_1, b_1] \times [a_2, b_2]$ i sprawdzenie czy $(y_1, y_2) \in X$, jeżeli nie należy do X , konieczne jest powtórzenie losowania. Przyjmuje się, że prawdopodobieństwo trafienia w X w trakcie losowania jest równe ilorazowi pola X przez $(b_1 - a_1)(b_2 - a_2)$ [103, 134, 243].

Biorąc pod uwagę specyfikę metody oceny cyklu istnienia (LCA) i metody Monte Carlo opracowano specjalną metodę Monte Carlo LCA, która skutecznie rozwiązuje problem niepewności w ramach metody LCA w ocenie oddziaływania na otoczenie obiektów technicznych energetyki odnawialnej, zapewniając przy tym naukową i racjonalną podstawę podejmowania decyzji. Analizę tę zazwyczaj wykonuje się z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro. W pierwszym kroku należy ocenić niepewność danych z wykorzystaniem wskaźnika jakości danych DQI (ang. *Data Quality Indicators*), uwzględniającego pięć kryteriów: precyzję pomiarów, geograficzne źródło pochodzenia, reprezentatywność próby i technologii oraz wiek danych. Otrzymane wyniki rozkładu są danymi wejściowymi do drugiego etapu jakim jest probabilistyczne oszacowanie niepewności kluczowych kryteriów oddziaływania z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Na tej podstawie otrzymuje się kategorie oddziaływania o największej niepewności oraz cechujące się nią dane wejściowe. Dzięki symulacji Monte Carlo można uzyskać np. informacje o średniej arytmetycznej, wariancji, odchyleniu standardowym i współczynniku zmienności dla wyników kluczowych kategorii wpływu na otoczenie [103, 134, 243].



Rys. 4.5. Schemat blokowy algorytmu wyznaczania maksymalnej wartości funkcji F z wykorzystaniem generatora liczb losowych (G.L.L.). Opracowanie własne na podstawie [135]

Najważniejsze rezultaty analizy Monte Carlo dla cykli istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych zamieszczono w podrozdziale 5.7.

4.3.6. Reguły interpretacji uzyskanych wyników

Celem fazy interpretacji w ramach metody LCA jest identyfikacja etapów lub procesów w cyklu istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej, w których możliwym jest sterowanie w kierunku ograniczenia ich destrukcyjnego i/lub zwiększenia konstruktywnego oddziaływania na otoczenie. Obejmuje ona także szczegółową analizę oraz ocenę obciążeń wywieranych przez dany obiekt na środowisko. Proces interpretacji pozwala nie tylko ocenić wyniki analiz, ale także sformułować wnioski, wskazać ograniczenia prowadzonych badań i określić zalecenia, które mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności (energetycznej, ekonomicznej, ekologicznej) rozważanego obiektu technicznego. Powinna być ona przeprowadzana w sposób systematyczny, uwzględniając pozostałe fazy oceny cyklu istnienia. LCA określana jest mianem techniki iteracyjnej ze względu na jej charakter polegający na cyklicznej weryfikacji wprowadzanych danych i otrzymywanych wyników. Na każdym etapie analiz konieczna jest bieżąca ocena uzyskanych rezultatów. W przypadku wykrycia błędów lub nieścisłości, proces badawczy wymaga cofnięcia się do wcześniejszego etapu celem wprowadzenia stosownych korekt, co minimalizuje ryzyko wystąpienia nieprawidłowości. Ponadto, interpretacja obejmuje kompleksową analizę wpływu na otoczenie każdego etapu cyklu istnienia badanego obiektu technicznego, ocenę oddziaływania wszystkich jego tworzyw, materiałów, elementów, zespołów roboczych oraz szczegółową analizę generowanych emisji. Działania te mają umożliwić pełne zrozumienie charakteru wpływu obiektu na środowisko oraz identyfikację obszarów wymagających sterowania [34, 52, 96].

W normie ISO 14040 przybliżono trzy kluczowe elementy interpretacji wyników badań:

- identyfikacja istotnych problemów na podstawie inwentaryzacji danych i oceny charakteru oddziaływania obiektu technicznego na otoczenie;
- ocena wyników z uwzględnieniem sprawdzenia jakości wprowadzanych danych, ich kompletności, dokładności i zgodności z innymi, wcześniej przeprowadzonymi analizami (jeżeli takie istnieją);
- zaproponowanie zaleceń oraz sporządzenie raportu końcowego zawierającego istotne kwestie związane z wpływem cyklu istnienia obiektu na otoczenie [6, 51, 102].

Podczas identyfikacji kluczowych zagadnień dotyczących oddziaływania badanego obiektu technicznego energetyki odnawialnej na otoczenie należy uwzględnić najistotniejsze czynniki występujące w każdej kategorii wpływu (zastosowane procesy i surowce). W oparciu o zdefiniowaną granicę systemu, wartości oddziaływania cechujące te elementy można przypisać do określonej fazy lub całego cyklu istnienia obiektu [6, 51, 102].

Uzyskane wyniki badań są oceniane zgodnie z zasadami określonymi w normie ISO, co wymaga weryfikacji ich kompletności, dokładności oraz zgodności wszystkich procesów jednostkowych lub etapów cyklu istnienia obiektu technicznego z wcześniej założonym celem, zakresem analizy oraz

przyjętą metodologią. Kompletność można sprawdzić wykorzystując analizę równań bilansowych surowców i energii opisujących oceniany obiekt [141, 189].

W ostatniej fazie interpretacji opracowuje się raport zawierający wyniki przeprowadzonej analizy oraz formułuje wnioski wraz z zaleceniami, które stanowią podstawę do podejmowania decyzji mających na celu sterowanie cyklem istnienia obiektu technicznego energetyki odnawialnej w kierunku poprawy efektywności energetycznej, ekonomicznej i/lub ekologicznej. Realizacja tych założeń staje się możliwa dzięki udoskonaleniu bądź modyfikacji poszczególnych procesów w ramach określonych etapów cyklu istnienia danego obiektu. Obejmuje to między innymi dokonanie zmian w technikach wytwarzania tworzyw, materiałów, elementów, zespołów roboczych oraz minimalizację zużycia surowców i energii na pozostałych etapach cyklu istnienia, jak również wdrożenie bardziej efektywnych metod zagospodarowania poużytkowego odpadów powstających po wycofaniu obiektu technicznego z eksploatacji [82, 217, 233].

W ramach prowadzonych badań etap interpretacji opierał się na identyfikacji kluczowych destrukcyjnych i konstruktywnych oddziaływań badanych elektrowni fotowoltaicznych na otoczenie. Przeprowadzano ocenę rzeczonych wpływów, zweryfikowano kompletność, spójność oraz precyzję uzyskanych wyników, a następnie sformułowano wnioski i zalecenia w obszarze sterowania cyklami istnienia rozważanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

5. ZASTOSOWANIE PROCEDURY NA PRZYKŁADZIE WYBRANEGO OBIEKTU ENERGETYKI ODNAWIALNEJ

5.1. ELEKTROWNIA FOTOWOLTAICZNA OPARTA NA MODUŁACH MONOKRYSTALICZNYCH

5.1.1. Model IMPACT World+

5.1.1.1. Charakteryzowanie

Praktyczne zastosowanie zaproponowanej metodologii analiz rozpoczęto od dokonania oceny oddziaływania na otoczenie elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych. Miała ona na celu umożliwienie sterowania jej cyklem istnienia pod kątem zwiększenia efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, dążenia do bardziej zrównoważonej konstrukcji, wprowadzenia głównych zasad gospodarki w obiegu zamkniętym oraz obniżenia destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie, w tym na jakość środowiska i zdrowie człowieka. W przeprowadzonych analizach uwzględniono nie tylko cały obiekt techniczny, ale również pięć głównych grup elementów konstrukcyjnych: panele fotowoltaiczne, stację inwerterową, konstrukcję wsporczą, stację transformatorową i instalację elektryczną. Rozpatrywano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów – składowanie na wysypisku odpadów oraz recykling.

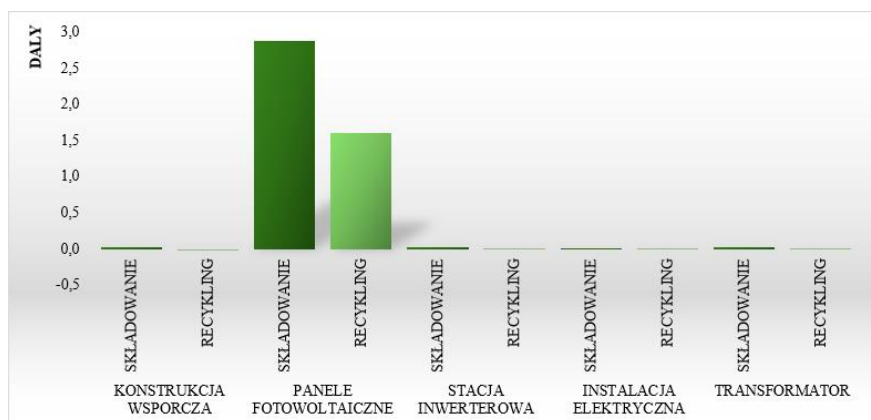
W pierwszym etapie analiz wykorzystano model IMPACT World+, którego istotę szczegółowo opisano w rozdziale 4.3.4. Ocenie poddano dwadzieścia siedem kategorii wpływu oraz dwa obszary oddziaływania (zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu). Rezultaty charakteryzowania następstw środowiskowych dla zdrowia ludzkiego przedstawiono w jednostce DALY (ang. *Disability Adjusted Life Years*), a dla jakości ekosystemu – z wykorzystaniem jednostki gatunek/rok. Miara DALY została opracowana przez Światową Organizację Zdrowia (ONZ) i Bank Światowy. Umożliwia ona oszacowanie wzrostu stopnia zachorowalności, zwiększenia liczby osób dotkniętych niepełnosprawnością oraz spadku średniej długości życia. DALY stanowi sumę czasu przeżytego w niepełnosprawności z liczbą utraconych lat życia na skutek przedwczesnej śmierci, spowodowanych oddziaływaniem cyklu istnienia badanego obiektu technicznego. Z kolei do oceny wpływu na jakość ekosystemu wykorzystano wielkość gatunek/rok. Wskaźnik ten określa prawdopodobieństwo nie pojawienia się lub zaniku na określonym obszarze danych gatunków roślin lub zwierząt w wyniku oddziaływania analizowanego obiektu. Jest zatem jednostką opisującą zmniejszenie bioróżnorodności [81, 114].

W tabeli Z.9 (załącznik do rozprawy) zaprezentowano wyniki charakteryzowania prognozowanych następstw dla otoczenia powstałych w wyniku cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach

monokrystalicznych. Najwięcej szkodliwych oddziaływań dla wszystkich rozważanych zespołów elementów konstrukcyjnych odnotowano w ramach kategorii wpływu obejmujących substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody, oddziaływujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemu (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). W przypadku wszystkich wymienionych kategorii najwyższym poziomem destrukcyjnego oddziaływania cechowały się panele fotowoltaiczne, dla których formę zagospodarowania poużytkowego stanowiłoby składowanie na wysypisku odpadów. Zastosowanie procesów recyklingu spowodowałoby znaczące zmniejszenie niekorzystnego wpływu na otoczenie wszystkich zespołów elementów konstrukcyjnych badanej elektrowni fotowoltaicznej (paneli fotowoltaicznych, stacji inwerterowej, konstrukcji wsporczej, stacji transformatorowej i instalacji elektrycznej). Na podstawie danych zawartych w tabeli Z.9 podjęto decyzję o szerszym omówieniu dwóch kategorii wpływu o najwyższym szkodliwym oddziaływaniu w obszarze zdrowia człowieka (procesy wpływające na dostępność wody i emisja substancji powodujących zmiany klimatu) oraz dwóch – w zakresie obniżania jakości środowiska (emisja substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych i emisja substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów).

Na rysunku 5.1 zaprezentowano wyniki charakteryzowania następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych. Otrzymane rezultaty analiz zestawiono oddzielnie dla dwóch scenariuszy zagospodarowania poużytkowego – składowania na wysypisku odpadów oraz zastosowania procesów recyklingu. Najwyższym poziomem niekorzystnego oddziaływania w ocenianym zakresie charakteryzował się cykl istnienia paneli PV (składowanie: $2,88 \cdot 10^0$ DALY, recykling: $1,61 \cdot 10^0$ DALY), z kolei najniższym – instalacji elektrycznej (składowanie: $1,24 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $2,34 \cdot 10^{-3}$ DALY). Procesy wytwarzania monokrystalicznych paneli fotowoltaicznych, oparte na metodzie Czochralskiego, należą do najbardziej energo- i materiałochłonnych w cyklu istnienia całego rozważanego obiektu technicznego. Instalacja elektryczna cechuje się natomiast najmniejszym udziałem procentowym w masie całej elektrowni (niecałe 2%). Wśród procesów związanych ze zmniejszeniem dostępności wody w cyklu istnienia analizowanego obiektu technicznego można wyróżnić przede wszystkim zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (podczas wytwarzania energii elektrycznej). Ograniczenie dostępności do wody stanowi współcześnie jeden z najpoważniejszych globalnych problemów zdrowotnych, gospodarczych i środowiskowych. Społeczeństwa wykorzystują dostępne zasoby

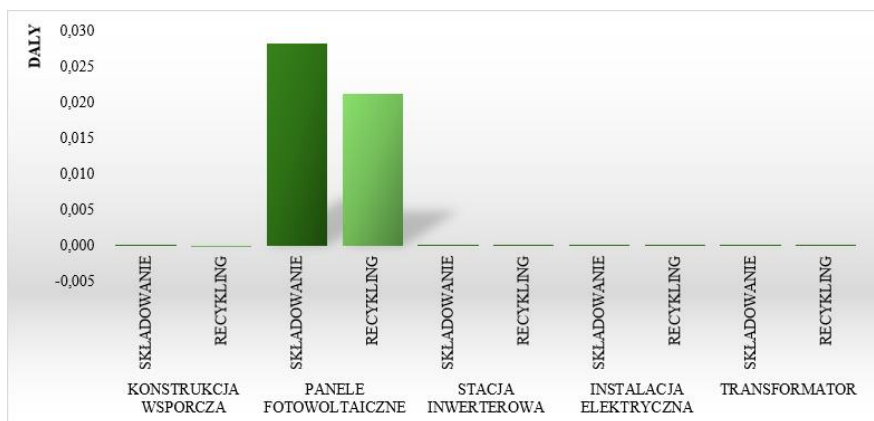
wodne w niezrównoważony, nadmierny sposób oraz odwadniają niezwykle duże powierzchnie gruntów (np. podczas budowy kopalni). Obecnie pobór wody jest większy niż przyrost jej zasobów. Problemem jest również stałe obniżanie jej jakości na skutek skażenia powodowanego np. przez przemysł, transport, niską emisję, rolnictwo czy nieprawidłowo zabezpieczone lub nielegalne wysypiska odpadów. Średnie zużycie wody w krajach europejskich wynosi ok. 1200, w USA – ok. 2500, a w Etiopii – ok. 360 m³/rok (ze względu na trudną dostępność). Prawie 900 mln ludzi na świecie nie ma dostępu do wody nadającej się do picia. W krajach rozwijających się brak dostępu do czystej wody jest przyczyną ok. 80% chorób. Z tego względu koniecznym wydaje się zwrócenie szczególnej uwagi na problematykę zapotrzebowania na wodę we wszystkich procesach przemysłowych, również tych w cyklach istnienia elektrowni fotowoltaicznych (od wydobywania zasobów surowców do zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów konstrukcyjnych). Istotną kwestią staje się zatem sterowanie cyklem istnienia obiektów technicznych w kierunku zmniejszenia zapotrzebowania na wodę w wykorzystywanych procesach technologicznych [203].



Rys. 5.1. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

W przypadku kategorii wpływu obejmującej następstwa środowiskowe dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), ponownie najwyższe wartości negatywnego oddziaływania odnotowano w cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $2,82 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $2,13 \cdot 10^{-2}$ DALY), a najniższe – instalacji elektrycznej (składowanie: $8,39 \cdot 10^{-5}$ DALY, recykling: $4,40 \cdot 10^{-5}$ DALY). Wytwarzanie paneli PV wymaga bardzo dużych nakładów energetycznych, przy czym energia elektryczna do tego celu pochodzi głównie ze źródeł nieodnawialnych, stąd wysoki poziom emisji gazów cieplarnianych oraz

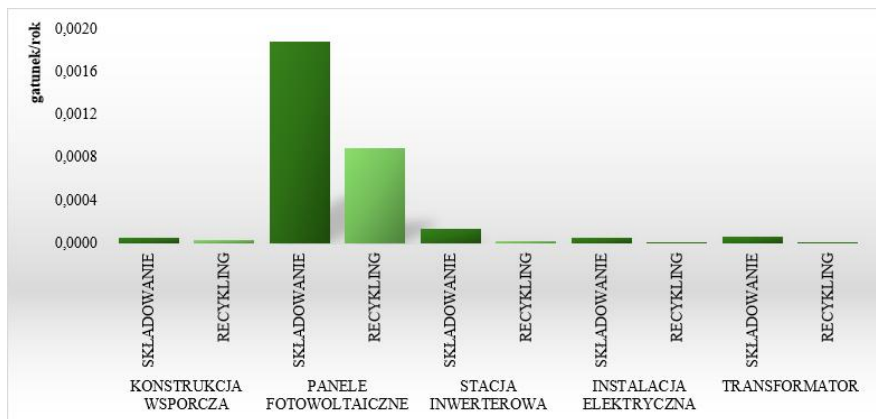
innych substancji wpływających na zmiany klimatu. Spośród związków chemicznych wpływających na zmiany klimatu, w cyklu istnienia ocenianej elektrowni najwyższymi wartościami destrukcyjnego wpływu charakteryzowały się emisje: ditlenku węgla, metanu, tlenku diazotu, heksafluorku siarki, tetrafluorometanu (CFC-14), heksafluoroetanu (HFC-116) oraz trifluorometanu (HFC-23). Ditlenek węgla jest produktem spalania oraz oddychania, dlatego stanowi kluczową część obiegu węgla w przyrodzie. Jego duże ilości zostają wyemitowane do otoczenia w energo- i materiałochłonnych procesach wytwarzania tworzyw, materiałów i elementów elektrowni. Zwiększenie koncentracji tej substancji w środowisku powoduje pogłębianie efektu cieplarnianego oraz wiele innych niebezpiecznych konsekwencji nie tylko dla zdrowia człowieka, ale również dla jakości ekosystemu. Jednak bez CO₂ życie na Ziemi nie byłoby możliwe. Problemem stanowi zatem nie samo istnienie ditlenku węgla, ale nadmierny wzrost jego stężenia w atmosferze, który współcześnie ma miejsce w coraz szybszym tempie. Z tego względu tak istotnym jest wprowadzenie działań sterujących, mających na celu obniżenie jego emisji w cyklu istnienia badanych obiektów technicznych (rys. 5.2) [126].



Rys. 5.2. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Maksymalnym poziomem szkodliwych oddziaływań w obszarze następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,89 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok, recykling: $8,94 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok), natomiast najniższym – instalacji elektrycznej (składowanie: $4,52 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $1,23 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok). Dla każdego z analizowanych elementów konstrukcyjnych elektrowni, zastosowanie procesów recyklingu w dużym stopniu skutkowałoby obniżeniem wartości destrukcyjnych wpływów na otoczenie. Wśród materiałów konstrukcyjnych

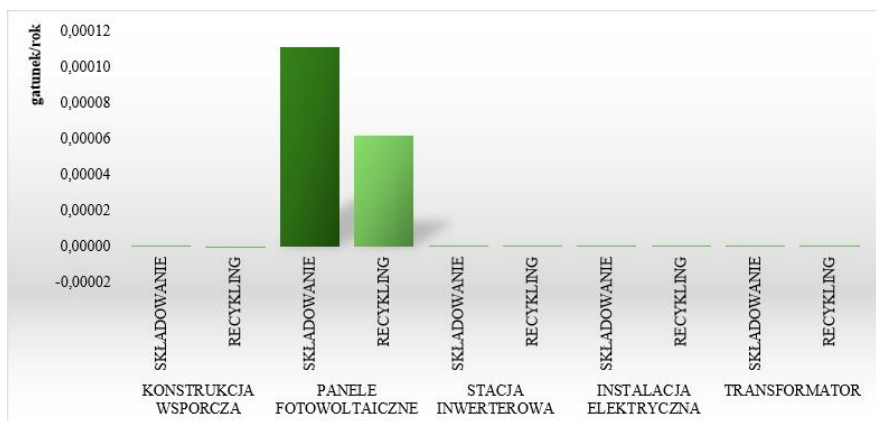
ocenianej elektrowni, których cykl istnienia najbardziej wpływa na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Miedź jest pierwiastkiem uczestniczącym w wielu reakcjach biochemicznych. Odgrywa niezwykle ważną rolę w procesie fotosyntezy oraz podczas tworzenia białek. Jednak eksploataowanie i przetwarzanie złóż rud miedzi (jak również innych metali), skutkuje wprowadzeniem do środowiska szeregu niebezpiecznych substancji (np. w efekcie zrzucania wód kopalnianych, ścieków z hut i zakładów wzbogacania, emisji pyłów, powstawania odpadów po flotacyjnych oraz hutniczych, itd.). Najwięcej szkodliwych emisji ma miejsce do środowiska wodnego (np. odcieki ze składowisk, spływy z gleb, zrzut ścieków, itd.). Z tego względu wyjątkowo istotnym działaniem jest zwiększanie poziomu recyklingu odpadów miedzianych. Recykling miedzi wyróżnia się wysokim poziomem energooszczędności i efektywności. Wymaga on ok. 85% mniejszego nakładu energii w porównaniu do produkcji pierwotnej. Miedź może być odzyskiwana wielokrotnie, gdyż przetwarzanie nie pogarsza jej jakości oraz właściwości użytkowych. Ze względu na dużą energochłonność procesów związanych z wytwarzaniem elementów miedzianych oraz ogromną ingerencję w środowisko związaną z procesami jej wydobycia i przetwarzania, pomimo, że procentowy udział miedzi w masie badanej elektrowni nie jest duży (ok. 2%), to jednak jej cykli istnienia ma wyraźny wpływ na zanieczyszczenie środowiska wodnego. Z tego powodu ważną kwestią staje się sterowanie cyklem istnienia obiektów technicznych w obszarze zmniejszenia zapotrzebowania na miedź (rys. 5.3) [73, 89].



Rys. 5.3. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

W zakresie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), znów największą wartością niekorzystnych wpływów

charakteryzował się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,11 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok, recykling: $6,20 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok), a najmniejszą – instalacji elektrycznej (składowanie: $1,96 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok, recykling: $9,71 \cdot 10^{-8}$ gatunku/rok). Jak już wcześniej wspomniano, cykl istnienia paneli PV wyróżnia się dużą energochłonnością, a energia potrzebna do realizacji tego rodzaju procesów pochodzi zazwyczaj ze źródeł konwencjonalnych. Do związków chemicznych występujących w cyklu istnienia rozpatrywanej elektrowni, które powodują najwięcej niebezpiecznych oddziaływań w obszarze zmian klimatycznych, można zaliczyć: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Metan jest gazem cieplarnianym stanowiącym istotne zagrożenie dla jakości ekosystemów oraz ludzkiego zdrowia. Przez pierwsze 20 lat przebywania w atmosferze, wpływ na klimat jednego kilograma CH_4 jest ok. 85 razy większy aniżeli tej samej masy CO_2 . Największe źródła metanu stanowią przemysł energetyczny (wykorzystujący kopalne źródła energii) i rolnictwo. Ograniczenie jego emisji możliwe jest m.in. poprzez odejście od paliw kopalnych czy zabezpieczenie nieczynnych szybów naftowych, gazowych oraz zamkniętych kopalni przed wyciekami. Procesy związane z wytwarzaniem i zagospodarowaniem materiałów oraz elementów elektrowni fotowoltaicznych, wymagające dużych nakładów energii i materii, cechują się szczególnie wysokim poziomem emisji metanu do otoczenia. W związku z powyższym, koniecznym staje się wprowadzenie działań naprawczych, w kierunku sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych w taki sposób, aby ograniczyć ich energo- i materiałochłonność (rys. 5.4) [152, 165].



Rys. 5.4. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

W tabeli 5.2. przedstawiono wyniki charakteryzowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na

modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego. Wpływ na zdrowie ludzkie zaprezentowano w jednostce DALY, z kolei na jakość ekosystemów – stosując miarę gatunek/rok. Maksymalny poziom negatywnych oddziaływań w obu obszarach charakteryzuje cykl istnienia monokrystalicznych paneli fotowoltaicznych, które po zakończeniu eksploatacji zostałyby składowane na wysypisku odpadów (zdrowie człowieka: $2,92 \cdot 10^0$ DALY, jakość ekosystemów: $2,09 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok). Zastosowanie procesów recyklingu pozwoliłoby na istotne ograniczenie destrukcyjnych wpływów na otoczenie w perspektywie całego cyklu istnienia zarówno w odniesieniu do tego (zdrowie człowieka: o ok. 44%, jakość ekosystemów: o ok. 52%), jak i pozostałych zespołów elementów badanego obiektu technicznego.

Tab. 5.1. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania użytkowego	Kategoria wpływu	
		Zdrowie człowieka [DALY]	Jakość ekosystemów [gatunek/rok]
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$5,48 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$-1,93 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$2,92 \cdot 10^0$	$2,09 \cdot 10^{-3}$
	recykling	$1,64 \cdot 10^0$	$1,01 \cdot 10^{-3}$
Stacja inwerterowa	składowanie	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$
	recykling	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
Instalacja elektryczna	składowanie	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$
Transformator	składowanie	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$9,99 \cdot 10^{-3}$	$9,33 \cdot 10^{-6}$

5.1.1.2. Normalizowanie

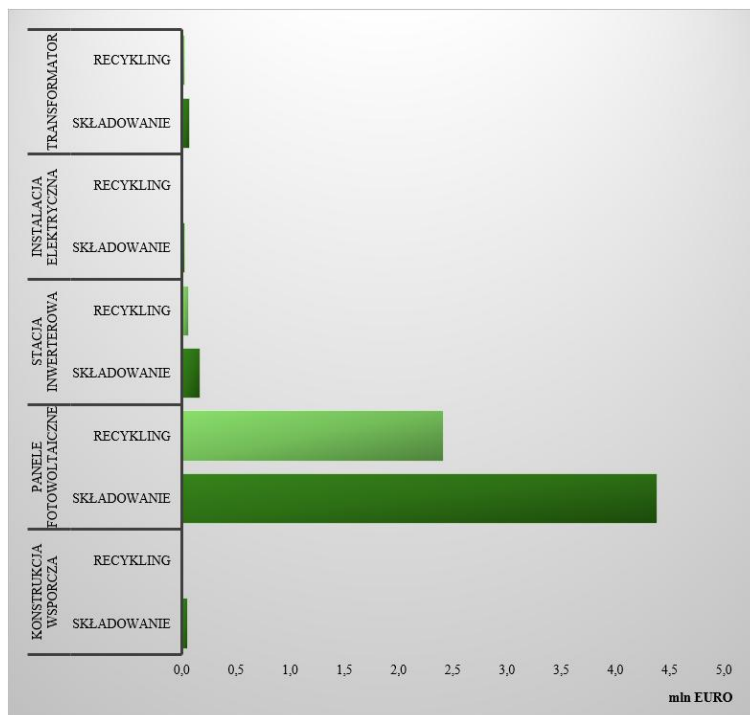
Normalizowanie stanowi narzędzie wykorzystywane do wyrażania wskaźników charakteryzowania, w taki sposób aby możliwym stało się porównanie poszczególnych kategorii wpływu. Polega ono na obliczaniu wielkości wyników wskaźnika kategorii względem informacji odniesienia. Dzięki temu zabiegowi można określić względne znaczenie wartości wskaźników odniesionych do danego obszaru (np. Europy) lub osoby (np. przeciętny Europejczyk) w przyjętym przedziale czasu. W ramach prowadzonych badań, normalizowanie pozwoliło na przygotowanie wyników LCIA do etapu grupowania i ważenia. W tabeli Z.10 (załącznik do rozprawy) przybliżono wyniki normalizowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia badanej elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego. Największą ilość negatywnych wpływów na otoczenie generował cykl istnienia paneli PV.

5.1.1.3. Grupowanie i ważenie

Wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz dwóch scenariuszy zagospodarowania użytkowego przedstawia tabela Z.11 (załącznik do rozprawy). Jednostką, w której zostały zaprezentowane wyniki jest euro (EUR, €), w związku z tym prognozowany poziom destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie wyznaczany jest na podstawie wielkości nakładów finansowych jakie należy ponieść w celu usuwania powstałych szkód w środowisku lub celem zapobiegania wystąpienia emisji substancji szkodliwych w danej kategorii oddziaływania. Wszystkie rozpatrywane grupy elementów konstrukcyjnych badanego obiektu technicznego charakteryzują się najwyższym poziomem negatywnego wpływu na otoczenie w następujących kategoriach: substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa krótko- i długoterminowa), substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). Spośród wymienionych kategorii, elementem konstrukcyjnym elektrowni wyróżniającym się najwyższym stopniem niekorzystnych oddziaływań na otoczenie są monokrystaliczne panele fotowoltaiczne (łącznie składowanie: $1,05 \cdot 10^7$ EUR, recykling: $5,80 \cdot 10^6$ EUR). Zastosowanie procesów recyklingu wyraźnie ogranicza koszty środowiskowe związane z cyklem istnienia analizowanego obiektu technicznego. Bazując na danych zawartych w tabeli Z.11 podjęto decyzję o scharakteryzowaniu trzech kategorii wpływu wyróżniających się najwyższym negatywnym oddziaływaniem, a mianowicie obejmujących procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz emisje substancji powodujących zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów.

Najwyższy poziom prognozowanych do poniesienia kosztów środowiskowych w obszarze procesów wpływających na dostępność wody oddziałujących na zdrowie człowieka, cechował cykl istnienia paneli PV (składowanie: $4,38 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $2,42 \cdot 10^6$ EUR), a najniższy – instalacji elektrycznej (składowanie: $2,50 \cdot 10^4$ EUR, recykling: $4,32 \cdot 10^3$ EUR). Współcześnie, wytwarzanie paneli monokrystalicznych nadal jest związane z koniecznością stosowania bardzo energo- i materiałochłonnych procesów, które generują szereg istotnych, negatywnych następstw środowiskowych zarówno w obszarze zdrowia człowieka, jak i jakości ekosystemów. Instalacja elektryczna jest zbudowana przede wszystkim z miedzi oraz tworzyw polimerowych, których cykl istnienia również generuje wiele szkodliwych oddziaływań na otoczenie, jednak jej udział procentowy w masie całej elektrowni jest najniższy (niecałe 2%).

Spośród procesów powodujących zmniejszenie dostępności wody w cyklu istnienia ocenianej elektrowni największe znaczenie ma zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (w trakcie wytwarzania energii) (rys. 5.5).

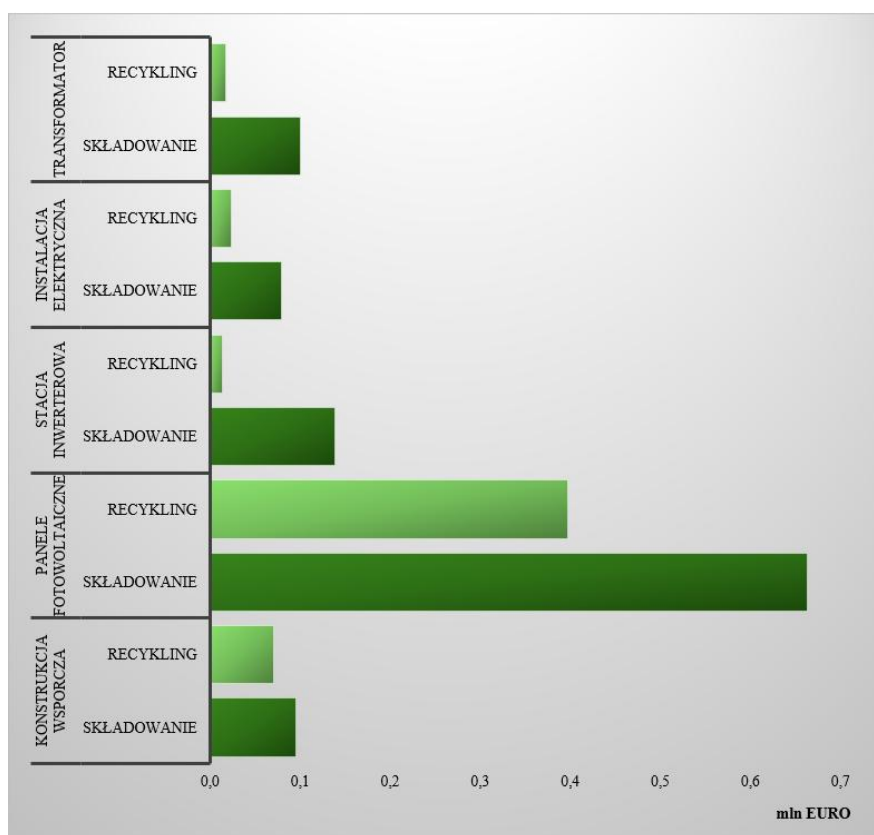


Rys. 5.5. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Woda pokrywa prawie 75% powierzchni Ziemi. Objętość hydrosfery jest szacowana na 1,4 mld km³, jednak woda słodka stanowi zaledwie ok. 3% tej wielkości. Zdecydowana jej większość występuje w postaci lodu (ok. 68%) oraz wód podziemnych (ok. 30%), zatem jest trudno dostępna. Z tego względu ludzie korzystają tylko z ok. 0,3% zasobów wody słodkiej. Rosnąca liczba światowej ludności wiąże się z coraz większym zapotrzebowaniem na wodę do przygotowania żywności, celów higienicznych i rolnictwa, ale również do produkcji przemysłowej oraz usług. Potrzeby te nie zawsze mogą zostać zaspokojone. Prawie 20% ludności świata, czyli ok. 1,2 mld osób, cierpi z powodu niewystarczającej dostępności wody, a kolejne 0,5 mld jest bliskie znalezienia się w tej sytuacji. Zagrożenie stanowi zarówno brak dostępu do wody, jak również możliwość korzystania tylko z wody o złej jakości, zawierającej np. bakterie chorobotwórcze, pestycydy, itp. Stąd też tak ważnym aspektem stało się zrównoważone gospodarowanie zasobami wody, również w cyklach istnienia

obiektów technicznych, stosowanie tworzyw i materiałów oraz procesów wymagających jak najmniejszego jej zużycia i opracowywanie nowych technologii pozwalających na zaoszczędzenie zasobów wodnych (rys. 5.5) [203].

W przypadku emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), ponownie najwyższe wartości kosztów środowiskowych charakteryzowały cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $6,63 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $3,97 \cdot 10^5$ EUR). Dla wszystkich analizowanych elementów konstrukcyjnych elektrowni, zagospodarowanie poużytkowe w formie recyklingu istotnie zmniejszało poziom niezbędnych do poniesienia kosztów w tym zakresie (konstrukcja wsporcza: o ok. 26%, stacja inwerterowa: o ok. 91%, instalacja elektryczna: o ok. 70%, transformator: o ok. 83%) (rys. 5.6).

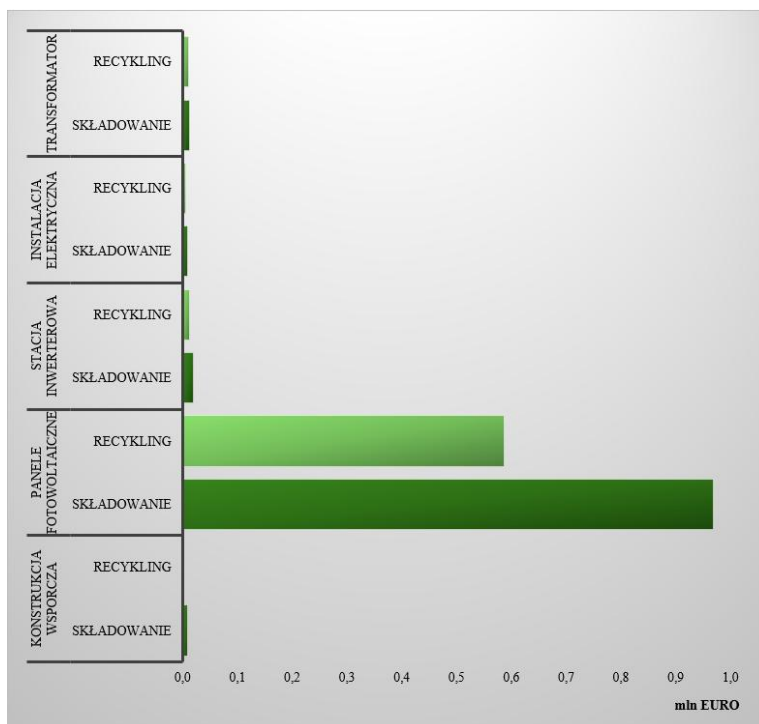


Rys. 5.6. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Do materiałów konstrukcyjnych, których cykl istnienia w największym stopniu wpływa na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można zaliczyć:

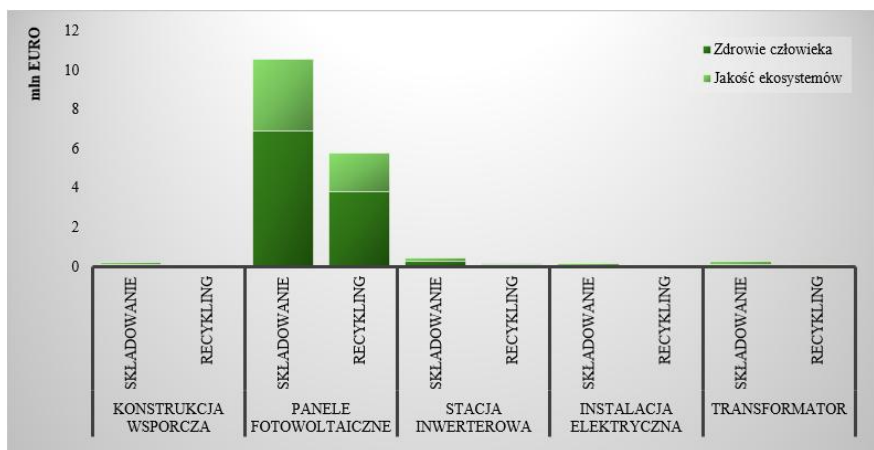
miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Aluminium jest lekkie, plastyczne, ciągliwe, niemagnetyczne, dobrze przewodzi prąd elektryczny, łatwo się utlenia i można je poddawać recyklingowi. Występuje w otoczeniu w różnych formach. Wzrost zanieczyszczenia środowiska spowodowany kwaśnymi opadami spowodował zwiększenie zawartości glinu w glebach i wodach. Obecność glinu przyczynia się do zahamowania wzrostu roślin w wyniku negatywnego oddziaływania na system korzeniowy oraz trudności w pobieraniu i kumulacji składników mineralnych. Jego podwyższona zawartość w organizmie ludzkim toksycznie wpływa m.in. na układ nerwowy, kostny i krwiotwórczy. Jest on pierwiastkiem reaktywnym tworzącym związki stałe, zatem niezbędnym jest dostarczenie dużych ilości energii (zwykle ze źródeł konwencjonalnych), aby z tlenku glinu pozyskać aluminium. Dla celów komercyjnych aluminium otrzymuje się poprzez elektrolizę tlenku glinu, który uzyskiwany jest z rudy (boksytu). Ze względu na specyfikę oraz energo- i materiałochłonność tych procesów, stanowią one źródło m.in. emisji substancji o działaniu ekotoksycznym, zmniejszających bioróżnorodność. Istotnym jest zatem wprowadzenie działań sterujących, mających na celu ograniczenie ich destrukcyjnego oddziaływania w cyklach istnienia obiektów technicznych (rys. 5.6) [253, 254].

W obszarze emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów, najwyższym poziomem niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $9,68 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $5,87 \cdot 10^5$ EUR), natomiast najniższym – instalacji elektrycznej (składowanie: $8,39 \cdot 10^3$ EUR, recykling: $4,54 \cdot 10^3$ EUR). Podczas wytwarzania paneli monokrystalicznych, koniecznym jest dostarczanie dużych ilości energii (najczęściej ze źródeł kopalnych). Wśród związków chemicznych występujących w cyklu istnienia analizowanej elektrowni, powodujących najwięcej niepożądanych wpływów w zakresie zmian klimatu, można wymienić: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Tlenek diazotu jest bezbarwnym gazem, bez smaku i zapachu, cechującym się działaniem drażniącym. W największych stężeniach występuje przede wszystkim w środowisku przemysłowym oraz miejskim, ponieważ jest to związek, który w największej ilości powstaje w efekcie działalności człowieka. Główne źródło jego emisji stanowią procesy spalania wymagające wysokiej temperatury i dostępu tlenu. N_2O jest jedną z bardziej niebezpiecznych substancji zanieczyszczających środowisko atmosferyczne. Wiele z reakcji fotochemicznych, w których bierze udział, przyczynia się nie tylko pogłębienia efektu cieplarnianego, ale również do tworzenia smogu czy powstawania „kwaśnych opadów”. W związku z powyższym, niezwykle istotnym problemem staje się takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, aby ograniczyć ich zapotrzebowanie na energię, w szczególności tą pochodzącą ze źródeł konwencjonalnych (rys. 5.7) [246].



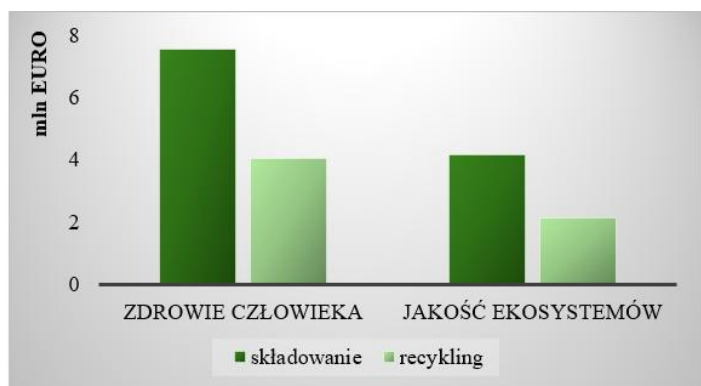
Rys. 5.7. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Na rysunku 5.8. przedstawiono sumaryczne oddziaływanie poszczególnych komponentów elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla dwóch obszarów oddziaływania (zdrowie ludzkie, jakość ekosystemu) oraz dwóch scenariuszy zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów (składowanie, recykling). Spośród wszystkich badanych zespołów elementów, monokrystaliczne panele fotowoltaiczne cechują się najbardziej destrukcyjnym wpływem na otoczenie (łącznie składowanie: $1,05 \cdot 10^7$ EUR, recykling: $5,80 \cdot 10^6$ EUR). W przypadku zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów, ich oddziaływanie na zdrowie człowieka stanowi ok. 67% całkowitego wpływu na otoczenie, natomiast dla recyklingu jest to ok. 59%. Drugi najwyższy poziom ponoszonych kosztów środowiskowych charakteryzuje stację inwerterową (łącznie składowanie: $4,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,51 \cdot 10^5$ EUR), której wpływ na zdrowie człowieka stanowi ok. 61% całkowitego oddziaływania dla zagospodarowania w formie składowania oraz ok. 71% – w formie recyklingu. W odniesieniu do pozostałych grup elementów – stacji transformatorowej, konstrukcji wsporczej oraz instalacji elektrycznej, procesy recyklingu istotnie obniżały udział destrukcyjnych oddziaływań w zakresie wpływu na zdrowie człowieka.



Rys. 5.8. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Cykl istnienia obiektu badań wywiera większy wpływ na pogorszenie zdrowia i jakości życia człowieka niż na degradację ekosystemów. Zastosowanie recyklingu jako sposobu zagospodarowania użytkowego może znacząco zmniejszyć oddziaływanie analizowanej elektrowni na otoczenie, redukując jej wpływ na zdrowie o ok. 54%, a na jakość ekosystemów o ok. 52%. Koniecznym staje się zatem wprowadzenie działań naprawczych mających na celu sterowanie cyklem istnienia elektrowni monokrystalicznej w kierunku obniżenia poziomu jej destrukcyjnego oddziaływania na zdrowie człowieka, szczególnie w obszarze cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

5.1.1.4. Model IPCC 2021

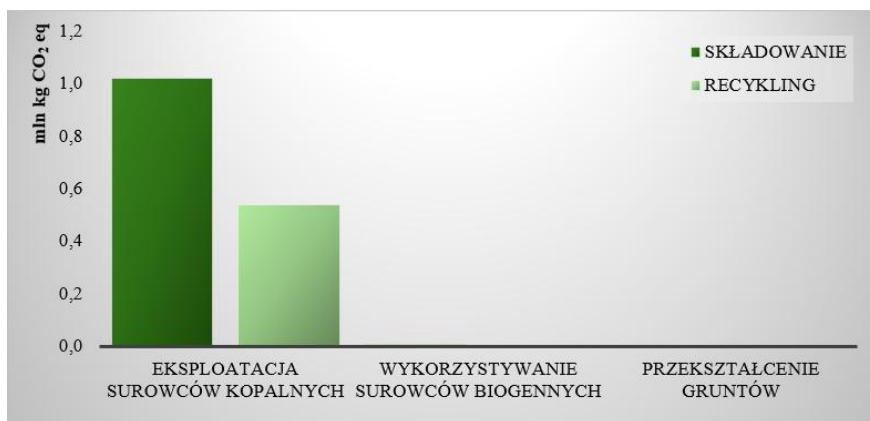
W celu pogłębienia analiz dotyczących wpływu cyklu istnienia badanych obiektów technicznych na otoczenie, podjęto decyzję o przeprowadzeniu badań pozwalających na określenie poziomu emisji gazów cieplarnianych. Do ich realizacji wykorzystano model IPCC 2021, opracowany specjalnie z myślą o tego rodzaju ocenach. Wyższy łączny poziom emisji gazów szklarniowych odnotowano dla cykli istnienia wszystkich badanych zespołów elementów konstrukcyjnych, zakładających zagospodarowanie użytkowe w formie składowania. Monokrystaliczne panele fotowoltaiczne charakteryzują się najwyższym poziomem destrukcyjnych emisji w porównaniu do pozostałych zespołów elementów (składowanie: $9,66 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $5,28 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). Proces ich wytwarzania wiąże się z dużymi nakładami energii, która jest pozyskiwana przede wszystkim ze źródeł konwencjonalnych. Najmniejszym wpływem na łączny poziom emisji gazów szklarniowych w cyklu istnienia rozpatrywanego obiektu technicznego charakteryzowała się instalacja elektryczna (składowanie: $8,57 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $1,68 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq) (tab. 5.2).

Tab. 5.2. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania użytkowego	Emisja gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z			RAZEM
		eksploatacją surowców kopalnych	wykorzystywaniem surowców biogennych	przekształceniem gruntów	
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$1,25 \cdot 10^4$	$2,72 \cdot 10^2$	$4,13 \cdot 10^1$	$1,29 \cdot 10^4$
	recykling	$-3,78 \cdot 10^2$	$8,59 \cdot 10^1$	$1,41 \cdot 10^1$	$-2,78 \cdot 10^2$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$9,60 \cdot 10^5$	$3,86 \cdot 10^3$	$1,86 \cdot 10^3$	$9,66 \cdot 10^5$
	recykling	$5,25 \cdot 10^5$	$2,12 \cdot 10^3$	$9,48 \cdot 10^2$	$5,28 \cdot 10^5$
Stacja inwerterowa	składowanie	$2,21 \cdot 10^4$	$4,38 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^1$	$2,26 \cdot 10^4$
	recykling	$6,43 \cdot 10^3$	$3,60 \cdot 10^1$	$9,15 \cdot 10^0$	$6,48 \cdot 10^3$
Instalacja elektryczna	składowanie	$8,35 \cdot 10^3$	$1,94 \cdot 10^2$	$3,15 \cdot 10^1$	$8,57 \cdot 10^3$
	recykling	$1,68 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^0$	$1,14 \cdot 10^0$	$1,68 \cdot 10^3$
Transformator	składowanie	$1,74 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^2$	$4,61 \cdot 10^1$	$1,78 \cdot 10^4$
	recykling	$5,81 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^1$	$1,06 \cdot 10^1$	$5,87 \cdot 10^3$

Podczas analiz dokonano oceny wielkości emisji GHG na skutek działań związanych z eksploatacją surowców kopalnych, wykorzystaniem surowców biogennych i przekształceniem gruntów. Najwyższy poziom emisji gazów cieplarnianych odnotowano jako konsekwencję procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (składowanie: $1,03 \cdot 10^6$ kg CO₂ eq, recykling: $5,42 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq), z kolei najniższy – w efekcie przekształcania gruntów (składowanie: $2,03 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $9,83 \cdot 10^2$ kg CO₂ eq). Zastosowanie procesów recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego pozwala w istotny sposób obniżyć łączny poziom emisji gazów szklarniowych w perspektywie całego cyklu istnienia ocenianego obiektu technicznego (łącznie

o ok. 53%). Zasadnym wydaje się zatem takie sterowanie cyklami istnienia elektrowni monokrystalicznych, które umożliwi zmniejszenie wielkości emisji GHG, szczególnie w przypadku paneli PV (rys. 5.10).



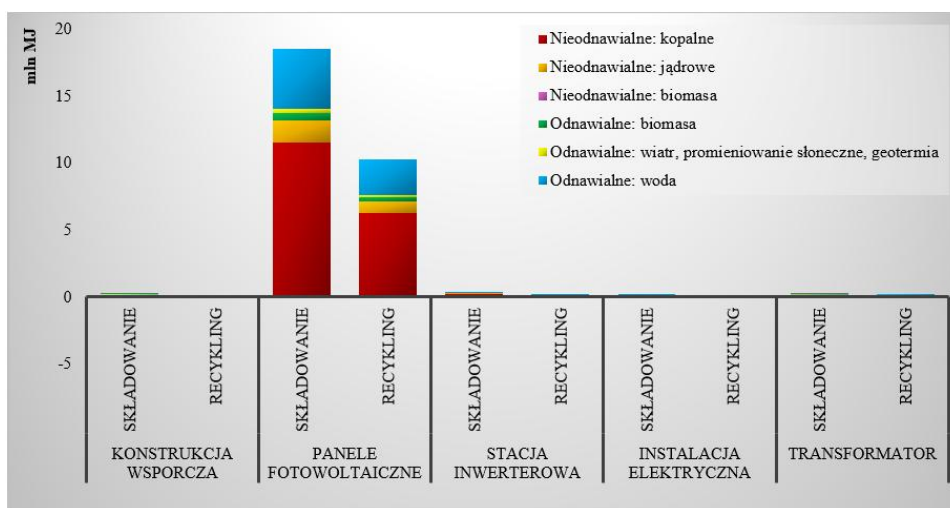
Rys. 5.10. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

5.1.1.5. Model CED

Trzecim modelem wykorzystanym do oceny cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych był CED. Określa on skumulowane zapotrzebowanie na energię wynikające z eksploatacji zasobów surowców, które są wykorzystywane w trakcie cyklu istnienia obiektów technicznych. Jego wartość wyrażana jest w MJ (lub MWh). W modelu CED zapotrzebowanie na energię jest określone dla trzech kategorii obejmujących źródła nieodnawialne (kopalne, jądrowe, biomasę) oraz trzech odnawialnych (biomasę, wiatr, promieniowanie słoneczne, geotermię, wodę). Energia zużywana w cyklach istnienia jest dzielona na różne kategorie wpływu, przede wszystkim według jej pochodzenia. Biomasa odnawialna, jest rozumiana jako energia pozyskiwana z organicznej materii, która ulega odnowieniu w perspektywie czasowej odpowiadającej długości życia człowieka. Do jej przykładów należą drewno z lasów zarządzanych w sposób zrównoważony czy odpady roślinne. Biomasa tego rodzaju nie prowadzi do trwałego wyczerpywania zasobów naturalnych, a jej charakterystyczną cechą jest często neutralność w kontekście emisji ditlenku węgla, wynikająca z równoważenia emisji pochłanianiem CO₂ podczas wzrostu roślin. Z kolei pojęcie biomasy nieodnawialnej odnosi się do materiałów organicznych, które są pozyskiwane w tempie przewyższającym ich zdolność do naturalnego odtworzenia. Przykładem tego zjawiska jest eksploatacja lasów pierwotnych bez podejmowania działań mających na celu ich regenerację, co prowadzi do trwałej redukcji zasobów ekosystemowych, takich jak

bioróżnorodność czy jakość gleby. Pomimo biologicznego pochodzenia, tego rodzaju biomasa w modelu CED jest traktowana jako zasób nieodnawialny.

Maksymalnym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,85 \cdot 10^7$ MJ, recykling: $1,03 \cdot 10^7$ MJ). Najwyższy procentowy udział miało w tym przypadku zapotrzebowanie na energię pochodzącą ze źródeł kopalnych (składowanie: ok. 65%, recykling: ok. 59%). Tak jak już wspomniano, etap wytwarzania paneli PV należy do niezwykle energo- i materiałochłonnych, co warunkuje wysokie wartości zapotrzebowania na energię w analizowanym obszarze. Z kolei najmniejszym zapotrzebowaniem cechowała się instalacja elektryczna (składowanie: $1,87 \cdot 10^5$ MJ, recykling: $5,47 \cdot 10^4$ MJ), dla której niezbędna ilość energii ze źródeł kopalnych w przypadku zagospodarowania w formie składowania wynosiła ok. 74% zapotrzebowania całkowitego, a w formie recyklingu – ok. 83% (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model CED, jednostka: mln MJ)

Obszarem, w ramach którego odnotowano najwyższe skumulowane zapotrzebowanie na energię była kategoria źródeł kopalnych (składowanie: $1,23 \cdot 10^7$ MJ, recykling: $6,59 \cdot 10^6$ MJ). Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego pozwoliłoby istotnie obniżyć poziom zapotrzebowania w perspektywie całego cyklu istnienia badanego obiektu technicznego (łącznie o ok. 54%). Niezbędnym staje się zatem wprowadzenie działań w zakresie sterowania cyklem istnienia elektrowni monokrystalicznej w kierunku obniżenia jej skumulowanego zapotrzebowania na energię, szczególnie w obszarze cyklu istnienia monokrystalicznych paneli fotowoltaicznych (tab. 5.3).

Tab. 5.3. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

Lp.	Kategoria wpływu	Forma zagospodarowania poużytkowego	
		składowanie	recykling
1.	Nieodnawialne: kopalne	$1,23 \cdot 10^7$	$6,59 \cdot 10^6$
2.	Nieodnawialne: jądrowe	$1,80 \cdot 10^6$	$8,89 \cdot 10^5$
3.	Nieodnawialne: biomasa	$9,65 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^2$
4.	Odnawialne: biomasa	$5,33 \cdot 10^5$	$2,84 \cdot 10^5$
5.	Odnawialne: wiatr, promieniowanie słoneczne, geotermia	$3,53 \cdot 10^5$	$1,46 \cdot 10^5$
6.	Odnawialne: woda	$4,68 \cdot 10^6$	$2,71 \cdot 10^6$
RAZEM		$1,96 \cdot 10^7$	$1,06 \cdot 10^7$

5.2. ELEKTROWNIE FOTOWOLTAICZNE OPARTE NA MODUŁACH POLIKRYSTALICZNYCH

5.2.1. Model IMPACT World+

5.2.1.1. Charakteryzowanie

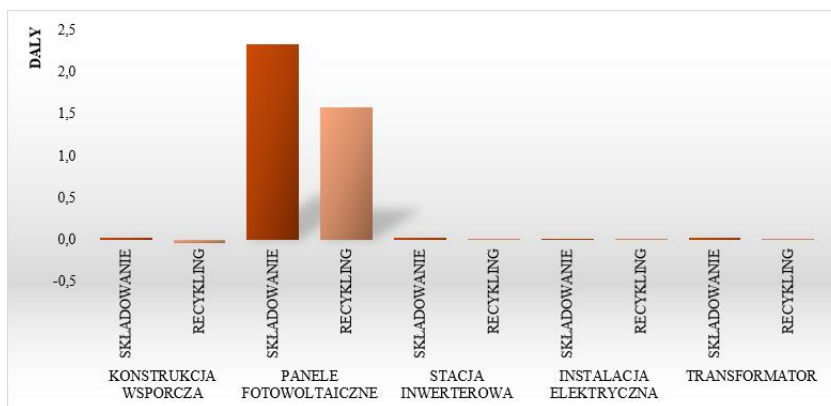
Drugi etap praktycznego zastosowania zaproponowanej metodologii analiz obejmował przeprowadzenie oceny potencjalnego oddziaływania na otoczenie cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych. Ponownie podczas badań uwzględniono zarówno cały obiekt techniczny, jak i pięć głównych grup jego elementów konstrukcyjnych (panele fotowoltaiczne, stację inwerterową, konstrukcję wsporczą, stację transformatorową i instalację elektryczną). Analogicznie jak w przypadku elektrowni monokrystalicznej, wzięto pod uwagę dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów – składowanie na wysypisku odpadów oraz procesy recyklingu. W pierwszym kroku również został wykorzystany model IMPACT World+, w ramach którego przeanalizowano wszystkie dwadzieścia siedem kategorii wpływu oraz dwa obszary oddziaływania (zdrowie człowieka i jakość ekosystemu).

Wyniki charakteryzowania następstw środowiskowych zestawiono w tabeli Z.12 (załącznik do rozprawy). Najwyższym poziomem destrukcyjnych oddziaływań dla wszystkich badanych zespołów elementów konstrukcyjnych wyróżniały się kategorie wpływu obejmujące substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziaływujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemu (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). Dla wszystkich ww. kategorii, maksymalnymi wartościami szkodliwego oddziaływania cechowały się panele fotowoltaiczne, które po zakończeniu eksploatacji byłyby

składowane na wysypisku. Recykling jako forma zagospodarowania poużytkowego pozwala na istotne ograniczenie niepożądanego wpływu na otoczenie wszystkich elementów konstrukcyjnych badanego obiektu technicznego.

W dalszej części podrozdziału dokonano szerszej analizy dwóch kategorii wpływu charakteryzujących się największym poziomem niekorzystnego oddziaływania na zdrowie człowieka (procesy wpływające na dostępność wody i emisja substancji powodujących zmiany klimatu) oraz dwóch – w największym stopniu obniżających jakość środowiska (emisja substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych i substancji powodujących zmiany klimatu).

Tak jak w przypadku elektrowni monokrystalicznej, maksymalna wartość szkodliwego oddziaływania procesów wpływających na dostępność wody cechowała cykl istnienia paneli PV (składowanie: $2,34 \cdot 10^0$ DALY, recykling: $1,58 \cdot 10^0$ DALY), była ona jednak niższa od wspomnianego cyklu istnienia paneli monokrystalicznych (dla składowania o ok. 19%, natomiast w zakresie recyklingu – o ok. 2%). Najniższy poziom destrukcyjnego oddziaływania wyróżniał instalację elektryczną (składowanie: $1,45 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $2,73 \cdot 10^{-3}$ DALY), jednak był on wyższy o ok. 17% w przypadku składowania oraz o ok. 16% – dla recyklingu, w porównaniu do wpływu analogicznej instalacji w elektrowni monokrystalicznej. Było to spowodowane m.in. większą liczbą i powierzchnią paneli fotowoltaicznych budujących badaną elektrownię polikrystaliczną, które musiały zostać ze sobą połączone przewodami elektrycznymi (elektrownia monokrystaliczna: 2632 szt. o pow. 4896 m², elektrownia polikrystaliczna: 3572 szt. o pow. 5823 m²) (rys. 5.12).

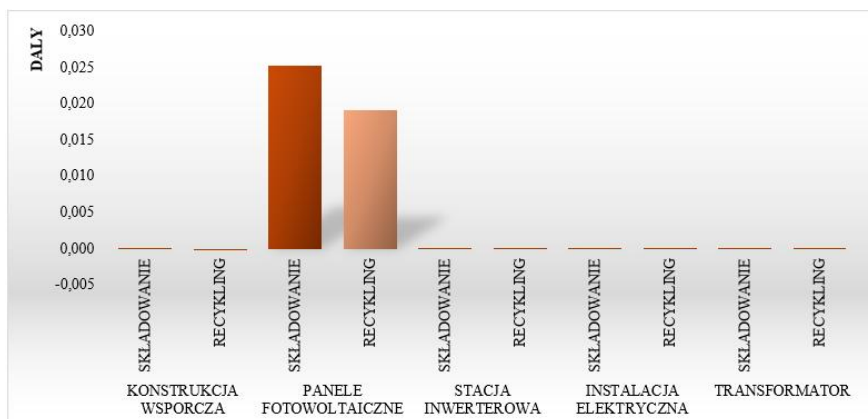


Rys. 5.12. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Spośród procesów wpływających na ograniczenie dostępności wody w cyklu istnienia rozważanego obiektu technicznego można wyróżnić zużywanie wody

pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (podczas wytwarzania energii elektrycznej). Stałe zwiększanie się liczby ludności, rozwój przemysłu oraz urbanizacja prowadzą do szeregu zmian klimatycznych, których jednym z efektów jest kurczenie się zasobów wody. Według prognoz do roku 2050 zapotrzebowanie na wodę wzrośnie o ok. 50%. Jej niedobór może istotnie odczuć ponad 40% ludności świata. Deficyt wody stanowi ogromny problem, wymagający odpowiedzialnych, skoordynowanych działań. Muszą być one podejmowane nie tylko na szczeblu państwowym, ale również w przedsiębiorstwach wytwarzających, eksploatujących oraz zagospodarowujących obiekty techniczne (rys. 5.12) [203].

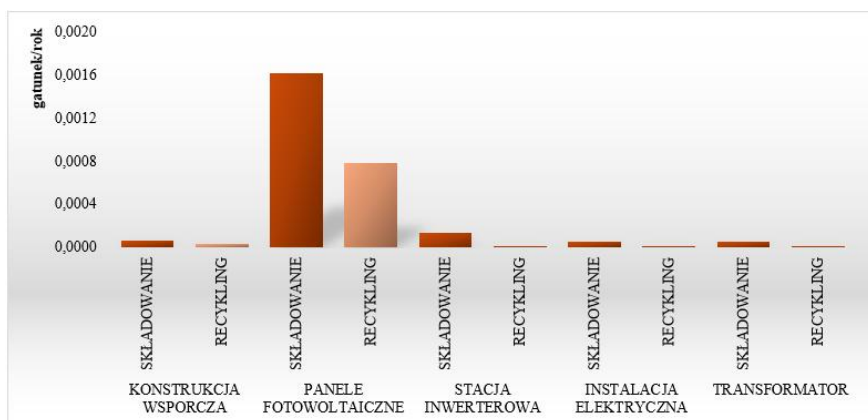
Również w przypadku emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na zdrowie człowieka, maksymalny ich poziom został odnotowany w cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $2,53 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $1,92 \cdot 10^{-2}$ DALY). W porównaniu do paneli monokrystalicznych był on niższy o ok. 11% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 10% – dla zagospodarowania z wykorzystaniem procesów recyklingu. Ponownie najniższymi wartościami szkodliwych emisji cechowała się instalacja elektryczna (składowanie: $1,04 \cdot 10^{-4}$ DALY, recykling: $5,15 \cdot 10^{-5}$ DALY). Porównując ich poziom do emisji w cyklu istnienia instalacji elektrowni monokrystalicznej, był on wyższy o ok. 24% w przypadku składowania oraz o ok. 17% – w przypadku recyklingu. Wytwarzanie paneli PV, również tych polikrystalicznych, wymaga istotnych nakładów energetycznych. Energia do tego celu jest pozyskiwana przede wszystkim ze źródeł nieodnawialnych, co w konsekwencji powoduje wysoki poziom emisji GHG i innych substancji pogłębiających zmiany klimatyczne. Wśród związków chemicznych, które wpływają na zmiany klimatu, w cyklu istnienia obiektu badań, największym poziomem niepożądanego oddziaływania cechowały się emisje: ditlenku węgla, metanu, tlenu diazotu, heksafluorku siarki, tetrafluorometanu (CFC-14), heksafluoroetanu (HFC-116) oraz trifluorometanu (HFC-23). Heksafluorek siarki jest bezbarwnym gazem, bez zapachu i smaku. Zalicza się go do fluorowanych gazów cieplarnianych (F- gazów), które ze względu na wysoką trwałość swoich cząsteczek bardzo długo przebywają w atmosferze, przyczyniając się do podwyższenia jej temperatury. Jest on współcześnie uznawany za najniebezpieczniejszy gaz cieplarniany (wg. IPCC), ponieważ cechuje go wartość współczynnika globalnego ocieplenia (GWP) równa 23900 (jeden kilogram SF_6 ma takie samo działanie jak 23900 kilogramów CO_2). Jest on również niezwykle trwały, ponieważ czas jego rozkładu w atmosferze określany jest na powyżej 800 lat. SF_6 jest emitowany praktycznie całkowicie ze źródeł pochodzenia antropogenicznego. W tej perspektywie, niezwykle istotnym staje się takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, które umożliwi ograniczenie energochłonności stosowanych w nich procesów technologicznych, szczególnie w zakresie wykorzystywania energii pochodzącej z paliw kopalnych (rys. 5.13) [30].



Rys. 5.13. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Najwyższą wartością destrukcyjnego wpływu w obszarze emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych charakteryzował się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,62 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok, recykling: $7,87 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Porównując poziom niepożądanego oddziaływania do cyklu istnienia paneli monokrystalicznych, był on niższy o ok. 14% dla składowania ich tworzyw, materiałów i elementów po zakończeniu eksploatacji oraz o ok. 12% w przypadku zastosowania procesów recyklingu. Z kolei najniższymi wartościami szkodliwych wpływów w badanym zakresie wyróżniała się instalacja elektryczna (składowanie: $5,28 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $1,43 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok). W odniesieniu do instalacji elektrowni monokrystalicznej, jej cykl istnienia zakładający składowanie na wysypisku generował o ok. 17% więcej negatywnych następstw dla środowiska, z kolei w przypadku recyklingu – o ok. 16%. Cykl istnienia każdego z badanych elementów konstrukcyjnych cechowałby się istotnie niższymi wartościami niekorzystnych oddziaływań na otoczenie, gdyby jako forma zagospodarowania poużytkowego zostałyby wybrane procesy recyklingu. Spośród materiałów konstrukcyjnych analizowanej elektrowni, które najbardziej wpływają na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wskazać: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Żelazo jest metalem ciężkim, trudnotopliwym, ciągliwym, o barwie białoszarej. Jest ono nie tylko głównym składnikiem stali, ale także pierwiastkiem, który miał kluczowy wpływ na rozwój życia na ziemi. Żelazo wchodzi w skład hemoglobiny, jest składnikiem enzymów biorących udział w fotosyntezie, oddychaniu komórkowym czy wiązaniu azotu atmosferycznego. Jednak w nadmiarze może być toksyczne, co jest ściśle związane ze zdolnością tego pierwiastka oraz jego związków do gromadzenia się w komórkach i tkankach organizmów żywych (bioakumulacja). Fe może niszczyć białka i materiał genetyczny, zwiększać ryzyko zawału serca oraz chorób

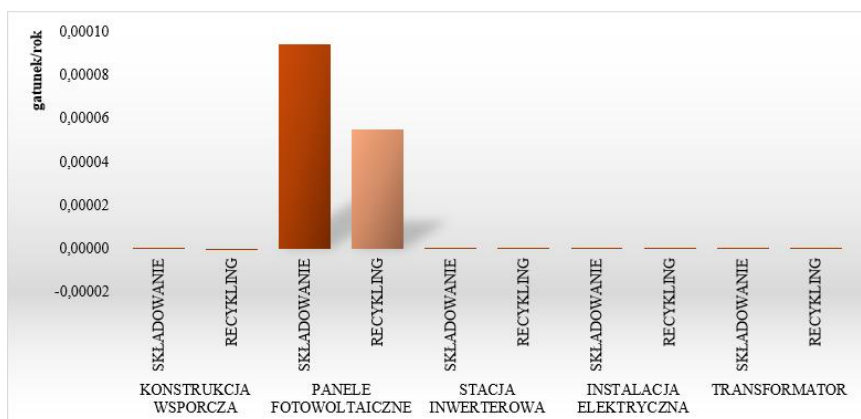
nowotworowych. W przypadku roślin może zaburzać syntezę chlorofilu, blokując ich wzrost i rozwój, a w konsekwencji – prowadząc do obumierania oraz zmniejszania bioróżnorodności na danym obszarze. Jego zwiększona koncentracja w atmosferze, hydrosferze i litosferze przede wszystkim stanowi wynik działalności przemysłowej np. procesów spalania paliw kopalnych, emisji zanieczyszczeń ze składowisk odpadów czy eksploatacji i wytopu rud oraz produkcji stali. Ważnym problemem staje się zatem sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych w taki sposób, aby ograniczyć wykorzystywanie żelaza i jego związków w procesach technologicznych oraz zwiększyć poziom recyklingu tworzyw, materiałów i elementów, które je zawierają (rys. 5.14) [73, 89].



Rys. 5.14. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

W przypadku emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), maksymalnym poziomem destrukcyjnych oddziaływań również wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $9,46 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $5,52 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok). Ze względu na mniejsze zapotrzebowanie na energię w procesach wytwarzania paneli polikrystalicznych, wartości ich szkodliwego wpływu w porównaniu do paneli monokrystalicznych były niższe o ok. 15% dla cyklu istnienia z zagospodarowaniem w formie składowania oraz o ok. 11% – dla recyklingu. Najmniejszym poziomem niepożądanego oddziaływania w badanym obszarze cechowała się instalacja elektryczna (składowanie: $2,29 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok, recykling: $1,14 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok). W odniesieniu do instalacji elektrowni monokrystalicznej, jej niekorzystny wpływ był wyższy o ok. 17% zarówno w przypadku składowania, jak i recyklingu tworzyw, materiałów oraz elementów nie nadających się do dalszej eksploatacji. Wśród związków chemicznych, które występują w cyklu istnienia obiektu badań

i powodują najwięcej destrukcyjnych oddziaływań w odniesieniu do zmian klimatu, można wyróżnić: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Tetrafluorometan stanowi organiczny związek chemiczny, złożony z węgla i fluoru (perfluorowana pochodna metanu). Jest zaliczany do grupy do gazów szklarniowych. Każdą cząsteczkę CF_4 cechuje ok. 6630 razy wyższy potencjał globalnego ocieplenia (GWP) w porównaniu do CO_2 . Perfluorowęglowodory są uznawane za jedne z najsilniejszych GHG. Długość ich czasu istnienia w atmosferze przekracza tysiąc lat, z tego powodu przyjmuje się, że ich emisje skutkują trwałymi zmianami klimatu. Podstawowe źródło CF_4 stanowi produkcja półprzewodników oraz hutnictwo aluminium, dlatego najwięcej negatywnych konsekwencji środowiskowych dla tego związku chemicznego odnotowano podczas produkcji tworzyw, materiałów i elementów badanego obiektu technicznego. Niezbędnym staje się zatem wprowadzenie działań sterujących, naprawczych w obszarze ograniczenia zapotrzebowania na energię (szczególnie ze źródeł nieodnawialnych) w cyklach istnienia obiektów technicznych (rys. 5.15) [121, 208].



Rys. 5.15. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Najwyższe wartości niekorzystnych wpływów zarówno na zdrowie człowieka, jak i jakość ekosystemów cechuje zatem cykl istnienia monokrystalicznych paneli fotowoltaicznych, dla których formą zagospodarowania poużytkowego byłoby składowanie na wysypisku odpadów (zdrowie człowieka: $2,38 \cdot 10^0$ DALY, jakość ekosystemów: $1,80 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok). W porównaniu do paneli monokrystalicznych, ich poziom szkodliwego oddziaływania na otoczenie był niższy o ok. 19% w obszarze zdrowia człowieka oraz o ok. 14% w zakresie jakości ekosystemów. Zastosowanie procesów recyklingu w cyklach istnienia wszystkich elementów elektrowni

polikrystalicznej umożliwiłoby istotne zmniejszenie łącznych niepożądanych wpływów na zdrowie człowieka o ok. 35%, a na jakość ekosystemów – o ok. 55% (tab. 5.4).

Tab. 5.4. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania poużytkowego	Kategoria wpływu	
		Zdrowie człowieka [DALY]	Jakość ekosystemów [gatunek/rok]
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$6,52 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$-2,12 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$2,38 \cdot 10^0$	$1,80 \cdot 10^{-3}$
	recykling	$1,61 \cdot 10^0$	$9,04 \cdot 10^{-4}$
Stacja inwerterowa	składowanie	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$
	recykling	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
Instalacja elektryczna	składowanie	$1,51 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$
Transformator	składowanie	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$9,99 \cdot 10^{-3}$	$9,33 \cdot 10^{-6}$

5.2.1.2. Normalizowanie

Wyniki normalizowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia polikrystalicznej elektrowni fotowoltaicznej dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego zobrazowano w tabeli Z.13 (załącznik do rozprawy). Maksymalny poziom szkodliwych oddziaływań na otoczenie generował cykl istnienia paneli fotowoltaicznych. Cechuje się on najwyższym zapotrzebowaniem na energię i materię w porównaniu do pozostałych elementów konstrukcyjnych elektrowni (choć mniejszym aniżeli cykl paneli monokrystalicznych). Zagospodarowanie poużytkowe tworzyw, materiałów i elementów elektrowni na wysypisku odpadów wyróżnia się wyższymi wartościami destrukcyjnego wpływu na zdrowie człowieka i jakość środowiska aniżeli zastosowanie do tego celu procesów recyklingu.

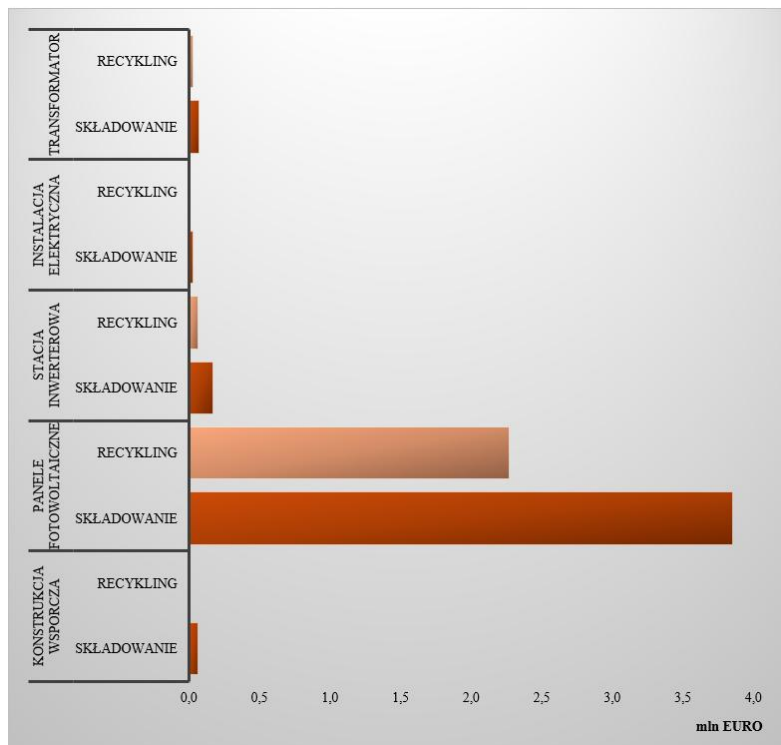
5.2.1.3. Grupowanie i ważenie

W tabeli Z.14 (załącznik do rozprawy) zestawiono wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych w cyklu istnienia polikrystalicznej elektrowni fotowoltaicznej (dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego). Wszystkie analizowane grupy elementów konstrukcyjnych obiektu badań cechują się najwyższym poziomem szkodliwego oddziaływania na otoczenie w następujących kategoriach wpływu: substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, substancje

powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa krótko- i długoterminowa), substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). Wśród wymienionych kategorii, elementem konstrukcyjnym wyróżniającym się maksymalnym stopniem niepożądanych oddziaływań na otoczenie są panele fotowoltaiczne (łącznie składowanie: $8,11 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $4,80 \cdot 10^6$ EUR). W porównaniu do cyklu istnienia paneli monokrystalicznych, ich całkowity poziom niekorzystnego wpływu na środowisko jest o ok. 23% niższy w przypadku zastosowania składowania na wysypisku odpadów jako formy zagospodarowania poużytkowego oraz o ok. 17% – dla procesów recyklingu. W oparciu o dane zamieszczone w tabeli Z.14 zdecydowano się na bardziej szczegółowe omówienie trzech kategorii wpływu wyróżniających się maksymalnym destrukcyjnym oddziaływaniem na otoczenie, obejmującym procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa) oraz emisje substancji powodujących zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa).

Najwyższe wartości prognozowanych kosztów środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody oddziałujących na zdrowie człowieka, charakteryzowały cykl istnienia paneli PV (składowanie: $4,38 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $2,42 \cdot 10^6$ EUR). W odniesieniu do paneli monokrystalicznych były one niższe o ok. 12% dla składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 6% – dla procesów recyklingu. Najniższe potencjalne koszty środowiskowe były związane z cyklem istnienia instalacji elektrycznej (składowanie: $2,93 \cdot 10^4$ EUR, recykling: $5,06 \cdot 10^3$ EUR). W porównaniu do analogicznej instalacji w elektrowni monokrystalicznej były one wyższe o ok. 17% dla obu form zagospodarowania tworzyw, materiałów i elementów konstrukcyjnych. Przemysłowe procesy wytwarzania zarówno paneli monokrystalicznych, jak i polikrystalicznych nadal są związane z koniecznością stosowania energo- i materiałochłonnych technologii, generujących wiele niepożądanych następstw środowiskowych. Wśród procesów skutkujących zmniejszeniem dostępności wody w cyklu istnienia badanej elektrowni opartej na panelach polikrystalicznych, największe znaczenie posiada zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (w trakcie wytwarzania energii). Za największe zużycie zasobów wody odpowiedzialne jest rolnictwo, w którym wykorzystuje się ok. 40% wody zużywanej rocznie w Europie oraz sektor produkcji energii – ok. 28%. Poszukiwanie oszczędności w przemyśle powinno rozpocząć się od pozyskania informacji, w których procesach i w jakich ilościach woda jest wykorzystywana. Jedną z możliwości sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych w tym zakresie jest przeprojektowanie procesów technologicznych, w taki sposób by umożliwić wykorzystywanie wody w obiegu (w jak

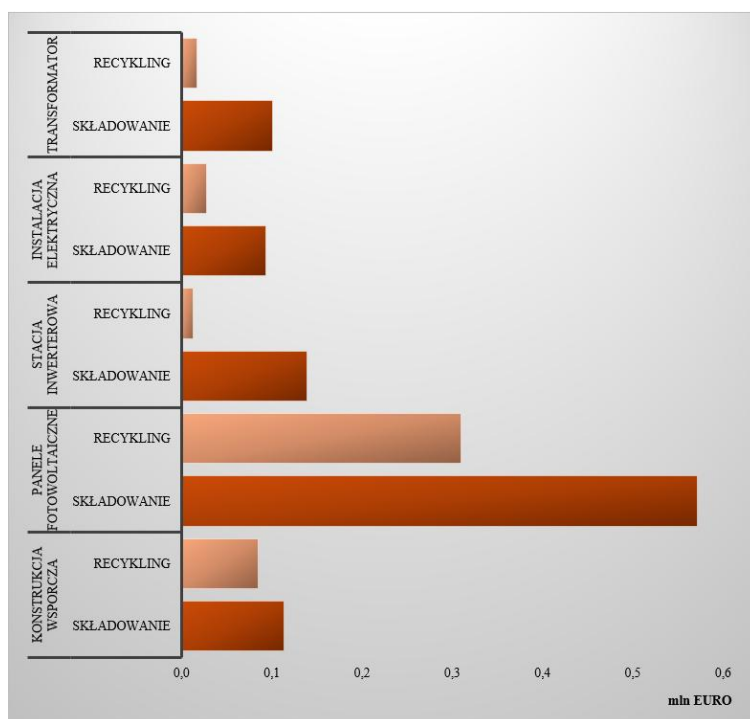
największym stopniu) zamkniętym. Jest to realne przede wszystkim dzięki zawracaniu tzw. „wody szarej” oraz oczyszczaniu ścieków (rys. 5.16) [203].



Rys. 5.16. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W przypadku emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, najwyższym poziomem potencjalnie koniecznych do poniesienia kosztów środowiskowych również wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $5,17 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $3,09 \cdot 10^5$ EUR). W odniesieniu do paneli monokrystalicznych, były one o ok. 22% niższe dla obu form zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów. Zagospodarowanie z wykorzystaniem procesów recyklingu istotnie zmniejszało poziom niezbędnych do poniesienia kosztów w tym zakresie dla wszystkich rozważanych zespołów elementów elektrowni (konstrukcja wsporcza: o ok. 25%, stacja inwerterowa: o ok. 91%, instalacja elektryczna: o ok. 69%, transformator: o ok. 83%). Wśród materiałów konstrukcyjnych, których cykl istnienia w największym stopniu powoduje zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Stront jest pierwiastkiem chemicznym z grupy berylowców. Może on tworzyć związki rozpuszczalne oraz nierozpuszczalne w wodzie. Naturalny stront

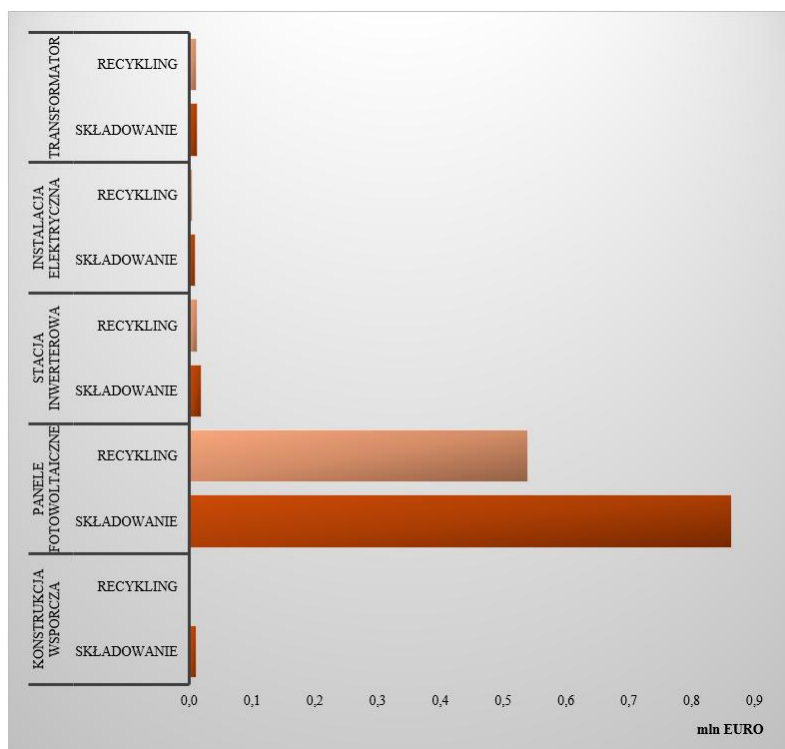
nie jest radioaktywny i występuje w formie czterech stabilnych izotopów (^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr i ^{88}Sr), które cechują analogiczne właściwości chemiczne. Znajduje zastosowanie podczas produkcji wyrobów szklanych, ceramicznych oraz w stopach metali. Emisje ze spalania węgla i ropy naftowej zwiększają poziom strontu w otoczeniu. Częsteczki pyłu zawierającego ten pierwiastek opadają z powietrza na wody powierzchniowe, rośliny i glebę, powodując zanieczyszczenie. W organizmie stront zachowuje się bardzo podobnie do wapnia, może zostać wbudowany w kości i negatywnie oddziaływać na szpik kostny (najważniejszy narząd krwiotwórczy). Nadmierne ilości strontu wpływają również niekorzystnie na wzrost i rozwój roślin. Koniecznym wydaje się zatem takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, aby możliwie do minimum ograniczyć wykorzystywanie strontu w procesach technologicznych (rys. 5.17) [203].



Rys. 5.17. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W zakresie emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), maksymalne wartości niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych charakteryzowały cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $6,63 \cdot 10^5$ EUR, recykling:

3,84·10⁵ EUR). W porównaniu do paneli monokrystalicznych, poziom potencjalnych kosztów był niższy o ok. 32% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 35% – dla recyklingu. Najmniejszymi kosztami spośród wszystkich analizowanych zespołów elementów wyróżniała się z kolei instalacja elektryczna (składowanie: 9,82·10³ EUR, recykling: 5,31·10³ EUR). Po ich zestawieniu z analogicznymi potencjalnymi kosztami w cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej, widocznym było, że są one wyższe o ok. 17% dla obu rozpatrywanych form zagospodarowania poużytkowego. Do związków chemicznych występujących w cyklu istnienia badanej elektrowni polikrystalicznej, powodujących najwięcej szkodliwych wpływów w obszarze zmian klimatycznych, można zaliczyć: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23) (rys. 5.18).

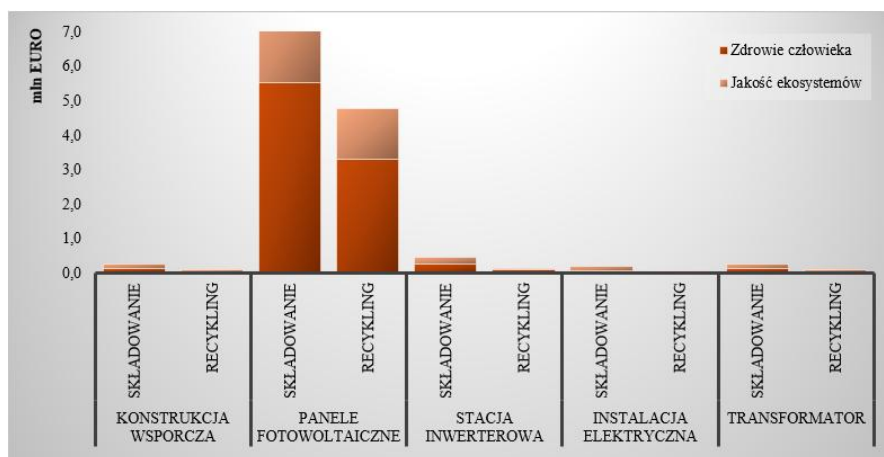


Rys. 5.18. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Heksafluoroetan jest organicznym związkiem chemicznym, złożonym z węgla i fluoru. Fluor jest szeroko rozpowszechniony w otoczeniu, jednak prawie nie występuje w środowisku w formie związków organicznych. Związki fluoroorganiczne obecne w otoczeniu mają przede wszystkim pochodzenie

antropogeniczne (emisje z hut żelaza, aluminium i szkła, elektrowni węglowych oraz elektrociepłowni). Heksafluoroetan cechuje się wysoką stabilnością w środowisku przyrodniczym. Przyczynia się do dużo większej degradacji otoczenia w porównaniu do nieorganicznych związków fluoru. Powoduje systematyczne zubożanie warstwy ozonu w stratosferze, przyczyniając się do powiększania dziury ozonowej oraz pogłębiania efektu cieplarnianego. Z tego względu istotnym jest sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych w kierunku zmniejszenia energochłonności procesów technologicznych (rys. 5.18) [255].

Wśród wszystkich ocenianych zespołów elementów badanego obiektu technicznego, polikrystaliczne panele fotowoltaiczne wyróżniają się najbardziej niekorzystnym wpływem na otoczenie (łącznie składowanie: $8,11 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $4,80 \cdot 10^6$ EUR). W przypadku zagospodarowania poużytkowego w formie składowania, wielkość ich oddziaływania na zdrowie człowieka stanowi ok. 68% całkowitego wpływu na otoczenie, a dla recyklingu – jest to ok. 70%. Drugi najwyższy poziom potencjalnych kosztów środowiskowych cechuje stację inwerterową (łącznie składowanie: $4,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,51 \cdot 10^5$ EUR), której wpływ na zdrowie człowieka obejmuje ok. 61% całkowitego oddziaływania dla zagospodarowania w formie składowania oraz ok. 71% – w formie recyklingu (rys. 5.19).

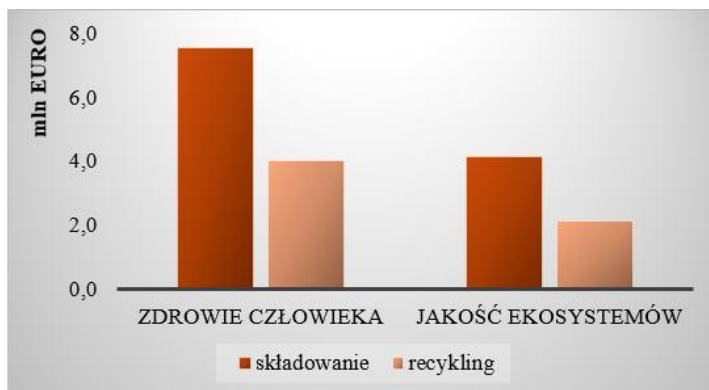


Rys. 5.19. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Trzecią najwyższą wartość odnotowano w przypadku stacji transformatorowej (łącznie składowanie: $2,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,02 \cdot 10^5$ EUR), dla składowania ok. 52% całkowitego oddziaływania stanowi wpływ na zdrowie, a dla recyklingu – ok. 59%. W odniesieniu do dwóch ostatnich

grup elementów – konstrukcji wsporczej oraz instalacji elektrycznej, procesy recyklingu istotnie zmniejszyły udział szkodliwych oddziaływań na zdrowie człowieka. W przypadku konstrukcji wsporczej (łącznie składowanie: $2,81 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,16 \cdot 10^5$ EUR) było to ok. 50% dla składowania i ok. 25% dla recyklingu, z kolei w odniesieniu do instalacji elektrycznej – ok. 44% dla składowania i ok. 36% dla recyklingu (łącznie składowanie: $2,06 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $6,78 \cdot 10^4$ EUR) (rys. 5.19).

Cykl istnienia badanej elektrowni w większym stopniu wpływa na pogorszenie jakości zdrowia i życia człowieka w porównaniu do oddziaływania na jakość ekosystemów. Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego może znacząco obniżyć wpływ obiektu badań na otoczenie – dla zdrowia o ok. 43%, a w odniesieniu do jakości ekosystemów – o ok. 46%. Niezbędnym staje się zatem wprowadzenie działań naprawczych, sterowanie cyklem istnienia elektrowni polikrystalicznej w kierunku minimalizacji poziomu jej destrukcyjnego oddziaływania na zdrowie człowieka, szczególnie w odniesieniu do paneli fotowoltaicznych (rys. 5.20).



Rys. 5.20. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

5.2.1.4. Model IPCC 2021

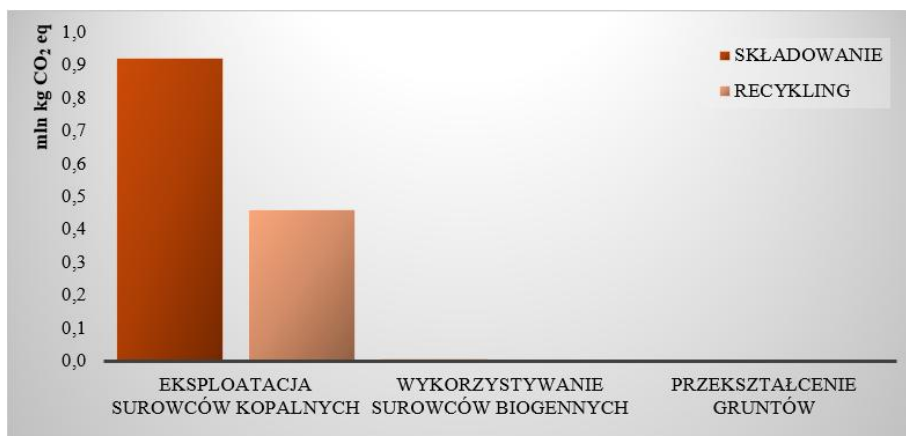
Wyższym łącznym poziomem emisji gazów szklarniowych w przypadku cyklu istnienia każdego z badanych zespołów elementów konstrukcyjnych, charakteryzowało się zagospodarowanie użytkowe w formie składowania na wysypisku odpadów aniżeli z wykorzystaniem procesów recyklingu. Polikrystaliczne panele fotowoltaiczne wyróżniają się najwyższym poziomem szkodliwych emisji w porównaniu do pozostałych zespołów elementów budujących oceniany obiekt techniczny (składowanie: $8,63 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $4,49 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). W odniesieniu do cyklu istnienia paneli monokrystalicznych, poziom rozpatrywanych emisji jest niższy o ok. 11% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 15% – dla recyklingu.

Najmniejszy wpływ na łączny poziom emisji GHG w cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach polikrystalicznych wyróżniał instalację elektryczną (składowanie: $1,00 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq, recykling: $1,97 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq). W porównaniu do analogicznej instalacji w elektrowni monokrystalicznej, wielkość emisji gazów szklarniowych dla instalacji w elektrowni polikrystalicznej była o ok. 17% wyższa przy założeniu zagospodarowania poużytkowego w formie składowania oraz o ok. 16% – dla wykorzystania procesów recyklingu (tab. 5.5).

Tab. 5.5. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania poużytkowego	Emisja gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z:			RAZEM
		eksploatacją surowców kopalnych	wykorzystywaniem surowców biogennych	przekształceniem gruntów	
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$1,49 \cdot 10^4$	$3,24 \cdot 10^2$	$4,91 \cdot 10^1$	$1,53 \cdot 10^4$
	recykling	$-4,50 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^2$	$1,68 \cdot 10^1$	$-3,31 \cdot 10^2$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$8,58 \cdot 10^5$	$3,46 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^3$	$8,63 \cdot 10^5$
	recykling	$4,46 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^3$	$8,00 \cdot 10^2$	$4,49 \cdot 10^5$
Stacja inwerterowa	składowanie	$2,21 \cdot 10^4$	$4,38 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^1$	$2,26 \cdot 10^4$
	recykling	$6,43 \cdot 10^3$	$3,60 \cdot 10^1$	$9,15 \cdot 10^0$	$6,48 \cdot 10^3$
Instalacja elektryczna	składowanie	$9,76 \cdot 10^3$	$2,27 \cdot 10^2$	$3,69 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^4$
	recykling	$1,97 \cdot 10^3$	$2,38 \cdot 10^0$	$1,34 \cdot 10^0$	$1,97 \cdot 10^3$
Transformator	składowanie	$1,74 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^2$	$4,61 \cdot 10^1$	$1,78 \cdot 10^4$
	recykling	$5,81 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^1$	$1,06 \cdot 10^1$	$5,87 \cdot 10^3$

Spośród ocenianych kategorii wpływu, maksymalną wartość emisji gazów szklarniowych odnotowano w przypadku procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (składowanie: $9,22 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $4,60 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). W porównaniu do elektrowni monokrystalicznej, poziom emisji GHG był niższy o ok. 11% dla cyklu istnienia uwzględniającego składowanie na wysypisku odpadów oraz o ok. 15% – w przypadku zastosowania procesów recyklingu. Dla elektrowni polikrystalicznej, najniższe wartości emisji gazów cieplarnianych zauważono w odniesieniu do kategorii przekształcania gruntów (składowanie: $1,86 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $8,83 \cdot 10^2$ kg CO₂ eq). Były to emisje niższe o ok. 8% w odniesieniu do scenariusza składowania oraz o ok. 15% niższe dla zagospodarowania w formie recyklingu, w porównaniu do cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej. Zastosowanie procesów recyklingu daje możliwość istotnego obniżenia łącznego poziomu emisji gazów cieplarnianych w perspektywie całego cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach polikrystalicznych (łącznie o ok. 50%). Koniecznym staje się zatem takie sterowanie cyklami istnienia elektrowni PV, które pozwoli na zmniejszenie wielkości emisji GHG, w szczególności w odniesieniu do paneli fotowoltaicznych (rys. 5.21).



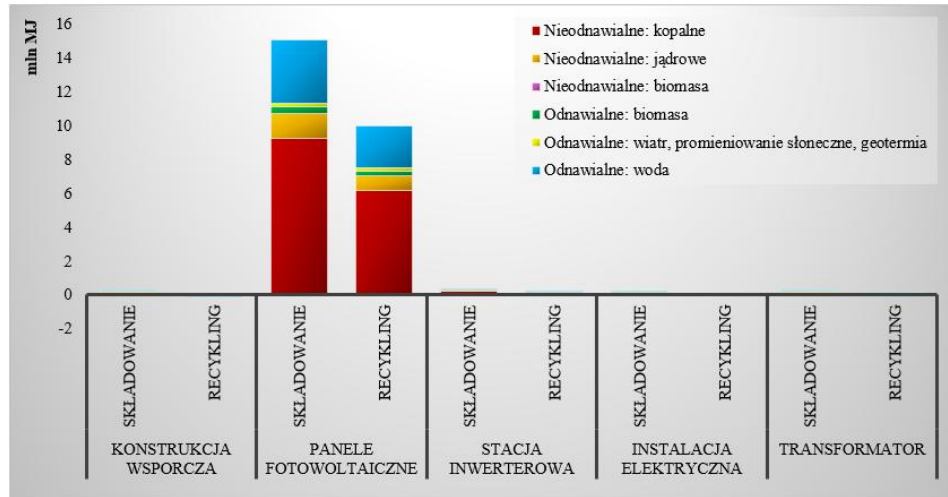
Rys. 5.21. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

5.2.1.5. Model CED

Najwyższym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię charakteryzował się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,51 \cdot 10^7$ MJ, recykling: $1,00 \cdot 10^7$ MJ). Maksymalny procentowy udział w ocenianym obszarze wyróżniał zapotrzebowanie na energię ze źródeł kopalnych (składowanie: ok. 61%, recykling: ok. 62%). W porównaniu do paneli monokrystalicznych, rozwiązanie polikrystaliczne cechowało się mniejszym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię, które wynosiło o ok. 18% mniej dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 3% – dla recyklingu. Wytwarzanie paneli PV, zarówno tych mono- jak i polikrystalicznych, jest procesem o wysokim stopniu energo- i materiałochłonności, co warunkuje duże zapotrzebowanie na energię. Najmniejszym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię w cyklu istnienia elektrowni polikrystalicznej wyróżniała się natomiast instalacja elektryczna (składowanie: $2,19 \cdot 10^5$ MJ, recykling: $6,40 \cdot 10^4$ MJ), dla której ilość energii ze źródeł kopalnych dla zagospodarowania w formie składowania wynosiła ok. 74% zapotrzebowania całkowitego, a dla recyklingu – ok. 83%. W porównaniu do cyklu istnienia analogicznej instalacji w elektrowni monokrystalicznej, zapotrzebowanie było o ok. 17% wyższe dla obu scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (rys. 5.22).

Najwyższe skumulowane zapotrzebowanie na energię odnotowano dla kategorii obejmującej wykorzystanie źródeł kopalnych (składowanie: $1,01 \cdot 10^7$ MJ, recykling: $6,44 \cdot 10^6$ MJ). Zastosowanie procesów recyklingu umożliwiłoby w istotnym stopniu obniżenie poziomu zapotrzebowania na energię w perspektywie całego cyklu istnienia analizowanego obiektu technicznego (łącznie o ok. 64%). W porównaniu do elektrowni monokrystalicznej, cykl

istnienia elektrowni polikrystalicznej cechuje się niższym o ok. 17% skumulowanym zapotrzebowaniem na energię dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 3% – w przypadku zastosowania procesów recyklingu. Niezbędnym staje się zatem wprowadzenie działań w obszarze sterowania cyklem istnienia elektrowni opartej na modułach polikrystalicznych, celem obniżenia poziomu jej skumulowanego zapotrzebowania na energię, w szczególności dla paneli fotowoltaicznych (tab. 5.6).



Rys. 5.22. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model CED, jednostka: mln MJ)

Tab. 5.6. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

Lp.	Kategoria wpływu	Forma zagospodarowania użytkowego	
		składowanie	recykling
1.	Nieodnawialne: kopalne	$1,01 \cdot 10^7$	$6,44 \cdot 10^6$
2.	Nieodnawialne: jądrowe	$1,56 \cdot 10^6$	$8,96 \cdot 10^5$
3.	Nieodnawialne: biomasa	$7,92 \cdot 10^2$	$1,83 \cdot 10^2$
4.	Odnawialne: biomasa	$4,25 \cdot 10^5$	$2,85 \cdot 10^5$
5.	Odnawialne: wiatr, promieniowanie słoneczne, geotermia	$2,40 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^5$
6.	Odnawialne: woda	$3,96 \cdot 10^6$	$2,51 \cdot 10^6$
RAZEM		$1,62 \cdot 10^7$	$1,03 \cdot 10^7$

5.3. ELEKTROWANIA FOTOWOLTAICZNA OPARTA NA MODUŁACH AMORFICZNYCH

5.3.1. Model IMPACT World+

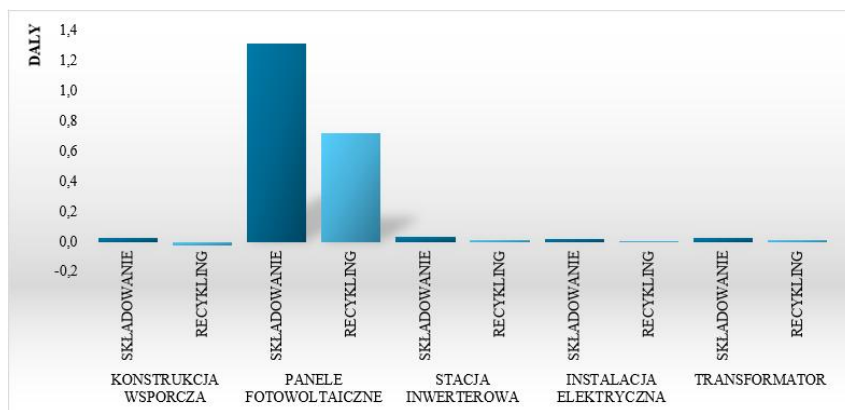
5.3.1.1. Charakteryzowanie

W ramach trzeciego etapu praktycznego zastosowania zaproponowanej metodologii badań przeprowadzono ocenę wpływu na otoczenie elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych. W ramach analiz wzięto pod uwagę zarówno cały obiekt techniczny, jak i grupy jego elementów konstrukcyjnych. Analogicznie jak w przypadku elektrowni mono- i polikrystalicznej, zastosowano dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów. Pierwszy krok obejmował wykorzystanie modelu IMPACT World+. Następstwa środowiskowe dla zdrowia wyrażono w jednostce DALY, natomiast dla jakości ekosystemu – wykorzystując wskaźnik gatunek/rok.

W tabeli Z.15 (załącznik do rozprawy) przybliżono wyniki charakteryzowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia amorficznej elektrowni fotowoltaicznej. Maksymalną wartością niepożądanych wpływów dla wszystkich ocenianych zespołów elementów konstrukcyjnych wyróżniały się kategorie obejmujące substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemu (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). Dla wszystkich wymienionych kategorii, najwyższym poziomem destrukcyjnego oddziaływania charakteryzowały się amorficzne panele fotowoltaiczne, których formą zagospodarowania użytkowego było składowanie na wysypisku odpadów. Zastosowanie procesów recyklingu umożliwiłoby istotne ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko wszystkich zespołów elementów rozważanego obiektu technicznego. Na podstawie danych zawartych w tabeli Z.15 podjęto decyzję o przeprowadzeniu szczegółowej analizy dwóch kategorii cechujących się najwyższą wartością szkodliwego oddziaływania na zdrowie człowieka (procesy wpływające na dostępność wody i emisja substancji powodujących zmiany klimatu) oraz dwóch – powodujących największe obniżenie jakości środowiska (emisja substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych i substancji powodujących zmiany klimatu).

Tak jak w przypadku wcześniej rozważanych elektrowni, najwyższy poziom destrukcyjnego oddziaływania dla procesów wpływających na dostępność wody oddziałujących na zdrowie człowieka w cyklu istnienia elektrowni amorficznej, charakteryzował panele PV (składowanie: $1,32 \cdot 10^0$ DALY, recykling: $7,23 \cdot 10^{-1}$ DALY), był on jednak niższy od tego odnotowanego w cyklu istnienia paneli mono- i polikrystalicznych: dla składowania kolejno o ok. 54 i 44%, a dla

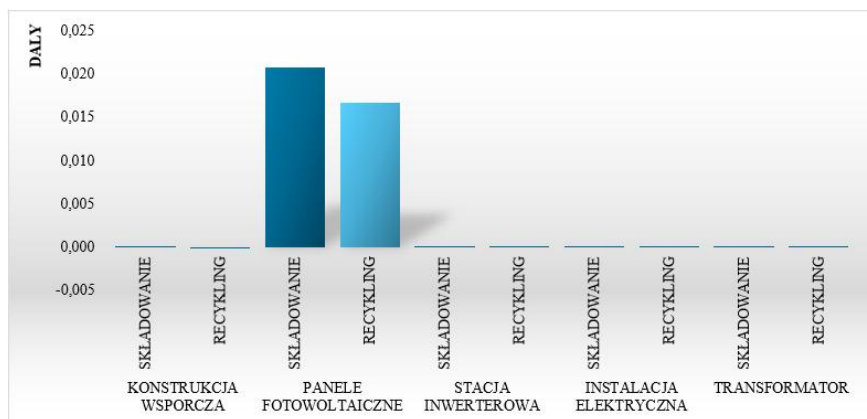
procesów recyklingu – o ok. 55 i 54%. Najniższą wartością niekorzystnego wpływu w przypadku elektrowni amorficznej cechowała się instalacja elektryczna (składowanie: $1,71 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $3,22 \cdot 10^{-3}$ DALY), jednak była ona wyższa w porównaniu do oddziaływania analogicznych instalacji w elektrowniach mono- i polikrystalicznej kolejno o ok. 38 i 17% w przypadku składowania oraz o ok. 37 i 18% – dla recyklingu. Przyczynę ponownie stanowiła liczba i powierzchnia paneli PV, z których zbudowane były elektrownie (elektrownia monokrystaliczna: 2632 szt. o pow. 4896 m², elektrownia polikrystaliczna: 3572 szt. o pow. 5823 m², elektrownia amorficzna: 5000 szt. o pow. 5650 m²). Wśród procesów mających wpływ na ograniczenie dostępności wody w cyklu istnienia elektrowni amorficznej można wyróżnić zużycie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (podczas wytwarzania energii elektrycznej). Zapotrzebowanie na wodę zwiększa się i najprawdopodobniej będzie rosło również w przyszłości. Im większe ilości się jej pobiera, tym mocniejszy wpływ wywiera się na środowisko naturalne. Obecnie zachodzące zmiany klimatu dalej pogłębiają deficyt wody. W związku z tym należy tak sterować cyklami istnienia obiektów technicznych, aby bardziej efektywnie ją wykorzystywać. Dodatkowo, oszczędzanie wody będzie miało pozytywne oddziaływanie w obszarze ochrony innych zasobów, ekosystemów oraz poprawy jakości życia i zdrowia ludzi (rys. 5.23) [203].



Rys. 5.23. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Ponownie, najwyższą wartość szkodliwych emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), odnotowano w cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $2,08 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $1,67 \cdot 10^{-2}$ DALY). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych była ona niższa kolejno o ok. 26 i 18% w przypadku zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów

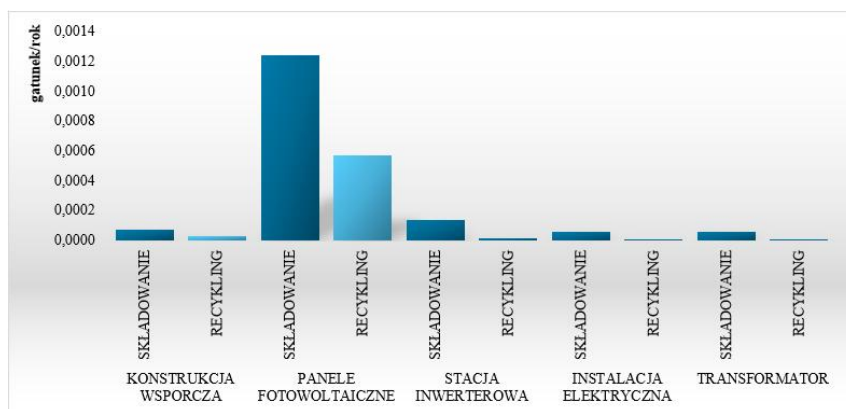
oraz o ok. 22 i 13% – dla recyklingu. W tym przypadku najniższym poziomem niepożądanych emisji dla elektrowni amorficznej również charakteryzowała się instalacja elektryczna (składowanie: $1,23 \cdot 10^{-4}$ DALY, recykling: $6,07 \cdot 10^{-5}$ DALY). Porównując otrzymane wartości do emisji w cyklach istnienia instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej, były one wyższe kolejno o ok. 47 i 18% dla składowania oraz o ok. 38 i 17% – w przypadku recyklingu. Wytwarzanie amorficznych paneli PV wiąże się z poniesieniem istotnych nakładów energetycznych, głównie ze źródeł nieodnawialnych. Skutkuje to wysokim poziomem emisji gazów szklarniowych oraz innych związków chemicznych wpływających na postępowanie zmian klimatu. Spośród substancji oddziałujących na zmiany klimatyczne w cyklu istnienia elektrowni amorficznej, maksymalnymi wartościami destrukcyjnego wpływu wyróżniały się emisje: ditlenku węgla, metanu, tlenu diazotu, heksafluorku siarki, tetrafluorometanu (CFC-14), heksafluoroetanu (HFC-116) oraz trifluorometanu (HFC-23). Trifluorometan jest zaliczany do grupy trihalogenometanów (halogenoformów), gazów cieplarnianych oraz substancji powodujących uszczuplanie warstwy ozonowej. Jeden kilogram CHF_3 ma analogiczne działanie na pogłębienie efektu szklarniowego jak 11700 kg CO_2 . Szacuje się, że jego czas przebywania w atmosferze przekracza 250 lat. Główne źródło trifluorometanu stanowi przemysł oraz spalanie paliw kopalnych. W związku z powyższym, istotnym jest takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, które pozwoli na zmniejszenie energochłonności procesów technologicznych, szczególnie opierających się wykorzystywaniu energii ze źródeł nieodnawialnych (rys. 5.24) [206].



Rys. 5.24. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Maksymalnym poziomem szkodliwego oddziaływania dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa

długoterminowa), wyróżniał się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,24 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok, recykling: $5,71 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Odnosząc poziom destrukcyjnego wpływu w stosunku do cyklu istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, można zauważyć że był on niższy kolejno o ok. 34 i 23% w przypadku zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 36 i 28% – dla procesów recyklingu. Najniższymi wartościami niekorzystnych oddziaływań w badanym zakresie dla elektrowni amorficznej charakteryzowała się instalacja elektryczna (składowanie: $6,23 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $1,69 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok). W porównaniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej, jej cykl istnienia zakładający scenariusz składowania na wysypisku odpadów generował kolejno o ok. 38 i 18% więcej niepożądanych następstw dla otoczenia, natomiast dla recyklingu – o ok. 37 i 17%. Było to spowodowane koniecznością poniesienia wyższych nakładów energii i materii w cyklu istnienia instalacji elektrycznej elektrowni amorficznej. Gdyby wybrano recykling jako formę zagospodarowania tworzyw, materiałów i elementów, cykl istnienia wszystkich ocenianych elementów konstrukcyjnych charakteryzowałby się istotnie mniejszym poziomem szkodliwego wpływu na otoczenie. Do materiałów konstrukcyjnych elektrowni amorficznej o najwyższym wpływie na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można zaliczyć: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad (rys. 5.25).



Rys. 5.25. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

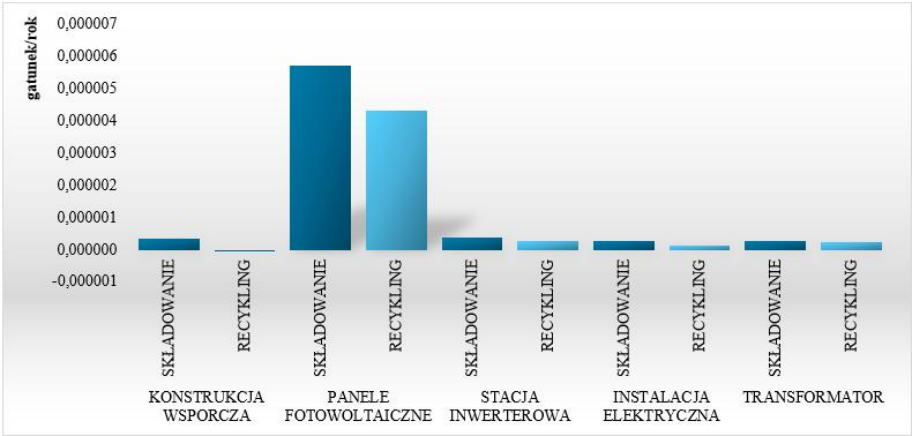
Nikiel to metal powszechnie obecny w środowisku. Wraz z wiatrem i opadami deszczu dostaje się do gleby oraz wód gruntowych. Zasadniczymi źródłami emisji niklu do otoczenia jest spalanie ropy naftowej, paliw stałych (głównie węgla) i odpadów, procesy galwanizacyjne oraz produkcja stali. Nikiel ma także zastosowanie jako katalizator szeregu reakcji, np. stosowanych w trakcie wytwarzania tworzyw polimerowych. Coraz większe zapotrzebowanie na produkty, które zawierają nikiel prowadzi do zanieczyszczenia środowiska tym

pierwiastkiem oraz jego związkami (głównie tlenkami, siarczkami i siarczanami). Jego nadmiar w organizmie może mieć działanie rakotwórcze. Istotny problem stanowi zatem takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, aby zmniejszyć wykorzystywanie niklu oraz jego związków w procesach technologicznych (rys. 5.25) [22, 36].

Najwyższa wartość niepożądanego wpływu dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), również cechowała cykl istnienia paneli PV (składowanie: $5,71 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok, recykling: $4,32 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok). Z powodu mniejszego zapotrzebowania na energię w procesach produkcji paneli amorficznych, poziom ich niekorzystnego oddziaływania w porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych były niższe kolejno o ok. 95 i 94% dla cyklu istnienia z zagospodarowaniem w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 93 i 92% – dla scenariusza obejmującego recykling. Najmniejszą wartością szkodliwego wpływu w ocenianym zakresie wyróżniał się cykl istnienia instalacji elektrycznej elektrowni amorficznej (składowanie: $2,10 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok, recykling: $1,34 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok). W porównaniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej, jej destrukcyjne oddziaływanie było wyższe kolejno o ok. 8 i 7% dla składowania oraz o ok. 38 i 18% – dla recyklingu tworzyw, materiałów oraz elementów. Do związków chemicznych występujących w cyklu istnienia elektrowni amorficznej, powodujących najwięcej niepożądanych wpływów w odniesieniu do zmian klimatu, można zaliczyć: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Spalanie paliw kopalnych, wycinka lasów i hodowla zwierząt gospodarskich w coraz większym stopniu mają wpływ na zmiany klimatu oraz wzrost temperatury Ziemi. Na skutek tych działań istotnie wrosła ilość gazów szklarniowych, które naturalnie występowały w atmosferze, co wpłynęło na globalne ocieplenie. Lata 2011-2020 stanowiły najcieplejszą dekadę w historii. Wywołane przez człowieka globalne ocieplenie zwiększa się obecnie o $0,2^{\circ}\text{C}$ na każde dziesięć lat. Tak duży wzrost w stosunku do temperatury w okresie przedindustrialnym jest związany z wieloma negatywnymi skutkami dla ekosystemów oraz zdrowia ludzi. Koniecznym jest zatem wprowadzanie działań naprawczych w formie sterowania cyklami obiektów technicznych celem ograniczenia zapotrzebowania na energię (szczególnie ze źródeł kopalnych) (rys. 5.27) [203].

Maksymalny łączny poziom destrukcyjnego oddziaływania na zdrowie człowieka i jakość ekosystemów charakteryzuje cykl istnienia paneli fotowoltaicznych, dla których formę zagospodarowania użytkowego stanowiłoby składowanie (zdrowie człowieka: $1,40 \cdot 10^0$ DALY, jakość ekosystemów: $1,25 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych, wartość ich niekorzystnego wpływu na otoczenie była niższa kolejno o ok. 52 i 41% w zakresie zdrowia człowieka oraz o ok. 40 i 31% w obszarze jakości ekosystemów. Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego wszystkich elementów elektrowni amorficznej

pozwoilioby na istotne obnizenie calkowitych szkodliwych oddziaływani dla zdrowia czlowieka o ok. 30%, natomiast w przypadku jakosci ekosystemow – o ok. 50% (tab. 5.7).



Rys. 5.26. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Tab. 5.7. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania poużytkowego	Kategoria wpływu	
		Zdrowie człowieka [DALY]	Jakość ekosystemów [gatunek/rok]
Konstrukcja wsparcza	składowanie	$2,90 \cdot 10^{-02}$	$7,67 \cdot 10^{-05}$
	recykling	$-2,18 \cdot 10^{-02}$	$3,43 \cdot 10^{-05}$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$1,40 \cdot 10^0$	$1,25 \cdot 10^{-03}$
	recykling	$7,76 \cdot 10^{-01}$	$5,80 \cdot 10^{-04}$
Stacja inwerterowa	składowanie	$3,06 \cdot 10^{-02}$	$1,40 \cdot 10^{-04}$
	recykling	$1,04 \cdot 10^{-02}$	$1,55 \cdot 10^{-05}$
Instalacja elektryczna	składowanie	$1,78 \cdot 10^{-02}$	$6,30 \cdot 10^{-05}$
	recykling	$3,56 \cdot 10^{-03}$	$2,02 \cdot 10^{-06}$
Transformator	składowanie	$2,50 \cdot 10^{-02}$	$5,79 \cdot 10^{-05}$
	recykling	$9,99 \cdot 10^{-03}$	$9,33 \cdot 10^{-06}$

5.3.1.2. Normalizowanie

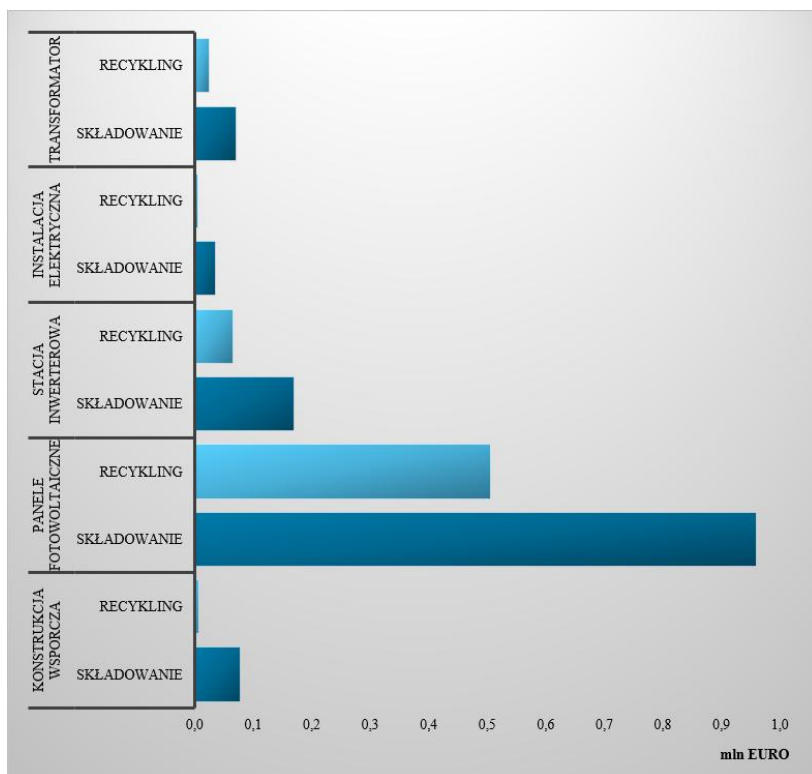
W tabeli Z.16 (załącznik do rozprawy) przedstawiono rezultaty etapu normalizowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia amorficznej elektrowni fotowoltaicznej dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz dwóch odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego. Najwyższą wartością destrukcyjnego wpływu na otoczenie cechował się cykl istnienia paneli

fotowoltaicznych. Wyróżniał się on najwyższą energo- i materiałochłonnością w porównaniu do wszystkich innych grup elementów konstrukcyjnych badanej elektrowni.

5.3.1.3. Grupowanie i ważenie

Rezultaty grupowania i ważenia następstw środowiskowych w cyklu istnienia amorficznej elektrowni fotowoltaicznej przedstawiono w tabeli Z.17 (załącznik do rozprawy). Wszystkie oceniane grupy elementów konstrukcyjnych charakteryzowały się maksymalną wartością niepożądanego oddziaływania na otoczenie w następujących kategoriach wpływu: substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa krótko- i długoterminowa), substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). W ramach wspomnianych kategorii, elementem konstrukcyjnym cechującym się najwyższym poziomem szkodliwych oddziaływań na otoczenie są panele fotowoltaiczne (łącznie składowanie: $3,40 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $2,45 \cdot 10^6$ EUR). W odniesieniu do cykli istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, ich całkowity poziom destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie jest kolejno o ok. 68 i 58% niższy w przypadku zagospodarowania poużytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 58 i 49% – dla procesów recyklingu. Biorąc pod uwagę dane z tabeli Z.17 podjęto decyzję by w dalszej części podrozdziału omówić trzy kategorie wpływu wyróżniające się największym negatywnym oddziaływaniem na otoczenie, a mianowicie obejmujące procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz emisje substancji powodujących zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów.

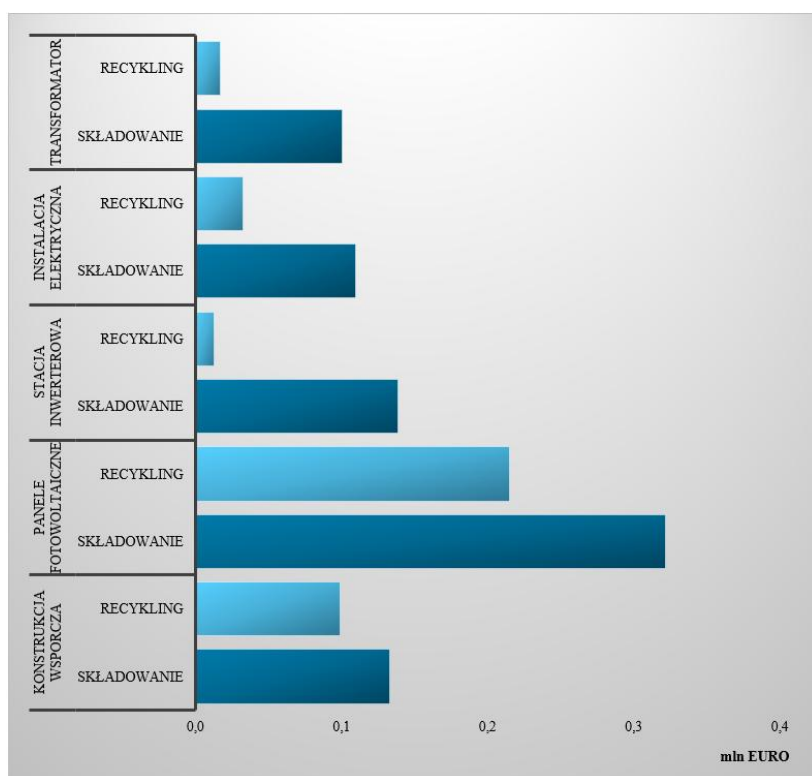
Maksymalny poziom prognozowanych kosztów środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody w cyklu istnienia amorficznej elektrowni fotowoltaicznej, cechował cykl istnienia paneli PV (składowanie: $9,60 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $5,05 \cdot 10^5$ EUR). W porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych były one niższe kolejno o ok. 78 i 75% dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 79 i 78% – dla recyklingu. Najmniejsze potencjalne koszty środowiskowe były związane z cyklem istnienia instalacji elektrycznej elektrowni amorficznej (składowanie: $3,45 \cdot 10^4$ EUR, recykling: $5,96 \cdot 10^3$ EUR). W odniesieniu do tego rodzaju instalacji w elektrowniach mono- i polikrystalicznej były one jednak wyższe kolejno o ok. 38 i 18% dla obu form zagospodarowania tworzyw, materiałów oraz elementów konstrukcyjnych (rys. 5.27).



Rys. 5.27. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Spośród procesów powodujących zmniejszenie dostępności wody w cyklu istnienia elektrowni opartej na panelach amorficznych, największym znaczeniem wyróżniało się zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (w trakcie wytwarzania energii). Nieregularne opady czy coraz częściej występujące okresy suszy powodują intensyfikację poszukiwania metod efektywnego gospodarowania zasobami wody. Zasoby wody słodkiej w Polsce są mocno ograniczone, z tego względu koniecznym jest promowanie i podejmowanie dobrych praktyk związanych z podnoszeniem retencji, ograniczaniem powierzchni nieprzepuszczalnych, zbieraniem deszczówki czy stosowaniem nowoczesnych technologii, pozwalających na ograniczanie jej zużycia w zakładach przemysłowych. W obliczu zmian klimatycznych, zrównoważone wykorzystywanie stale kurczących się zasobów wody winno stanowić priorytet. Działania sterujące, służące ochronie tego cennego naturalnego dobra oraz odpowiedniemu nim zarządzaniu, powinny być wdrażane na każdym etapie cyklu istnienia obiektów technicznych (rys. 5.27) [203].

Najwyższym poziomem potencjalnie niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa) w cyklu istnienia elektrowni amorficznej również charakteryzowały się panele fotowoltaiczne (składowanie: $3,22 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $2,15 \cdot 10^5$ EUR). W porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych, były one kolejno o ok. 52 i 44% niższe dla zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów w formie składowania oraz o ok. 46 i 30% – dla recyklingu. Zagospodarowanie obejmujące scenariusz recyklingu istotnie obniżyło wartość koniecznych do poniesienia kosztów w tym obszarze dla wszystkich analizowanych zespołów elementów elektrowni (konstrukcja wsporcza: o ok. 26%, stacja inwerterowa: o ok. 91%, instalacja elektryczna: o ok. 70%, transformator: o ok. 83%) (rys. 5.28).

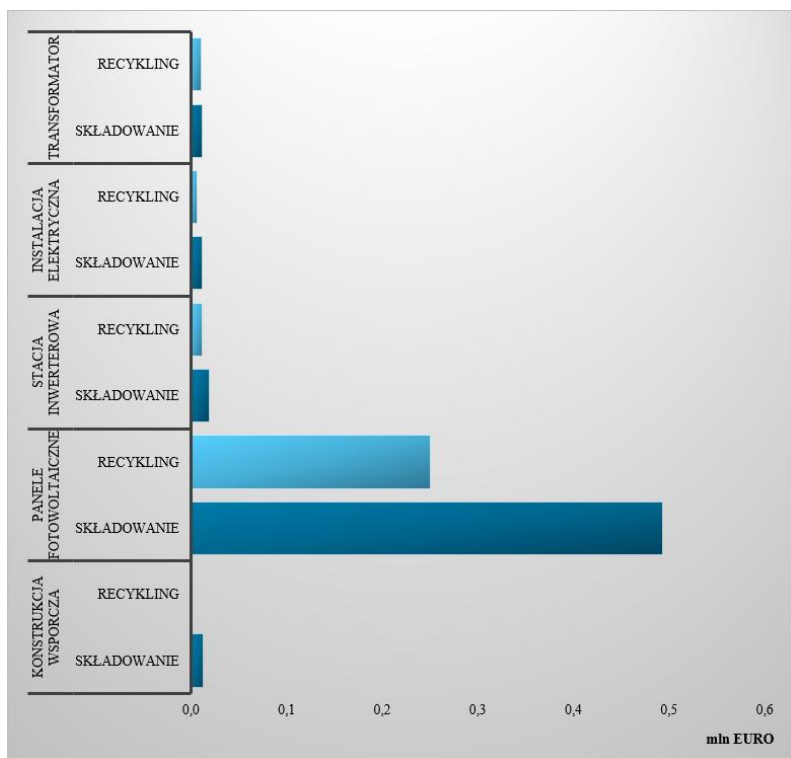


Rys. 5.28. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Spośród materiałów konstrukcyjnych, których cykl istnienia w największym stopniu powoduje zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Cynk jest naturalnym składnikiem otoczenia, występującym w środowisku

atmosferycznym, wodnym i glebowym w zróżnicowanych ilościach. Zwykle przyjmuje formę związaną (np. tlenku, siarczku, siarczanu). Stanowi pierwiastek niezbędny do prawidłowego funkcjonowania ekosystemów, łatwo przyswajalny przez rośliny. W ludzkim organizmie warunkuje prawidłowe funkcjonowanie wielu enzymów, transport neuroprzekaźników czy stabilizację DNA. Jednak jego nadmiar może skutkować zaburzeniami gospodarki lipidowej, odpowiedzi immunologicznej czy sprzyjać rozwojowi choroby Alzheimera. Główne źródła cynku stanowi przemysł, transport, gospodarka komunalna oraz rolnictwo. Jest on surowcem dobrze poddającym się recyklingowi. Niezbędnym staje się zatem odpowiednie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, w kierunku ograniczenia do minimum wykorzystywania cynku w procesach technologicznych oraz zwiększania poziomu recyklingu elementów, które go zawierają (rys. 5.28) [56, 218].

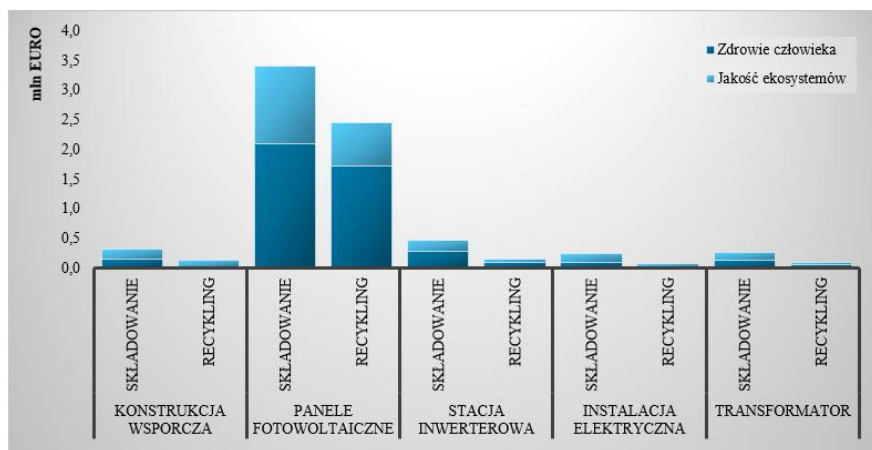
Również w obszarze emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), najwyższe wartości niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych cechowały cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $4,93 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $2,50 \cdot 10^5$ EUR). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych, wielkość potencjalnych kosztów była niższa kolejno o ok. 49 i 26% dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 57 i 35% – dla procesów recyklingu. Najniższym poziomem kosztów wśród wszystkich ocenianych zespołów elementów elektrowni amorficznej wyróżniała się instalacja elektryczna (składowanie: $1,16 \cdot 10^4$ EUR, recykling: $6,26 \cdot 10^3$ EUR). W porównaniu z analogicznymi potencjalnymi kosztami w cyklach istnienia elektrowni mono- i polikrystalicznej, były one wyższe o ok. 38 i 18% dla obu rozważanych form zagospodarowania poużytkowego. Wśród związków chemicznych występujących w cyklu istnienia ocenianej elektrowni amorficznej, powodujących najwięcej destrukcyjnych wpływów w obszarze zmian klimatu, można wyróżnić: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Wzrost emisji gazów szklarniowych następuje przede wszystkim na skutek spalania węgla, ropy naftowej czy gazu (powstaje wtedy m.in. ditlenek węgla czy tlenek diazotu). Dodatkowo, fluorowane gazy cieplarniane mogą być emitowane z maszyn i urządzeń, które je wykorzystują. Cechują się one bardzo wysokimi współczynnikami wpływu na globalne ocieplenie, a każda ich cząsteczka może nawet 23 tys. razy bardziej oddziaływać na jego pogłębianie w porównaniu do cząsteczki CO₂. Z tego względu niezwykle istotnym problemem jest takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, które zapewni istotne zmniejszenie poziomu energochłonności procesów technologicznych w nich występujących (szczególnie tych wykorzystujących energię pochodzącą ze źródeł konwencjonalnych) (rys. 5.29) [255].



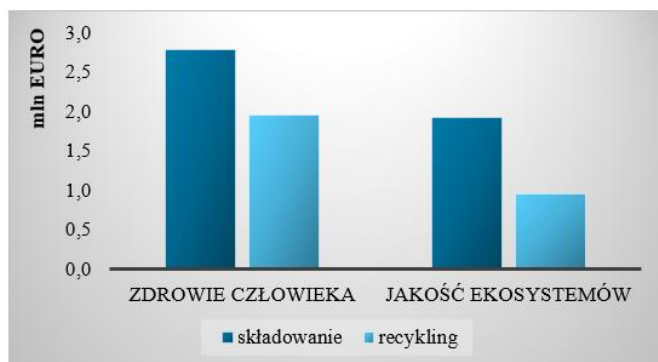
Rys. 5.29. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Spośród wszystkich analizowanych zespołów elementów obiektu badań, panele fotowoltaiczne cechują się najbardziej szkodliwym oddziaływaniem na otoczenie (łącznie składowanie: $3,40 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $2,45 \cdot 10^6$ EUR). W przypadku zastosowania zagospodarowania poużytkowego w formie składowania, poziom ich wpływu na zdrowie człowieka stanowi ok. 62% całkowitego oddziaływania, z kolei dla procesów recyklingu jest to ok. 71%. Drugim najwyższym poziomem potencjalnych kosztów środowiskowych charakteryzuje się stacja inwerterowa (łącznie składowanie: $4,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,51 \cdot 10^5$ EUR), której oddziaływanie na zdrowie człowieka obejmuje ok. 61% całkowitego wpływu w przypadku zagospodarowania w formie składowania oraz ok. 71% – dla recyklingu. Trzecią najwyższą wartość wyróżnia się cykl istnienia stacji transformatorowej (łącznie składowanie: $2,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,02 \cdot 10^5$ EUR), dla składowania ok. 52% całkowitego oddziaływania stanowi oddziaływanie na zdrowie, natomiast dla recyklingu – ok. 59%. W przypadku dwóch ostatnich grup elementów – konstrukcji wsporczej oraz instalacji elektrycznej, recykling istotnie zmniejszył udział niekorzystnych wpływów na zdrowie człowieka. W odniesieniu do konstrukcji

wsporczej (łącznie składowanie: $3,30 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,37 \cdot 10^5$ EUR) było to ok. 50% dla składowania i ok. 25% dla recyklingu, z kolei w przypadku do instalacji elektrycznej – ok. 44% dla składowania i ok. 39% dla recyklingu (łącznie składowanie: $2,43 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $8,00 \cdot 10^4$ EUR) (rys. 5.30).



Rys. 5.30. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)



Rys. 5.31. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Cykl istnienia ocenianej elektrowni amorficznej wywiera większy wpływ na pogorszenie zdrowia i jakości życia ludzi niż na degradację ekosystemów. Włączenie procesów recyklingu jako metody zagospodarowania poużytkowego może znacząco ograniczyć oddziaływanie tego obiektu technicznego na otoczenie – dla zdrowia człowieka nawet o ok. 30%, a dla jakości ekosystemów – o ok. 50%. Z tego względu konieczne jest ukierunkowanie sterowania cyklem istnienia

elektrowni amorficznej na minimalizowanie jej negatywnego wpływu na zdrowie człowieka, szczególnie w odniesieniu do paneli PV (rys. 5.31).

5.3.2. Model IPCC 2021

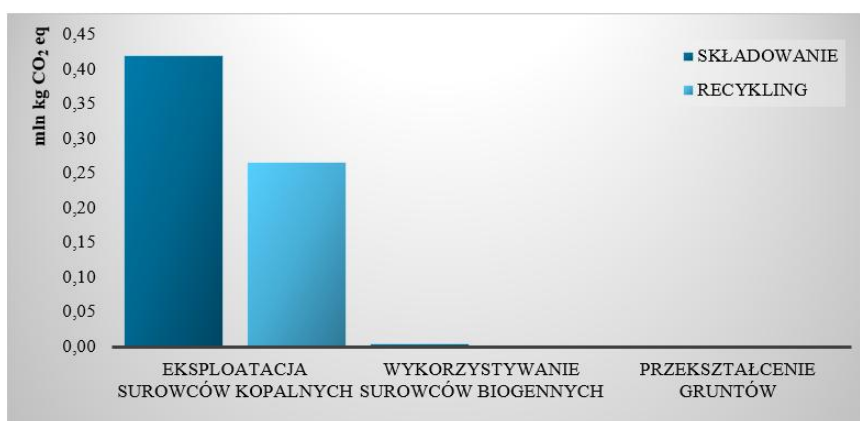
Zagospodarowanie użytkowe w formie składowania cechowało się wyższym łącznym poziomem emisji GHG dla cykli istnienia wszystkich ocenianych zespołów elementów konstrukcyjnych, w porównaniu do zagospodarowania w formie recyklingu. Panele fotowoltaiczne charakteryzują się największą ilością generowanych emisji w odniesieniu do innych zespołów elementów budujących obiekt badań (składowanie: $2,26 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq, recykling: $6,48 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq). W porównaniu do cyklu istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, wartość odnotowanych szkodliwych emisji była niższa kolejno o ok. 98 i 97% dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 99 i 98% – dla procesów recyklingu. Najmniejszy wpływ na łączny poziom emisji w cyklu istnienia elektrowni amorficznej charakteryzował instalację elektryczną (składowanie: $1,18 \cdot 10^4$ kg CO₂ eq, recykling: $2,32 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq). W odniesieniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej, wartość emisji GHG dla instalacji elektrowni amorficznej była kolejno o ok. 37 i 17% wyższa po przyjęciu scenariusza zagospodarowania użytkowego w formie składowania oraz o ok. 38 i 18% – w przypadku zastosowania procesów recyklingu (tab. 5.8).

Tab. 5.8. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania użytkowego	Emisja gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z			RAZEM
		eksploatacją surowców kopalnych	wykorzystywaniem surowców biogennych	przekształceniem gruntów	
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$1,76 \cdot 10^4$	$3,81 \cdot 10^2$	$5,78 \cdot 10^1$	$1,80 \cdot 10^4$
	recykling	$-5,29 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^1$	$-3,89 \cdot 10^2$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$3,50 \cdot 10^5$	$3,00 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^3$	$3,54 \cdot 10^5$
	recykling	$2,51 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^3$	$7,71 \cdot 10^2$	$2,53 \cdot 10^5$
Stacja inwerterowa	składowanie	$2,21 \cdot 10^4$	$4,38 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^1$	$2,26 \cdot 10^4$
	recykling	$6,43 \cdot 10^3$	$3,60 \cdot 10^1$	$9,15 \cdot 10^0$	$6,48 \cdot 10^3$
Instalacja elektryczna	składowanie	$1,15 \cdot 10^4$	$2,68 \cdot 10^2$	$4,35 \cdot 10^1$	$1,18 \cdot 10^4$
	recykling	$2,32 \cdot 10^3$	$2,80 \cdot 10^0$	$1,58 \cdot 10^0$	$2,32 \cdot 10^3$
Transformator	składowanie	$1,74 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^2$	$4,61 \cdot 10^1$	$1,78 \cdot 10^4$
	recykling	$5,81 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^1$	$1,06 \cdot 10^1$	$5,87 \cdot 10^3$

Wśród analizowanych kategorii wpływu, najwyższy poziom emisji GHG zauważono dla procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (składowanie: $4,19 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $2,65 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). W odniesieniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej, wartość szkodliwych emisji była niższa kolejno o ok. 59 i 55% dla cyklu istnienia uwzględniającego składowanie oraz

o ok. 51 i 42% – w przypadku recyklingu. Dla elektrowni amorficznej, najniższy poziom emisji gazów szklarniowych miał miejsce w odniesieniu do kategorii przekształcania gruntów (składowanie: $1,26 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $8,13 \cdot 10^2$ kg CO₂ eq). W porównaniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej były one niższe kolejno o ok. 38 i 32% w przypadku składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 17 i 8% – dla zagospodarowania w formie recyklingu. Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na istotne obniżenie łącznego poziomu destrukcyjnych emisji w perspektywie całego cyklu istnienia elektrowni amorficznej (łącznie o ok. 37%). Niezbędnym wydaje się zatem sterowanie cyklami istnienia elektrowni amorficznych w kierunku zmniejszenia poziomu emisji gazów cieplarnianych, w szczególności w odniesieniu do paneli fotowoltaicznych (rys. 5.32).

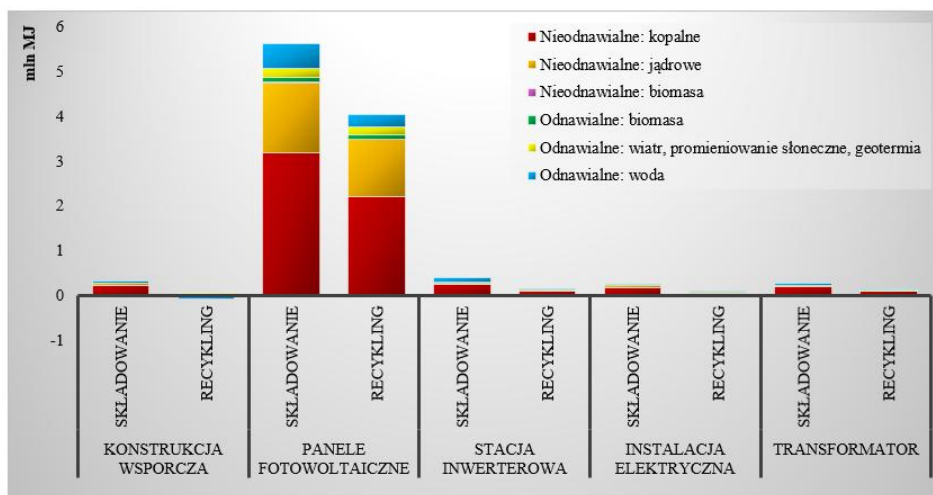


Rys. 5.32. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

5.3.2.1. Model CED

Maksymalnym poziomem skumulowanego zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej wyróżniały się panele PV (składowanie: $5,63 \cdot 10^6$ MJ, recykling: $4,04 \cdot 10^6$ MJ). Najwyższy procentowy udział w analizowanym obszarze cechował zapotrzebowanie na energię ze źródeł kopalnych (składowanie: ok. 56%, recykling: ok. 55%). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych, rozwiązanie amorficzne charakteryzowało się niższym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię, które wynosiło kolejno o ok. 70 i 63% mniej dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 61 i 60% – dla zastosowania procesów recyklingu. Wytwarzanie paneli fotowoltaicznych jest procesem charakteryzującym się wysokim stopniem energo- i materiałochłonności, co stanowi przyczynę wysokiego poziomu zapotrzebowania na energię w ocenianym obszarze. Najniższą wartością skumulowanego zapotrzebowania na energię w cyklu

istnienia elektrowni amorficznej wyróżniała się natomiast instalacja elektryczna (składowanie: $2,58 \cdot 10^5$ MJ, recykling: $7,54 \cdot 10^4$ MJ), dla której energia ze źródeł kopalnych dla zagospodarowania w formie składowania stanowiła ok. 74% zapotrzebowania całkowitego, a dla recyklingu – ok. 83%. W odniesieniu do cykli istnienia analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej, zapotrzebowanie na energię było kolejno o ok. 38 i 18% wyższe dla obu analizowanych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (rys. 5.33).



Rys. 5.33. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model CED, jednostka: mln MJ)

Maksymalną wartość skumulowanego zapotrzebowania na energię odnotowano dla kategorii obejmującej wykorzystanie źródeł kopalnych (składowanie: $4,03 \cdot 10^6$ MJ, recykling: $2,52 \cdot 10^6$ MJ). Zastosowanie zagospodarowania tworzyw, materiałów i elementów w formie recyklingu w istotnym stopniu pozwoliłoby na zmniejszenie poziomu zapotrzebowania na nią w perspektywie całego cyklu istnienia obiektu badań (łącznie o ok. 63%). W odniesieniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej, cykl istnienia elektrowni amorficznej wyróżnia się niższym kolejno o ok. 79 i 75% skumulowanym zapotrzebowaniem na energię dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 76 i 75% – w przypadku recyklingu. Koniecznym staje się zatem wprowadzenie działań naprawczych w formie sterowania cyklem istnienia elektrowni amorficznej w kierunku zmniejszenia poziomu jej skumulowanego zapotrzebowania na energię, w szczególności dla cyklu istnienia paneli PV (tab. 5.9).

Tab. 5.9. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

Lp.	Kategoria wpływu	Forma zagospodarowania poużytkowego	
		składowanie	recykling
1.	Nieodnawialne: kopalne	$4,03 \cdot 10^6$	$2,52 \cdot 10^6$
2.	Nieodnawialne: jądrowe	$1,68 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^6$
3.	Nieodnawialne: biomasa	$2,85 \cdot 10^4$	$3,89 \cdot 10^2$
4.	Odnawialne: biomasa	$1,32 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$
5.	Odnawialne: wiatr, promieniowanie słoneczne, geotermia	$2,20 \cdot 10^5$	$1,91 \cdot 10^5$
6.	Odnawialne: woda	$7,78 \cdot 10^5$	$2,56 \cdot 10^5$
RAZEM		$6,88 \cdot 10^6$	$4,36 \cdot 10^6$

5.4. ELEKTROWANIA FOTOWOLTAICZNA OPARTA NA MODUŁACH PEROWSKITOWYCH

5.4.1. Model IMPACT World+

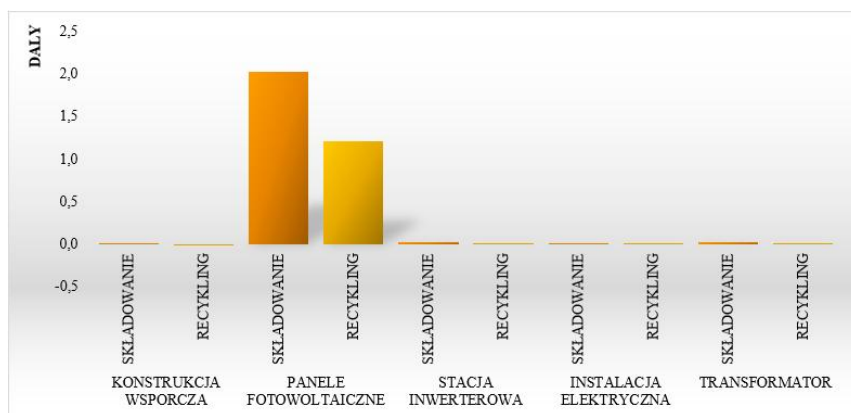
5.4.1.1. Charakteryzowanie

W zakresie czwartego etapu praktycznego zastosowania przyjętej metodologii analiz wykonano ocenę wpływu na otoczenie elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych. Podczas badań wzięto pod uwagę cały rozważany obiekt techniczny oraz pięć głównych grup jego elementów konstrukcyjnych. Tak jak w przypadku wcześniej ocenianych elektrowni, użyto dwóch scenariuszy zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów – składowanie oraz recykling. Ponownie, w pierwszym kroku wykorzystano model IMPACT World+.

Wyniki charakteryzowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia perowskitowej elektrowni fotowoltaicznej zobrazowano w tabeli Z.18 (załącznik do rozprawy). Najwyższy poziom szkodliwych oddziaływań dla wszystkich badanych zespołów elementów konstrukcyjnych cechował kategorie wpływu obejmujące substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody, oddziaływujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemu (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). W przypadku ww. kategorii, maksymalną wartością niekorzystnego wpływu wyróżniały się perowskitowe panele fotowoltaiczne, dla których zastosowano składowanie na wysypisku odpadów jako formę zagospodarowania poużytkowego. Recyklingu tworzyw, materiałów i elementów nienadających się do dalszej eksploatacji pozwoliłby na istotne zmniejszenie destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie wszystkich zespołów elementów badanego obiektu technicznego. Biorąc pod uwagę dane zestawione

w tabeli Z.18 zdecydowano się wykonać szczegółową analizę dwóch kategorii charakteryzujących się maksymalnym poziomem niekorzystnego wpływu na zdrowie człowieka (procesy wpływające na dostępność wody i emisja substancji powodujących zmiany klimatu) oraz dwóch – powodujących największe obniżenie jakości środowiska (emisja substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych i substancji powodujących zmiany klimatu).

Analogicznie jak w przypadku wcześniej badanych elektrowni, maksymalna wartość szkodliwego wpływu w obszarze procesów wpływających na dostępność wody oddziałujących na zdrowie człowieka, wyróżniała cykl istnienia paneli PV (składowanie: $2,02 \cdot 10^0$ DALY, recykling: $1,21 \cdot 10^0$ DALY), był on jednak niższy od tego odnotowanego cyklu paneli mono- i polikrystalicznych: dla zagospodarowania w formie składowania kolejno o ok. 30 i 14%, a dla recyklingu – o ok. 25 i 23%. Natomiast w porównaniu do paneli amorficznych był on wyższy o ok. 53% dla składowania oraz o ok. 67% dla recyklingu. Najniższym poziomem destrukcyjnego oddziaływania na dostępność wody w przypadku elektrowni perowskitowej cechowała się z kolei instalacja elektryczna (składowanie: $1,09 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $2,06 \cdot 10^{-3}$ DALY). Był on niższy w porównaniu do wpływu analogicznych instalacji w elektrowniach mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej kolejno o ok. 12, 25 i 36% w przypadku składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 11, 24 i 36% – dla procesów recyklingu (rys. 5.34).

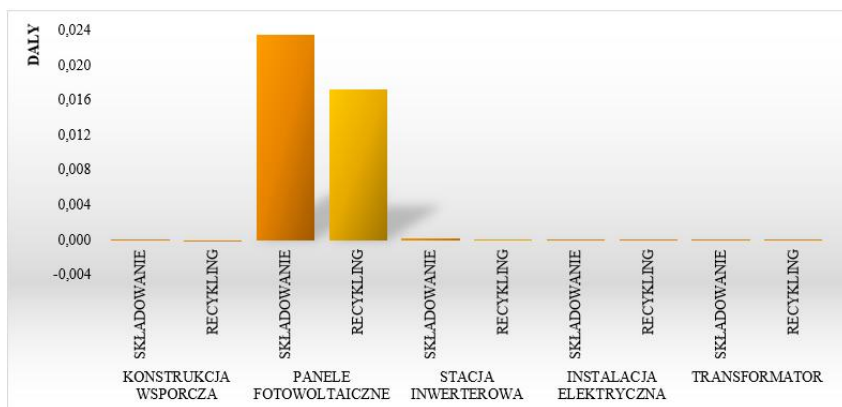


Rys. 5.34. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Spośród procesów wpływających na ograniczenie dostępności wody w cyklu istnienia elektrowni perowskitowej można wymienić zużycie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (podczas wytwarzania energii elektrycznej). Przemysł odgrywa istotną rolę w sprostaniu wyzwaniom związanym ze zrównoważonym gospodarowaniem zasobami wody. Większość tego cennego zasobu jest zużywana w przemyśle do celów chłodniczych, jednak tylko co drugi zakład w Polsce wykorzystuje ją

w obiegu (możliwie) zamkniętym. W tym obszarze jest zatem jeszcze miejsce na wprowadzenie ulepszeń. Spadek zużycia wody w przedsiębiorstwach jest możliwy dzięki zastosowaniu technologii przyjaznych dla środowiska. Koniecznym jest zatem sterowanie cyklem istnienia obiektów technicznych w obszarze optymalizacji i zmniejszenia zużycia zasobów wody (rys. 5.34) [203].

W przypadku emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na zdrowie człowieka, ponownie maksymalny poziom niepożądanych emisji zauważono w cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $2,35 \cdot 10^{-2}$ DALY, recykling: $1,73 \cdot 10^{-2}$ DALY). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych był on niższy kolejno o ok. 17 i 7% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 19 i 10% – dla procesów recyklingu. Natomiast w porównaniu do paneli amorficznych – był wyższy o ok. 13% dla składowania oraz o ok. 3 % dla recyklingu. W analizowanym obszarze najniższe wartości niekorzystnych emisji dla elektrowni perowskitowej wyróżniały instalację elektryczną (składowanie: $7,86 \cdot 10^{-5}$ DALY, recykling: $3,87 \cdot 10^{-5}$ DALY). Porównując otrzymane wartości do poziomu emisji w cyklach istnienia instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, były one niższe kolejno o ok. 6, 24 i 36% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 12, 25 i 36% – w odniesieniu do recyklingu. Wytwarzanie perowskitowych paneli PV, jest związane z koniecznością dostarczania istotnych ilości energii pochodzącej głównie ze źródeł konwencjonalnych. W efekcie odnotowany zostaje wysoki poziom emisji gazów cieplarnianych i innych substancji mających wpływ na pogłębianie zmian klimatycznych. Wśród związków chemicznych oddziałujących na zmiany klimatu w cyklu istnienia elektrowni perowskitowej, najwyższym poziomem szkodliwego oddziaływania wyróżniały się emisje: ditlenku węgla, metanu, tlenu diazotu, heksafluorku siarki, tetrafluorometanu (CFC-14), heksafluoroetanu (HFC-116) oraz trifluorometanu (HFC-23) (rys. 5.35).

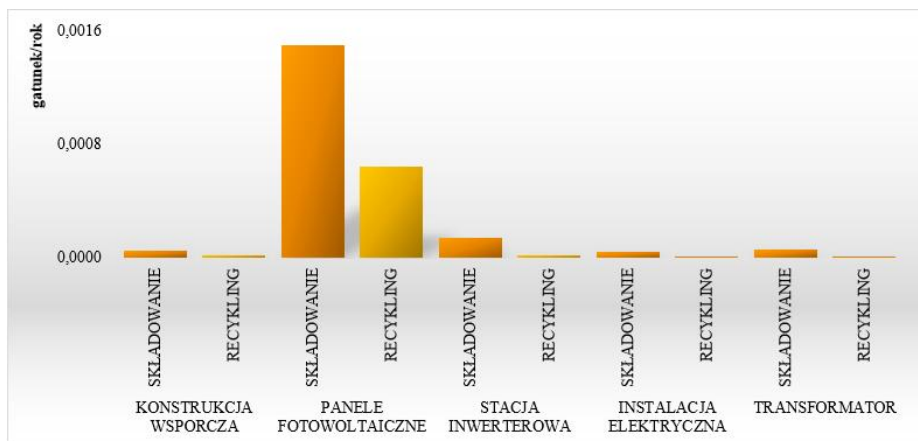


Rys. 5.35. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Kwestia ocieplania klimatu w ciągu ostatnich lat stała się istotnym problemem i wyzwaniem dla całego świata. Koniecznym jest podjęcie zdecydowanych kroków, które będą miały na celu zahamowanie negatywnych zmian. Ich powstrzymanie jest zadaniem kluczowym, a sukces w tym względzie jest uzależniony nie tylko od podejmowanych decyzji gospodarczych i politycznych, ale także od działań każdego człowieka. Za najważniejsze uważa się w tym względzie ograniczenie emisji gazów szklarniowych do atmosfery. Z tego względu jeden z kluczowych elementów stanowi przejście od paliw kopalnych w kierunku alternatywnych źródeł energii. W związku z powyższym, niezbędnym wydaje się takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, które umożliwi minimalizację energochłonności procesów technologicznych, szczególnie wykorzystujących energię ze źródeł nieodnawialnych (rys. 5.35) [203].

Najwyższe wartości niekorzystnego wpływu w obszarze emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, charakteryzowały cykl istnienia paneli PV (składowanie: $1,50 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok, recykling: $6,46 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Porównując odnotowany poziom szkodliwego oddziaływania w stosunku do cykli istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, widocznym jest, że był on niższy kolejno o ok. 21 i 7% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 28 i 18% – dla recyklingu. W odniesieniu paneli amorficznych był on wyższy o ok. 21% dla scenariusza składowania oraz o ok. 13% dla scenariusza recyklingu. Najniższymi wartościami destrukcyjnych wpływów dla elektrowni perowskitowej w analizowanym obszarze wyróżniała się instalacja elektryczna (składowanie: $3,97 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $1,08 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok). W porównaniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, jej cykl istnienia zakładający składowanie na wysypisku generował kolejno o ok. 12, 25 i 37% mniej niepożądanych następstw dla środowiska, z kolei dla recyklingu – o ok. 12, 24 i 36%. Recykling jako forma zagospodarowania tworzyw, materiałów i elementów, powodowała obniżenie niekorzystnego oddziaływania wszystkich cykli istnienia badanych grup elementów. Wśród materiałów konstrukcyjnych elektrowni opartej na panelach perowskitowych o najwyższym wpływie na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Mangan jest metalem przejściowym, o kolorze stalowo-szarym, lekko połyskującym, rdzewiejącym w kontakcie z wilgocią. Większość produkowanego manganu zostaje wykorzystywana do wytwarzania stali, w tym również nierdzewnej. Dodaje się go także do stopów z aluminium, dzięki czemu jego odporność na korozję ulega poprawie. Oprócz metalurgii, stanowi on dodatek do paliw, szkła, cementu czy farb. Mangan jest mikroelementem pokarmowym niezbędnym do życia. W organizmie człowieka odpowiada za wiele kluczowych procesów m.in. za metabolizm węglowodanów, cholesterolu, glukozy i aminokwasów oraz bierze udział w prawidłowym funkcjonowaniu układu nerwowego i kostnego. Zbyt duża ilość manganu może powodować zaburzenia pracy wątroby, tarczycy oraz układu

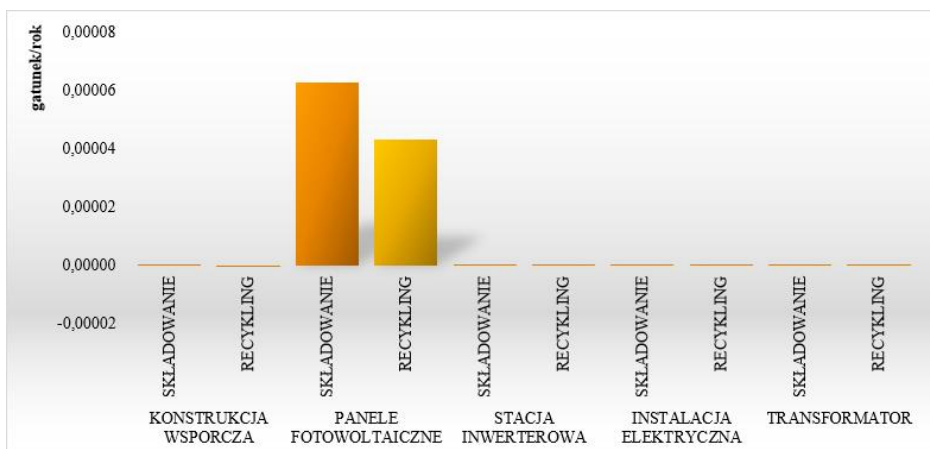
nerwowego. W przypadku roślin ma wpływ na zwiększenie intensywności oddychania, asymilacji ditlenku węgla czy syntezy węglowodanów. Jego nadmiar powoduje choroby i obumieranie roślin, skutkując zmniejszeniem bioróżnorodności. Ważnym jest zatem sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych w kierunku zmniejszenia wykorzystywania manganu oraz jego związków w procesach technologicznych (rys. 5.36) [203].



Rys. 5.36. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Maksymalny poziom destrukcyjnego oddziaływania w zakresie emisji substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), także cechował cykl istnienia paneli fotowoltaicznych (składowanie: $6,31 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $4,34 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok). Poziom ich szkodliwego wpływu w porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych były niższe kolejno o ok. 43 i 33% dla cyklu istnienia z zagospodarowaniem w formie składowania oraz o ok. 30 i 21% – dla procesów recyklingu. Z kolei w odniesieniu do paneli amorficznych był około dwukrotnie wyższy dla obu form zagospodarowania. Najniższą wartością niepożądanego oddziaływania w analizowanym zakresie cechował się natomiast cykl istnienia instalacji elektrycznej elektrowni perowskitowej (składowanie: $1,73 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok, recykling: $8,54 \cdot 10^{-8}$ gatunku/rok). W porównaniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, jej niekorzystny wpływ był niższy kolejno o ok. 11, 24 i 18% dla składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 12, 25 i 36% – dla recyklingu. Wśród związków chemicznych występujących w cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach perowskitowych, powodujących najczęściej destrukcyjnych wpływów w odniesieniu do zmian klimatycznych, można wyróżnić: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Obecnie na świecie obserwowane są

dynamiczne, niepokojące zmiany związane z kryzysem klimatycznym. Stężenie ditlenku węgla w atmosferze przekroczyło poziom 420 ppm, a jego wzrost postępuje w tempie dotąd niespotykanym. Dowodzi to, że dotychczasowe działania mające na celu ograniczenie emisji GHG są niewystarczające. W związku z tym konieczne staje się bardziej efektywne sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, ukierunkowane na redukcję ich zapotrzebowania na energię, zwłaszcza pochodzącą ze źródeł nieodnawialnych (rys. 5.37) [1].



Rys. 5.37. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Najwyższą wartością szkodliwego wpływu na zdrowie człowieka i jakość ekosystemów cechuje się cykl istnienia paneli fotowoltaicznych perowskitowych, dla których przyjęto scenariusz zagospodarowania poużytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów (zdrowie człowieka: $2,06 \cdot 10^0$ DALY, jakość ekosystemów: $1,62 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok). W porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych, ich poziom destrukcyjnego oddziaływania był niższy kolejno o ok. 30 i 13% w obszarze zdrowia człowieka oraz o ok. 23 i 10% w zakresie jakości ekosystemów. Natomiast w odniesieniu do paneli amorficznych, był on wyższy o ok. 47% dla składowania oraz o ok. 30% dla procesów recyklingu. Wykorzystanie recyklingu jako formy zagospodarowania poużytkowego wszystkich ocenianych grup elementów elektrowni perowskitowej umożliwiłoby istotne zmniejszenie łącznych niepożądanych oddziaływań dla zdrowia człowieka o ok. 24%, natomiast dla jakości ekosystemów – o ok. 59% (tab. 5.10).

Tab. 5.10. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania poużytkowego	Kategoria wpływu	
		Zdrowie człowieka [DALY]	Jakość ekosystemów [gatunek/rok]
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$1,86 \cdot 10^{-2}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$-1,62 \cdot 10^{-2}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$2,06 \cdot 10^0$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
	recykling	$1,62 \cdot 10^0$	$7,25 \cdot 10^{-4}$
Stacja inwerterowa	składowanie	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$
	recykling	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
Instalacja elektryczna	składowanie	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$
Transformator	składowanie	$2,50 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$
	recykling	$9,99 \cdot 10^{-3}$	$9,33 \cdot 10^{-6}$

5.4.1.2. Normalizowanie

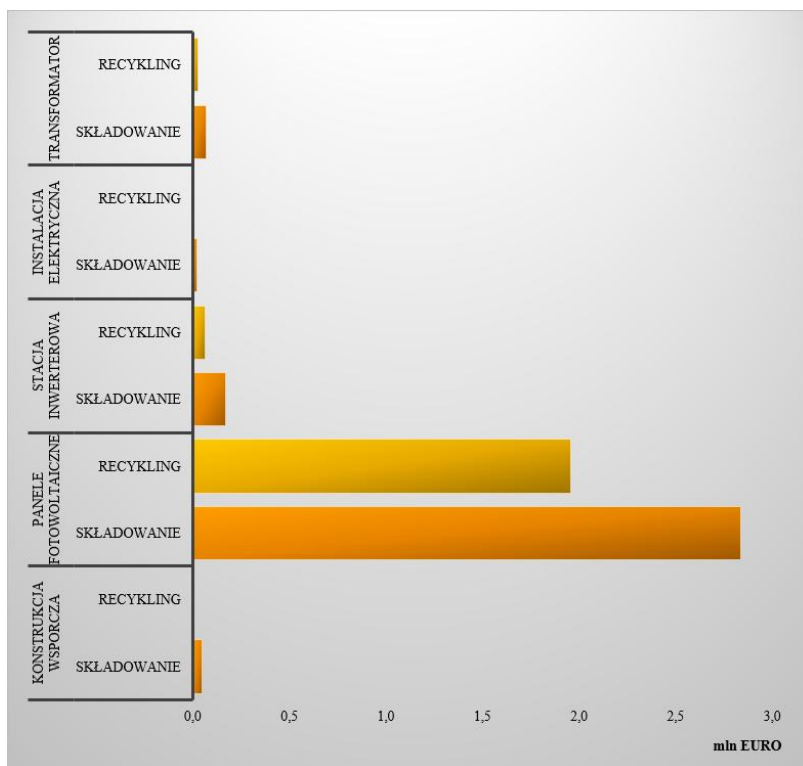
Wyniki etapu normalizowania następstw środowiskowych w cyklu istnienia perowskitowej elektrowni fotowoltaicznej dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz dwóch odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego zostały zaprezentowane w tabeli Z.19 (załącznik do rozprawy). Maksymalny poziom szkodliwego oddziaływania na otoczenie charakteryzował cykl istnienia paneli fotowoltaicznych. Cechuje się on najwyższą energo- i materiałochłonnością w porównaniu do pozostałych grup elementów konstrukcyjnych ocenianej elektrowni.

5.4.1.3. Grupowanie i ważenie

W tabeli Z.20 (załącznik do rozprawy) zobrazowano wyniki grupowania i ważenia następstw środowiskowych w cyklu istnienia perowskitowej elektrowni fotowoltaicznej. Wszystkie rozważane grupy elementów konstrukcyjnych cechowały się najwyższym poziomem niekorzystnego oddziaływania na otoczenie w następujących kategoriach wpływu: substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa krótko- i długoterminowa), substancje powodujące zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa) oraz substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa). Dla wymienionych kategorii, elementem konstrukcyjnym wyróżniającym się maksymalną wartością niepożądanych oddziaływań na otoczenie są panele fotowoltaiczne (łącznie składowanie: $5,82 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $3,62 \cdot 10^6$ EUR). W porównaniu do cyklu istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, ich całkowity poziom szkodliwego wpływu na otoczenie jest kolejno o ok. 45 i 28% niższy dla zagospodarowania poużytkowego

w formie składowania oraz o ok. 38 i 25% – dla procesów recyklingu. Z kolei w odniesieniu do paneli amorficznych, jest on o ok. 71% wyższy w przypadku składowania oraz o ok. 48% – dla recyklingu. Po uwzględnieniu danych z tabeli Z.20 postanowiono szczegółowo omówić trzy kategorie cechujące się największym niepożądanym oddziaływaniem na otoczenie, a mianowicie obejmujące procesy wpływające na dostępność wody oddziałujące na zdrowie człowieka, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz emisje substancji powodujących zmiany klimatu wpływające na jakość ekosystemów.

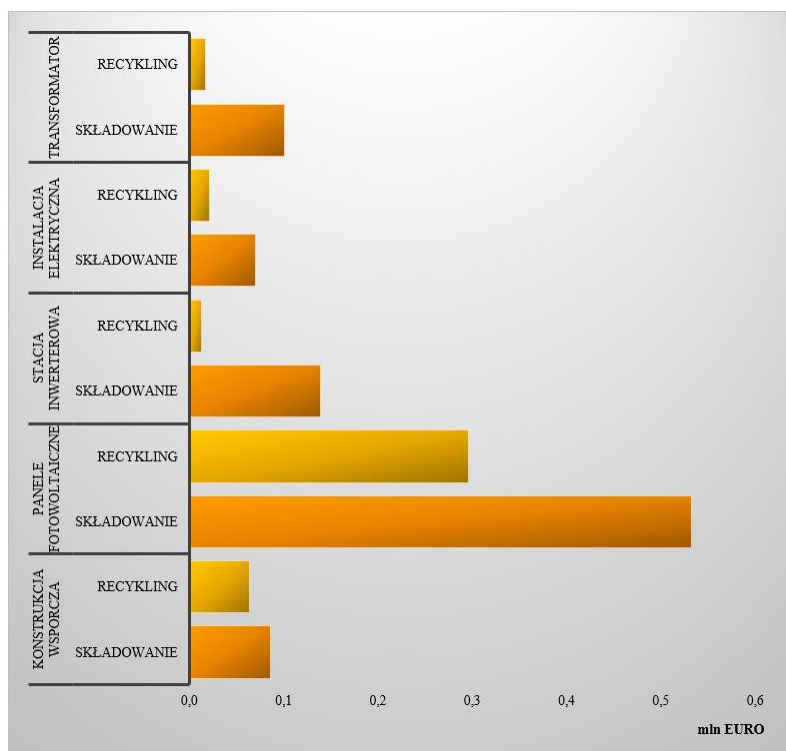
Najwyższą wartością potencjalnych kosztów środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia perowskitowej elektrowni fotowoltaicznej, charakteryzował się cykl istnienia paneli PV (składowanie: $2,84 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $1,96 \cdot 10^6$ EUR). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych były one niższe kolejno o ok. 35 i 26% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 19 i 14% – dla procesów recyklingu. Natomiast w porównaniu do cyklu istnienia paneli amorficznych były około dwukrotnie wyższe dla obu scenariuszy zagospodarowania poużytkowego. Najmniejsze potencjalne koszty środowiskowe były związane z cyklem istnienia instalacji elektrycznej elektrowni perowskitowej (składowanie: $2,20 \cdot 10^4$ EUR, recykling: $3,80 \cdot 10^3$ EUR). W odniesieniu do tego typu instalacji w elektrowniach mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, były one wyższe kolejno o ok. 12, 25 i 36% dla obu form zagospodarowania tworzyw, materiałów i elementów. Wśród procesów powodujących zmniejszenie dostępności wody w cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach perowskitowych, największym niepożądanym wpływem cechuje się zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (w trakcie wytwarzania energii). Woda jest jednym z kluczowych czynników determinujących rozwój społeczno-gospodarczy poszczególnych krajów i regionów. Ilość i jakość dostępnej wody na danym obszarze wynika głównie z naturalnych zasobów związanych z jej obiegiem w przyrodzie. Cel strategiczny zintegrowanego, zrównoważonego zarządzania zasobami wodnymi stanowi osiągnięcie, a następnie utrzymanie dobrego stanu wód. Ma on na celu nie tylko zaspokojenie potrzeb wodnych odmiennych użytkowników (poszczególne osoby, zakłady przemysłowe czy cała gospodarka), ale również zapewnienie bezpieczeństwa wodnego (rozumianego jako ochrona przed suszą i powodzią, gospodarcze wykorzystanie rzek przez żeglugę śródlądową, energetykę, rolnictwo, turystykę oraz rekreację). W związku z powyższym, na każdym etapie cyklu istnienia obiektów technicznych należy wprowadzić działania sterujące w kierunku ochrony tego cennego, naturalnego dobra (rys. 5.38) [203].



Rys. 5.38. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Maksymalna wartość potencjalnie koniecznych do poniesienia kosztów środowiskowych w obszarze emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni perowskitowej także cechowała panele fotowoltaiczne (składowanie: $5,32 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $2,95 \cdot 10^5$ EUR). W odniesieniu do paneli mono- i polikrystalicznych, były one kolejno o ok. 20 i 7% niższe dla zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów w formie składowania oraz o ok. 26 i 5% – dla scenariusza uwzględniającego procesy recyklingu. W przypadku paneli amorficznych, były one wyższe o ok. 65% dla składowania i o ok. 37% dla recyklingu. Zagospodarowanie użytkowe z wykorzystaniem recyklingu istotnie zmniejszyło poziom niezbędnych do poniesienia kosztów w tym zakresie dla wszystkich badanych zespołów elementów elektrowni (konstrukcja wsporcza: o ok. 35%, stacja inwerterowa: o ok. 91%, instalacja elektryczna: o ok. 77%, transformator: o ok. 83%). Spośród materiałów konstrukcyjnych, których cykl istnienia w największym stopniu powoduje zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Kadm jest metalem ciężkim,

uważanym za toksyczny, nie pełniącym funkcji fizjologicznych. Istnieje wiele różnych form narażenia na ten pierwiastek, jednak największe emisje do otoczenia mają podłoże antropologiczne. Jest on stosowany w przemyśle jako odczynnik trawiący oraz jako stabilizator w produktach z PCV czy barwnikach. Kadm może być również emitowany do środowiska na skutek procesów wytopu i rafinacji niklu oraz miedzi, jak również spalania paliw kopalnych. Dostaje się także do otoczenia w trakcie procesów wytwarzania w hutach metali nieżelaznych oraz podczas recyklingu odpadów elektronicznych. Do uwalniania kadmu przyczynia się działalność kopalni miedzi, ołowiu i cynku. Nadmierna ekspozycja na ten pierwiastek może powodować np. dysfunkcję wątroby i nerek, uszkodzenie układu krwiotwórczego czy obrzęk płuc. Kadm jest zaliczany do grupy czynników rakotwórczych. Niezbędnym staje się zatem takie sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych, aby ograniczyć wykorzystywanie kadmu w procesach technologicznych (rys. 5.39) [28,59].



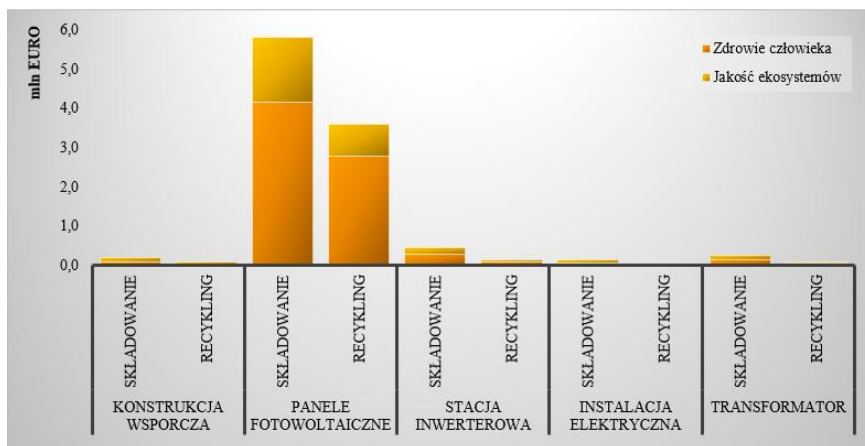
Rys. 5.39. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W zakresie emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), maksymalnym poziomem koniecznych do poniesienia kosztów środowiskowych również

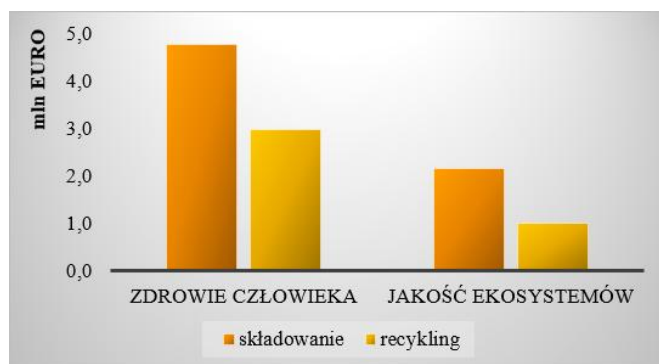
Zmiany klimatu postępują tak szybko, że wiele gatunków zwierząt i roślin nie jest w stanie się do nich przystosować. Bezpośrednie negatywne skutki dla bioróżnorodności obejmują zmiany zachowania, składu populacji, rozmieszczenia i liczebności gatunków czy procesów ekosystemowych. Z kolei skutki pośrednie powstają ze względu na zmiany w sposobie użytkowania gruntów oraz innych zasobów. Mogą one obejmować np. utratę lub fragmentację siedlisk w konsekwencji nadmiernej eksploatacji zasobów, zanieczyszczenia gleby, wody i powietrza czy rozprzestrzeniania się obcych, inwazyjnych gatunków. Z tego względu koniecznym jest sterowanie cyklami istnienia obiektów technicznych w kierunku istotnego zmniejszenia poziomu energochłonności procesów technologicznych w nich występujących (szczególnie wykorzystujących energię ze źródeł kopalnych) (rys. 5.40) [255].

Wśród wszystkich badanych zespołów elementów rozważanego obiektu technicznego, perowskitowe panele fotowoltaiczne charakteryzują się najbardziej niekorzystnym wpływem na otoczenie (łącznie składowanie: $5,82 \cdot 10^6$ EUR, recykling: $3,62 \cdot 10^6$ EUR). Jeżeli jako forma zagospodarowania poużytkowego zostanie zastosowane składowanie na wysypisku odpadów, poziom ich oddziaływania na zdrowie człowieka będzie stanowił ok. 72% całkowitego wpływu, natomiast w przypadku wykorzystania scenariusza obejmującego procesy recyklingu – będzie to ok. 77%. Drugą najwyższą wartością potencjalnych kosztów środowiskowych wyróżnia się cykl istnienia stacji inwerterowej (łącznie składowanie: $4,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,51 \cdot 10^5$ EUR), którego oddziaływanie na zdrowie człowieka obejmuje ok. 61% całkowitego wpływu dla zagospodarowania w formie składowania oraz ok. 71% – w przypadku recyklingu. Trzecim najwyższym poziomem charakteryzuje się cykl istnienia stacji transformatorowej (łącznie składowanie: $2,73 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $1,02 \cdot 10^5$ EUR), dla składowania ok. 52% całkowitego oddziaływania stanowi wpływ na zdrowie, natomiast dla recyklingu – ok. 59%. W odniesieniu do dwóch ostatnich grup elementów – konstrukcji wsporczej oraz instalacji elektrycznej, recykling znacząco ograniczył udział szkodliwych wpływów na zdrowie człowieka. W przypadku konstrukcji wsporczej (łącznie składowanie: $2,12 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $8,79 \cdot 10^4$ EUR) było to ok. 50% dla składowania i ok. 25% dla recyklingu, natomiast dla instalacji elektrycznej – ok. 44% dla składowania i ok. 39% dla recyklingu (łącznie składowanie: $1,55 \cdot 10^5$ EUR, recykling: $5,10 \cdot 10^4$ EUR) (rys. 5.41).

Cykl istnienia analizowanej elektrowni w większym stopniu wpływa na pogorszenie jakości zdrowia człowieka niż na obniżenie jakości ekosystemów. Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania poużytkowego może znacząco zmniejszyć oddziaływania ocenianego obiektu technicznego – w zakresie zdrowia o ok. 37%, natomiast dla jakości ekosystemów – o ok. 53%. Niezbędnym jest zatem takie sterowanie cyklem istnienia elektrowni perowskitowej, aby zmniejszyć poziom jej destrukcyjnego wpływu na zdrowie człowieka, szczególnie w odniesieniu do paneli PV (rys. 5.42).



Rys. 5.41. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)



Rys. 5.42. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych obszarów oddziaływania (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

5.4.1.4. Model IPCC 2021

Zagospodarowanie użytkowe w formie składowania wyróżniało się wyższym łącznym poziomem emisji gazów szklarniowych dla cykli istnienia wszystkich analizowanych zespołów elementów konstrukcyjnych, w porównaniu do zagospodarowania z wykorzystaniem scenariusza obejmującego recykling. Perowskitowe panele fotowoltaiczne cechują się maksymalnym poziomem generowanych szkodliwych emisji w porównaniu do pozostałych zespołów elementów budujących rozważany obiekt techniczny (składowanie: $5,78 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $2,85 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). W odniesieniu do cyklu istnienia paneli mono- i polikrystalicznych, poziom niepożądanych emisji był niższy kolejno

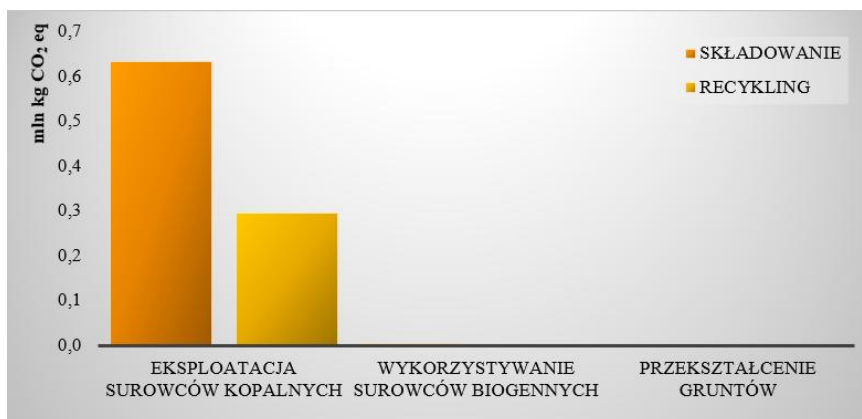
o ok. 40 i 33% dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 46 i 37% – dla procesów recyklingu. Z kolei w porównaniu do paneli amorficznych był on około dwukrotnie wyższy dla obu form zagospodarowania poużytkowego. Najmniejszy wpływ na łączny poziom emisji w cyklu istnienia elektrowni perowskitowej wyróżniał instalację elektryczną (składowanie: $7,54 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $1,48 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq). W porównaniu do analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, wartość ocenianych emisji dla instalacji w elektrowni perowskitowej była kolejno o ok. 12, 24 i 36% wyższa dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 11, 25 i 36% – dla scenariusza obejmującego procesy recyklingu (tab. 5.11).

Tab. 5.11. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq)

Element obiektu technicznego	Forma zagospodarowania poużytkowego	Emisja gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z			RAZEM
		eksploatacją surowców kopalnych	wykorzystywaniem surowców biogennych	przekształceniem gruntów	
Konstrukcja wsporcza	składowanie	$1,13 \cdot 10^4$	$2,45 \cdot 10^2$	$3,71 \cdot 10^1$	$1,16 \cdot 10^4$
	recykling	$-1,63 \cdot 10^3$	$5,87 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^1$	$-1,56 \cdot 10^3$
Panele fotowoltaiczne	składowanie	$5,74 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$5,78 \cdot 10^5$
	recykling	$2,83 \cdot 10^5$	$1,16 \cdot 10^3$	$4,99 \cdot 10^2$	$2,85 \cdot 10^5$
Stacja inwerterowa	składowanie	$2,21 \cdot 10^4$	$4,38 \cdot 10^2$	$5,74 \cdot 10^1$	$2,26 \cdot 10^4$
	recykling	$6,43 \cdot 10^3$	$3,60 \cdot 10^1$	$9,15 \cdot 10^0$	$6,48 \cdot 10^3$
Instalacja elektryczna	składowanie	$7,34 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^2$	$2,78 \cdot 10^1$	$7,54 \cdot 10^3$
	recykling	$1,48 \cdot 10^3$	$1,79 \cdot 10^0$	$1,01 \cdot 10^0$	$1,48 \cdot 10^3$
Transformator	składowanie	$1,74 \cdot 10^4$	$3,51 \cdot 10^2$	$4,61 \cdot 10^1$	$1,78 \cdot 10^4$
	recykling	$5,81 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^1$	$1,06 \cdot 10^1$	$5,87 \cdot 10^3$

Spośród ocenianych kategorii wpływu, najwyższe wartości emisji gazów szklarniowych odnotowano dla procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (składowanie: $6,32 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq, recykling: $2,95 \cdot 10^5$ kg CO₂ eq). W porównaniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej, poziom destrukcyjnych emisji był niższy kolejno o ok. 39 i 31% dla cyklu istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania oraz o ok. 46 i 36% – dla scenariusza obejmującego recykling. W odniesieniu do cyklu istnienia elektrowni amorficznej był on jednak wyższy o ok. 51% dla składowania oraz o ok. 11% dla recyklingu. W cyklu istnienia elektrowni perowskitowej, najmniejsza wartość emisji GHG została zauważona w przypadku kategorii przekształcania gruntów (składowanie: $1,24 \cdot 10^3$ kg CO₂ eq, recykling: $5,30 \cdot 10^2$ kg CO₂ eq). W porównaniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej były one niższe kolejno o ok. 39, 33 i 2% dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 46, 40 i 35% – dla recyklingu. Zastosowanie scenariusza obejmującego procesy recyklingu umożliwia istotne zmniejszenie łącznego poziomu szkodliwych emisji w perspektywie całego cyklu istnienia elektrowni amorficznej

(łącznie o ok. 47%). Koniecznym wydaje się zatem takie sterowanie cyklami istnienia elektrowni perowskitowych, aby zmniejszyć poziom emisji gazów cieplarnianych, szczególnie w odniesieniu do paneli PV (rys. 5.43).

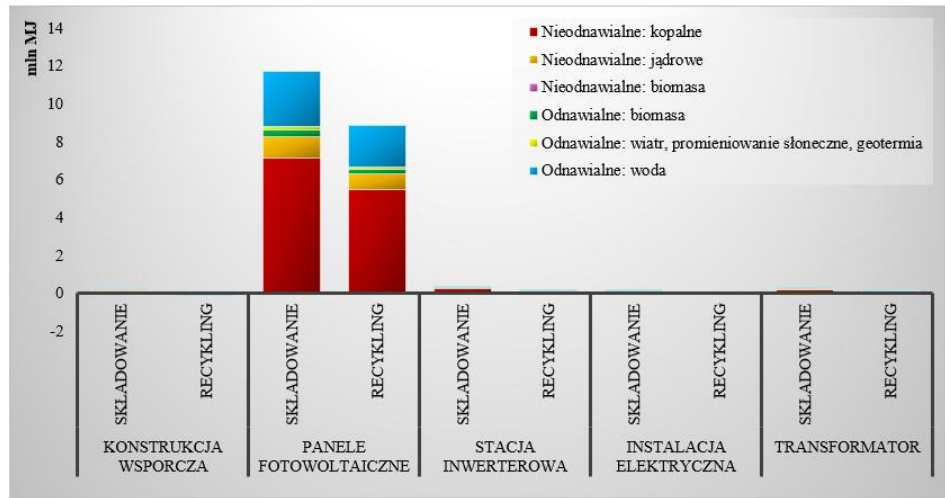


Rys. 5.43. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

5.4.1.5. Model CED

Najwyższą wartością skumulowanego zapotrzebowania na energię cechował się cykl istnienia perowskitowych paneli fotowoltaicznych (składowanie: $1,17 \cdot 10^7$ MJ, recykling: $8,89 \cdot 10^6$ MJ). Maksymalny procentowy udział w badanym zakresie charakteryzował zapotrzebowanie na energię ze źródeł kopalnych (składowanie: ok. 61%, recykling: ok. 62%). W porównaniu do paneli mono- i polikrystalicznych, rozwiązanie perowskitowe wyróżniało się niższym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię, które wynosiło kolejno o ok. 37 i 23% mniej dla zagospodarowania w formie składowania oraz o ok. 14 i 11% – dla procesów recyklingu. Z kolei w odniesieniu do paneli amorficznych, cechowało się około dwukrotnie wyższym zapotrzebowaniem na energię dla każdego z rozważanych scenariuszy zagospodarowania użytkowego. Wytwarzanie paneli PV stanowi proces charakteryzujący się wysokim stopniem energo- i materiałochłonności, stanowiąc podstawową przyczynę wysokiego poziomu zapotrzebowania na energię w rozpatrywanym zakresie. Najniższy poziom skumulowanego zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni perowskitowej wyróżniał z kolei instalację elektryczną (składowanie: $1,65 \cdot 10^5$ MJ, recykling: $4,81 \cdot 10^4$ MJ), dla której zapotrzebowanie ze źródeł kopalnych dla zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów wynosiło ok. 74% zapotrzebowania całkowitego, a dla procesów recyklingu – ok. 83%. W porównaniu do cyklu istnienia analogicznych instalacji elektrowni mono- i polikrystalicznej oraz amorficznej, zapotrzebowanie na

energię było kolejno o ok. 12, 25 i 36% niższe dla obu przyjętych możliwości zagospodarowania poużytkowego (rys. 5.44).



Rys. 5.44. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanego obiektu technicznego (model CED, jednostka: mln MJ)

Najwyższy poziom skumulowanego zapotrzebowania na energię zauważono dla kategorii obejmującej wykorzystanie źródeł kopalnych (składowanie: $7,88 \cdot 10^6$ MJ, recykling: $5,76 \cdot 10^6$ MJ). Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania poużytkowego w istotnym stopniu umożliwiłoby zmniejszenie wielkości zapotrzebowania na nią w perspektywie całego cyklu istnienia badanego obiektu technicznego (łącznie o ok. 72%) (tab. 5.12).

Tab. 5.12. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

Lp.	Kategoria wpływu	Forma zagospodarowania poużytkowego	
		składowanie	recykling
1.	Nieodnawialne: kopalne	$7,88 \cdot 10^6$	$5,76 \cdot 10^6$
2.	Nieodnawialne: jądrowe	$1,23 \cdot 10^6$	$8,42 \cdot 10^5$
3.	Nieodnawialne: biomasa	$5,90 \cdot 10^2$	$1,43 \cdot 10^2$
4.	Odnawialne: biomasa	$3,32 \cdot 10^5$	$2,47 \cdot 10^5$
5.	Odnawialne: wiatr, promieniowanie słoneczne, geotermia	$2,35 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^5$
6.	Odnawialne: woda	$3,06 \cdot 10^6$	$2,20 \cdot 10^6$
RAZEM		$1,27 \cdot 10^7$	$9,18 \cdot 10^6$

W porównaniu do elektrowni mono- i polikrystalicznej, cykl istnienia elektrowni perowskitowej cechuje się niższym kolejno o ok. 60 i 51%

skumulowanym zapotrzebowaniem na energię w przypadku zagospodarowania w formie składowania na wysypisku odpadów oraz o ok. 46 i 44% – dla procesów recyklingu. Z kolei w odniesieniu do elektrowni amorficznej jest ono niemal dwukrotnie wyższe dla obu form zagospodarowania poużytkowego. Niezbędnym staje się zatem sterowanie cyklem istnienia elektrowni perowskitowej w kierunku zmniejszenia poziomu jej skumulowanego zapotrzebowania na energię, w szczególności dla paneli fotowoltaicznych (tab. 5.12).

5.5. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ DLA ANALIZOWANYCH OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

5.5.1. Model IMPACT World+

5.5.1.1. Charakteryzowanie

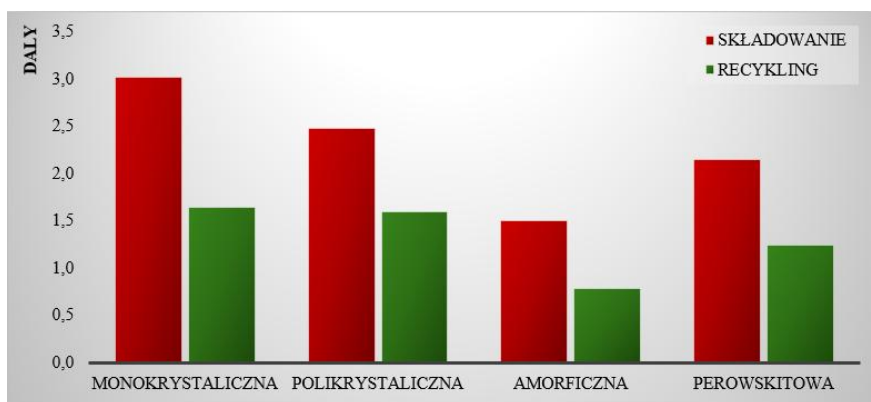
Po przeprowadzeniu analiz potencjalnego oddziaływania na otoczenie poszczególnych elektrowni fotowoltaicznych (opartych na modułach monokrystalicznych, polikrystalicznych, amorficznych i perowskitowych), dokonano ich porównania w dwóch zasadniczych obszarach – zdrowie człowieka i jakość ekosystemów, ponownie uwzględniając dwa odmienne scenariusze zagospodarowania poużytkowego (składowanie, recykling).

Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka

Pierwszy etap oceny obejmował analizę wpływu na zdrowie człowieka. W jej ramach dokonano porównania oddziaływania całkowitego cykli istnienia wszystkich rozważanych elektrowni oraz ich poszczególnych grup elementów (konstrukcja wsporcza, panele PV, stacja inwerterowa, instalacja elektryczna, transformator). Dodatkowo szczegółowo omówiono oddziaływanie cykli istnienia elektrowni na zdrowie w ramach dwóch kategorii wpływu wywierających największe destrukcyjne oddziaływanie w tym względzie, a mianowicie obejmujące procesy wpływające na dostępność wody oraz emisje substancji powodujących zmiany klimatu.

Najwięcej szkodliwych wpływów w obszarze całkowitego oddziaływania na zdrowie człowieka generuje elektrownia monokrystaliczna, której tworzywa, materiały i elementy będą składowane na wysypisku odpadów po zakończeniu eksploatacji (3,01 DALY), natomiast najmniejsze destrukcyjne wpływy wyróżniają elektrownię amorficzną, dla której przyjęto recykling jako formę zagospodarowania poużytkowego (0,78 DALY). Niekorzystne oddziaływanie na zdrowie człowieka w cyklu istnienia elektrowni polikrystalicznej jest niższe o ok. 18%, elektrowni amorficznej – o ok. 50%, a elektrowni perowskitowej – o ok. 29%, w porównaniu do elektrowni monokrystalicznej (scenariusz zagospodarowania: składowanie). W przypadku zastosowania procesów recyklingu, jest to o ok. 2,5% mniej dla elektrowni polikrystalicznej, ok. 53% dla elektrowni amorficznej i ok. 25% dla elektrowni perowskitowej. Kluczowym jest zatem sterowanie cyklami istnienia elektrowni fotowoltaicznych w kierunku

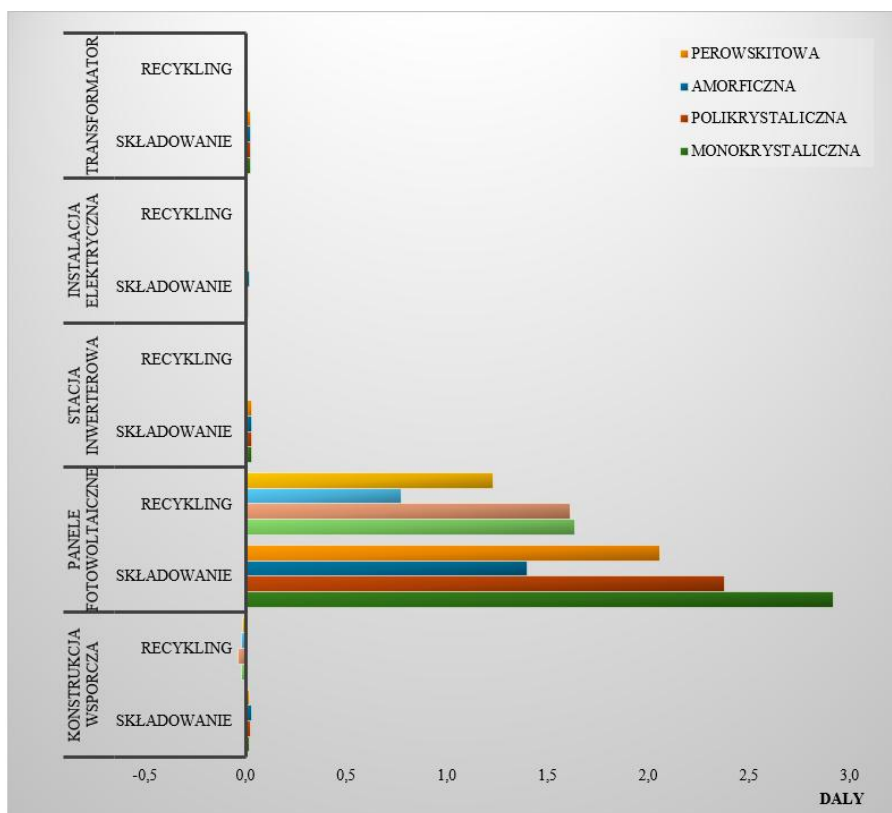
maksymalizacji udziału procesów recyklingu. Najniższy poziom wpływu na zdrowie człowieka elektrowni fotowoltaicznych opartych na modułach amorficznych jest konsekwencją faktu, że moduły są wytwarzane w dużo niższych temperaturach niż te z krzemu mono- i polikrystalicznego oraz perowskitowe, co m.in. wpływa na ograniczenie energochłonności procesów. Istotną wadą ograniczającą upowszechnienie elektrowni amorficznych jest niestabilność struktury amorficznej, która powoduje, że sprawność ogniw wynosi zaledwie około 10%, a ich żywotność około 10 lat. Są to znacząco niższe wartości w porównaniu do elektrowni opartych na modułach monokrystalicznych, polikrystalicznych i amorficznych (rys. 5.45).



Rys. 5.45. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Dla wszystkich analizowanych grup elementów elektrowni fotowoltaicznych, najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań w obszarze zdrowia człowieka cechował panele fotowoltaiczne. Niewątpliwie jest to spowodowane faktem, że spośród analizowanych komponentów budujących system fotowoltaiczny wyróżnia je największa masa oraz że do ich produkcji niezbędnych jest najwięcej energii i surowców. Recykling paneli PV powoduje ograniczenie ich niepożądanego wpływu w rozważanym obszarze, odpowiednio dla monokrystalicznych i amorficznych o ok. 44%, dla polikrystalicznych – o ok. 32%, a dla perowskitowych – o ok. 40%. Niezbędnym jest zatem zwrócenie szczególnej uwagi na sterowanie cyklami istnienia paneli PV w kierunku zwiększenia udziału recyklingu ich tworzyw, materiałów i elementów. Najmniejsze oddziaływanie na zdrowie spośród zespołów elementów budujących system fotowoltaiczny, w przypadku składowania jako formy zagospodarowania użytkowego, cechuje instalację elektryczną, którą wyróżnia najmniejszy udział masowy we wszystkich rozważanych obiektach technicznych. Niezwykle istotną kwestią jest maksymalizacja recyklingu tworzyw, materiałów i elementów konstrukcji wsporczej, wykonanej głównie z aluminium, stali oraz betonu. Tego

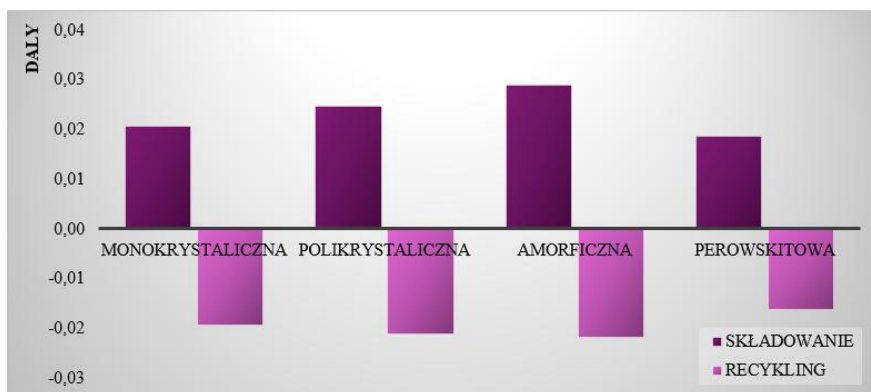
rodzaju działania umożliwiając odzyskanie znacznej ilości surowców i istotne ograniczenie zużycia energii niezbędnej do wytworzenia kolejnych elementów konstrukcyjnych. Produkcja wtórna aluminium zużywa zaledwie 5% energii wymaganej do produkcji pierwotnej i generuje tylko ok. 3-5% emisji wytwarzanych w jej ramach. Z kolei wykorzystywanie złomu stalowego do produkcji stali cechuje się zużyciem o ok. 56% mniej energii w porównaniu do produkcji pierwotnej (rys. 5.46) [204].



Rys. 5.46. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Składowanie jako forma zagospodarowania użytkowego konstrukcji wsporczych, w przypadku wszystkich badanych elektrowni, znacząco negatywnie wpływa na zdrowie. Dla wszystkich ocenianych elektrowni, recykling tego rodzaju elementów, składających się głównie ze stali, aluminium i betonu, w perspektywie ich całego cyklu istnienia, przynosi istotne korzyści dla zdrowia człowieka. Jest to spowodowane odzyskaniem surowców i energii, które należałoby wykorzystać na wyprodukowanie nowych elementów konstrukcyjnych. Recykling stali i aluminium prowadzi do zmniejszenia zużycia

energii, wody i surowców pierwotnych oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń do otoczenia. Ich zagospodarowanie w tej formie zmniejsza zużycie energii nawet o ok. 95% i wody o ok. 40% oraz ogranicza emisje zanieczyszczeń do środowiska atmosferycznego maksymalnie o ok. 86% oraz do środowiska wodnego – o ok. 76% (rys. 5.47) [120].

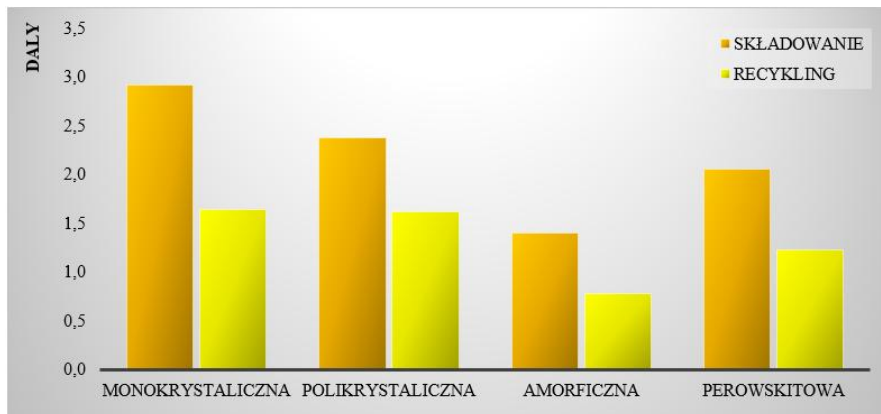


Rys. 5.47. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

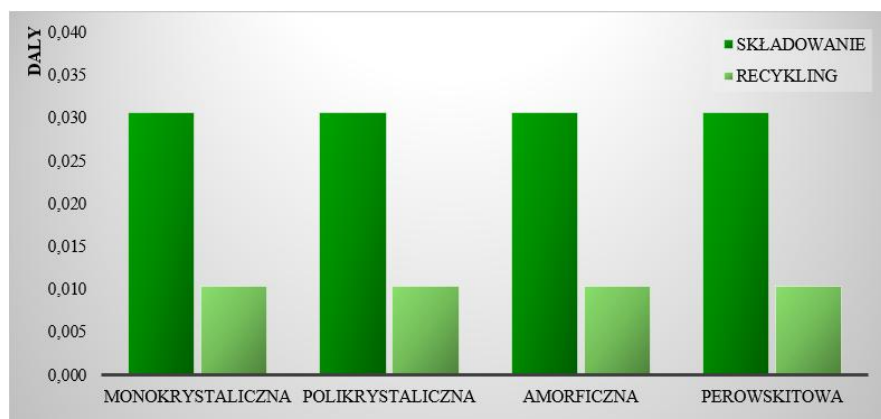
Destrukcyjne oddziaływanie na zdrowie człowieka paneli monokrystalicznych jest najwyższe zarówno dla scenariusza zagospodarowania obejmującego składowanie (2,92 DALY), jak i recykling (1,64 DALY). Najmniejszy negatywny wpływ w tym obszarze cechuje panele amorficzne (składowanie: 1,40 DALY, recykling: 0,78 DALY). Podczas produkcji krzemu mono- i polikrystalicznego zużywa się znaczne ilości surowców i energii, a w konsekwencji emitowane są substancje szkodliwe. Analizy wykonane dla poszczególnych elektrowni wykazały, że ważnym czynnikiem wpływającym na zdrowie jest m.in. dostępność wody. Brak dostępu lub jej niska jakość niekorzystnie oddziałuje na zdrowie ludzi, skutkując rozwojem wielu chorób oraz skracaniem potencjalnej długości życia. Dlatego w ramach sterowania cyklem istnienia paneli PV istotnym jest ograniczenie wykorzystania wody oraz jej zanieczyszczenia, szczególnie podczas procesów wytwarzania i zagospodarowania poużytkowego. Recykling paneli fotowoltaicznych może ograniczyć destrukcyjny wpływ na zdrowie – w przypadku paneli monokrystalicznych i amorficznych o ok. 44%, dla polikrystalicznych o ok. 32% i dla perowskitowych o ok. 40%. Niezbędnym staje się zatem sterowanie cyklami istnienia paneli PV w zakresie zmniejszenia zapotrzebowania na stal i aluminium oraz zrównoważonego gospodarowania zasobami wody (rys. 5.48).

Ze względu na fakt, że badane elektrownie miały tę samą moc (1 MW), we wszystkich przypadkach zastosowano analogiczne stacje inwerterowe. Oddziaływanie cyklu istnienia ich tworzyw i materiałów, które po zakończeniu

eksploatacji będą składowane wynosi 0,031 DALY, natomiast jeżeli zostaną poddane procesom recyklingu – będzie równe 0,01 DALY. Recykling powoduje zatem znaczną redukcję negatywnego wpływu stacji na zdrowie (o ok. 66%) (rys. 5.49).



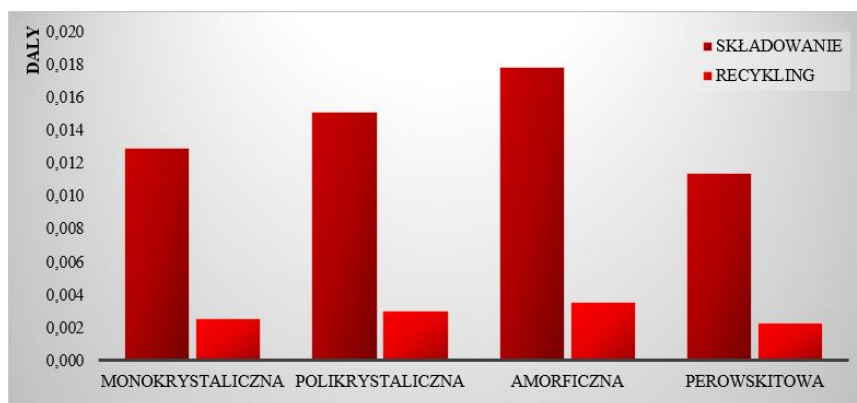
Rys. 5.48. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)



Rys. 5.49. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Największe negatywne oddziaływanie cykli istnienia instalacji elektrycznych odnotowano dla elektrowni opartych na panelach amorficznych (składowanie: 0,018 DALY, recykling: 0,004 DALY). Stanowi to konsekwencję konieczności wykonania dużej ilości połączeń pomiędzy modułami PV, która skutkuje istotnym udziałem masowym przewodów oraz innych elementów

elektroinstalacyjnych. Przewody zbudowane są przede wszystkim z miedzi i tworzyw polimerowych. Recykling miedzi cechuje wysoki poziom efektywności i energooszczędności. Wymaga on ok. 85% mniejszego nakładu energii w porównaniu do produkcji pierwotnej. Miedź można wielokrotnie odzyskiwać, ponieważ przetwarzanie nie pogarsza jej właściwości użytkowych oraz jakości. Z powodu dużej energochłonności procesów związanych z wytwarzaniem elementów miedzianych oraz znaczącej ingerencji w środowisko na skutek procesów jej wydobywania oraz przetwarzania, cykli istnienia miedzi ma istotny wpływ na pogorszenie zdrowia ludzkiego. Z tego powodu istotną kwestią jest sterowanie cyklem istnienia instalacji elektrycznych w obszarze zmniejszenia zapotrzebowania na miedź (rys. 5.50) [72, 90].

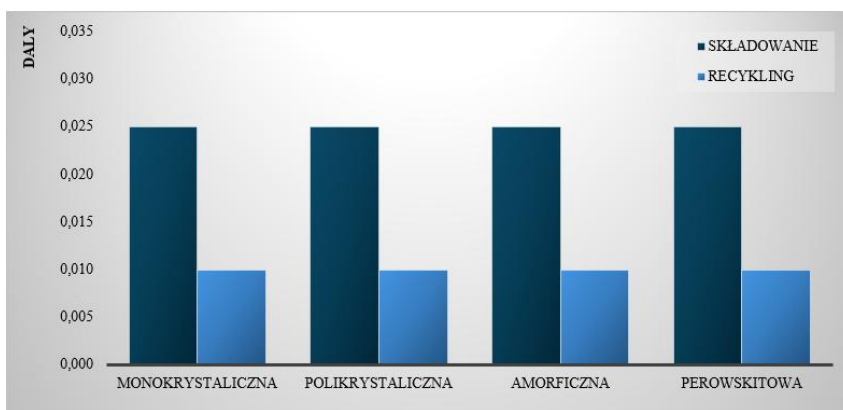


Rys. 5.50. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

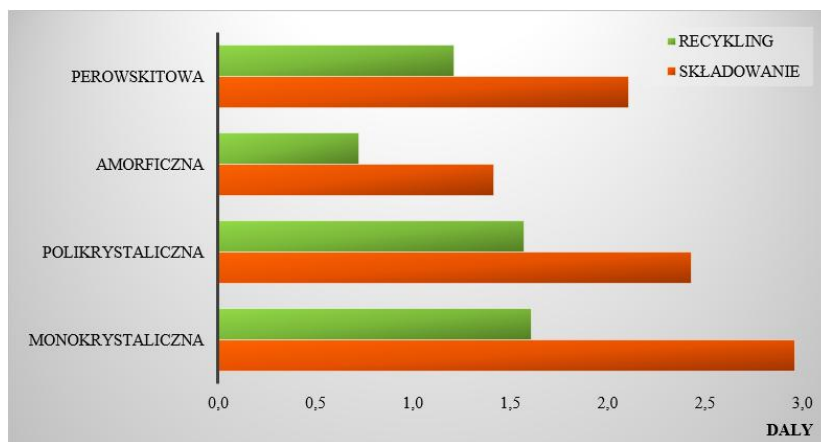
Elektrownie miały tę samą moc (1 MW), zatem we wszystkich przypadkach zastosowano analogiczne transformatory. Wpływ cyklu istnienia tworzyw, materiałów i elementów transformatorów, dla których formą zagospodarowania użytkowego po zakończeniu eksploatacji będzie składowanie wynosi 0,025 DALY, natomiast w przypadku recyklingu – będzie on równy 0,01 DALY. Poddanie transformatorów składających się głównie ze stali, aluminium, miedzi i tworzyw polimerowych, procesom recyklingu skutkuje redukcją niepożądanego oddziaływania na zdrowie człowieka o ok. 60% (rys. 5.51).

Tak jak już wcześniej wspomniano, dokonano również dodatkowej analizy oddziaływania na zdrowie człowieka cykli istnienia badanych elektrowni, które ma miejsce w ramach dwóch kategorii wpływu, charakteryzujących się najwyższym poziomem szkodliwego oddziaływania w tym względzie. Na rysunku 5.52 zaprezentowano porównanie wyników charakteryzowania następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody. Najwyższy poziom niekorzystnych oddziaływań w rozpatrywanym obszarze charakteryzował cykl istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach

monokrystalicznych (składowanie: 2,96 DALY, recykling 1,61 DALY), z kolei najniższy – elektrownię amorficzną (składowanie: 1,41 DALY, recykling 0,72 DALY). Zmniejszenie dostępności wody było spowodowane wykorzystaniem dużych jej ilości podczas wydobywania surowców pierwotnych, niezbędnych w fazie wytwarzania (szczególnie paneli monokrystalicznych) oraz podczas procesów związanych z produkcją energii elektrycznej i ciepłej niezbędnej na poszczególnych etapach cyklu istnienia elektrowni (zwłaszcza w trakcie wytwarzania paneli monokrystalicznych). Istotną kwestią staje się zatem sterowanie cyklem istnienia elektrowni PV w kierunku zmniejszenia zapotrzebowania na wodę w procesach technologicznych.

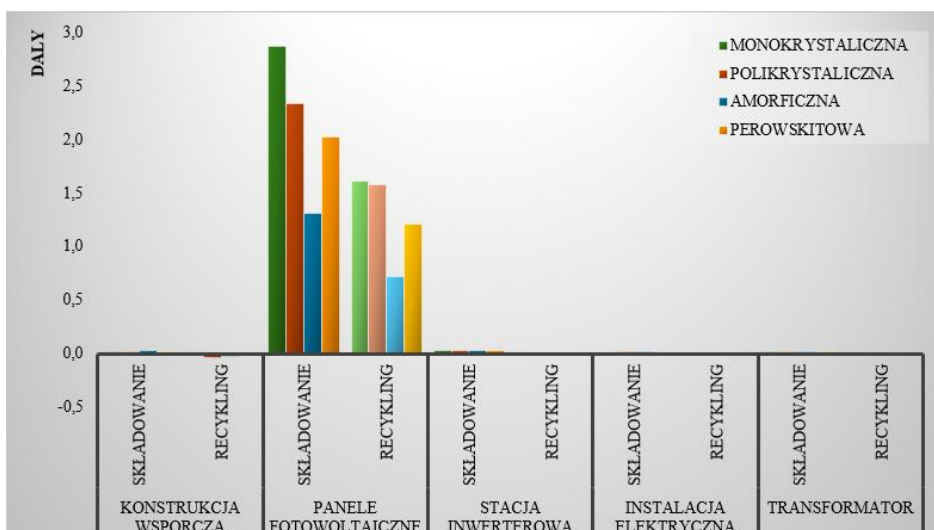


Rys. 5.51. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)



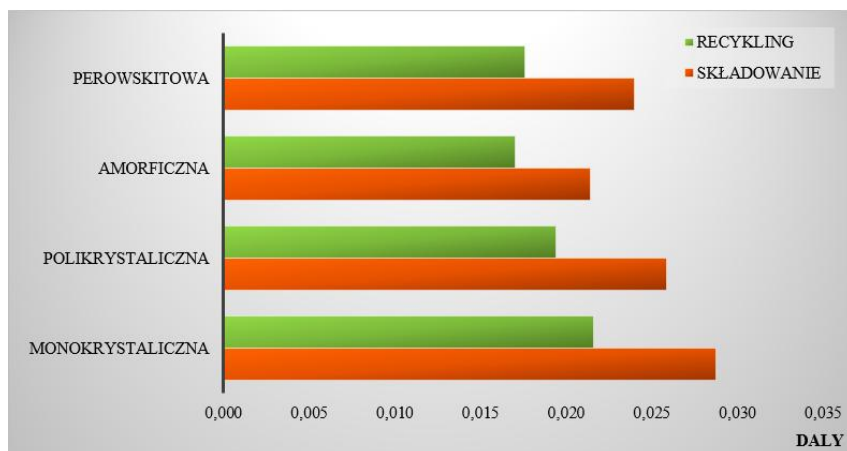
Rys. 5.52. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Grupą elementów, których cykl istnienia cechuje największy negatywny wpływ na dostępność wody są panele PV. Maksymalny poziom szkodliwego oddziaływania w tym obszarze wyróżnia panele monokrystaliczne (składowanie: 2,88 DALY, recykling: 1,61 DALY), z kolei najniższy – amorficzne (składowanie: 1,32 DALY, recykling: 0,72 DALY). Elementy wchodzące w skład instalacji elektrycznej wyróżniają się natomiast najmniejszym niepożądanym wpływem na dostępność wody – od 0,011 (elektrownia perowskitowa) do 0,017 DALY (elektrownia amorficzna) dla zagospodarowania w formie składowania oraz od 0,002 (elektrownia monokrystaliczna i perowskitowa) do 0,003 DALY (elektrownia polikrystaliczna i amorficzna) w przypadku zastosowania recyklingu (rys. 5.53).

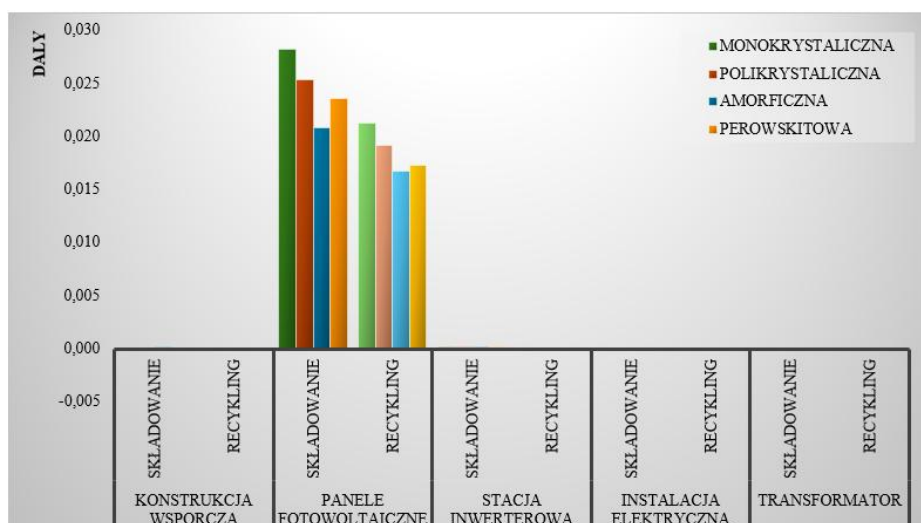


Rys. 5.53. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

Najwyższy poziom szkodliwego oddziaływania w przypadku kategorii obejmującej emisje substancji powodujących zmiany klimatu wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa) cechował elektrownię opartą na modułach monokrystalicznych (składowanie: 0,029 DALY, recykling: 0,022 DALY), natomiast najniższy – elektrownię amorficzną (składowanie: 0,021 DALY, recykling: 0,017 DALY). Recykling tworzyw, materiałów i elementów po zakończeniu eksploatacji, ogranicza destrukcyjne oddziaływanie cyklu istnienia elektrowni PV – w przypadku tych opartych na modułach monokrystalicznych i polikrystalicznych o ok. 25 %, dla elektrowni opartej na modułach amorficznych o ok. 20%, a dla tej wykorzystującej moduły perowskitowe – o ok. 27% (rys. 5.54).



Rys. 5.54. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY)



Rys. 5.55. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: DALY)

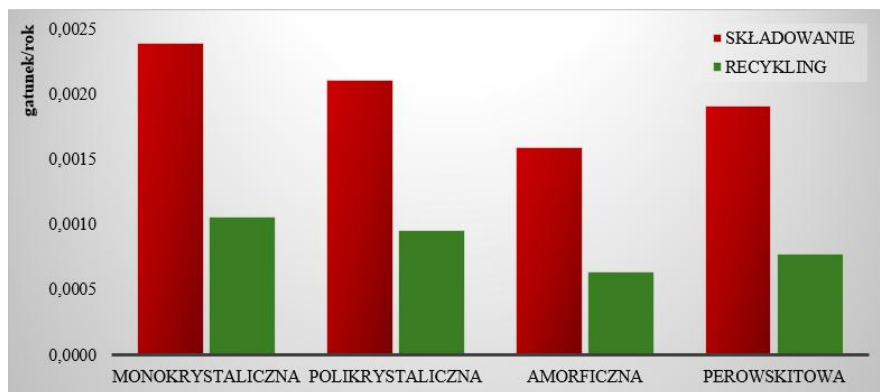
W przypadku emisji substancji powodujących zmiany klimatu, panele PV ponownie stanowią grupę elementów, których cykl istnienia cechuje największy negatywny wpływ na zdrowie człowieka. Najwyższe wartości destrukcyjnego

oddziaływania charakteryzują panele monokrystaliczne (składowanie: 0,028 DALY, recykling: 0,021 DALY), natomiast najniższe – amorficzne (składowanie: 0,021 DALY, recykling: 0,017 DALY). I w tym przypadku elementy instalacji elektrycznej cechują się najmniejszym niekorzystnym wpływem na otoczenie (rys. 5.55).

Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów

Drugi etap analiz obejmował ocenę potencjalnego oddziaływania na jakość ekosystemów. W jej ramach ponownie porównano całkowity wpływ cykli istnienia wszystkich badanych elektrowni oraz ich grup elementów. Szczegółowo oceniono także oddziaływanie badanych obiektów technicznych na jakość ekosystemów w ramach dwóch kategorii wpływu powodujących najwięcej niepożądanych oddziaływań w tym zakresie, a mianowicie uwzględniających emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz substancji powodujących zmiany klimatu.

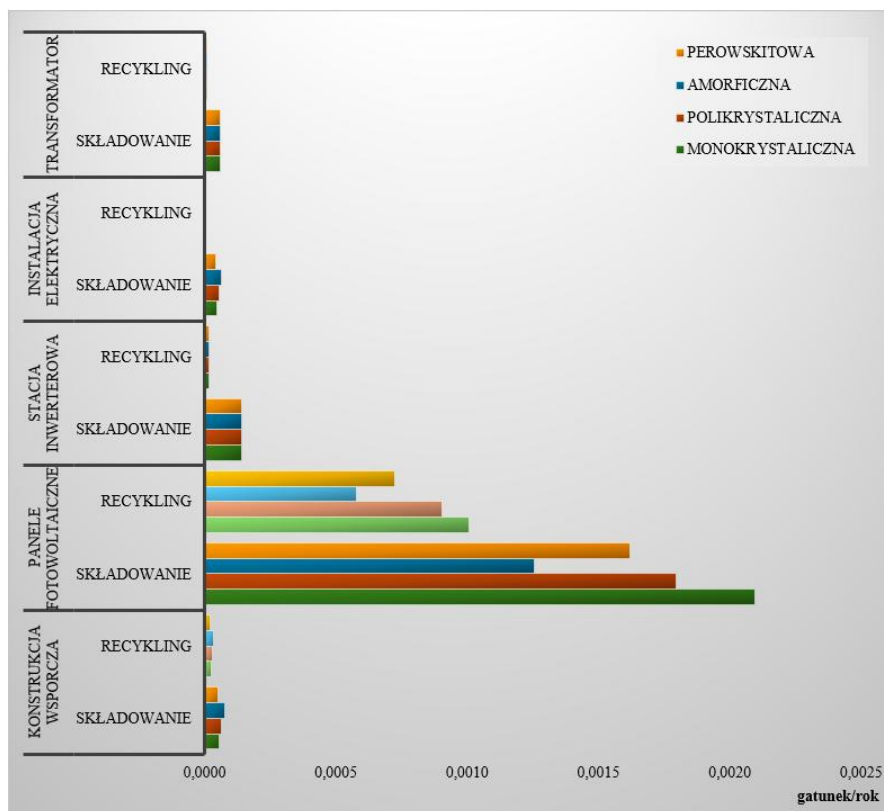
Maksymalny poziom całkowitego szkodliwego oddziaływania na jakość ekosystemów charakteryzował elektrownię opartą na modułach monokrystalicznych (składowanie: 0,0024 gatunku/rok, recykling: 0,0011 gatunku/rok), natomiast najniższy – elektrownię amorficzną (składowanie: 0,0016 gatunku/rok, recykling: 0,0006 gatunku/rok). Dla każdego z analizowanych obiektów, zastosowanie procesów recyklingu znacząco obniżyło wartość negatywnych wpływów na jakość ekosystemu – dla elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych o ok. 56%, dla polikrystalicznej o ok. 54%, a dla amorficznej i perowskitowej o ok. 60% (rys. 5.56).



Rys. 5.56. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Cykle istnienia paneli fotowoltaicznych wyróżniają się najwyższym poziomem szkodliwych oddziaływań na jakość ekosystemu spośród wszystkich analizowanych komponentów elektrowni. Ich zagospodarowanie poużytkowe

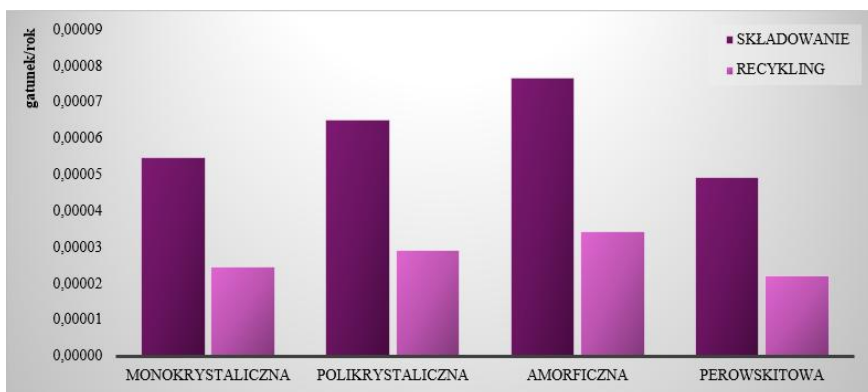
w formie recyklingu pozwoliłoby na obniżenie destrukcyjnych wpływów w tym obszarze o ok. 52% dla elektrowni monokrystalicznej, o ok. 50% dla polikrystalicznej, o ok. 54% dla amorficznej oraz o ok. 55% dla perowskitowej. Najniższym poziomem niekorzystnych oddziaływań na otoczenie charakteryzowały się natomiast instalacje elektryczne. Tak jak już wcześniej wspomniano, cechują się one najmniejszym udziałem procentowym w masie całej elektrowni (ok. 2%) (rys. 5.57).



Rys. 5.57. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

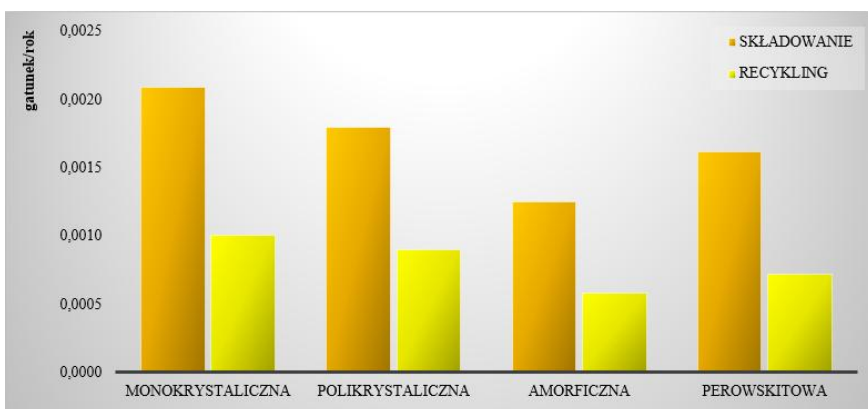
W kolejnym kroku analiz przystąpiono do szczegółowego porównania poszczególnych zespołów elementów budujących badane obiekty techniczne, w obszarze oddziaływania na jakość ekosystemów. W przypadku konstrukcji wsporczych, najwyższy poziom szkodliwego oddziaływania cechuje elektrownię amorficzną (składowanie: $7,67 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok, recykling: $3,43 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok). W ramach scenariusza zagospodarowania użytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów, był on wyższy od wpływu konstrukcji wsporczej elektrowni monokrystalicznej o ok. 28%, polikrystalicznej

– o ok. 15% oraz perowskitowej – o ok. 35%. Destrukcyjne oddziaływanie tych elementów elektrowni fotowoltaicznych na jakość ekosystemu może zostać ograniczone (nawet o ok. 55%) dzięki zastosowaniu recyklingu (rys. 5.58).



Rys. 5.58. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

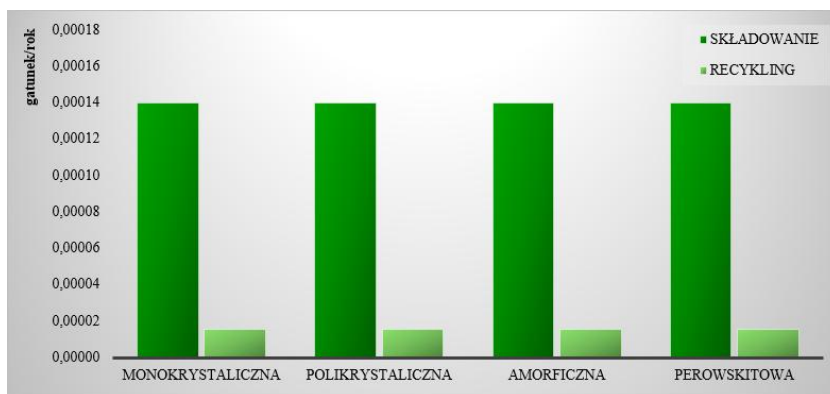
Najwyższy poziom szkodliwego oddziaływania na jakość ekosystemów odnotowano w cyklu istnienia monokrystalicznych paneli PV (składowanie: 0,0021 gatunku/rok, recykling: 0,001 gatunku/rok). Porównując do nich trzy pozostałe rodzaje paneli widocznym jest, że ich niepożądany wpływ w przypadku zagospodarowania w formie składowania jest niższy o ok. 14% dla paneli polikrystalicznych, o ok. 40% dla amorficznych i o ok. 23% dla perowskitowych. Dla procesów recyklingu jest to natomiast odpowiednio o 10, 43 i 28% mniej (rys. 5.59).



Rys. 5.59. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Recykling paneli fotowoltaicznych powoduje istotną redukcję negatywnego oddziaływania na jakość ekosystemów – dla paneli monokrystalicznych o ok. 52%, dla polikrystalicznych o ok. 50%, dla amorficznych o ok. 53% i dla perowskitowych o ok. 55%. Wytwarzanie paneli PV wiąże się z dużym zapotrzebowaniem na materię oraz energię. Ponowne wykorzystanie tworzyw, materiałów i elementów ma zatem ogromne znaczenie (rys. 5.59).

Maksymalnym poziomem destrukcyjnego wpływu w cyklach istnienia stacji inwerterowych wszystkich badanych elektrowni wyróżniał się scenariusz zagospodarowania poużytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów ($1,4 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Recykling umożliwia ograniczenie o ok. 89% szkodliwego oddziaływania stacji na środowisko (rys. 5.60).

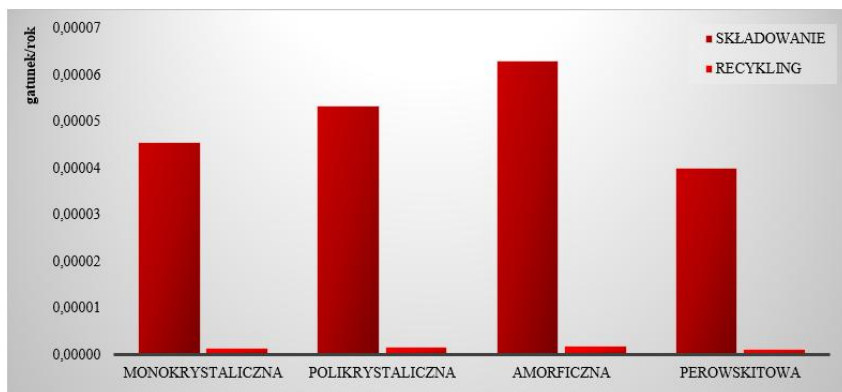


Rys. 5.60. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

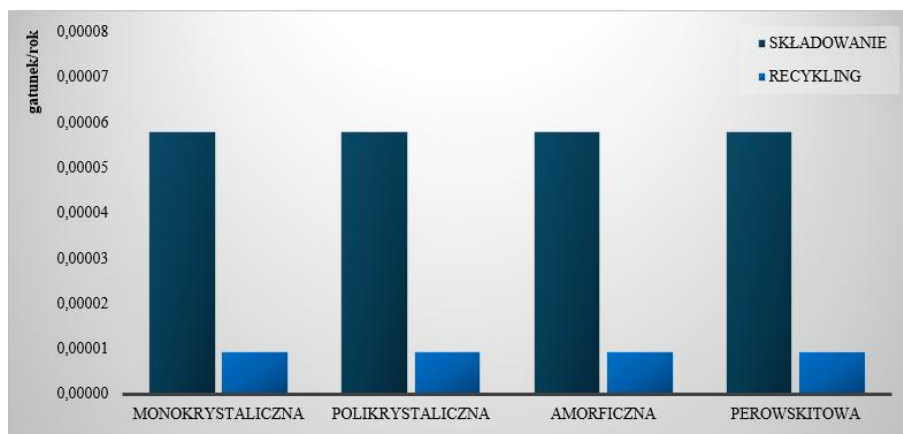
Najwyższy poziom niepożądanego oddziaływania na jakość ekosystemów w cyklach istnienia instalacji elektrycznych odnotowano dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych ($6,29 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok), jest ono wyższe w porównaniu do instalacji elektrowni monokrystalicznej o ok. 27%, elektrowni polikrystalicznej – o ok. 15% i elektrowni perowskitowej – o ok. 36%. Podstawowe elementy składowe instalacji elektrycznej obejmują przewody wykonane z miedzi i tworzyw polimerowych. Dzięki ich recyklingowi można ograniczyć szkodliwość wpływu tego rodzaju elementów na środowisko maksymalnie o 97% (rys. 5.61).

Tak jak już wspomniano, ze względu na tą samą moc zainstalowaną wszystkich rozważanych elektrowni (1 MW), wykorzystano w nich analogiczne stacje transformatorowe, w wyniku czego ich cykl istnienia cechuje porównywalne niepożądane oddziaływanie na jakość ekosystemu, które wynosi $5,79 \cdot 10^{-5}$ gatunku/rok. Recykling tworzyw, materiałów i elementów budujących transformatory (głównie aluminium, stali, miedzi i tworzyw polimerowych)

pozwała na znaczącą redukcję ich szkodliwego wpływu na środowisko – do poziomu $9,32 \cdot 10^{-6}$ gatunku/rok, czyli o ok. 84% (rys. 5.62).



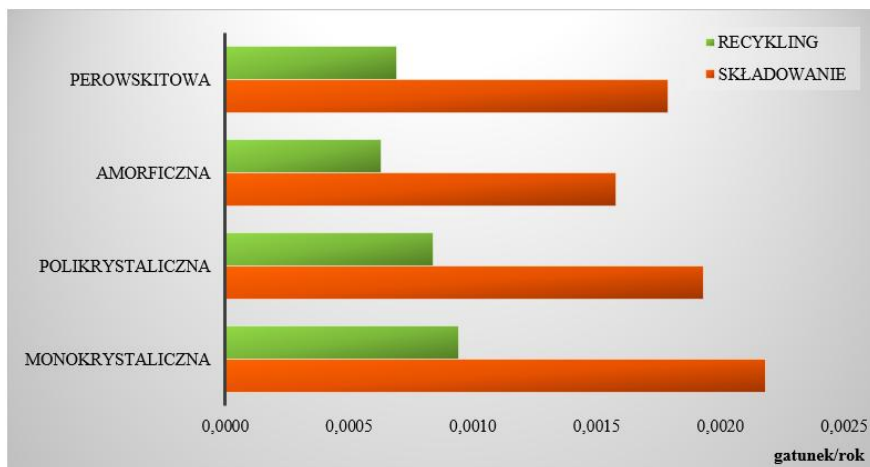
Rys. 5.61. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)



Rys. 5.62. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Ponownie przeprowadzono dodatkową ocenę oddziaływania na jakość ekosystemów cykli istnienia badanych elektrowni, w ramach dwóch kategorii wpływu, wyróżniających się najwyższymi wartościami negatywnego wpływu w tym obszarze (emisje substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz substancji powodujących zmiany klimatu). Rezultaty charakteryzowania następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym przybliżono na rysunku 5.63. Maksymalna wartość szkodliwego

wpływu na ekosystemy słodkowodne wyróżnia elektrownie oparte na modułach monokrystalicznych (składowanie: $2,2 \cdot 10^{-3}$ gatunku/rok, recykling: $9,4 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Jest ona wyższa w porównaniu do analizowanych elektrowni odpowiednio: dla elektrowni polikrystalicznej o ok. 11%, dla amorficznej o ok. 28% i dla elektrowni o ok. 18%. Zastosowanie procesów recyklingu pozwoli ograniczyć destrukcyjny wpływ na ekosystemy słodkowodne – w odniesieniu do cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej i polikrystalicznej o ok. 57%, amorficznej o ok. 60% oraz dla perowskitowej o ok. 61%.

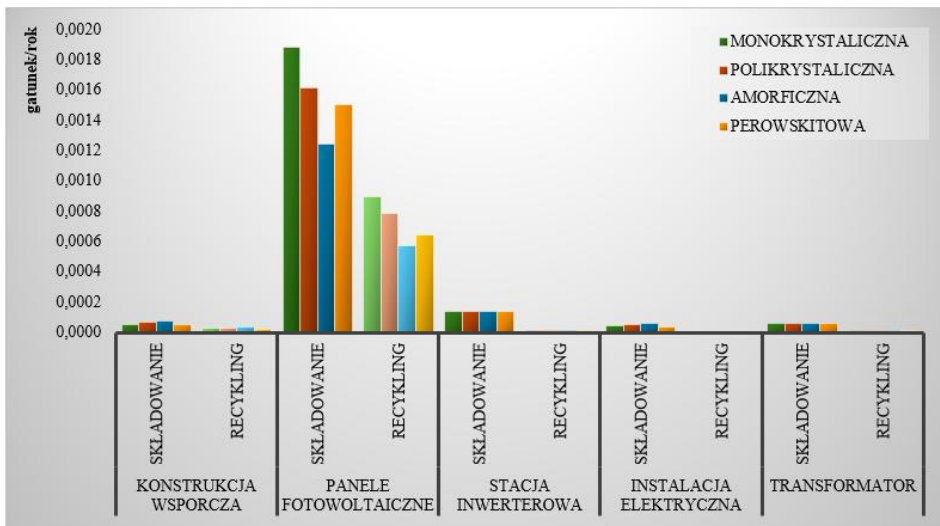


Rys. 5.63. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

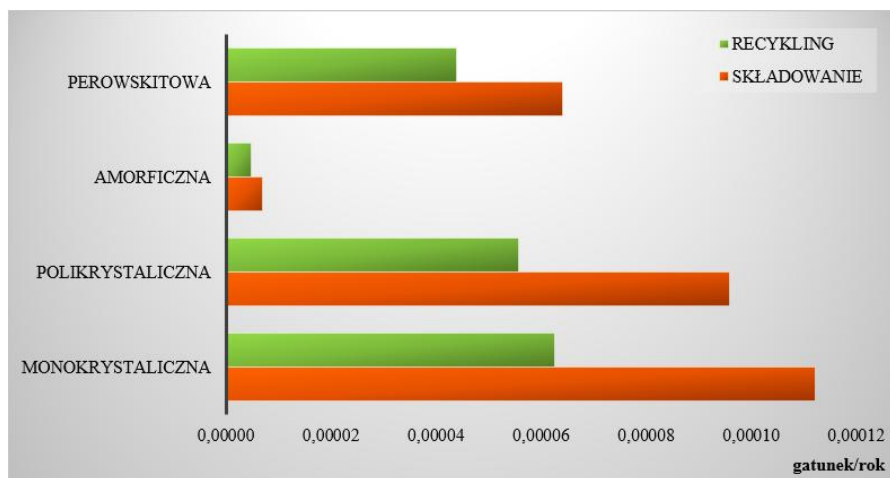
Elementami o największym niepożądanym oddziaływaniu na ekosystemy słodkowodne są panele fotowoltaiczne, których udział procentowy w całkowitej masie każdej z rozważanych elektrowni jest największy. Z kolei instalacje elektryczne elektrowni obejmują grupy elementów o najmniejszym szkodliwym wpływie na środowisko. Ich udział procentowy w całkowitej masie wszystkich badanych elektrowni jest jednak najniższy. Widocznym jest, że recykling poszczególnych komponentów powoduje znaczące ograniczenie ich negatywnych oddziaływań w stosunku do ekosystemów słodkowodnych (rys. 5.64).

W przypadku emisji substancji powodujących zmiany klimatu, najwyższą wartość niekorzystnego wpływu charakteryzowała elektrownię fotowoltaiczną opartą na modułach monokrystalicznych ($1,1 \cdot 10^{-4}$ gatunku/rok). Jest ona wyższa w porównaniu do poziomu destrukcyjnego oddziaływania elektrowni polikrystalicznej o ok. 15%, amorficznej – o ok. 94% i perowskitowej – o ok. 43%. Recykling tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych budujących te obiekty techniczne pozwala na obniżenie ich szkodliwego wpływu

na środowisko o ok. 44% dla elektrowni monokrystalicznej, o ok. 41% dla polikrystalicznej oraz o ok. 30% dla amorficznej i perowskitowej (rys. 5.65).

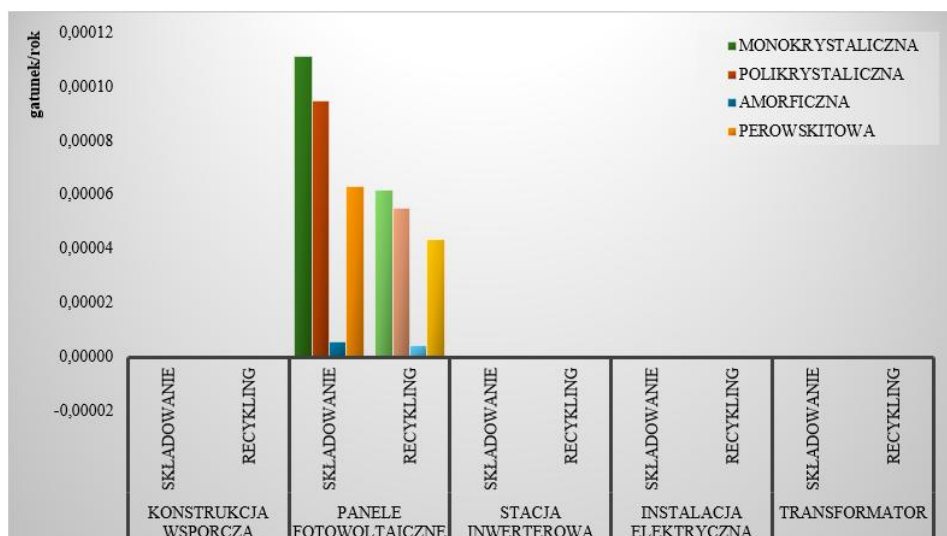


Rys. 5.64. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)



Rys. 5.65. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

Elementami o największym niekorzystnym oddziaływaniu na klimat są panele PV, cechujące się największym udziałem procentowym w całkowitej masie każdej z ocenianych elektrowni. Instalacje elektryczne elektrowni stanowią z kolei grupy elementów o najmniejszym destrukcyjnym wpływie. W porównaniu do cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych, szkodliwe oddziaływanie konstrukcji wsporczych, stacji inwerterowych oraz transformatorów jest niewielkie. Recykling poszczególnych grup elementów konstrukcyjnych skutkuje istotnym zmniejszeniem ich szkodliwych wpływów na zmiany klimatu. Cykl istnienia paneli amorficznych wyróżnia się o ok. 95% mniejszym niekorzystnym oddziaływaniem w porównaniu do paneli monokrystalicznych (rys. 5.66).

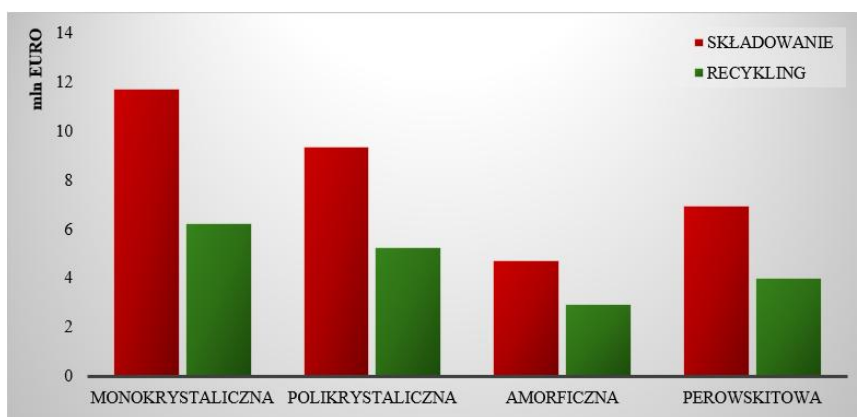


Rys. 5.66. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: gatunek/rok)

5.5.1.2. Grupowanie i ważenie

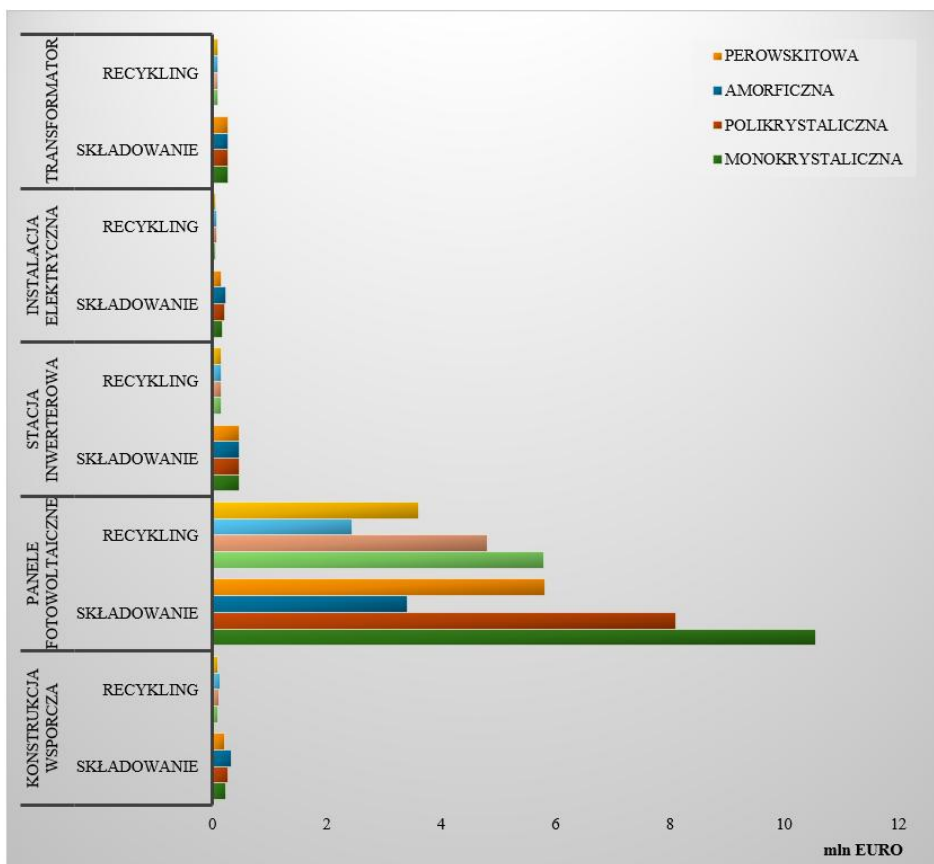
Po zrealizowaniu analiz wpływu na otoczenie poszczególnych typów elektrowni fotowoltaicznych, porównano ich łączne oddziaływanie na otoczenie uwzględniając dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego (składowanie i recykling). Dokonano oceny oddziaływania cykli istnienia poszczególnych grup elementów konstrukcyjnych oraz wpływu elektrowni na zdrowie człowieka oraz jakość środowiska. Przeanalizowano również stopień oddziaływania na otoczenie w ramach trzech kategorii wpływu cechujących się największym szkodliwym oddziaływaniem, a mianowicie obejmujących procesy wpływające na dostępność wody, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym oraz substancji powodujących zmiany klimatu.

Wszystkie badane rodzaje elektrowni PV cechują się najwyższym poziomem szkodliwego oddziaływania na otoczenie w przypadku składowania ich tworzyw, materiałów i elementów po zakończeniu eksploatacji. Cykl istnienia elektrowni monokrystalicznych wiąże się z koniecznością ponoszenia największych potencjalnych nakładów finansowych w celu usunięcia szkód powstałych w środowisku bądź zapobiegania wystąpieniu emisji szkodliwych substancji (składowanie: 11,7 mln EUR, recykling: 6,21 mln EUR). Porównując do niego potencjalne koszty środowiskowe ponoszone w odniesieniu do cykli istnienia pozostałych elektrowni, w przypadku tej opartej na modułach polikrystalicznych są one o ok. 20% niższe, dla elektrowni amorficznej – o ok. 60% natomiast dla perowskitowej – o ok. 41%. Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na ograniczenie kosztów środowiskowych w perspektywie całego cyklu istnienia wszystkich ocenianych elektrowni – w odniesieniu do tej opartej na modułach monokrystalicznych o 47%, na polikrystalicznych o ok. 44%, na amorficznych o ok. 38% a na perowskitowych o ok. 42% (rys. 5.67).



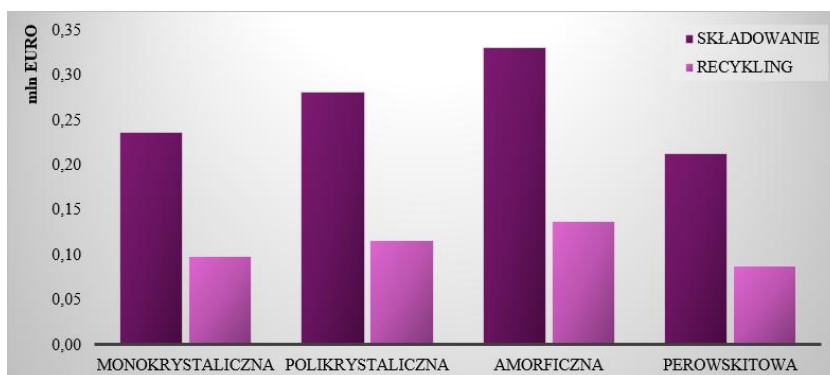
Rys. 5.67. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Spośród przeanalizowanych komponentów budujących system fotowoltaiczny, cykl istnienia paneli PV generuje potencjalnie najwyższe koszty środowiskowe (od ok. 10,5 mln EUR dla paneli monokrystalicznych do ok. 3,4 mln EUR dla paneli amorficznych). Elementem, który w najmniejszym stopniu oddziałuje negatywnie na otoczenie, a przez to będzie generował potencjalnie najniższe koszty finansowe w tym obszarze jest instalacja elektryczna. Recykling pozwala na obniżenie kosztów środowiskowych w perspektywie całego cyklu istnienia, w przypadku konstrukcji wsporczych średnio o ok. 59%, stacji inwerterowych o ok. 68%, instalacji elektrycznych o ok. 67%, transformatorów o ok. 63%, natomiast dla paneli fotowoltaicznych – od ok. 28% (moduły amorficzne) do ok. 45% (moduły monokrystaliczne) (rys. 5.68).



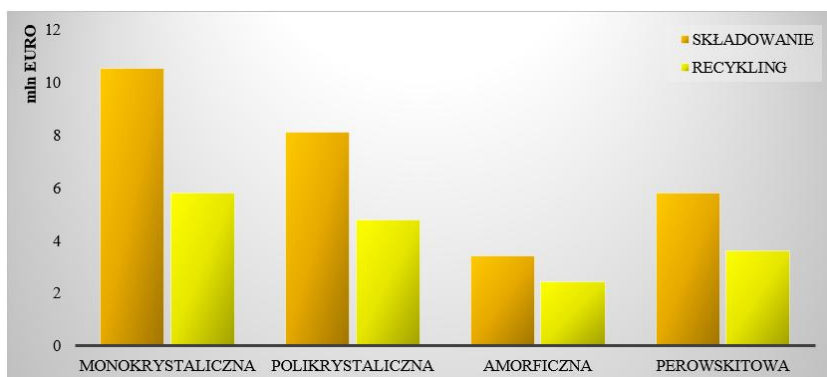
Rys. 5.68. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W ramach kolejnych analiz dokonano porównania oddziaływania cykli istnienia poszczególnych grup elementów badanych elektrowni (konstrukcja wsporcza, panele fotowoltaiczne, stacja inwerterowa, instalacja elektryczna, transformator). Porównując potencjalne koszty środowiskowe generowane przez cykle istnienia konstrukcji wsporczych analizowanych elektrowni, widocznym jest, że najwyższe wiążą się z elementami systemów amorficznych (składowanie: 0,33 mln EUR, recykling: 0,13 mln EUR) a najniższe – perowskitowych (składowanie: 0,21 mln EUR, recykling: 0,08 mln EUR). Konieczność ponoszenia potencjalnych nakładów finansowych w celu usunięcia szkód powstałych w środowisku bądź zapobiegania wystąpieniu emisji szkodliwych substancji może zostać istotnie ograniczona (średnio o ok. 59%) dzięki zastosowaniu recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów konstrukcji wsporczych, które nie nadają się już do dalszej eksploatacji (rys. 5.69).



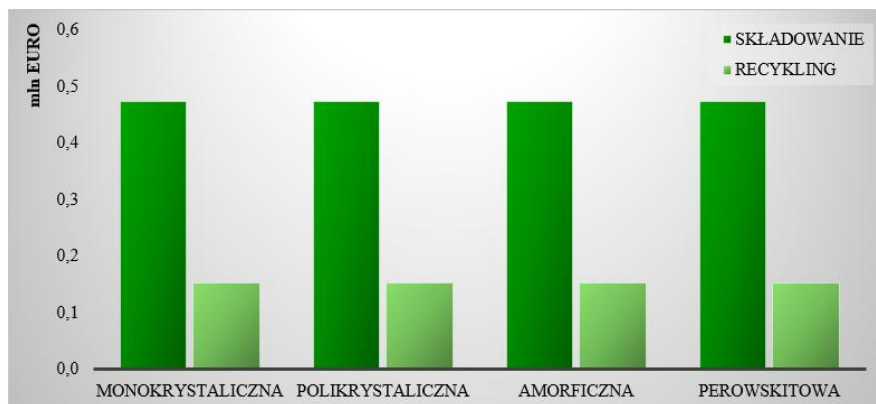
Rys. 5.69. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W przypadku paneli fotowoltaicznych, najwyższym poziomem niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych wyróżniał się cykl istnienia paneli monokrystalicznych (składowanie: 10,5 mln EUR, recykling: 5,8 mln EUR), natomiast najniższym – amorficznych (składowanie: 3,4 mln EUR, recykling: 2,4 mln EUR). Wytwarzanie monokrystalicznych i polikrystalicznych modułów PV związane jest z wykorzystaniem znacznej ilości surowców nieodnawialnych oraz energii (pochodzącej zazwyczaj ze źródeł konwencjonalnych). Procesy recyklingu ograniczają wielkość potencjalnych kosztów środowiskowych o ok. 28% dla paneli amorficznych, o ok. 38% dla perowskitowych, o ok. 41% dla polikrystalicznych oraz o ok. 45% w przypadku monokrystalicznych. Koniecznym staje się zatem takie sterowanie cyklem istnienia paneli fotowoltaicznych, które umożliwi ograniczenie energochłonności na etapie ich wytwarzania (rys. 5.70).



Rys. 5.70. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

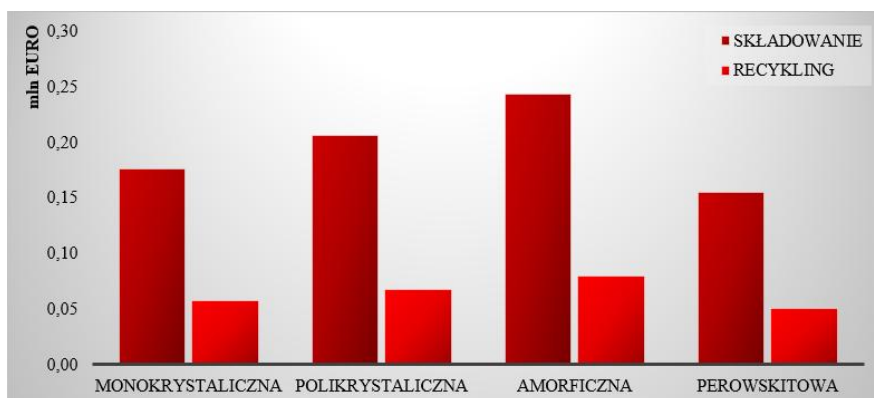
Dla każdego z analizowanych obiektów technicznych potencjalne koszty środowiskowe cykli istnienia stacji inwerterowych wynoszą 0,47 mln EUR dla składowania jako formy zagospodarowania poużytkowego, natomiast dla recyklingu – 0,15 mln EUR. Recykling jest zatem w stanie ograniczyć analizowane nakłady finansowe o ok. 68% w perspektywie całego cyklu istnienia tej grupy elementów. Otrzymane wyniki przyjmują te same wartości dla wszystkich ocenianych elektrowni, ponieważ charakteryzują się one tą samą mocą zainstalowaną (1 MW), zatem podczas ich konstrukcji wykorzystano analogiczne stacje inwerterowe (rys. 5.71).



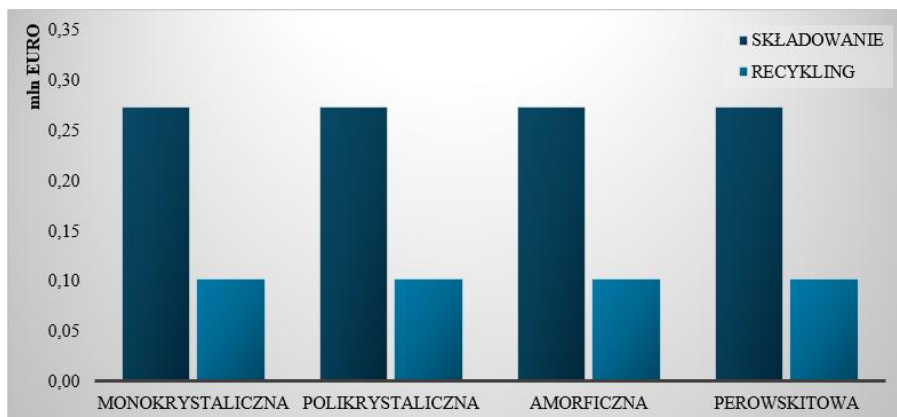
Rys. 5.71. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Analogicznie jak w przypadku cyklu istnienia konstrukcji wsporczej, instalacja elektryczna elektrowni opartej na modułach amorficznych generuje najwyższe potencjalne koszty środowiskowe (składowanie: 0,24 mln EUR, recykling: 0,08 mln EUR). Najmniejsze z kolei wiążą się z cyklem istnienia elektrowni opartej na modułach perowskitowych (składowanie: 0,15 mln EUR, recykling: 0,05 mln EUR), wyróżniającą się najmniejszą powierzchnią modułów (4390 m^2). Recykling tworzyw, materiałów i elementów instalacji pozwoliłby na obniżenie potencjalnych kosztów środowiskowych ich cykli istnienia średnio o ok. 67% (rys. 5.72).

Analogicznie jak dla stacji inwerterowych, potencjalne koszty środowiskowe cykli istnienia transformatorów wszystkich analizowanych elektrowni są takie same, ze względu na ich moc zainstalowaną (1 MW). W zależności od formy zagospodarowania poużytkowego koniecznym będzie poniesienie innych kosztów środowiskowych – od 0,10 mln EUR dla recyklingu do 0,27 mln EUR dla składowania. Procesy recyklingu pozwolą zatem na ich obniżenie o ok. 63% w perspektywie całego cyklu istnienia (rys. 5.73).



Rys. 5.72. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

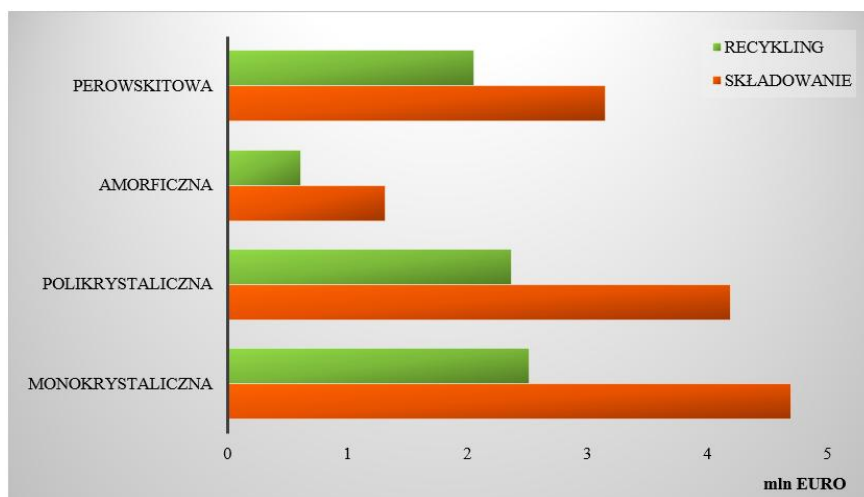


Rys. 5.73. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

W kolejnym kroku dokonano szczegółowej analizy oddziaływania na otoczenie cykli istnienia badanych obiektów technicznych, koncentrując się na trzech kluczowych kategoriach wpływu wyróżniających się najwyższym potencjałem destrukcyjnym, obejmujących: procesy wpływające na dostępność wody, emisje substancji o działaniu ekotoksycznym oraz substancji powodujących zmiany klimatu.

Niewystarczająca dostępność wody dobrej jakości, zdatnej do spożycia jest jednym z kluczowych problemów współczesnego świata, stanowiącym przyczynę wielu problemów zdrowotnych, gospodarczych i środowiskowych. Zasoby wody zazwyczaj są wykorzystywane w nadmierny, nie zrównoważony sposób, a jej

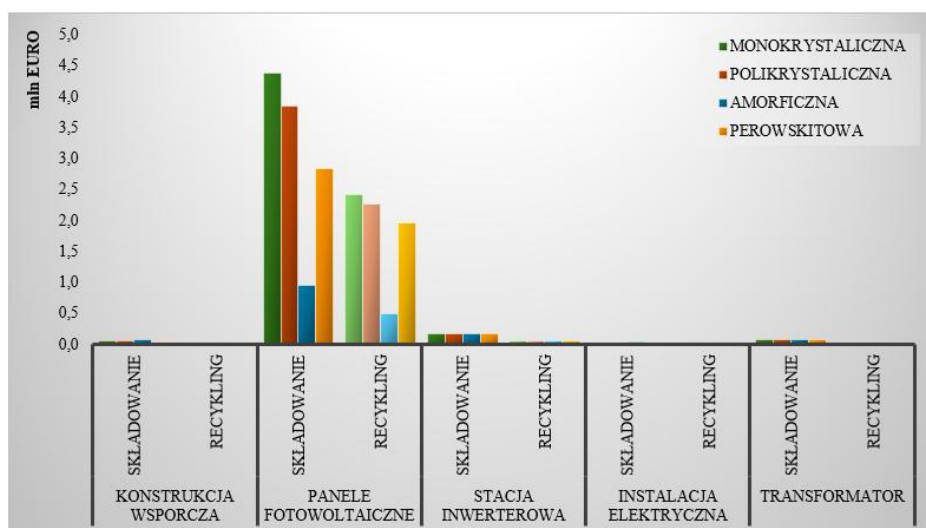
pobór jest większy niż przyrost. Społeczeństwa odwadniają ogromne powierzchnie gruntów, a przemysł, transport, niska emisja, rolnictwo czy nieodpowiednio zabezpieczone lub nielegalne wysypiska odpadów, prowadzą do obniżenia jej jakości, a nawet skażenia. Najwyższe koszty środowiskowe w obszarze procesów wpływających na dostępność wody są generowane przez elektrownie oparte na modułach monokrystalicznych (składowanie: 4,7 mln EUR, recykling: 2,5 mln EUR), natomiast najniższe – przez te oparte na modułach amorficznych (składowanie: 1,3 mln EUR, recykling: 0,6 mln EUR). Procesy wytwarzania monokrystalicznych ogniw PV (np. metoda Czochralskiego), są niezwykle energo- i materiałochłonne. Zastosowanie procesów recyklingu tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych rozważanych obiektów technicznych przyczyni się do zredukowania potencjalnych kosztów środowiskowych, w przypadku elektrowni monokrystalicznej o ok. 46%, dla polikrystalicznej o ok. 43%, dla amorficznej o ok. 54% a dla perowskitowej o ok. 35%. Sterowanie cyklem istnienia elektrowni fotowoltaicznych na etapie zagospodarowania poużytkowego, winno zatem uwzględniać obniżenie potencjalnych kosztów środowiskowych związanych z procesami wpływającymi na dostępność wody, oddziałującymi na zdrowie człowieka (rys. 5.74)



Rys. 5.74. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Wśród procesów związanych ze zmniejszeniem dostępności wody w cyklu istnienia analizowanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej można wyróżnić przede wszystkim zużywanie wody pochodzącej z różnych źródeł (jeziora, rzeki, itd.) oraz stosowanie jej do chłodzenia turbin (podczas wytwarzania energii elektrycznej). Niezwykle energo- i materiałochłonny cykl istnienia paneli fotowoltaicznych wiąże się z koniecznością ponoszenia największych potencjalnych nakładów finansowych w celu usunięcia szkód

powstałych w środowisku bądź zapobiegania wystąpieniu emisji szkodliwych substancji. Największe koszty środowiskowe wyróżniają cykl istnienia paneli monokrystalicznych (składowanie: 4,38 mln EUR, recykling: 2,41 mln EUR), natomiast najniższe – amorficznych (składowanie: 0,95 mln EUR, recykling: 0,50 mln EUR). Recykling pozwoliłby na obniżenie potencjalnych nakładów finansowych o od ok. 31% (panele perowskitowe) do ok. 47% (panele amorficzne). Grupę elementów cechującą się najniższymi kosztami środowiskowymi stanowią instalacje elektryczne. W przypadku scenariusza zagospodarowania poużytkowego z wykorzystaniem procesów składowania wynoszą one od 0,022 mln EUR dla elektrowni perowskitowej do 0,035 mln EUR dla amorficznej, natomiast w przypadku zastosowania procesów recyklingu – od 0,004 mln EUR dla elektrowni perowskitowej do 0,006 mln dla amorficznej. W tym przypadku recykling umożliwia obniżenie potencjalnych nakładów finansowych średnio o ok. 83% (rys. 5.75).

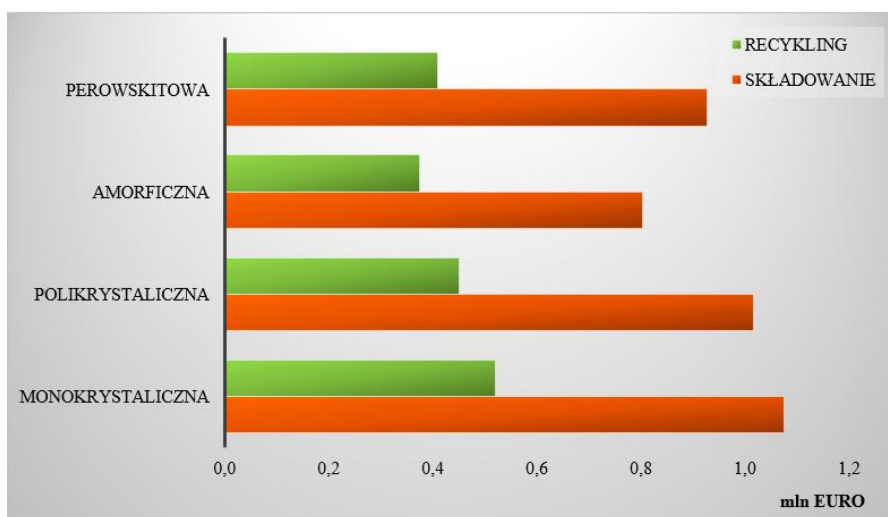


Rys. 5.75. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na zdrowie człowieka, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Wśród materiałów konstrukcyjnych ocenianych elektrowni, których cykl istnienia najbardziej wpływa na zwiększenie ekotoksyczności wody słodkiej, można wyróżnić: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm i wanad. Elektrownie oparte na monokrystalicznych modułach fotowoltaicznych generują najwyższe koszty środowiskowe w analizowanym zakresie (składowanie: 1,07 mln EUR, recykling: 0,52 mln EUR), z kolei najniższe – te oparta na modułach amorficznych (składowanie: 0,80 mln EUR, recykling: 0,37 mln EUR). Recykling tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych badanych obiektów technicznych umożliwiłby obniżenie ponoszonych

kosztów o ok. 53% w przypadku elektrowni monokrystalicznych i amorficznych oraz o ok. 56% dla polikrystalicznych i perowskitowych (rys. 5.76).

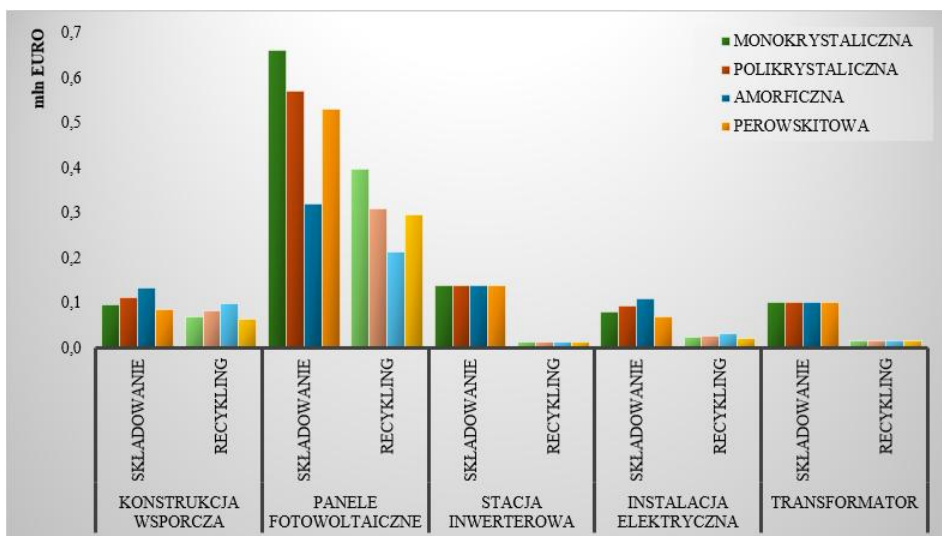
Substancje ekotoksyczne mogą wywoływać zarówno natychmiastowe, jak i długoterminowe zagrożenia dla ekosystemów, prowadząc m.in. do obniżenia poziomu bioróżnorodności. Potencjalnie najwyższe koszty środowiskowe ponoszone z tego tytułu wyróżniają cykle istnienia paneli PV, zwłaszcza monokrystalicznych (składowanie: 6,62 mln EUR, recykling: 3,96 mln EUR), natomiast najniższe cechują instalacje elektryczne, szczególnie elektrowni perowskitowej (składowanie: 0,069 mln EUR, recykling: 0,002 mln EUR). Procesy recyklingu paneli fotowoltaicznych pozwoliłyby ograniczyć ponoszone nakłady finansowe o ok. 33% w przypadku elektrowni amorficznych do ok. 46% dla polikrystalicznych (rys. 5.77).



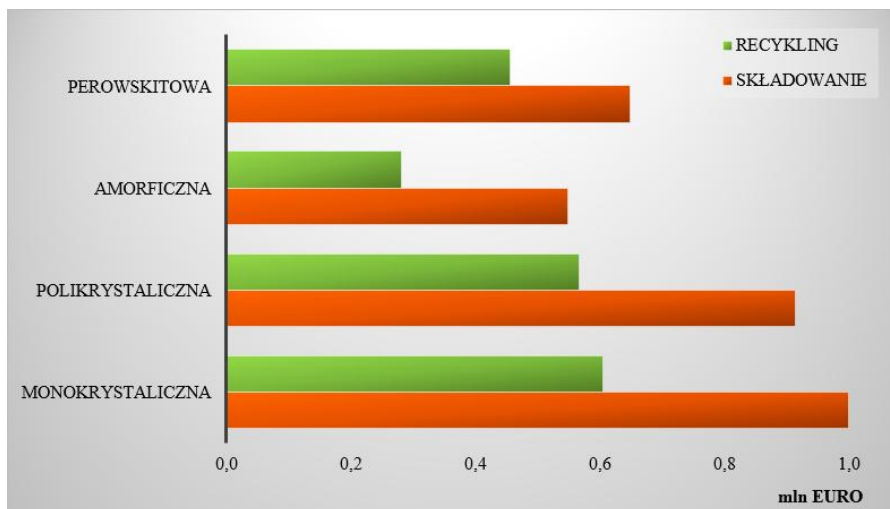
Rys. 5.76. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Do związków chemicznych występujących w cyklach istnienia rozważanych elektrowni, które powodują najczęściej destrukcyjnych oddziaływań w obszarze zmian klimatu można zaliczyć: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23). Cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej wiąże się z koniecznością ponoszenia największych potencjalnych nakładów finansowych w celu usunięcia szkód powstałych w środowisku bądź zapobiegania wystąpieniu emisji szkodliwych substancji (składowanie: 0,99 mln EUR, recykling: 0,61 mln EUR), z kolei najmniejsze koszty tego rodzaju wyróżniają elektrownię opartą na modułach amorficznych (składowanie: 0,55 mln EUR, recykling: 0,28 mln EUR). Wybór scenariusza zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów w formie recyklingu pozwoliłby na obniżenie

potencjalnych kosztów środowiskowych o ok. 30% w przypadku cyklu istnienia elektrowni perowskitowej, o ok. 38% dla polikrystalicznej, o ok. 39% dla monokrystalicznej oraz o ok. 49% dla amorficznej (rys. 5.78).

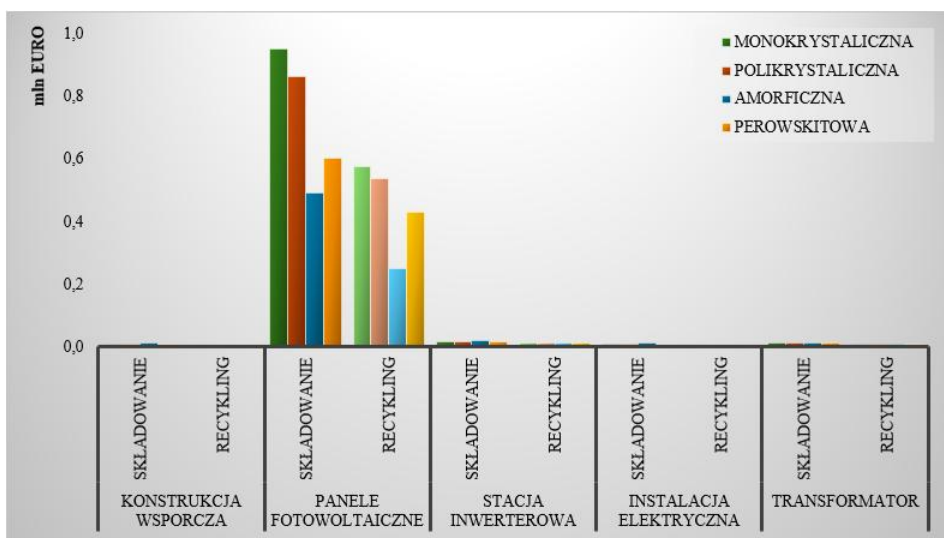


Rys. 5.77. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)



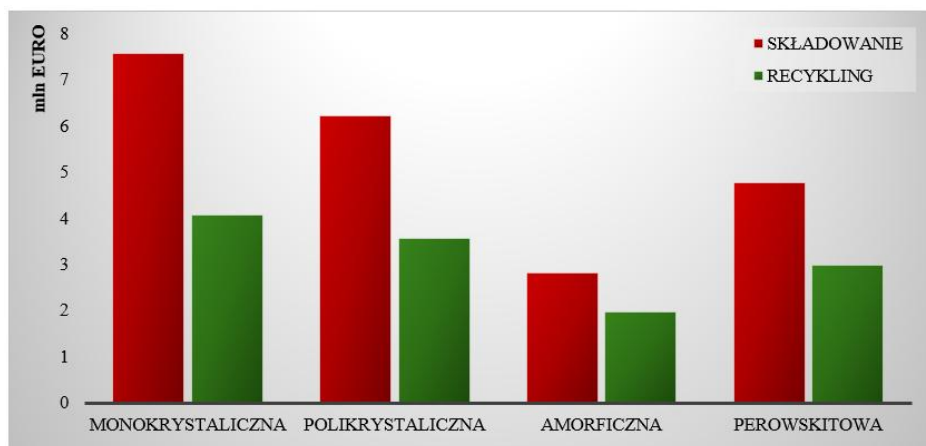
Rys. 5.78. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Największe potencjalne koszty środowiskowe w zakresie emisji substancji powodujących zmiany klimatu odnotowano dla cykli istnienia paneli fotowoltaicznych, szczególnie monokrystalicznych (składowanie: 0,95 mln EUR, recykling: 0,57 mln EUR). Recykling po zakończeniu eksploatacji umożliwiłby obniżenie tego rodzaju nakładów finansowych o ok. 29% (dla paneli perowskitowych) do ok. 49% (dla amorficznych). Wśród wszystkich grup elementów najmniejsze potencjalne koszty wyróżniają cykle istnienia instalacji elektrycznych, zwłaszcza elektrowni monokrystalicznej (składowanie: 0,008 mln EUR, recykling: 0,004 mln EUR). Recykling tego rodzaju komponentów pozwoliłby obniżyć koszty środowiskowe średnio o ok. 46% (rys. 5.79).



Rys. 5.79. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla emisji substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na jakość ekosystemów (perspektywa długoterminowa), w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

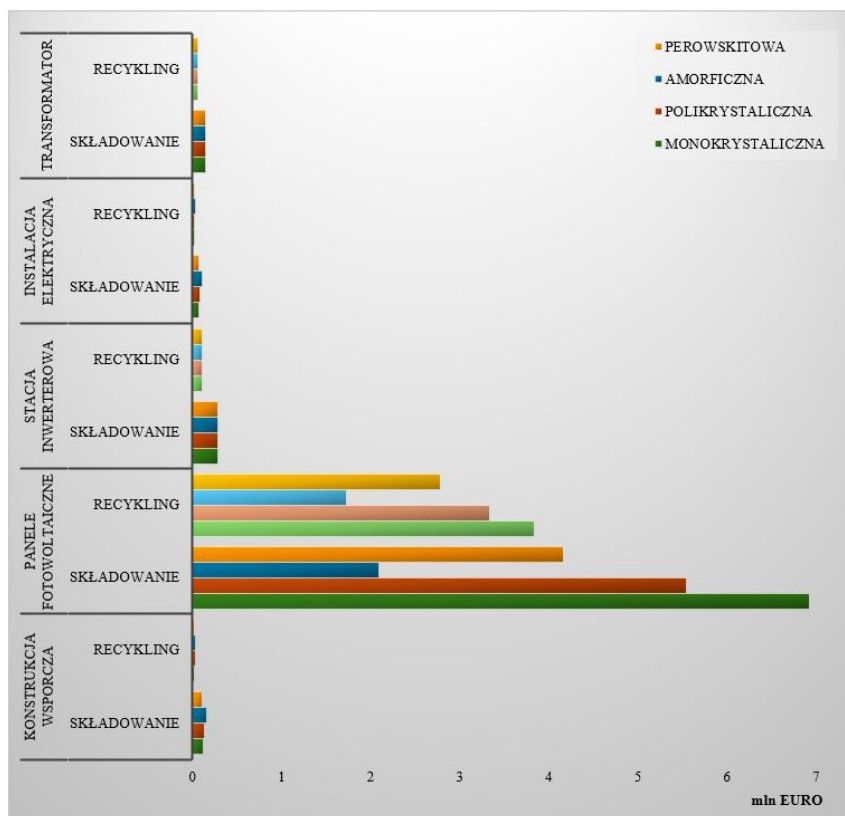
Kolejny etap analiz stanowiła ocena potencjalnego oddziaływania badanych obiektów technicznych na zdrowie człowieka. Najwyższe koszty środowiskowe ponoszone w tym obszarze charakteryzowały cykl istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych (składowanie: 7,55 mln EUR, recykling: 4,05 mln EUR). Porównując je z analogicznymi kosztami dla cyklu istnienia elektrowni polikrystalicznej, to są one wyższe o ok. 17%, w przypadku amorficznej – o ok. 62%, a dla perowskitowej – o ok. 36%. Dla wszystkich rozważanych obiektów, zastosowanie zagospodarowania poużytkowego w formie recyklingu wpływa na redukcję kosztów środowiskowych odpowiednio: dla elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych – o ok. 46%, na polikrystalicznych – o ok. 42%, na amorficznych – o ok. 29% oraz na perowskitowych – o ok. 37% (rys. 5.80).



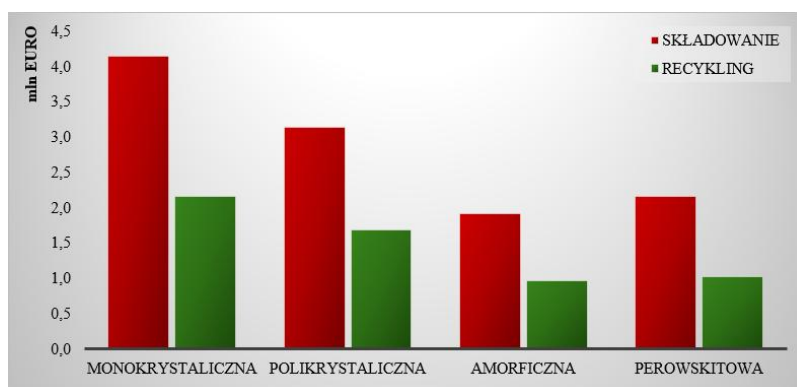
Rys. 5.80. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Najwyższe koszty niezbędne do poniesienia w celu ograniczenia lub usunięcia szkód powstałych w zakresie zdrowia ludzkiego bądź zapobiegania wystąpieniu emisji szkodliwych dla niego substancji wyróżniają cykl istnienia paneli fotowoltaicznych, zwłaszcza monokrystalicznych (składowanie: 6,92 mln EUR, recykling: 3,83 mln EUR), a najniższe – instalacji elektrycznej, w szczególności elektrowni opartej na modułach perowskitowych (składowanie: 0,067 mln EUR, recykling: 0,019 mln EUR). Recykling poszczególnych komponentów instalacji PV jest w stanie w znacznym stopniu ograniczyć koszty ponoszone z tytułu szkodliwego oddziaływania ich cykli istnienia na zdrowie – dla konstrukcji wsporczych średnio o ok. 80%, dla stacji inwerterowej o ok. 63%, dla instalacji elektrycznej średnio o ok. 71%, dla transformatora o ok. 58%, natomiast dla paneli fotowoltaicznych od ok. 18% (panele amorficzne) do ok. 45% (monokrystaliczne) (rys. 5.81).

Następny etap badań obejmował analizę potencjalnego wpływu rozważanych obiektów technicznych na ekosystemy. Również w tym obszarze, najwyższe wartości niezbędnych do poniesienia kosztów środowiskowych cechowały cykl istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (składowanie: 4,15 mln EUR, recykling: 2,16 mln EUR). W porównaniu do niej, poziom potencjalnych nakładów finansowych był o ok. 24% niższy dla elektrowni polikrystalicznej, o ok. 53% – dla amorficznej oraz o ok. 48% – dla perowskitowej. Zastosowanie procesów recykling redukuje potencjalnie poniesione koszty dla elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych o ok. 48%, na polikrystalicznych o ok. 46%, na amorficznych o ok. 50% a na perowskitowych o ok. 52% (rys. 5.82).



Rys. 5.81. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

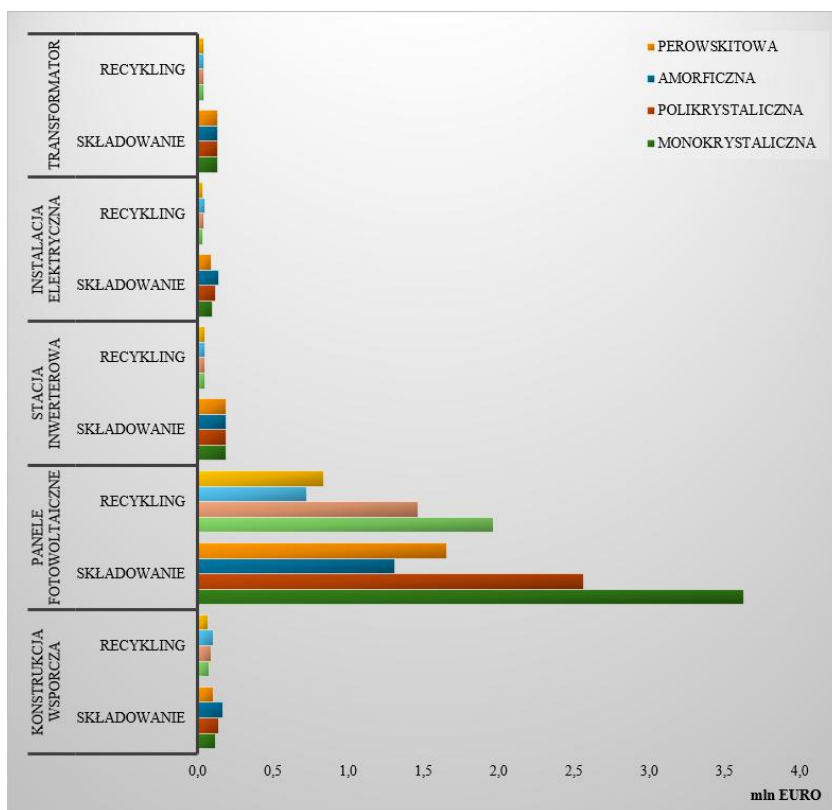


Rys. 5.82. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

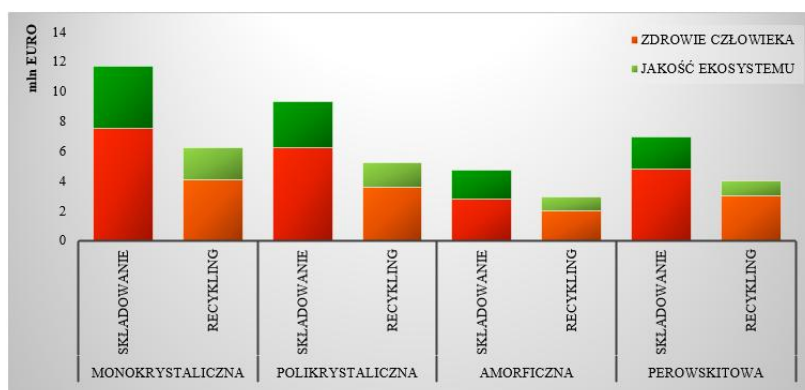
Najwyższe koszty środowiskowe z tytułu obniżenia jakości ekosystemów są generowane przez cykle istnienia paneli fotowoltaicznych, przy czym maksymalny ich poziom, analogicznie jak w przypadku wpływu na zdrowie człowieka, odnotowano dla paneli monokrystalicznych (składowanie: 3,62 mln EUR, recykling: 1,96 mln EUR). W odniesieniu do innych rodzajów paneli, koszty te są wyższe o ok. 29% aniżeli polikrystalicznych, o ok. 63% w porównaniu do amorficznych i o ok. 54% niż perowskitowych. Spośród wszystkich ocenianych komponentów najniższe potencjalne koszty charakteryzują cykl istnienia instalacji elektrycznej, zwłaszcza elektrowni opartej na modułach perowskitowych (składowanie: 0,087 mln EUR, recykling: 0,031 mln EUR). Procesy recyklingu mogą obniżyć koszty środowiskowe w obszarze jakości ekosystemu w przypadku każdej analizowanej grupy elementów instalacji fotowoltaicznej, w tym średnio o ok. 37% dla konstrukcji wsporczych i instalacji elektrycznych, o ok. 76% dla stacji inwerterowych, o ok. 68% dla transformatorów natomiast dla paneli PV od ok. 43% (polikrystaliczne) do ok. 49% (perowskitowe) (rys. 5.83).

Sumaryczne wielkości następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych, z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, zobrazowano na rysunku 5.84. Spośród wszystkich analizowanych elektrowni, te oparte na modułach monokrystalicznych generują potencjalnie najwyższe koszty środowiskowe dla otoczenia (łącznie składowanie: 11,7 mln EUR, recykling: 6,21 mln EUR), a średnio ok. 65% z nich stanowią nakłady finansowe związane z pogorszeniem zdrowia człowieka. Drugim najwyższym poziomem kosztów środowiskowych charakteryzuje się elektrownia oparta na modułach polikrystalicznych (łącznie składowanie: 9,43 mln EUR, recykling: 5,23 mln EUR), w tym przypadku średnio ok. 67% stanowią nakłady w zakresie pogorszenia stanu zdrowia. Trzecią najwyższą wartością potencjalnych kosztów wyróżnia się cykl istnienia elektrowni opartej na modułach perowskitowych (łącznie składowanie: 6,93 mln EUR, recykling: 4,00 mln EUR), gdzie nakłady finansowe związane ze zdrowiem wynoszą od ok. 68% (dla zagospodarowania w formie składowania) do ok. 74% (recykling). W przypadku elektrowni opartej na modułach amorficznych sumaryczna wartość kosztów oddziaływania na otoczenie wynosiła odpowiednio dla składowania: 4,72 mln EUR a dla recyklingu: 2,99 mln EUR, przy czym wpływ na zdrowie ludzkie, analogicznie jak dla innych elektrowni, cechował najwyższy udział w całkowitych potencjalnych nakładach finansowych (składowanie: 59%, recykling: 67%).

W ostatnim kroku przeanalizowano poziom oddziaływania na zdrowie człowieka oraz jakość ekosystemu poszczególnych grup elementów konstrukcyjnych rozważanych obiektów technicznych (konstrukcje wsporcze, panele PV, stacje inwerterowe, instalacje elektryczne, transformatory) (rys. 5.85).



Rys. 5.83. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania pożytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

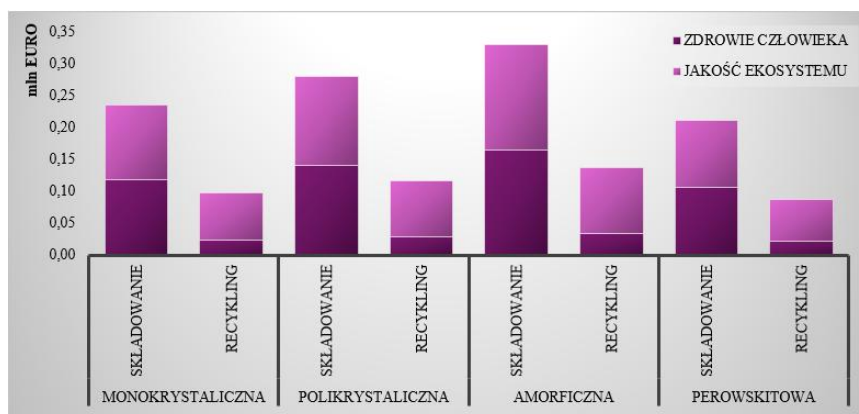


Rys. 5.84. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania pożytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

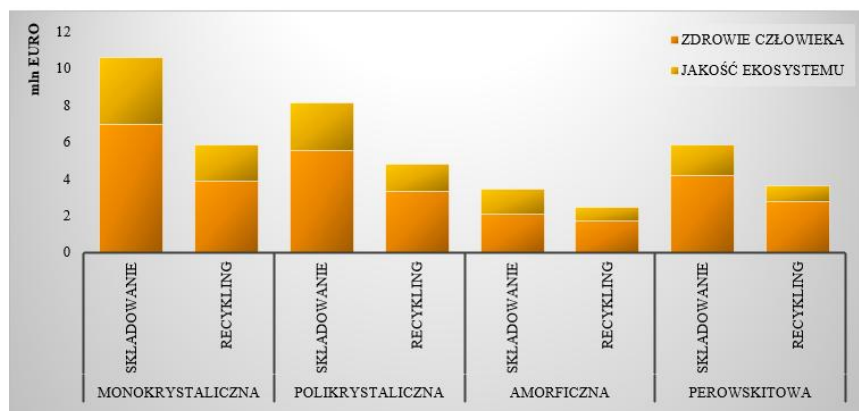
Konstrukcja wsporcza elektrowni amorficznych generuje najwyższe koszty dla otoczenia spośród wszystkich analizowanych obiektów (składowanie: 0,33 mln EUR, recykling 0,14 mln EUR). Nakłady finansowe związane z ich niepożądanym oddziaływaniem na zdrowie człowieka i jakość ekosystemu są porównywalne w przypadku zagospodarowania poużytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów (zdrowie człowieka: 0,165 mln EUR, jakość ekosystemu: 0,164 mln EUR). Zastosowanie procesów recyklingu znacząco obniża koszty związane z niekorzystnym wpływem na otoczenie – dla zdrowia człowieka o ok. 80%, a dla jakości ekosystemu o ok. 37%. Wysoki poziom potencjalnych kosztów związanych z negatywnym oddziaływaniem na otoczenie odnotowano także dla cyklu istnienia konstrukcji wsporczej elektrowni polikrystalicznej (składowanie: 0,28 mln EUR, recykling: 0,12 mln EUR). W przypadku scenariusza obejmującego składowanie, nakłady finansowe ponoszone w obszarze zdrowia człowieka i jakości ekosystemu (analogicznie jak dla elektrowni amorficznej) są porównywalne (zdrowie człowieka: 0,140 mln EUR, jakość ekosystemu: 0,139 mln EUR). Scenariusz zakładający recykling znacząco obniża potencjalne nakłady finansowe – w odniesieniu do zdrowia o ok. 79%, natomiast do jakości środowiska o ok. 36%. Trzecią najwyższą wartością potencjalnych kosztów wyróżniał się cykl istnienia konstrukcji wsporczych elektrowni monokrystalicznej (składowanie: 0,23 mln EUR, recykling: 0,097 mln EUR). Analogicznie jak w przypadku elektrowni amorficznej i polikrystalicznej, nakłady finansowe związane z oddziaływaniem na zdrowie człowieka i jakość ekosystemu podczas składowania konstrukcji wsporczych elektrowni monokrystalicznych są na podobnym poziomie (składowanie: 0,118 mln EUR, recykling: 0,117 mln EUR), a poddanie ich recyklingowi po zakończeniu eksploatacji obniża koszty o ok. 80% w przypadku zdrowia człowieka oraz o ok. 36% w odniesieniu do jakości środowiska. Spośród analizowanych elektrowni konstrukcja wsporcza elektrowni perowskitowych cechuje się najniższym poziomem potencjalnych kosztów środowiskowych, które dla składowania wynoszą 0,212 mln EUR, a dla recyklingu 0,087 mln EUR. Ponownie, podczas składowania koszty w obszarze zdrowia człowieka i jakości ekosystemu są na podobnym poziomie (zdrowie człowieka: 0,106 mln EUR, jakość ekosystemu: 0,105 mln EUR), jednak procesy recyklingu są w stanie znacząco je obniżyć (zdrowie człowieka: o ok. 79%, jakość ekosystemu: o ok. 37%) (rys. 5.85).

Drugą grupę ocenianych elementów stanowiły panele fotowoltaiczne. Spośród wszystkich badanych elektrowni, cykl istnienia paneli monokrystalicznych cechuje się najwyższymi kosztami środowiskowymi (składowanie: 10,5 mln EUR, recykling: 5,80 mln EUR), przy czym obszar oddziaływania na zdrowie człowieka, zarówno dla procesów składowania, jak i recyklingu stanowi ok. 66% całkowitych potencjalnych nakładów finansowych. Drugim najwyższym poziomem kosztów środowiskowych charakteryzują się cykle istnienia paneli polikrystalicznych, które w przypadku składowania wynoszą 8,11 mln EUR, a recyklingu – 4,79 mln EUR. Tak jak miało to miejsce

dla paneli monokrystalicznych, najwyższe nakłady finansowe trzeba będzie ponieść w celu usunięcia destrukcyjnych oddziaływań na zdrowie człowieka (składowanie: ok. 68%, recykling: ok. 69%). Trzecią najwyższą wartością potencjalnych kosztów wyróżniały się panele perowskitowe, które dla składowania jako formy zagospodarowania poużytkowego wynosiły 5,82 mln EUR, a dla recyklingu – 3,61 mln EUR. W tym przypadku, spośród dwóch analizowanych obszarów oddziaływania, większe nakłady finansowe były związane z pogorszeniem zdrowia człowieka i zagospodarowaniem w formie składowania, stanowiąc ok. 71% kosztów całkowitych (dla recyklingu ok. 76%) (rys. 5.86).



Rys. 5.85. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)



Rys. 5.86. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

Cykl istnienia paneli amorficznych generuje najniższe koszty środowiskowe w porównywaniu z pozostałymi badanymi panelami PV (składowanie: 3,40 mln EUR, recykling: 2,45 mln EUR). Ponownie wyższe nakłady finansowe będą ponoszone celem usunięcia destrukcyjnego wpływu w obszarze zdrowia człowieka (ok. 61% kosztów całkowitych dla zagospodarowania w formie składowania i ok. 70% dla procesów recyklingu) (rys. 5.86).

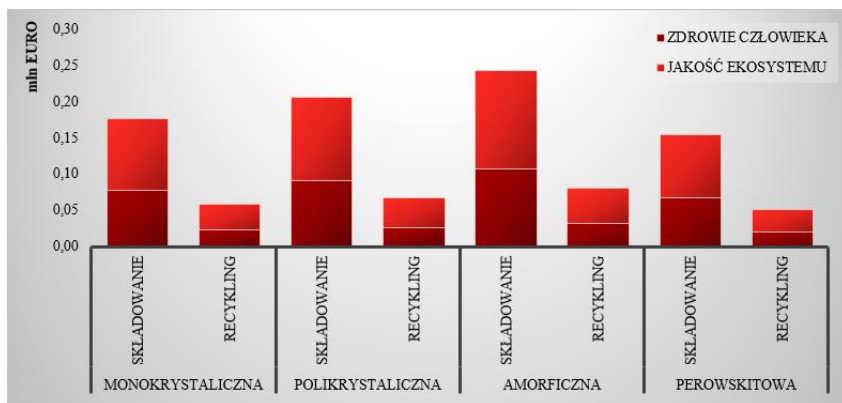
W związku z faktem, że analizowane elektrownie mają tę samą moc (1 MW), koszty środowiskowe cykli istnienia stacji inwerterowych dla poszczególnych elektrowni fotowoltaicznych są analogiczne (składowanie: 0,184 mln EUR, recykling: 0,043 mln EUR). Najwyższe nakłady finansowe związane z usunięciem lub ograniczeniem negatywnego oddziaływania na otoczenie będą ponoszone dla obszaru obejmującego pogorszenie zdrowia człowieka. W przypadku składowania jako formy zagospodarowania użytkowego wynoszą one ok. 61% kosztów całkowitych, natomiast dla recyklingu – ok. 71% (rys. 5.87).



Rys. 5.87. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

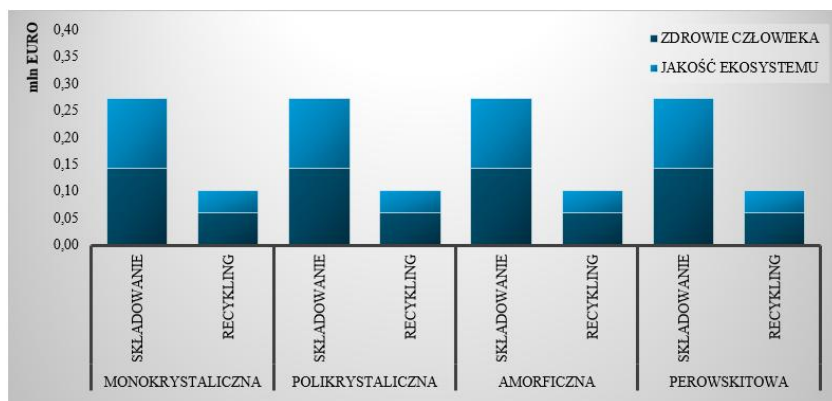
Przedostatnią ocenianą grupę elementów stanowiły instalacje elektryczne. Koszty środowiskowe związane z cyklem istnienia instalacji elektrowni amorficznej są najwyższe spośród analizowanych obiektów technicznych (składowanie: 0,243 mln EUR, recykling: 0,079 mln EUR). Drugim najwyższym poziomem potencjalnych kosztów charakteryzuje się instalacja elektrowni polikrystalicznej (składowanie: 0,206 mln EUR, recykling: 0,067 mln EUR). Trzecią najwyższą wartością wyróżniała się instalacja elektrowni monokrystalicznej (składowanie: 0,176 mln EUR, recykling: 0,057 mln EUR). Natomiast dla instalacji elektrowni perowskitowej sumaryczna wartość potencjalnych nakładów finansowych w tym względzie była najniższa i wynosiła 0,155 mln EUR dla składowania jako formy zagospodarowania użytkowego oraz 0,051 mln EUR w przypadku recyklingu. Dla wszystkich rozważanych

elektrowni fotowoltaicznych najwyższe koszty należy ponieść w celu usunięcia konsekwencji destrukcyjnego oddziaływania cykli istnienia na jakość ekosystemu, które dla składowania wynoszą średnio ok. 56% całkowitych kosztów środowiskowych, natomiast dla recyklingu – ok. 61% (rys. 5.88).



Rys. 5.88. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

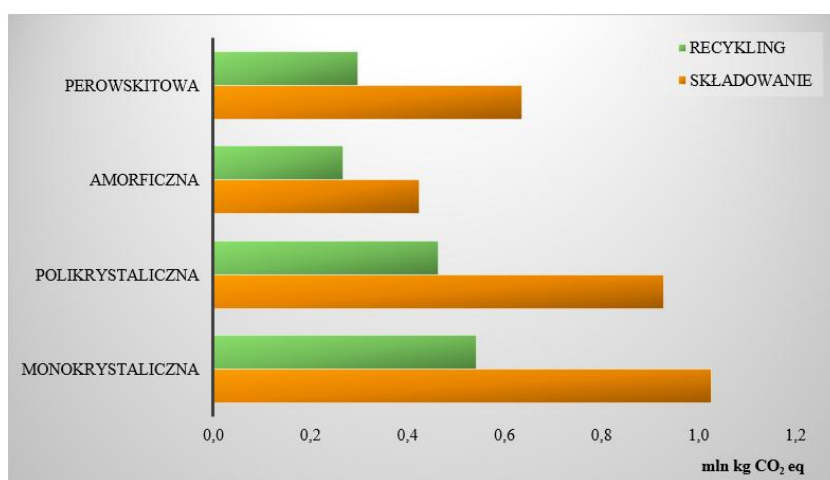
Analogicznie jak w przypadku stacji inwerterowych, koszty środowiskowe cykli istnienia stacji transformatorowych dla poszczególnych elektrowni są tożsame i wynoszą odpowiednio 0,27 mln EUR w przypadku składowania oraz 0,10 mln EUR dla recyklingu. Najwyższe potencjalne nakłady finansowe, niezależnie od formy zagospodarowania trzeba będzie ponieść w odniesieniu do obszaru zdrowia człowieka (ok. 52% całkowitych kosztów dla zagospodarowania w formie składowania oraz ok. 58% – w formie recyklingu) (rys. 5.89).



Rys. 5.89. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka i jakości ekosystemów w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: mln EURO)

5.5.2. Model IPCC 2021

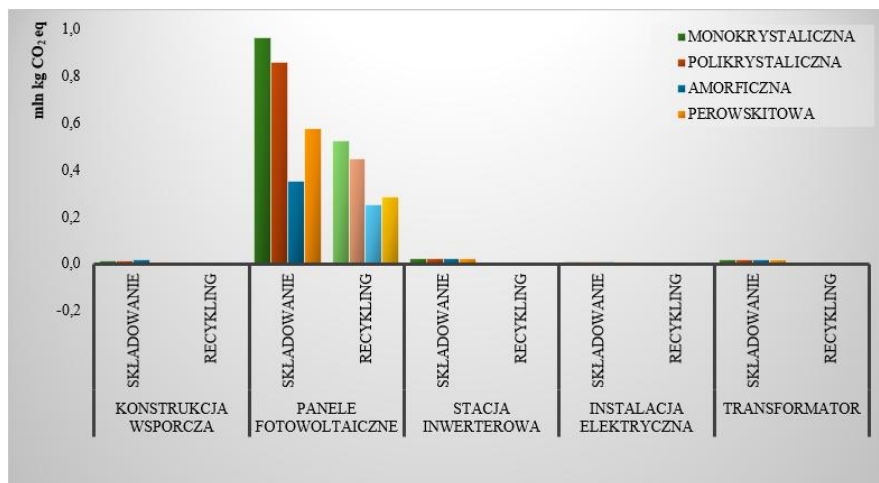
W celu zobrazowania rezultatów charakteryzowania potencjalnych następstw środowiskowych emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych dokonano analizy porównawczej. Najwyższym poziomem szkodliwych emisji dla wszystkich obiektów technicznych charakteryzowało się zagospodarowanie poużytkowe w formie składowania na wysypiskach odpadów – o od ok. 37% do ok. 53% w stosunku do wykorzystania procesów recyklingu. Spośród analizowanych elektrowni PV maksymalny poziom destrukcyjnych oddziaływań odnotowano dla tej opartej na modułach monokrystalicznych (składowanie: 1 027 611 kg CO₂ eq, recykling: 541 589 kg CO₂ eq), jest to o ok. 10% więcej w stosunku do elektrowni polikrystalicznej, o ok. 59% więcej w stosunku do amorficznej i o ok. 38% więcej niż dla perowskitowej, biorąc pod uwagę składowanie. Uwzględniając recykling jako formę zagospodarowania poużytkowego zauważono, że poziom emisji destrukcyjnych oddziaływań dla elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych jest wyższy o ok. 15% w stosunku do polikrystalicznej, o ok. 51% wyższy w odniesieniu do amorficznej i o ok. 45% wyższy aniżeli perowskitowej (rys. 5.90).



Rys. 5.90. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Cykle istnienia paneli fotowoltaicznych wszystkich analizowanych elektrowni wyróżniają się najwyższym poziomem szkodliwych emisji w porównaniu do pozostałych zespołów elementów (dla składowania o od ok. 83% do ok. 94% całkowitych emisji, dla recyklingu o od ok. 95% do ok. 97%). Natomiast najmniejszymi emisjami cechuje się cykl istnienia instalacji elektrycznych (wszystkich elektrowni). W dalszej części podrozdziału dokonano

szczegółowej analizy emisji GHG z podziałem na poszczególne grupy elementów elektrowni PV (rys. 5.91).

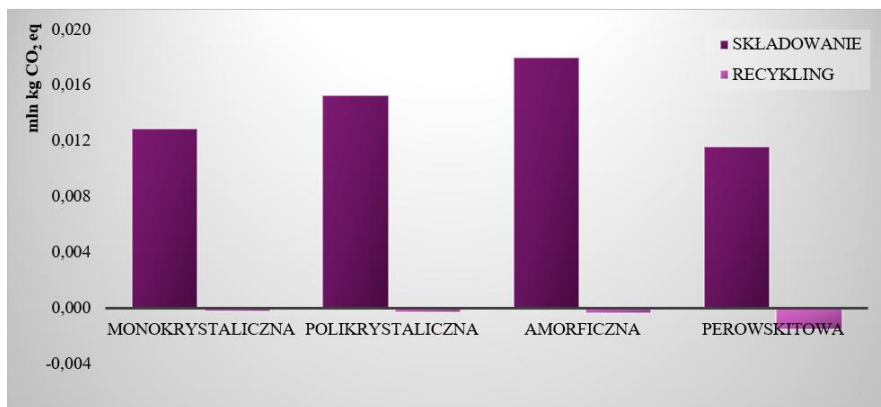


Rys. 5.91. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Cykl istnienia konstrukcji wsporczych elektrowni fotowoltaicznej opartej na panelach amorficznych (składowanie: 18 002 kg CO₂ eq, recykling: -389 kg CO₂ eq) powoduje największe emisje ditlenku węgla w porównaniu do pozostałych elektrowni. Dla zagospodarowania w formie składowania poziom emisji jest o ok. 28% wyższy niż dla konstrukcji wsporczej elektrowni monokrystalicznej, o ok. 15% wyższy w porównaniu do polikrystalicznej i o ok. 35% wyższy niż dla perowskitowej. Recykling konstrukcji wsporczych wykonanych z materiałów charakteryzujących się wysokim potencjałem ponownego wykorzystania odgrywa kluczową rolę w minimalizacji śladu węglowego. Umożliwia on znaczące obniżenie emisji związanych z całym cyklem istnienia tych elementów, a nawet osiągnięcie wartości ujemnych w bilansie emisji. Dzieje się tak dzięki zastosowaniu odzyskanych surowców do produkcji nowych komponentów, które znajdują zastosowanie w budowie kolejnych elektrowni fotowoltaicznych (rys. 5.92).

Analizując emisję gazów cieplarnianych w cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych zastosowanych w badanych elektrowniach, można zauważyć, że panele monokrystaliczne charakteryzują się najwyższymi wartościami emisji (składowanie: 965 733 kg CO₂ eq, recykling: 527 840 kg CO₂ eq), natomiast najniższymi – cechują się panele amorficzne (składowanie: 354 261 kg CO₂ eq, recykling: 253 414 kg CO₂ eq). W cyklu istnienia paneli PV emisja gazów cieplarnianych związana z formą ich zagospodarowania poużytkowego wykazuje znaczące różnice pomiędzy ocenianymi technologiami. W przypadku

składowania paneli monokrystalicznych emisje te są średnio o ok. 10% wyższe niż dla paneli polikrystalicznych, o ok. 63% wyższe niż dla paneli amorficznych oraz o ok. 40% wyższe w porównaniu z panelami perowskitowymi. Alternatywne podejście, obejmujące recykling tworzyw, materiałów i elementów może istotnie zmniejszyć ogólną emisję ditlenku węgla do atmosfery. Ogranicza on emisje o około 45% w przypadku paneli monokrystalicznych, o 48% dla paneli polikrystalicznych, o 28% dla technologii amorficznej oraz o 51% w kontekście paneli perowskitowych (rys. 5.93).



Rys. 5.92. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)



Rys. 5.93. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

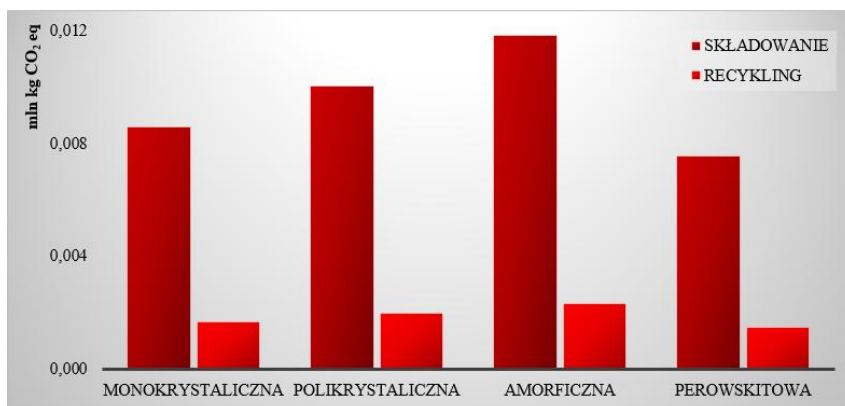
Z uwagi na identyczną moc analizowanych elektrowni fotowoltaicznych, wynoszącą 1 MW, wielkość emisji gazów szklarniowych związanych z cyklem

istnienia stacji inwerterowych jest stała. Dla procesu składowania wynosi ona 22 609 kg CO₂ eq, natomiast w przypadku recyklingu 6 476 kg CO₂ eq. Zastosowanie recyklingu tworzyw, materiałów i elementów budujących stacje inwerterowe prowadzi do redukcji emisji GHG o ok. 71%, co znacząco przyczynia się do minimalizacji ich destrukcyjnego wpływu na otoczenie (rys. 5.94).



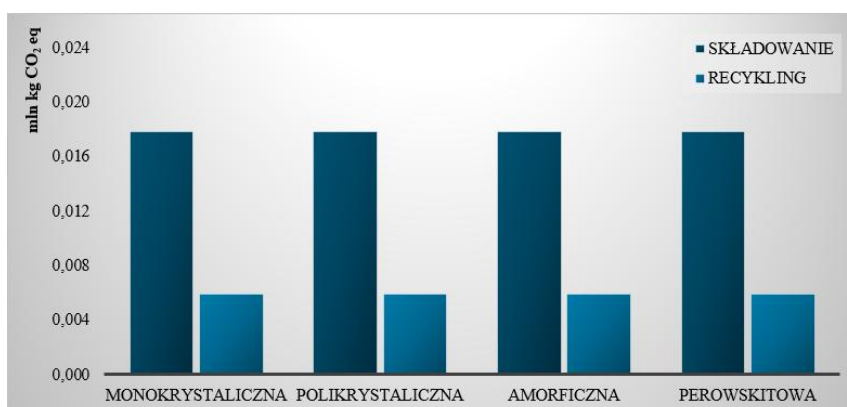
Rys. 5.94. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Składowanie tworzyw, materiałów i elementów instalacji elektrycznych generuje znacznie większą emisję CO₂ niż proces recyklingu we wszystkich typach elektrowni fotowoltaicznych. Spośród analizowanych przypadków, instalacja elektrowni amorficznej wiąże się z najwyższą emisją CO₂, wynoszącą 11 828 kg CO₂ eq w przypadku składowania oraz 2 323 kg CO₂ eq dla recyklingu. Z kolei elektrownia perowskitowa charakteryzuje się najniższym poziomem emisji szkodliwych gazów zarówno w scenariuszu składowania, jak i recyklingu. Proces recyklingu pozwala na redukcję emisji gazów cieplarnianych w granicach od 79 (dla elektrowni amorficznej) do 85% (w przypadku elektrowni perowskitowej), w porównaniu do emisji generowanych w procesach składowania. Wyraźnie wskazuje to na kluczowe znaczenie recyklingu w ograniczaniu wpływu środowiskowego instalacji elektrycznych, niezależnie od typu elektrowni fotowoltaicznej. Podobnie jak w przypadku stacji inwerterowych, poziom emisji ditlenku węgla związany z cyklem istnienia stacji transformatorowych w analizowanych elektrowniach fotowoltaicznych pozostaje na tym samym poziomie, wynosząc odpowiednio 178 839 kg CO₂ eq dla składowania oraz 5 868 kg CO₂ eq w przypadku recyklingu. Przeprowadzenie procesu recyklingu tworzyw, materiałów i elementów konstrukcyjnych stacji inwerterowych pozwala na znaczącą redukcję emisji, sięgającą ok. 67% (rys. 5.95).

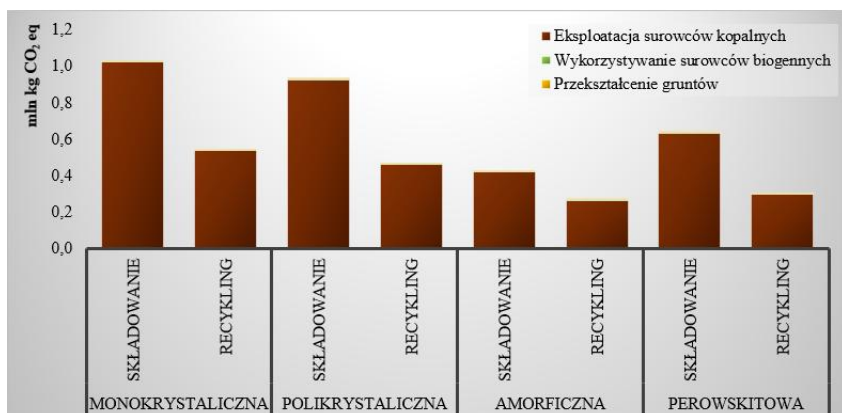


Rys. 5.95. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Eksploatacja surowców kopalnych stanowi dominujące źródło emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia wszystkich badanych elektrowni fotowoltaicznych. Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego znacząco obniża emisje CO₂, od ok. 40% w przypadku elektrowni amorficznych do nawet 53% dla perowskitowych. Różnice te wynikają z odmiennego składu materiałowego, energochłonności procesów produkcyjnych oraz sposobów zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji. Udział surowców biogennych i zmiany w użytkowaniu gruntów w całkowitym bilansie emisji jest marginalny. Zastąpienie składowania odpadów procesami recyklingu prowadzi do istotnego obniżenia emisji gazów cieplarnianych, przede wszystkim dzięki ograniczeniu eksploatacji surowców kopalnych (rys. 5.97).



Rys. 5.96. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

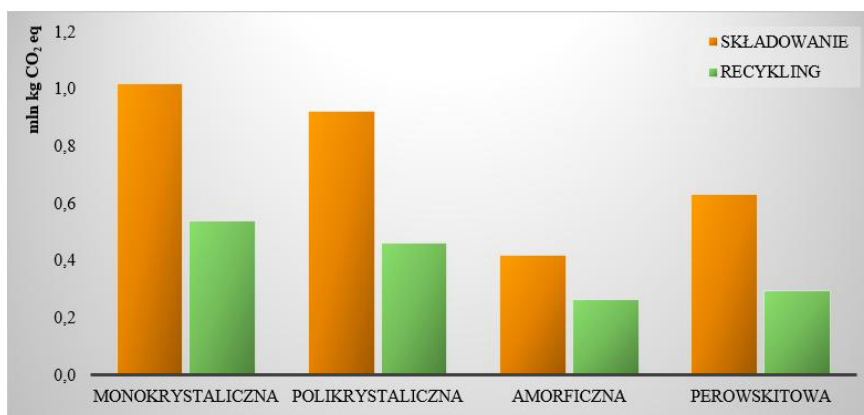


Rys. 5.97. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Jak już wcześniej wspomniano, kategoria wpływu obejmująca eksploatację surowców kopalnych stanowi główne źródło emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu istnienia wszystkich analizowanych elektrowni fotowoltaicznych. Uzyskane wyniki badań wskazują, iż zagospodarowanie poużytkowe tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni w formie recyklingu prowadzi do istotnego ograniczenia emisji gazów szklarniowych generowanych w trakcie wydobywania i przetwarzania surowców pierwotnych. Szczególnie korzystne rezultaty odnotowano dla technologii krzemowych (mono- i polikrystalicznej), gdzie wdrożenie recyklingu skutkuje redukcją emisji o około połowę (kolejno o 47 i 50%). W przypadku ogniw perowskitowych recykling pozwala na zmniejszenie emisji o ok. 53%. Najniższy poziom redukcji uzyskano w przypadku ogniw amorficznych (ok. 37%), co może wynikać z niższego zapotrzebowania na materię i energię ze źródeł nieodnawialnych w całkowitym bilansie materiałowo-energetycznym tej technologii. Wdrożenie zamkniętego obiegu materiałowego w sektorze fotowoltaicznym przyczyniłoby się nie tylko do ograniczenia zapotrzebowania na surowce pierwotne, lecz również do obniżenia śladu węglowego całego systemu energetycznego opartego na technologiach PV. Istnieje zatem pilna potrzeba opracowania i wdrożenia skutecznych wytycznych w zakresie sterowania cyklem istnienia elektrowni fotowoltaicznych. Takie podejście pozwoli na maksymalizację efektywności procesów recyklingu, zapewniając odpowiednie zagospodarowanie tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych tych obiektów technicznych po zakończeniu okresu eksploatacji (rys. 5.98).

Dokonano również analizy emisji gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych w cyklach istnienia najważniejszych grup elementów analizowanych elektrowni. Spośród analizowanych technologii największy udział w emisji ditlenku węgla

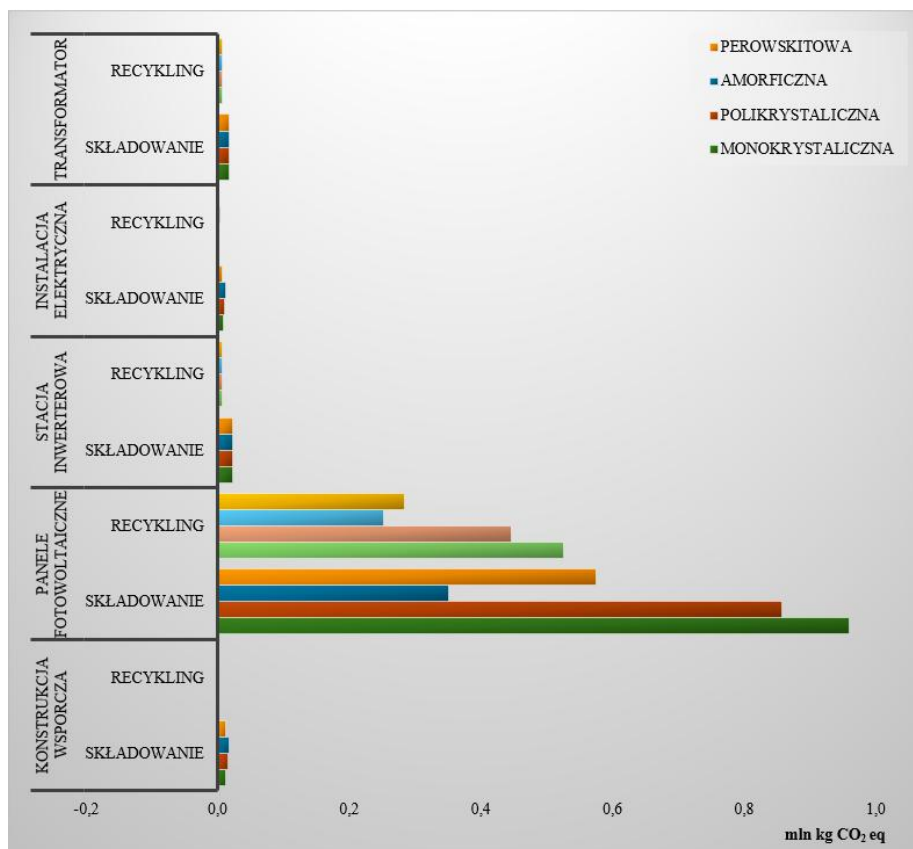
odnotowano dla cykli istnienia paneli PV, co czyni je kluczowym elementem w ocenie wpływu na otoczenie elektrowni fotowoltaicznych. W scenariuszu składowania, ich udział w całkowitej emisji gazów cieplarnianych wynosi od ok. 84% dla paneli amorficznych do ok. 94% dla monokrystalicznych. Istotne zmniejszenie emisji odnotowuje się w przypadku zastosowania recyklingu, choć panele wciąż pozostają dominującym źródłem emisji, co podkreśla konieczność opracowywania efektywnych strategii postępowania z odpadami na etapie zagospodarowania poużytkowego. Recykling konstrukcji wsporczej wykazuje szczególnie znaczący pozytywny wpływ środowiskowy w perspektywie całego cyklu istnienia tych komponentów. Technologia perowskitowa wyróżnia się największą wartością negatywnego bilansu emisji (-1 633 kg CO₂ eq), co wskazuje, że korzyści środowiskowe wynikające z recyklingu materiałów przewyższają emisje generowane przez procesy ich przetwarzania. Natomiast emisje związane z cyklami istnienia stacji inwerterowych i transformatorów są analogiczne dla wszystkich rozważanych rodzajów elektrowni, co wynika z jednakowej mocy zainstalowanej we wszystkich obiektach technicznych. W przypadku instalacji elektrycznej najwyższy poziom emisji stwierdzono dla elektrowni opartych na panelach amorficznych (11 517 kg CO₂ eq dla scenariusza składowania), podczas gdy najniższe wartości odnotowano dla technologii perowskitowej (1 478 kg CO₂ eq przy zastosowaniu recyklingu). Wprowadzenie technologii recyklingu istotnie redukuje ślad węglowy w każdej analizowanej technologii, co uwidacznia potencjalne korzyści związane z takimi działaniami (rys. 5.99).



Rys. 5.98. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

Panele fotowoltaiczne pozostają kluczowym źródłem emisji GHG w systemach fotowoltaicznych, co wskazuje na potrzebę ukierunkowania działań sterujących, optymalizacyjnych na ulepszenia związane z ich projektowaniem

oraz zagospodarowaniem po zakończeniu okresu eksploatacji. Obiecujące są również potencjalne pozytywne efekty środowiskowe wynikające z recyklingu konstrukcji wsporczej, które mogą przekładać się na negatywny bilans emisji. Prezentowane dane jednoznacznie wskazują na konieczność rozwoju technologii recyklingu jako istotnego elementu wdrożenia zrównoważonych rozwiązań w sektorze fotowoltaiki (rys. 5.99).

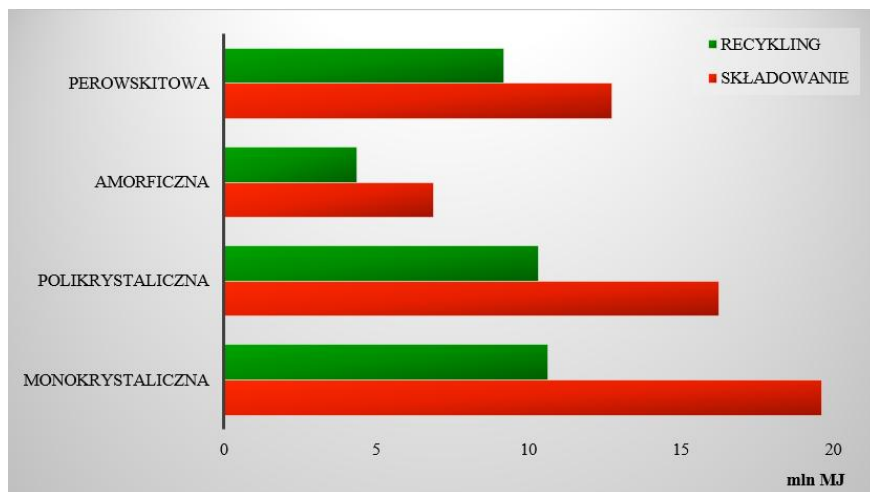


Rys. 5.99. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model IPCC 2021, jednostka: mln kg CO₂ eq)

5.5.3. Model CED

W dobie globalnej transformacji gospodarczej technologie fotowoltaiczne odgrywają coraz istotniejszą rolę w dekarbonizacji sektora energetycznego. Jednakże, oprócz korzyści środowiskowych związanych z produkcją energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, istotnym zagadnieniem pozostaje pełny

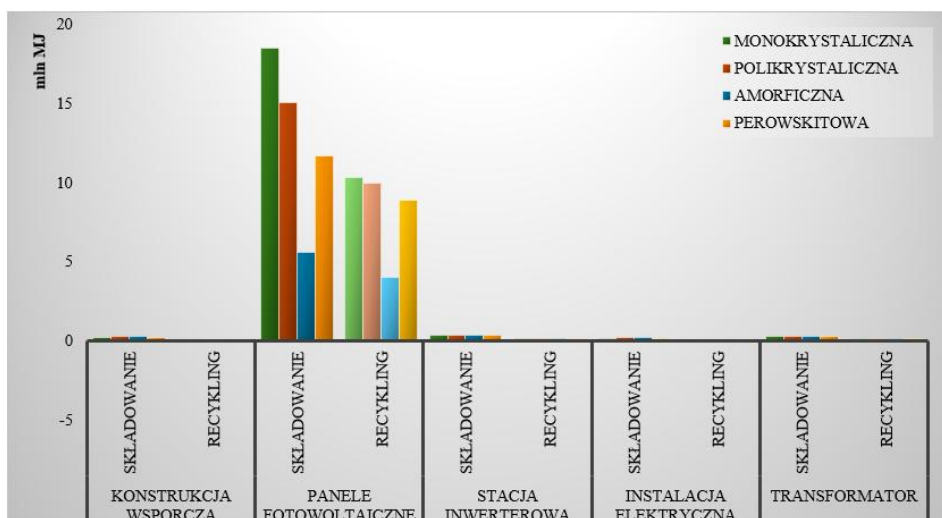
bilans energetyczny tego rodzaju obiektów technicznych, obejmujący zarówno etap produkcji, eksploatacji, jak i zagospodarowania poużytkowego. Z tego względu przeprowadzone badania obejmowały również szczegółową analizę porównawczą zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia rozpatrywanych elektrowni fotowoltaicznych. Spośród ocenianych typów, najwyższy poziom skumulowanego zapotrzebowania na energię odnotowano w przypadku elektrowni bazującej na modułach monokrystalicznych, gdzie dla wariantu ze składowaniem wynosiło ono ok. 19,6 mln MJ a dla recyklingu – ok. 10,6 mln MJ. Przy uwzględnieniu składowania jako metody zagospodarowania poużytkowego, zapotrzebowanie na energię dla elektrowni monokrystalicznej jest o ok. 17% wyższe niż dla jej polikrystalicznego odpowiednika, o ok. 65% niż dla elektrowni amorficznej i o ok. 35% niż dla wersji bazującej na technologii perowskitowej. Zastosowanie procesów recyklingu w odniesieniu do komponentów systemów fotowoltaicznych znacząco obniża zapotrzebowanie na energię. Poziom redukcji wynosi odpowiednio ok. 45% dla elektrowni monokrystalicznej, 36% dla polikrystalicznej, 37% dla amorficznej i 28% dla perowskitowej (rys. 5.100).



Rys. 5.100. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

W ramach przeprowadzonej analizy skumulowania zapotrzebowania na energię w cyklach istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych odnotowano, że największy udział w całkowitym zapotrzebowaniu na nią cechuje panele PV. W przypadku zagospodarowania poużytkowego w formie składowania wynosi on od ok. 82% dla paneli perowskitowych do ponad ok. 94% dla monokrystalicznych. Jednocześnie, w kontekście zagospodarowania poużytkowego w formie recyklingu, pozwala on na zmniejszenie zapotrzebowania na energię o od ok. 24% (panele perowskitowe) do ok. 44% (monokrystaliczne). Spośród komponentów systemów fotowoltaicznych

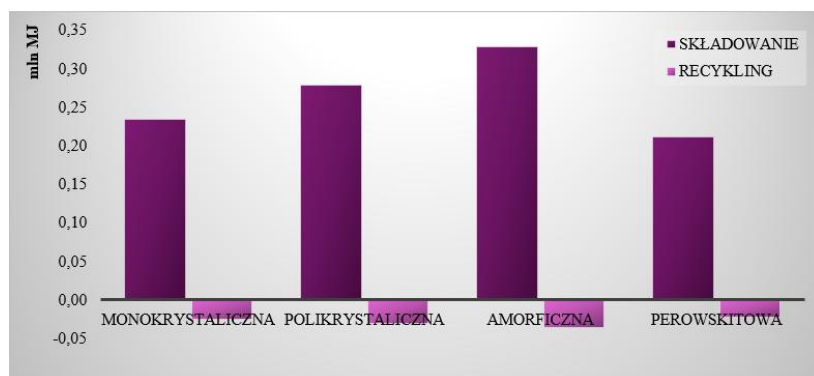
największą efektywność energetyczną wykazuje cykl istnienia konstrukcji wsporczej zakończony zagospodarowaniem w formie recyklingu surowców, materiałów oraz elementów. W konsekwencji zapewnia on pozytywny bilans energetyczny w porównaniu z ich wytwarzaniem przy użyciu surowców pierwotnych. Wyniki przeprowadzonej analizy jednoznacznie wskazują na znaczący wpływ procesów dotyczących zagospodarowania użytkowego elektrowni fotowoltaicznych na ich całkowity bilans energetyczny (rys. 5.101).



Rys. 5.101. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model CED, jednostka: mln MJ)

Bez względu na zastosowaną technologię, składowanie konstrukcji wsporczych elektrowni fotowoltaicznych wiąże się z istotnie wysokim zapotrzebowaniem energetycznym, które waha się od ok. 0,21 mln MJ dla technologii perowskitowej do ok. 0,33 mln MJ w przypadku technologii amorficznej. Najwyższy poziom skumulowanego zapotrzebowania na energię wykazują systemy bazujące na technologii amorficznej, co wynika z większej powierzchni modułów wymaganych dla tego typu rozwiązania. Proces recyklingu umożliwia odzysk energii w zakresie od ok. 0,02 mln MJ (perowskitowa) do ok. 0,04 MJ (amorficzna). Choć konstrukcje wsporcze cechuje stosunkowo niewielki udział w całkowitych bilansach energetycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych, konieczne jest sterowanie jej wpływem na otoczenie w tym obszarze. Wysokie wartości zapotrzebowania energetycznego wskazują na potrzebę podjęcia działań optymalizacyjnych, takich jak redukcja masy konstrukcji przy zachowaniu jej wytrzymałości, wdrożenie energooszczędnych procesów produkcyjnych (np. poprzez wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu) oraz ciągłe zwiększanie efektywności samego procesu recyklingu. W dłuższej perspektywie rozwój lekkich materiałów kompozytowych

o obniżonym śladzie energetycznym może istotnie przyczynić się do poprawy zrównoważenia tego elementu w infrastrukturze technicznej energetyki odnawialnej (rys. 5.102).



Rys. 5.102. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia konstrukcji wsporczych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

Panele fotowoltaiczne stanowią kluczowy komponent elektrowni PV, zarówno pod względem funkcjonalnym, jak i energetycznym. Należą one do najbardziej energochłonnych komponentów w cyklu istnienia każdej analizowanej elektrowni fotowoltaicznej, niezależnie od zastosowanej technologii. Najwyższym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię dla scenariusza zagospodarowania obejmującego składowanie cechuje się technologia monokrystaliczna (ok. 18,5 mln MJ). Jest to konsekwencją dużej masy oraz energochłonnych procesów związanych z produkcją krzemu monokrystalicznego. Jednocześnie, dzięki recyklingowi, możliwe jest zaoszczędzenie znacznych ilości energii (ok. 8,2 mln MJ). Technologia polikrystaliczna generuje niższy koszt energetyczny w przypadku składowania (ok. 15,1 mln MJ), przy porównywalnym zapotrzebowaniu na energię w procesach recyklingu. Z kolei technologia amorficzna i perowskitowa wyróżniają się najniższym zapotrzebowaniem na energię w całym cyklu istnienia (dla obu scenariuszy zagospodarowania). Recykling paneli pozwala na obniżenie skumulowanego zapotrzebowania na energię o ok. 23% w przypadku paneli perowskitowych do ok. 45% dla monokrystalicznych. Priorytetem staje się zatem dalsze doskonalenie technologii recyklingu paneli krzemowych, które mają kluczowy wpływ na zmniejszenie całkowitego śladu energetycznego. Panele fotowoltaiczne, będąc najważniejszym elementem elektrowni PV, powodują największe obciążenie energetyczne na etapie składowania. Jednak odpowiednie sterowanie ich istotnym potencjałem recyklingowym otwiera realną możliwość redukcji tego obciążenia dla otoczenia (rys. 5.103).

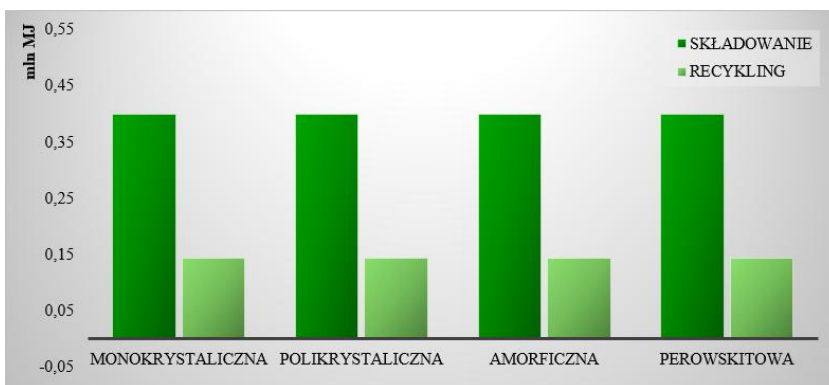
Stacja inwerterowa stanowi istotny element elektrowni fotowoltaicznej, odpowiedzialny m.in. za przekształcenie prądu stałego generowanego przez moduły PV w prąd zmienny wprowadzany do sieci elektroenergetycznej. Choć

nie jest to komponent o najwyższym zużyciu energii w skali całego obiektu technicznego, to jego trwałość oraz możliwości recyklingu tworzyw, materiałów i elementów po zakończeniu eksploatacji, mają istotne znaczenie w kontekście optymalizacji całkowitego śladu energetycznego w cyklach istnienia badanych elektrowni. Ze względu na tą samą moc zainstalowaną ocenianych elektrowni (1 MW), całkowite zapotrzebowanie na energię stacji inwerterowej, uwzględniające zagospodarowanie w formie składowania wynosi ok. 0,40 mln MJ, natomiast w przypadku zastosowania procesów recyklingu jest to ok. 0,14 mln MJ. Recykling pozwala zatem na obniżenie całkowitego zapotrzebowania na energię w perspektywie całego cyklu istnienia o ok. 64%. Jest to zatem element elektrowni o wysokim potencjale ponownego wykorzystania. Biorąc pod uwagę ograniczoną trwałość stacji inwerterowej, sterowanie jej cyklem istnienia powinno obejmować poprawę efektywności procesu recyklingu materiałów elektronicznych, projektowanie inwerterów zgodnie z zasadami łatwego demontażu (ang. *design for disassembly*) oraz prace nad technologiami umożliwiającymi ponowne wykorzystanie podzespołów (rys. 5.104).

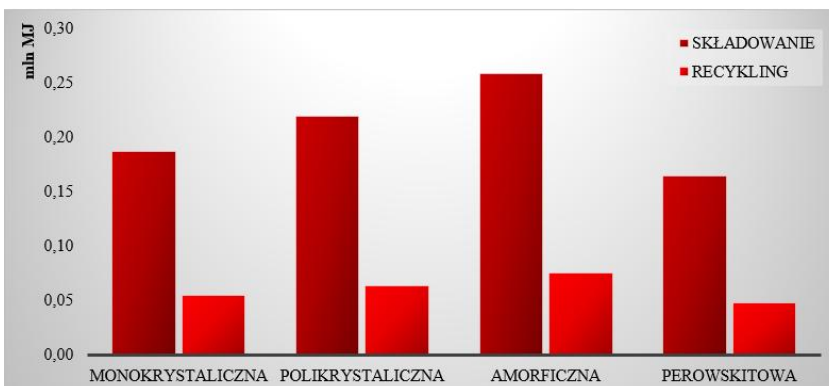
Instalacja elektryczna w elektrowni fotowoltaicznej odpowiada za przesył energii pomiędzy poszczególnymi elementami jej infrastruktury, obejmując okablowanie, złącza, zabezpieczenia, itd., których wytwarzanie oraz zagospodarowanie użytkowe generują określone zapotrzebowanie materiałowe i energetyczne. Efektywność energetyczna tej grupy elementów odgrywa zatem istotną rolę w ocenie całościowego wpływu elektrowni PV na otoczenie. Największe zużycie energii w cyklach istnienia uwzględniających procesy składowania dotyczy instalacji elektrowni amorficznych (ok. 0,26 mln MJ), co wynika m.in. z większej powierzchni paneli. Z kolei najmniejsze obciążenie energetyczne odnotowano dla instalacji elektrowni perowskitowych (ok. 0,16 mln MJ). Recykling jako scenariusz zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów i elementów, pozwoliłby na zmniejszenie zapotrzebowania na energię średnio o ok. 30% we wszystkich analizowanych technologiach. W związku z tym niemal jedna trzecia energii pierwotnie traconej w procesie składowania może zostać potencjalnie odzyskana dzięki odpowiednio zaplanowanym procesom recyklingu. Kluczowe materiały konstrukcyjne instalacji elektrycznych, takie jak miedź i tworzywa polimerowe, wykazują duży potencjał odzysku, jednak efektywność tych procesów jest uzależniona od rodzaju izolacji, obecności zanieczyszczeń oraz zastosowanej technologii separacji. Zwiększenie efektywności recyklingu mogłoby znacząco ograniczyć obciążenie środowiskowe całego obiektu technicznego, szczególnie że komponenty instalacji elektrycznej występują w dużej liczbie elementów elektrowni. Sterowanie cyklem istnienia instalacji elektrycznych w elektrowniach PV powinno bazować na strategiach zrównoważonego projektowania. Kluczowe działania w tym względzie winny obejmować redukcję ilości używanych tworzyw i materiałów, stosowanie monomateriałowych izolacji oraz wprowadzanie oznaczeń ułatwiających recykling poszczególnych elementów, co wspiera bardziej efektywne energetycznie, ekonomicznie i ekologicznie wykorzystanie zasobów (rys. 5.105).



Rys. 5.103. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia paneli PV badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

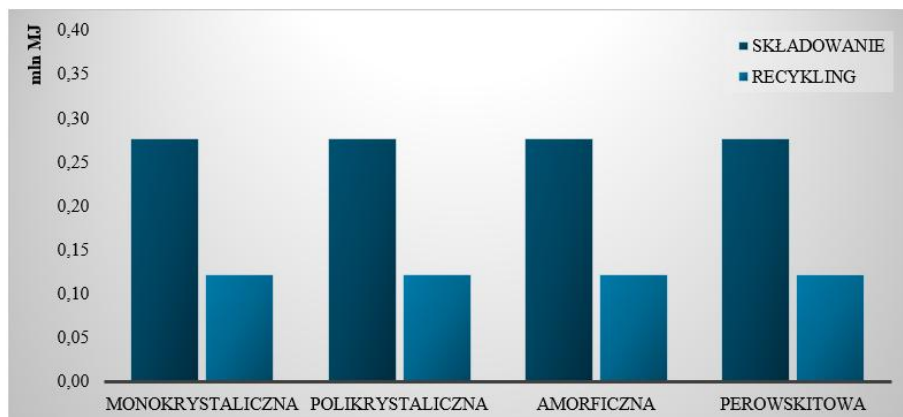


Rys. 5.104. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia stacji inwerterowych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)



Rys. 5.105. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia instalacji elektrycznych badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

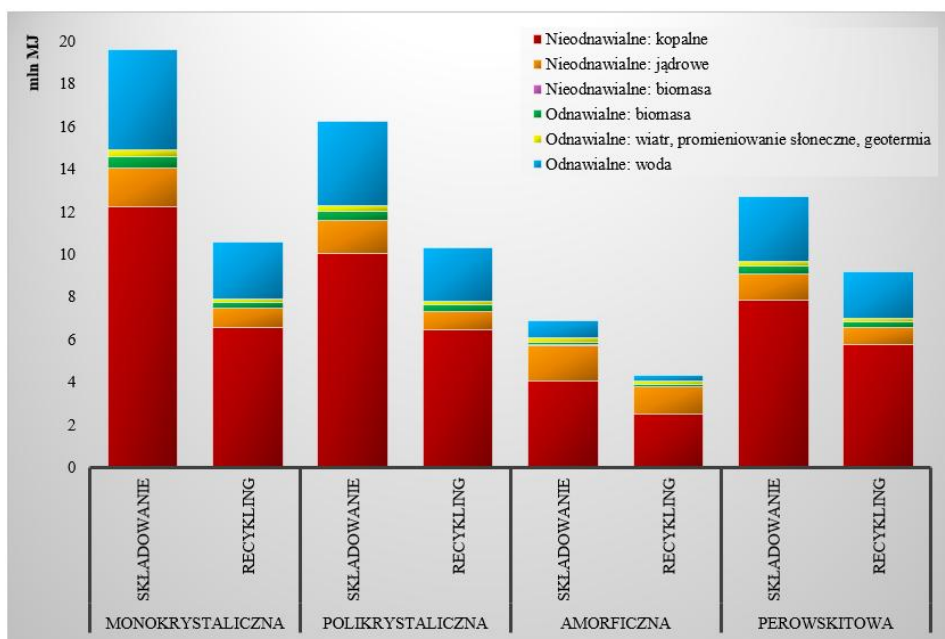
Transformatory stosowane w elektrowniach fotowoltaicznych umożliwiają przekształcenie napięcia wejściowego prądu na zgodne z wymaganiami sieci elektroenergetycznej. Ze względu na swoją budowę, obejmującą między innymi stalowy rdzeń, miedziane uzwojenia czy elementy obudowy i systemy chłodzenia, charakteryzują się znacznym zapotrzebowaniem na surowce oraz energię w całym cyklu istnienia. W analizowanym przypadku, wartości skumulowanego zapotrzebowania na energię dla cykli istnienia uwzględniających składowanie (ok. 0,28 mln MJ) oraz recykling (ok. 0,12 mln MJ) są analogiczne dla wszystkich typów technologii PV. Recykling pozwala na obniżenie zapotrzebowania na energię o ok. 56%, co stanowi zauważalnie wyższy wynik w porównaniu z innymi elementami elektrowni fotowoltaicznych. Wynika to m.in. z możliwości efektywnego odzysku materiałów cechujących się wysokim udziałem masowym i energetycznym. Sterowanie w kierunku dążenia do ograniczenia zapotrzebowania na energię w cyklach istnienia transformatorów powinno koncentrować się na optymalizacji ich masy oraz zastosowanych materiałów konstrukcyjnych (rys. 5.106).



Rys. 5.106. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia transformatorów badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

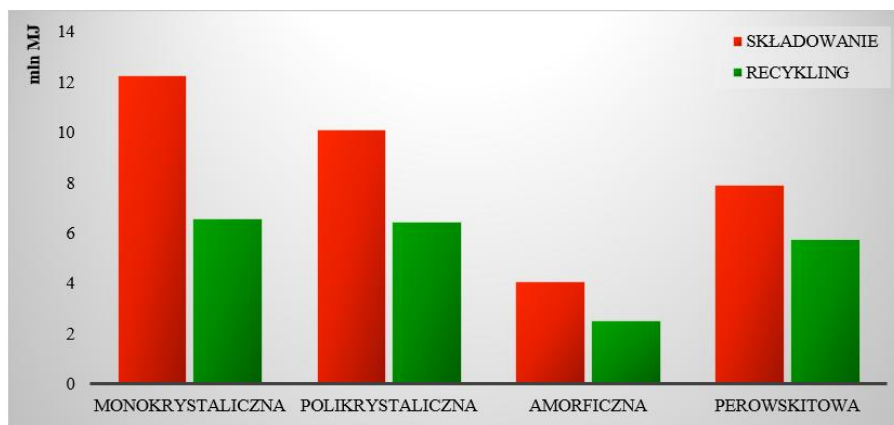
Elektrownia monokrystaliczna charakteryzuje się najwyższym całkowitym zapotrzebowaniem energetycznym (składowanie: ok. 19,6 mln MJ, recykling: ok. 10,6 MJ), z dominującym udziałem energii ze źródeł nieodnawialnych, kopalnych (składowanie: ok. 12,3 mln MJ, recykling: ok. 6,6 mln MJ). Najniższym całkowitym zapotrzebowaniem w tym obszarze cechuje się elektrownia amorficzna (składowanie: ok. 6,9 mln MJ, recykling: ok. 4,3 mln MJ), co stanowi wartość niższą o ok. 60% (recykling) do ok. 65% (składowanie). Wskazuje to na wyraźnie niższy ślad środowiskowy krzemu amorficznego, co ma istotne znaczenie m.in. w kontekście strategii dekarbonizacji. Zastosowanie scenariusza zagospodarowania poużytkowego obejmującego procesy recyklingu pozwoliłoby na zmniejszenie zapotrzebowania na energię w cyklach istnienia

rozważanych elektrowni o od ok. 28% (perowskitowa) do ok. 46% (monokrystaliczna). Obok energii ze źródeł kopalnych, energia pochodząca z hydroelektrowni oraz energia jądrowa, również odgrywają istotną rolę w strukturze energetycznej cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznych. Największe zapotrzebowanie na energię kopalną występuje w technologii monokrystalicznej z kolei najniższe – w amorficznej (przede wszystkim ze względu na mniejszą energochłonność procesów wytwarzania modułów PV). Analogiczna sytuacja cechuje zużycie energii wody. W przypadku energii jądrowej, najwyższe zapotrzebowanie na nią odnotowano dla elektrowni monokrystalicznej, a najniższe – dla perowskitowej. Zużycie energii odnawialnej pochodzącej z biomasy, wiatru, promieniowania słonecznego oraz geotermii jest niewielkie i stanowi ok. 5% dla cykli istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania (dla wszystkich technologii) oraz od ok. 4% (monokrystaliczna, perowskitowa) do ok. 8% (amorficzna) – w przypadku recyklingu. Recykling tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych monokrystalicznych elektrowni fotowoltaicznych (szczególnie ich modułów PV) cechuje się najwyższym udziałem odzysku energii, co wskazuje na ich istotny potencjał w kontekście gospodarki cyrkularnej. Uwzględnianie źródła energii pierwotnej powinno stać się zatem nieodłącznym elementem w procesach sterowania i oceny technologii fotowoltaicznych, obok parametrów technicznych i ekonomicznych (rys. 5.107).



Rys. 5.107. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

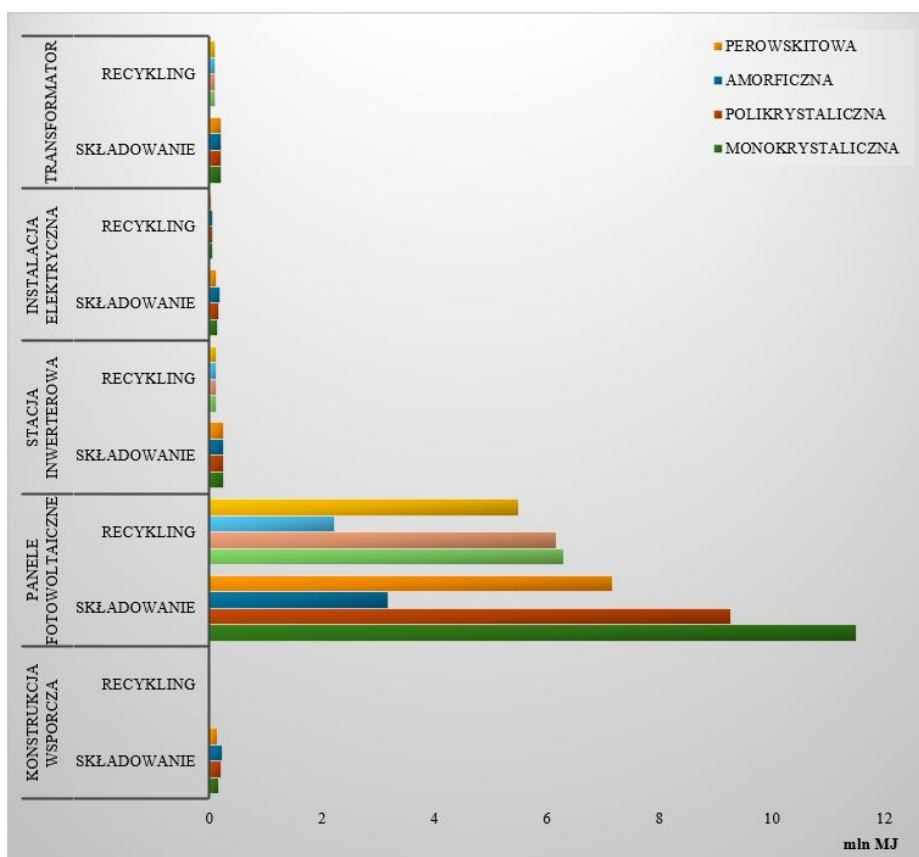
W kontekście dążeń do dekarbonizacji sektora energetycznego oraz zmniejszenia zależności od surowców nieodnawialnych, kluczowe znaczenie ma ocena zapotrzebowania na energię ze źródeł kopalnych cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznych. Największym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię w kategorii wpływu modelu CED obejmującej nieodnawialne źródła kopalne, cechuje się cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej, której zużycie energii dla scenariusza zagospodarowania obejmującego składowanie na wysypisku odpadów wynosi ok. 12,3 mln MJ. Stanowi to wartość wyraźnie wyższą niż w przypadku pozostałych technologii (np. elektrownie amorficzne wykazują ponad trzykrotnie niższe zużycie energii ze źródeł kopalnych, w granicach 4,1 mln MJ). Przy założeniu zastosowania procesów recyklingu, najwyższe zapotrzebowanie na energię cechuje również elektrownię monokrystaliczną (ok. 6,6 mln MJ), a najniższe – amorficzną (ok. 2,5 mln MJ). Recykling pozwala na obniżenie zapotrzebowania na energię ze źródeł kopalnych o ok. 27% (elektrownia perowskitowa) do ok. 46% (elektrownia monokrystaliczna). Sterowanie cyklami istnienia elektrowni PV powinno zatem uwzględniać ograniczenie zapotrzebowania na energię ze źródeł nieodnawialnych (rys. 5.108).



Rys. 5.108. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię z kopalnych źródeł nieodnawialnych, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: mln MJ)

W celu uzyskania pełnego obrazu środowiskowego wpływu systemów fotowoltaicznych, kluczowym jest uwzględnienie w analizach nie tylko rodzaju elektrowni fotowoltaicznych, ale również ich poszczególnych grup elementów. Niezależnie od ocenianego rodzaju elektrowni, największym udziałem w całkowitym zapotrzebowaniu na energię ze źródeł kopalnych wyróżniają się panele PV. Dla paneli monokrystalicznych wartość ta wynosi ok. 11,5 mln MJ (składowanie) i ok. 6,3 mln MJ (recykling), co stanowi od ok. 94% (składowanie) do ok. 96% (recykling) całkowitego zapotrzebowania energetycznego w ramach

analizowanej kategorii wpływu. Najniższe wartości odnotowano dla paneli amorficznych (składowanie: ok. 3,2 mln MJ, recykling: ok. 2,2 mln MJ, udział w całkowitym zapotrzebowaniu na energię: ok. 79% dla składowania i ok. 88% dla recyklingu). Pozostałe rozważane grupy elementów charakteryzują się niewielkim udziałem procentowym w całkowitym zapotrzebowaniu na energię ze źródeł kopalnych. W przypadku konstrukcji wsporczych jest to średnio od ok. 1% (elektrownia monokrystaliczna) do ok. 4% (amorficzna), dla stacji inwerterowych jest to ok. 5%, w odniesieniu do instalacji elektrycznych od ok. 1% (monokrystaliczna) do ok. 4% (amorficzna), natomiast dla transformatorów to ok. 5% . Zgodnie z powyższym, ze względu na wysoki udział cyklu istnienia paneli fotowoltaicznych w ogólnym bilansie energetycznym elektrowni, koniecznym staje się sterowanie w kierunku dalszej optymalizacji procesów ich produkcji i recyklingu (rys. 5.109).

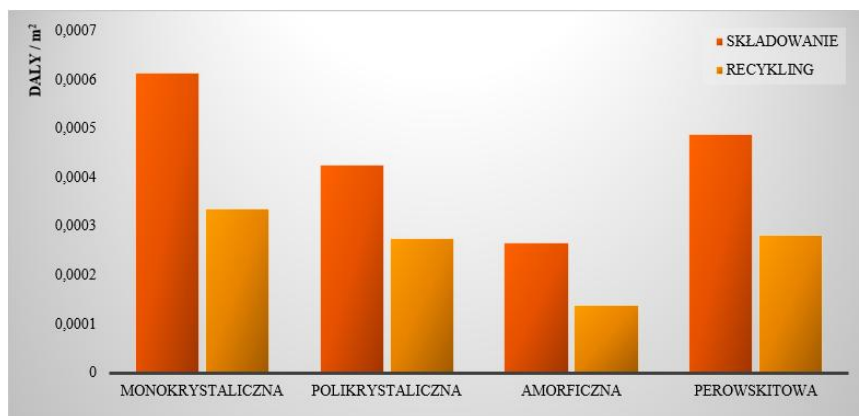


Rys. 5.109. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię z kopalnych źródeł nieodnawialnych, w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego, z podziałem na elementy analizowanych obiektów technicznych (model CED, jednostka: mln MJ)

5.5.4. Ocena wpływu na otoczenie w odniesieniu do powierzchni ogniw PV oraz wielkości produkcji energii elektrycznej

5.5.4.1. Oddziaływanie cykli istnienia elektrowni fotowoltaicznych na otoczenie w przeliczeniu na 1m² powierzchni ogniw PV

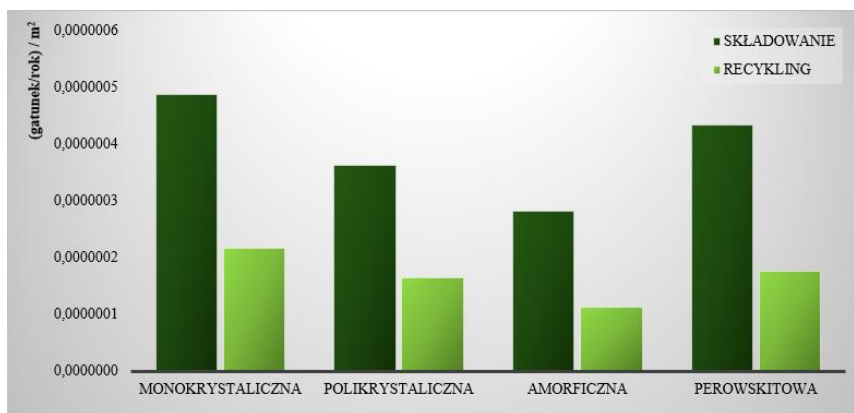
Z uwagi na zróżnicowane rozmiary badanych elektrowni fotowoltaicznych przeprowadzono szczegółową analizę ich wpływu na otoczenie, uwzględniając powierzchnię zajmowaną przez panele fotowoltaiczne (elektrownia monokrystaliczna: 4 896 m², elektrownia polikrystaliczna: 5 823 m², elektrownia amorficzna: 5 650 m², elektrownia perowskitowa: 4 390 m²). Oddziaływanie elektrowni PV na zdrowie człowieka w przeliczeniu na powierzchnię ogniw PV jest największe dla składowania jako formy zagospodarowania poużytkowego. Natomiast spośród analizowanych elektrowni maksymalne destrukcyjne oddziaływanie wykazuje cykl istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych (składowanie: $6,1 \cdot 10^{-4}$ DALY/m² recykling: $3,3 \cdot 10^{-4}$ DALY/m²). Dokonując porównania analizowanych elektrowni, uwzględniając powierzchnie jaką zajmują oraz zagospodarowanie w formie składowania odnotowano, że poziom wpływu elektrowni monokrystalicznych na zdrowie jest wyższy w porównaniu do elektrowni polikrystalicznych o ok. 31%, w przypadku amorficznych o ok. 56 % a dla perowskitowych – o ok. 21%. Zagospodarowanie poużytkowe w formie recyklingu ogranicza destrukcyjny wpływ na zdrowie człowieka o od ok. 35% (elektrownia polikrystaliczna) do ok. 48% (elektrownia amorficzna) (rys. 5.110).



Rys. 5.110. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY/m² powierzchni ogniw PV)

W przypadku oddziaływania na jakość ekosystemów, najwyższy poziom niepożądanego wpływu w cyklach istnienia wszystkich analizowanych elektrowni fotowoltaicznych ponownie odnotowano dla składowania jako formy

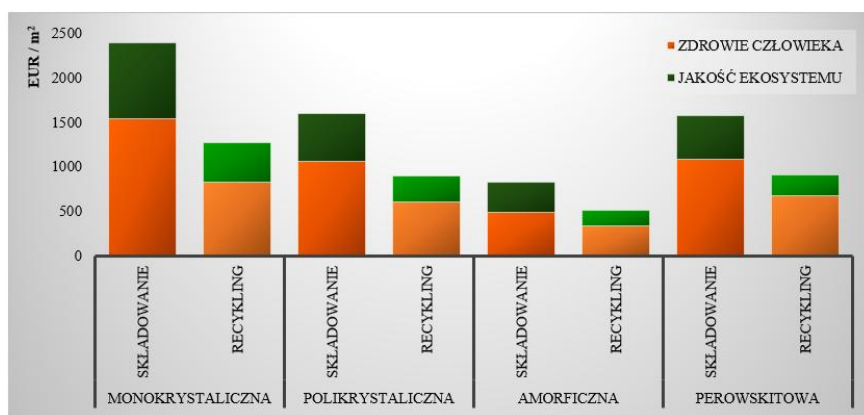
zagospodarowania poużytkowego. W przeliczeniu na m^2 powierzchni, elektrownie monokrystaliczne również wyróżniają się maksymalnymi wartościami szkodliwego wpływu, który w przypadku składowania jest równy $4,9 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok na każdy m^2 , z kolei dla recyklingu $2,2 \cdot 10^{-7}$ gatunku/rok na każdy m^2 . Dla zagospodarowania uwzględniającego scenariusz składowania na wysypisku odpadów, jest to oddziaływanie wyższe o ok. 11% w porównaniu do elektrowni perowskitowych, o ok. 26% do polikrystalicznych i o ok. 42% do amorficznych. Jeżeli jako forma zagospodarowania zostałby wybrany recykling, byłby to wpływ wyższy o ok. 18% w odniesieniu do elektrowni perowskitowych, o ok. 24% do polikrystalicznych i o ok. 48% do amorficznych. Zastosowanie procesów recyklingu umożliwiłoby zatem obniżenie poziomu destrukcyjnego wpływu na jakość ekosystemów o od ok. 55% (elektrownie mono- i polikrystaliczne) do ok. 60% (elektrownie amorficzne i perowskitowe). Sterowanie cyklami istnienia elektrowni fotowoltaicznych nabiera zatem kluczowego znaczenia, szczególnie jeśli chodzi o ukierunkowanie działań na maksymalizację efektywności procesów recyklingu. Jest to niezwykle istotne w kontekście ponownego wykorzystania tworzyw, materiałów i elementów na etapie ich zagospodarowania po zakończeniu okresu eksploatacji. Podejmowanie takich kroków pozwala nie tylko ograniczyć ilość odpadów, ale również wspiera rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym, dając szansę na bardziej zrównoważone zarządzanie zasobami i ochronę środowiska (rys. 5.111).



Rys. 5.111. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: (gatunek/rok)/ m^2 powierzchni ogniw PV)

Kolejny zakres zrealizowanych analiz obejmował ocenę poziomu potencjalnych kosztów środowiskowych cykli istnienia rozważanych elektrowni fotowoltaicznych w przeliczeniu na 1 m^2 powierzchni ogniw PV. W przypadku wszystkich analizowanych elektrowni, wyższe koszty środowiskowe będą ponoszone w celu uniknięcia lub usunięcia destrukcyjnych oddziaływań w obszarze zdrowia człowieka w porównaniu do ich wpływu na jakość

ekosystemu. Stanowią one od ok. 59% (cykl istnienia elektrowni amorficznej, scenariusz składowania) do ok. 75% (cykl istnienia elektrowni perowskitowej, scenariusz recyklingu) kosztów całkowitych. Najwyższe koszty całkowite na jednostkę powierzchni trzeba będzie ponieść w przypadku elektrowni monokrystalicznej (składowanie: 2 391 EUR/m², recykling: 1 269 EUR/m²), a najmniejsze dla elektrowni amorficznej (składowanie: 836 EUR/m², recykling: 517 EUR/m²). Recykling istotnie wpływa zarówno na obniżenie kosztów środowiskowych z tytułu szkodliwego oddziaływania na zdrowie człowieka (o od ok. 30% dla elektrowni amorficznej do ok. 46% dla monokrystalicznej), jak i jakość ekosystemów (o od ok. 46% dla elektrowni polikrystalicznej do ok. 53% dla perowskitowej) (rys. 5.112).

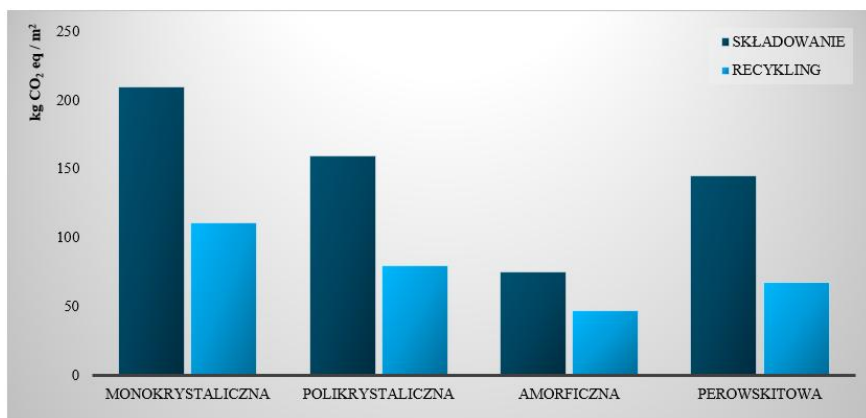


Rys. 5.112. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EUR/m² powierzchni ogniw PV)

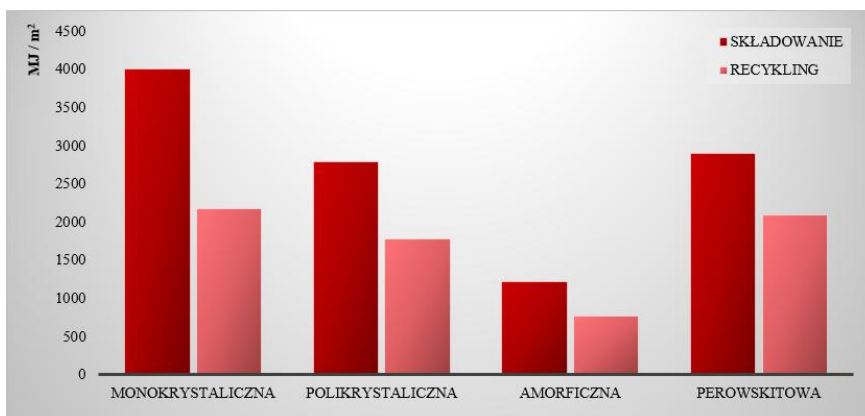
W następnym kroku oceniono wielkość emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia obiektów badań. W przypadku scenariusza składowania, najwyższą emisję równą 210 kg CO₂ eq/m² odnotowano dla elektrowni monokrystalicznych, z kolei najniższy poziom emisji na poziomie 75 kg CO₂ eq/m² wykazują elektrownie amorficzne. Analogiczną sytuację można zaobserwować w przypadku scenariusza recyklingu. Elektrownie monokrystaliczne cechują się najwyższą emisją (111 kg CO₂ eq/m²), natomiast amorficzne – najniższą (47 kg CO₂ eq/m²). Zastosowanie recyklingu przyczynia się do istotnego obniżenia emisji gazów cieplarnianych. Procentowa redukcja emisji wynosi od ok. 37% dla elektrowni amorficznych do ok. 53% dla perowskitowych. Recykling stanowi zatem efektywny środek ograniczający ślad węglowy końcowego etapu cyklu istnienia badanych obiektów technicznych (rys. 5.113).

Ostatni oceniany obszar stanowiła analiza skumulowanego zapotrzebowania na energię w cyklach istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych. W przypadku zaimplementowania scenariusza składowania, najwyższe

zapotrzebowanie cechowało elektrownie monokrystaliczne – 4 007 MJ/m², natomiast najniższe – elektrownie amorficzne (1 220 MJ/m²). W scenariuszu recyklingu także dominowały elektrownie monokrystaliczne, których cykle istnienia wiązały się z zapotrzebowaniem rzędu 2 168 MJ/m². Z kolei najniższa wartość zapotrzebowania na energię została ponownie odnotowana dla elektrowni amorficznych (770 MJ/m²). Zastosowanie recyklingu będzie prowadziło do znacznego obniżenia całkowitego zużycia energii w porównaniu do scenariusza składowania. Procentowe zmniejszenie zapotrzebowania energetycznego będzie zawierało się w granicach od ok. 28% dla elektrowni perowskitowych do ok. 46% dla monokrystalicznych (rys. 5.114).



Rys. 5.113. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq/m² powierzchni ogniw PV)



Rys. 5.114. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: MJ/m² powierzchni ogniw PV)

5.5.4.2. Oddziaływanie cykli istnienia elektrowni na otoczenie w przeliczeniu na 1 MWh wytworzonej energii elektrycznej

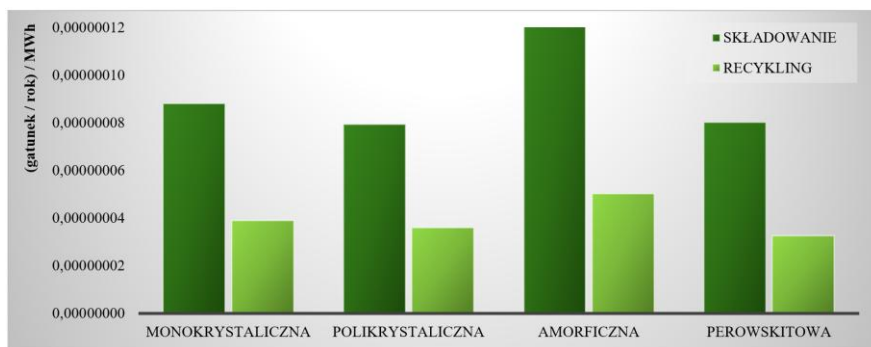
Istotny obszar prowadzonych analiz stanowiła także ocena oddziaływania cykli istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych na otoczenie w przeliczeniu na 1 MWh wytworzonej energii. Ze względu na odmienną sprawność różnych rodzajów paneli PV, każdy z analizowanych obiektów technicznych produkuje inną ilość energii elektrycznej. Ilość energii wytwarzanej przez panele fotowoltaiczne zależy nie tylko od technologii, w której zostały one wykonane, ale również od warunków środowiskowych (m.in. natężenie promieniowania słonecznego) czy specyfiki montażu (m.in. kąt nachylenia, połączenie modułów). Sprawia to, że instalacje o tej samej mocy zainstalowanej produkują inną ilość energii elektrycznej. Na potrzeby badań przyjęto te same warunki środowiskowe i instalacyjne. Zgodnie z tymi założeniami ustalono, że 1 MW elektrownia oparta na modułach monokrystalicznych w ciągu roku wyprodukuje ok. 1 085 MWh, na polikrystalicznych ok. 1 065 MWh, na amorficznych ok. 510 MWh a na perowskitowych ok. 950 MWh.

W przypadku składowania, najwyższy negatywny wpływ na zdrowie człowieka w przeliczeniu na ilość energii wyprodukowanej w całym cyklu istnienia (tj. 25 lat eksploatacji), wykazują elektrownie amorficzne – $1,18 \cdot 10^{-4}$ DALY/MWh. Jest to wartość o ok. 6% wyższa w porównaniu do cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznych, o ok. 21% w odniesieniu do polikrystalicznych oraz o ok. 23% aniżeli perowskitowych. W przypadku scenariusza zakładającego recykling, największym bezwzględnym wpływem na zdrowie również wyróżniają się elektrownie amorficzne – $6,10 \cdot 10^{-4}$ DALY/MWh. Jest on o ok. 3% wyższy w porównaniu do elektrowni mono- i polikrystalicznych oraz o ok. 15% w odniesieniu do perowskitowych. Recykling skutkuje znacznym ograniczeniem negatywnego wpływu na zdrowie człowieka w stosunku do scenariusza zagospodarowania obejmującego składowanie. Procentowe zmniejszenie wskaźnika DALY/MWh w analizowanych przypadkach wynosi od ok. 35% dla elektrowni polikrystalicznej do ok. 48% dla amorficznej (rys. 5.115).



Rys. 5.115. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla zdrowia człowieka w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: DALY/MWh)

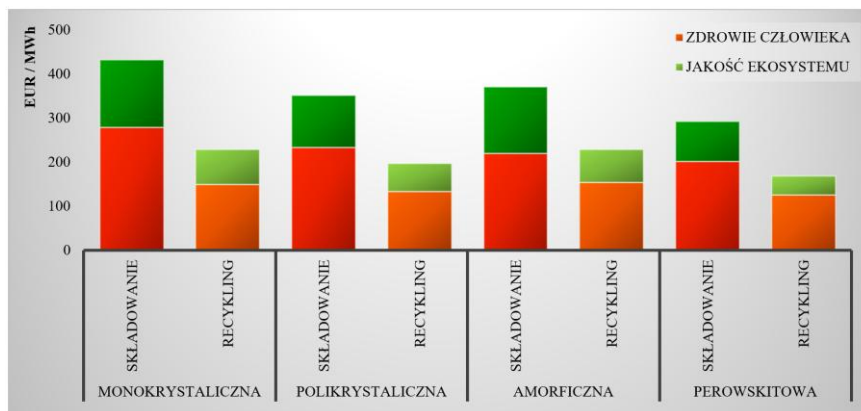
W obszarze oddziaływania na jakość ekosystemów, dla scenariusza zagospodarowania poużytkowego w formie składowania, największy destrukcyjny wpływ równy $1,27 \cdot 10^{-7}$ (gatunku/rok)/MWh charakteryzuje cykl istnienia elektrowni amorficznej. Jest on o ok. 29% wyższy aniżeli oddziaływanie elektrowni monokrystalicznej i o ok. 36% niż elektrowni polikrystalicznej i perowskitowej. Po wdrożeniu procesów recyklingu, wartości szkodliwego oddziaływania ulegają znacznemu obniżeniu dla wszystkich typów technologii PV. Najwyższym wpływem w tym obszarze wyróżnia się ponownie elektrownia amorficzna i jest on równy $5,03 \cdot 10^{-8}$ (gatunku/rok)/MWh. Jest to zatem wartość wyższa o ok. 22% w porównaniu do oddziaływania cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej, o ok. 28% aniżeli polikrystalicznej i o ok. 35% niż perowskitowej. Procentowa redukcja niepożądanego wpływu na jakość ekosystemów w wyniku zastosowania scenariusza zagospodarowania w formie recyklingu wynosi od ok. 55% dla elektrowni mono- i polikrystalicznej do ok. 60% dla amorficznej oraz perowskitowej (rys. 5.116).



Rys. 5.116. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla jakości ekosystemów w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IMPACT World+, jednostka: (gatunek/rok)/MWh)

W ramach dalszych analiz dokonano oceny kosztów środowiskowych związanych z końcowymi scenariuszami zagospodarowania elektrowni fotowoltaicznych w kontekście dwóch obszarów oddziaływania: zdrowia człowieka oraz jakości ekosystemów. Jednostką odniesienia było EUR/MWh, co umożliwiło bezpośrednią wycenę środowiskowych skutków produkcji energii elektrycznej. W odniesieniu do wszystkich analizowanych typów elektrowni, największe koszty środowiskowe będą ponoszone w celu zapobiegania lub eliminowania negatywnych skutków oddziaływania ich cykli istnienia dla zdrowia ludzkiego, które charakteryzują się wyższym poziomem destrukcyjnego wpływu w porównaniu do obszaru oddziaływania na jakość ekosystemu. W przypadku udziału w kosztach całkowitych, wartości te wynoszą od ok. 60% dla cyklu istnienia elektrowni amorficznej przy scenariuszu składowania, do ok. 76% dla elektrowni perowskitowej i scenariusza recyklingu. Najwyższy

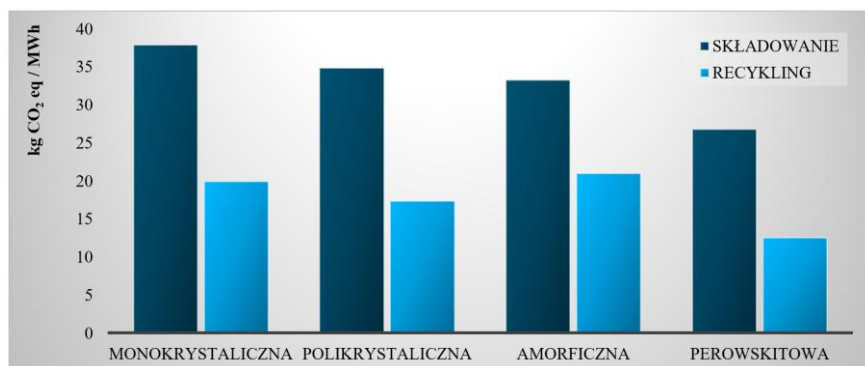
całkowity koszt środowiskowy wyróżnia energię wytwarzaną przez elektrownię monokrystaliczną (składowanie: 432 EUR/MWh, recykling: 229 EUR/MWh), podczas gdy najniższy cechuje elektrownię perowskitową (składowanie: 292 EUR/MWh, recykling: 169 EUR/MWh). Procesy recyklingu istotnie wpływają na zmniejszenie zarówno kosztów środowiskowych związanych ze szkodliwym oddziaływaniem na zdrowie człowieka (od ok. 54% w przypadku elektrowni monokrystalicznej do ok. 70% dla amorficznej), jak również kosztów dotyczących obniżenia jakości ekosystemów (od ok. 50% dla elektrowni amorficznej do ok. 54% dla polikrystalicznej) (rys. 5.117).



Rys. 5.117. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych dla otoczenia w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EUR/MWh)

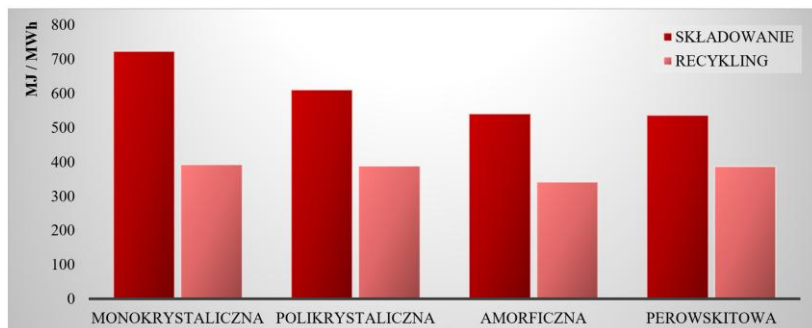
W następnym etapie dokonano analizy porównawczej emisji gazów cieplarnianych stanowiących następstwo cyklu istnienia rozważanych elektrowni. Wszystkie wartości wskaźników zostały przedstawione w kilogramach ekwiwalentu CO₂ na megawatogodzinę, co umożliwia dokładną ocenę wpływu na zmiany klimatyczne, jakie przypadają na jednostkę energii elektrycznej wytworzonej z alternatywnych źródeł. W wariancie zagospodarowania użytkowego uwzględniającego składowanie na wysypisku odpadów, najwyższe emisje GHG odnotowano dla technologii monokrystalicznej – 37,88 kg CO₂ eq/MWh. Była ona wyższa o ok. 8% od technologii polikrystalicznej, o ok. 12% od amorficznej i o ok. 29% od perowskitowej. W scenariuszu recyklingu emisje są istotnie niższe we wszystkich przypadkach. Najwyższe wartości w tym wariancie przypadają dla cyklu istnienia elektrowni amorficznej – 21,01 kg CO₂ eq/MWh. Jest to o ok. 5% więcej w porównaniu do monokrystalicznej, o ok. 17% do polikrystalicznej i o ok. 40% do perowskitowej. Porównanie obu scenariuszy zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji wskazuje na znaczną redukcję emisji w wyniku zastosowania recyklingu, wynoszącą od ok. 37% dla cyklu istnienia elektrowni amorficznej do ok. 53% dla perowskitowej. Procesy recyklingu tworzyw, materiałów, elementów i zespołów

roboczych elektrowni fotowoltaicznych mają zatem istotny wpływ na ograniczenie emisji gazów szklarniowych. Sterowanie ich cyklami istnienia w kierunku implementacji efektywnych strategii recyklingu powinno zatem stanowić kluczowy element polityki środowiskowej w sektorze fotowoltaiki, zarówno w celu minimalizacji śladu węglowego, jak i zwiększenia ogólnej efektywności środowiskowej technologii PV (rys. 5.118).



Rys. 5.118. Charakteryzowanie następstw środowiskowych dla emisji gazów cieplarnianych w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model IPCC 2021, jednostka: kg CO₂ eq/MWh)

W ramach przeprowadzonych badań dokonano szczegółowej analizy skumulowanego zapotrzebowania na energię w odniesieniu do jednostki wyprodukowanej energii elektrycznej ze źródła odnawialnego (MJ/MWh). Uwzględniając scenariusz składowania tworzyw, materiałów, elementów oraz zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznych, najwyższe wartości zapotrzebowania odnotowano dla technologii monokrystalicznej – 723 MJ/MWh. Było to o ok. 16% więcej niż w przypadku technologii polikrystalicznej oraz o ok. 25% w porównaniu z technologiami amorficzną i perowskitową. Wprowadzenie procesów recyklingu znacząco obniża skumulowane zapotrzebowanie na energię, co jest szczególnie widoczne dla cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej, gdzie wartość ta spadła do 391 MJ/MWh. Jest ona zatem o ok. 2% wyższa niż dla cyklu elektrowni polikrystalicznej i perowskitowej oraz o ok. 13% w porównaniu do amorficznej. Najwyższe całkowite zapotrzebowanie na energię, obserwowane w obu scenariuszach zagospodarowania poużytkowego, dotyczy technologii monokrystalicznej, co wynika m.in. z wysokiej energochłonności procesu produkcji krzemu. Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na ograniczenie tego zapotrzebowania w zakresie od ok. 28% dla elektrowni amorficznej do ok. 46% w odniesieniu do monokrystalicznej. Sterowanie cyklami istnienia elektrowni fotowoltaicznych pod kątem zrównoważonego rozwoju powinno zatem obejmować działania ukierunkowane na zwiększenie efektywności procesów recyklingu na etapie zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji (rys. 5.119).



Rys. 5.119. Charakteryzowanie zapotrzebowania na energię w cyklu istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych z uwzględnieniem odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego (model CED, jednostka: MJ/MWh)

5.6. ANALIZA MONTE CARLO

W ramach prowadzonych badań, analizę Monte Carlo dla rozważanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej przeprowadzono przy użyciu oprogramowania SimaPro 9.5, z uwzględnieniem wszystkich wcześniej rozpatrywanych kategorii wpływu i obszarów oddziaływania oraz dla dwóch scenariuszy zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów i elementów po zakończeniu ich eksploatacji, tj. składowania na wysypisku odpadów oraz zastosowania procesów recyklingu. Rezultaty analizy zaprezentowano dla modelu IMPACT World+, IPCC i CED.

Ze względu na bardzo dużą ilość otrzymanych wyników, podjęto decyzję o szerszym omówieniu dwóch kluczowych rodzajów interakcji:

- porównano cykl istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i amorficznych (zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, cykl istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych charakteryzuje się najwyższym łącznym poziomem negatywnego oddziaływania na otoczenie, z kolei opartej na modułach amorficznych – najniższym);
- porównano cykl istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i perowskitowych (moduły monokrystaliczne są współcześnie najczęściej stosowanym rodzajem generatora fotowoltaicznego zarówno w elektrowniach PV, jak i przydomowych instalacjach o małej mocy, z kolei moduły perowskitowe są jednym z najnowszych rozwiązań materiałowych, w których obecnie upatrywana jest przyszłość sektora fotowoltaicznego).

5.6.1. Porównanie cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i amorficznych

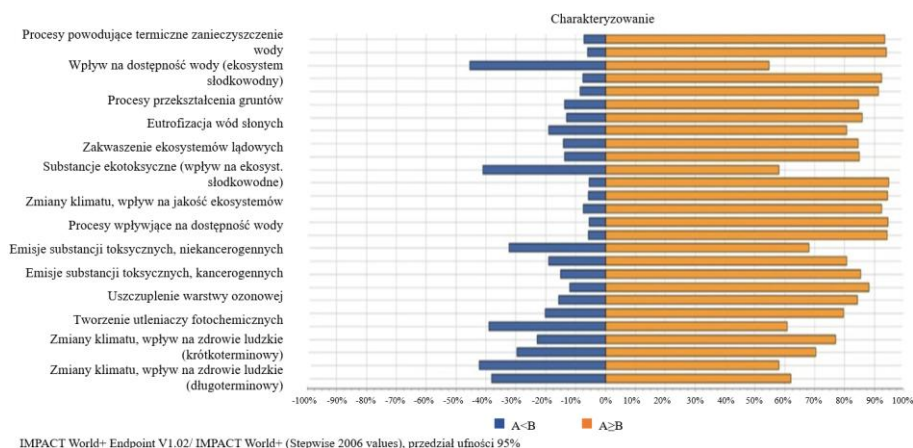
Analiza Monte Carlo wyników LCA (powtórzona dla 1000 iteracji) miała na celu porównanie systemów fotowoltaicznych opartych na modułach

wytworzonych w dwóch odmiennych technologiach (tj. monokrystalicznej i amorficznej). Przeprowadzona analiza miała za zadanie dostarczyć dodatkowej walidacji (opartej na ocenie statystycznej) wiarygodności przedstawionych w rozprawie wyników badań cykli istnienia rozważanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej. Pierwszą analizę przeprowadzono pomiędzy elektrownią „A” opartą na modułach monokrystalicznych i „B” – na amorficznych. Ustalono rozkład niepewności wpływów (LCIA) z przedziałem ufności wynoszącym 95%. Wyniki w formie wykresów słupkowych przedstawiono na rysunkach 5.120-5.131 (wygenerowanych bezpośrednio z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro). Obrazują one procent przypadków, w których elektrownia A ma większy negatywny wpływ na otoczenie niż elektrownia B ($A-B \geq 0$, co oznaczono słupkami w kolorze pomarańczowym) i odwrotnie ($A-B < 0$, słupki w kolorze niebieskim). Wyniki odnoszą się do porównania surowych danych LCA.

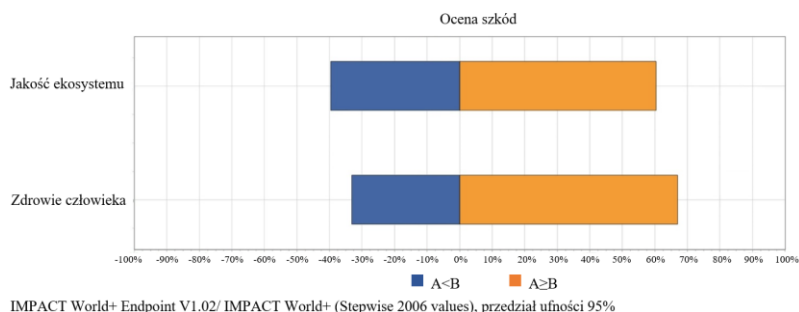
5.6.1.1. Model IMPACT World+

Na rysunku 5.120 zaprezentowano wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem wszystkich 27 kategorii wpływu dostępnych w ramach modelu IMPACT World+ (Endpoint V1.02). Elektrownię A (monokrystaliczną, kolor pomarańczowy) cechuje wyraźnie większe szkodliwe oddziaływanie na otoczenie w porównaniu do elektrowni B (amorficznej, kolor niebieski) we wszystkich badanych kategoriach. Największy destrukcyjny wpływ odnotowano w ramach kategorii obejmujących substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych w perspektywie krótkoterminowej (94,8%), substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych w perspektywie długoterminowej (94,2%), substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów w perspektywie krótkoterminowej (94,2%) i długoterminowej (94,1%), procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe (93,6%) oraz procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody (93,2%). Najbardziej zrównoważony wynik otrzymano dla kategorii procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na ekosystemy słodkowodne (A: 54,4%, B: 45,6%).

Z kolei na rysunku 5.121 przedstawiono wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, jednak z uwzględnieniem dwóch obszarów oddziaływania – na zdrowie człowieka i jakość ekosystemów. Ponownie, elektrownię A wyróżnia istotnie większy negatywny wpływ w obu analizowanych obszarach w porównaniu do elektrowni B.



Rys. 5.120. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IMPACT World+)

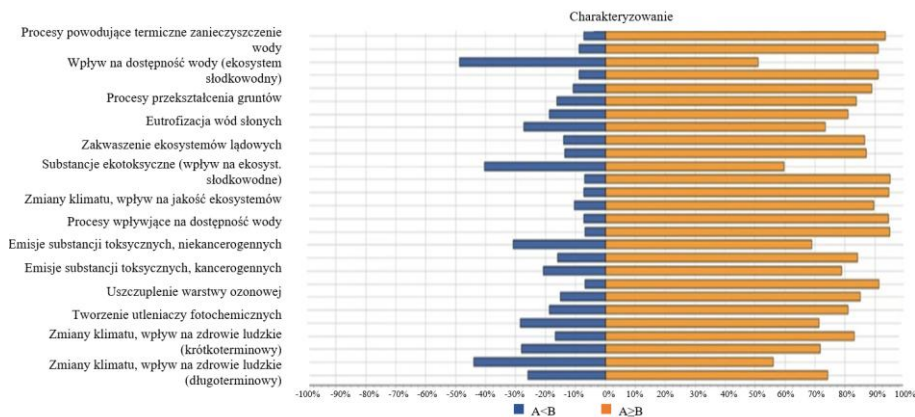


Rys. 5.121. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem obszarów oddziaływania (model IMPACT World+)

W całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniającym scenariusz zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie składowania na wysypisku odpadów zaobserwowano, że skala oddziaływania na otoczenie technologii monokrystalicznej była większa niż amorficznej.

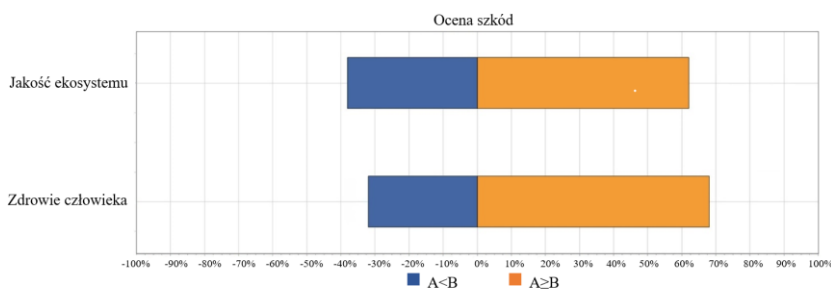
Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B), tym razem obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (z uwzględnieniem kategorii wpływu), przybliżono na rysunku 5.122. Elektrownia A charakteryzuje się wyraźnie większym niepożądanym oddziaływaniem na otoczenie aniżeli elektrownia B we wszystkich ocenianych kategoriach. Największym niekorzystnym wpływem wyróżniały się kategorie

obejmujące substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych w perspektywie krótkoterminowej (93,1%), substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów w perspektywie krótkoterminowej (92,8%) i długoterminowej (92,7%) oraz procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody (92,6%). Najbardziej zrównoważony wynik cechował z kolei kategorię procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na ekosystemy słodkowodne (A: 50,1%, B: 49,9%) oraz substancji powodujących zmiany klimatu, wpływających na zdrowie człowieka w perspektywie długoterminowej (A: 55,9%, B: 44,1%).



IMPACT World+ Endpoint V1.02/ IMPACT World+ (Stepwise 2006 values), przedział ufności 95%

Rys. 5.122. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IMPACT World+)



IMPACT World+ Endpoint V1.02/ IMPACT World+ (Stepwise 2006 values), przedział ufności 95%

Rys. 5.123. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem obszarów oddziaływania (model IMPACT World+)

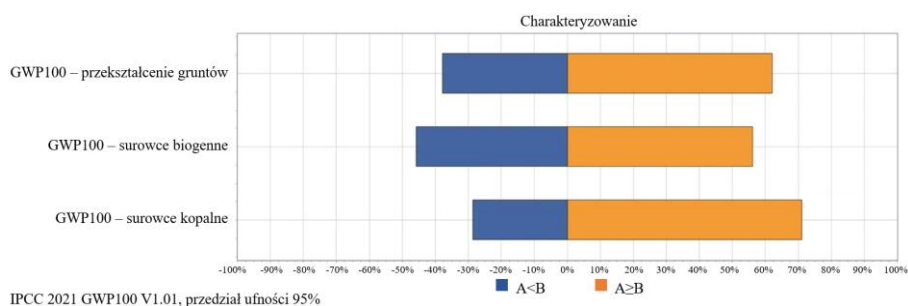
Wyniki analogicznej analizy lecz z uwzględnieniem dwóch obszarów oddziaływania (zdrowie człowieka, jakość ekosystemów) zobrazowano na

rysunku 5.123. W tym przypadku ponownie elektrownię A charakteryzuje znacznie większe szkodliwe oddziaływanie w obu analizowanych obszarach w porównaniu do elektrowni B.

W całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania użytkowego w formie recyklingu zauważono (analogicznie jak dla scenariusza zakładającego składowanie), że skala wpływu na otoczenie technologii monokrystalicznej była większa w porównaniu do amorficznej.

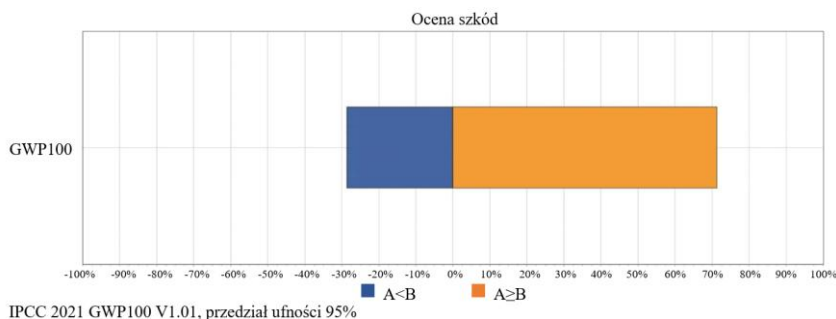
5.6.1.2. Model IPCC 2021

Na rysunku 5.124 zaprezentowano wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem 3 kategorii wpływu dostępnych w ramach modelu IPCC 2021 (GWP V1.01). We wszystkich badanych kategoriach, elektrownię A cechuje wyraźnie wyższy poziom emisji gazów szklarniowych w porównaniu do elektrowni B. Największy destrukcyjny wpływ odnotowano w ramach kategorii obejmującej emisję gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (70,9%). Najbardziej zrównoważony wynik otrzymano natomiast dla kategorii obejmującej emisję GHG na skutek procesów związanych z wykorzystywaniem surowców biogennych (A: 53,6%, B: 46,4%).



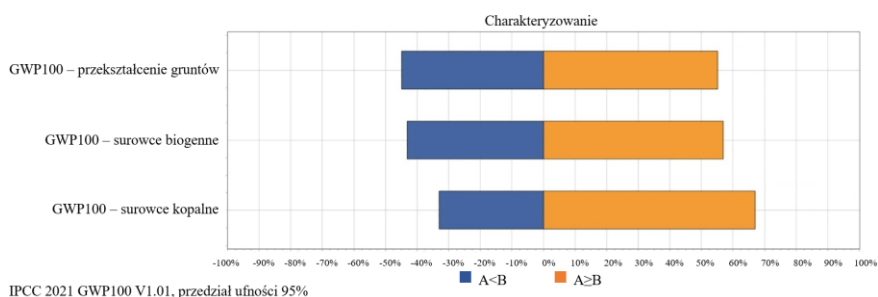
Rys. 5.124. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IPCC)

Po zestawieniu łącznych emisji w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie składowania, widocznym jest, że ich poziom dla technologii monokrystalicznej był zdecydowanie wyższy aniżeli dla amorficznej (rys. 5.125).



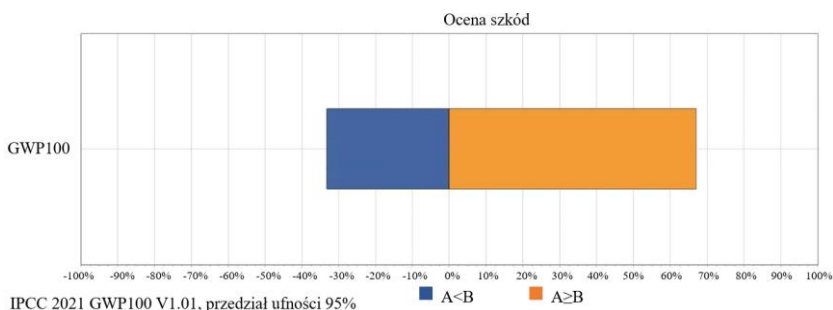
Rys. 5.125. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem całkowitej emisji gazów cieplarnianych (model IPCC)

Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B), jednak obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (z uwzględnieniem 3 kategorii wpływu modelu IPCC 2021), przybliżono na rysunku 5.126. We wszystkich ocenianych kategoriach, elektrownia A wyróżniała się wyższym poziomem emisji gazów szklarniowych w porównaniu do elektrowni B. Największe niepożądane oddziaływanie ponownie odnotowano w ramach kategorii obejmującej emisję gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (67,1%). Z kolei najbardziej zrównoważony wynik uzyskano dla kategorii obejmującej emisję GHG na skutek procesów związanych z przekształceniem gruntów (A: 54,7%, B: 45,3%).



Rys. 5.126. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IPCC)

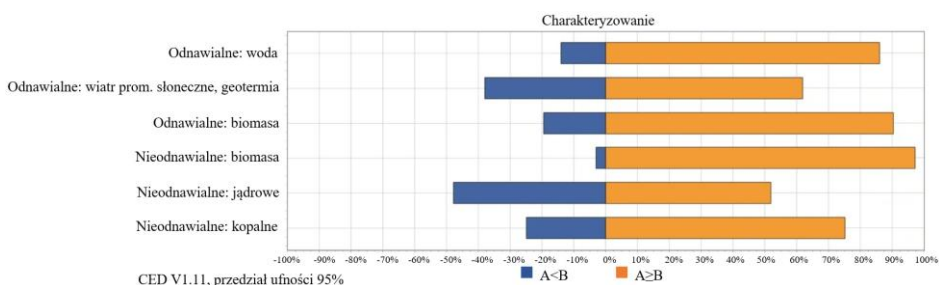
Zestawienie łącznych emisji w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania poużytkowego w formie recyklingu, uwidacznia, że ich poziom dla technologii monokrystalicznej również był istotnie wyższy niż dla amorficznej (rys. 5.127).



Rys. 5.127. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, całkowitej emisji gazów cieplarnianych (model IPCC)

5.6.1.3. Model CED

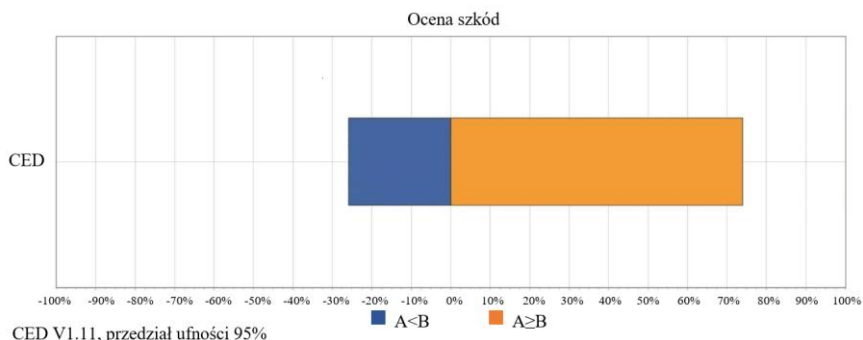
Na rysunku 5.128 zilustrowano wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem 6 kategorii wpływu dostępnych w ramach modelu CED (V1.11). W obszarze wszystkich rozważanych kategorii, elektrownię A charakteryzuje wyższy poziom zapotrzebowania na energię w porównaniu do elektrowni B. Największy niekorzystny wpływ wyróżniał kategorie obejmujące: wśród źródeł nieodnawialnych – biomasę (96,7%), a wśród odnawialnych – energię wody (85,7%). Najbardziej zrównoważony wynik uzyskano natomiast dla kategorii nieodnawialnych źródeł energii jądrowej (A: 51,6%, B: 48,4%).



Rys. 5.128. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model CED)

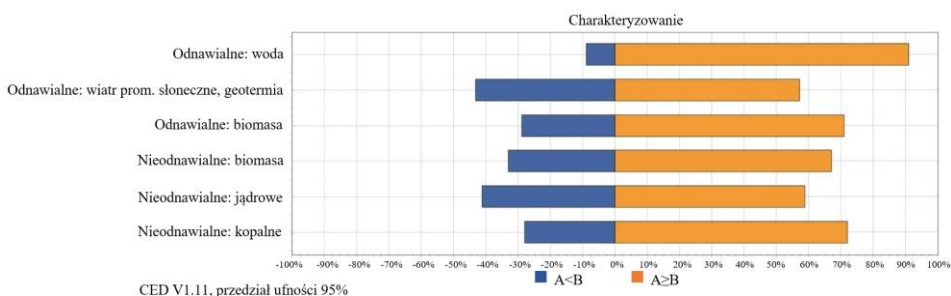
Po zestawieniu łącznego poziomu zapotrzebowania na energię w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania poużytkowego tworzyw,

materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie składowania na wysypisku odpadów, widocznym jest, że jego wartość dla technologii monokrystalicznej była zdecydowanie większa aniżeli dla amorficznej (rys. 5.129).



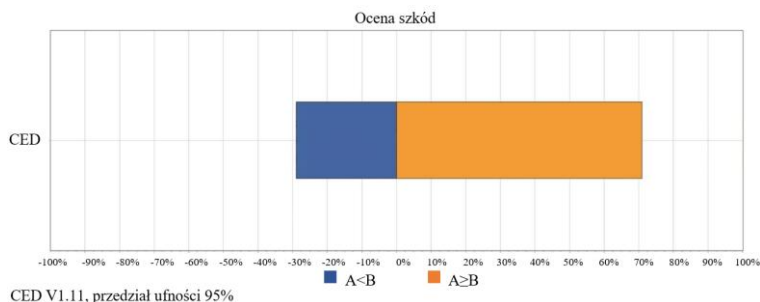
Rys. 5.129. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem całkowitego zapotrzebowania na energię (model CED)

Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B), jednak obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (z uwzględnieniem 7 kategorii wpływu modelu CED), zobrazowano na rysunku 5.130. We wszystkich rozważanych kategoriach, elektrownia A charakteryzuje się wyższym poziomem zapotrzebowania na energię w porównaniu do elektrowni B. Największe szkodliwe oddziaływanie zauważono w ramach kategorii obejmującej źródła odnawialne w formie energii wody (91,4%). Z kolei najbardziej zrównoważony wynik uzyskano dla kategorii nieodnawialnych źródeł energii jądrowej (A: 58,8%, B: 41,2%) oraz źródeł odnawialnych w formie energii wiatru, promieniowania słonecznego i geotermii (A: 56,7%, B: 43,3%).



Rys. 5.130. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model CED)

Zestawienie łącznego zapotrzebowania na energię w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania użytkowego w formie recyklingu, pokazuje, że jego poziom dla technologii monokrystalicznej także był wyraźnie wyższy niż dla amorficznej (rys. 5.131).



Rys. 5.131. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i amorficznych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie recyklingu, całkowitego zapotrzebowania na energię (model CED)

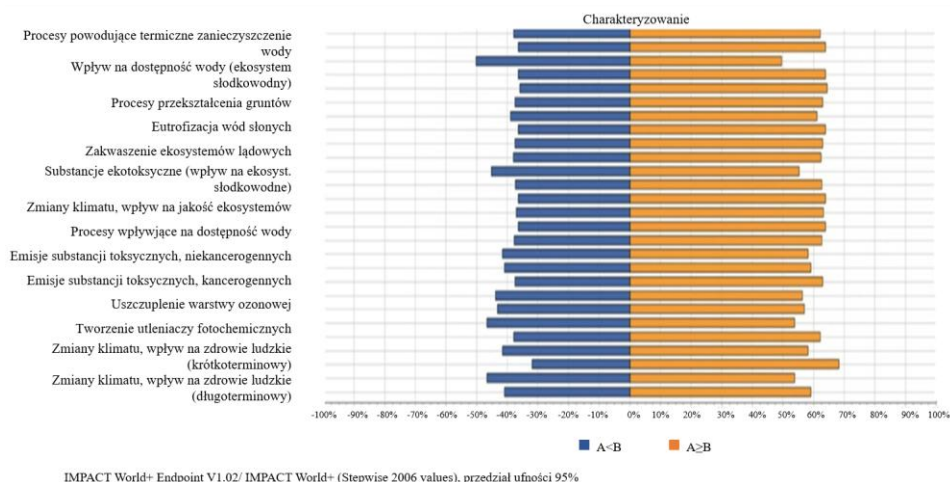
5.6.2. Porównanie cyklu istnienia elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych i perowskitowych

Druga z przeprowadzonych analiz Monte Carlo wyników LCA (również powtórzona dla 1000 iteracji) porównywała systemy fotowoltaiczne oparte na modułach wytworzonych w technologii monokrystalicznej („A”) i perowskitowej („B”). Ponownie ustalono rozkład niepewności wpływów (LCIA) z przedziałem ufności równym 95%. Na rysunkach 5.132-5.143 przedstawiono wyniki w formie wykresów słupkowych wygenerowanych bezpośrednio z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro. Tak jak w przypadku pierwszej analizy, słupki pomarańczowe obrazują procent przypadków, w których elektrownia A ma większy szkodliwy wpływ na otoczenie niż elektrownia B ($A - B \geq 0$), natomiast słupki niebieskie ilustrują sytuację odwrotną ($A - B < 0$).

5.6.2.1. Model IMPACT World+

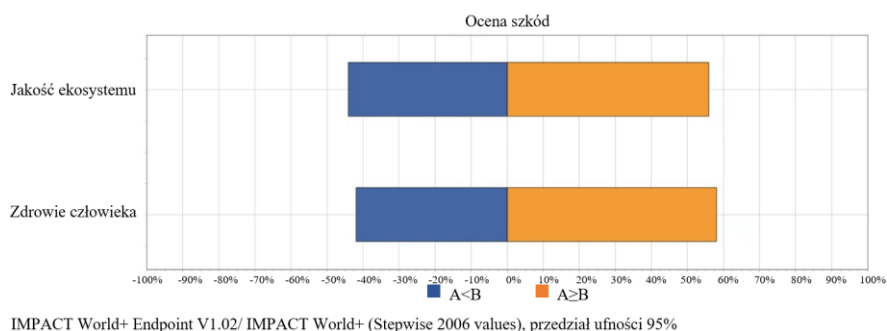
Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem użytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, przedstawiono na rysunku 5.132. Ponownie uwzględniono wszystkie kategorie wpływu dostępne dla modelu IMPACT World+ (Endpoint V1.02). Elektrownia A (monokrystaliczna, kolor pomarańczowy) wyróżniała się większym niepożądanym oddziaływaniem na otoczenie w porównaniu do elektrowni B (perowskitowej, kolor niebieski) we wszystkich ocenianych kategoriach. Największy szkodliwy wpływ odnotowano dla kategorii obejmującej substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych (69,3%).

Najbardziej zrównoważony wynik uzyskano z kolei dla kategorii procesów wpływających na dostępność wody, oddziałujących na ekosystemy słodkowodne (A: 50,4%, B: 49,6%).



Rys. 5.132. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IMPACT World+)

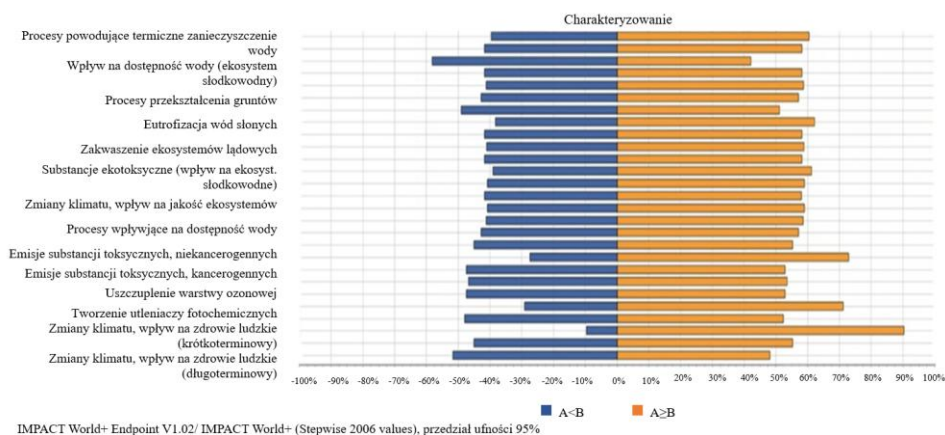
Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem dwóch obszarów oddziaływania (zdrowie człowieka, jakość ekosystemów), zobrazowano na rysunku 5.133. W tym przypadku elektrownia A również cechowała się wyraźnie większym destrukcyjnym wpływem w obu ocenianych obszarach aniżeli elektrownia B.



Rys. 5.133. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem obszarów oddziaływania (model IMPACT World+)

W całym cyklu istnienia obu badanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, zakładającym scenariusz zagospodarowania poużytkowego w formie składowania odnotowano, że skala oddziaływania na otoczenie technologii monokrystalicznej była większa niż perowskitowej.

Na rysunku 5.134 przedstawiono wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B), jednak obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (z uwzględnieniem kategorii wpływu). Elektrownia A wyróżnia się większym szkodliwym oddziaływaniem na otoczenie w porównaniu do elektrowni B we wszystkich rozważanych kategoriach. Maksymalny niepożądany wpływ charakteryzował kategorie obejmujące substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych (90,1%), substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego w perspektywie długoterminowej (73,1%) oraz substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej (70,7%). Najbardziej zrównoważony wynik cechował natomiast kategorię substancji wpływających na eutrofizację wód słonych (A: 50,9%, B: 49,1%).

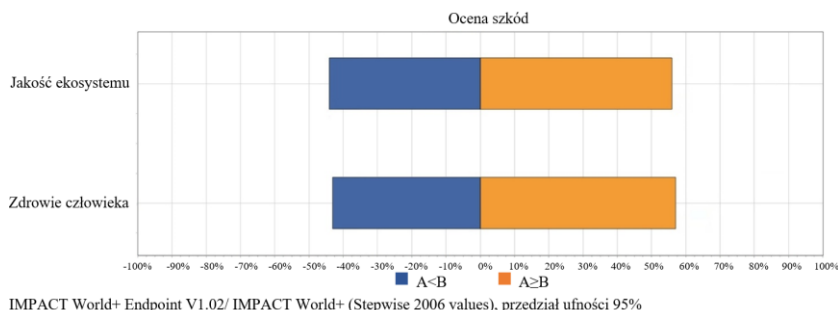


Rys. 5.134. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IMPACT World+)

Na rysunku 5.135 zestawiono wyniki analogicznej analizy, ale uwzględniającej dwa obszary oddziaływania – zdrowie człowieka i jakość ekosystemów. Elektrownia A (monokrystaliczna) także w tym przypadku charakteryzowała się większym destrukcyjnym oddziaływaniem w obu badanych obszarach w porównaniu do elektrowni B (perowskitowej).

W całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniającym scenariusz zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie procesów recyklingu odnotowano (analogicznie jak w przypadku składowania), że skala

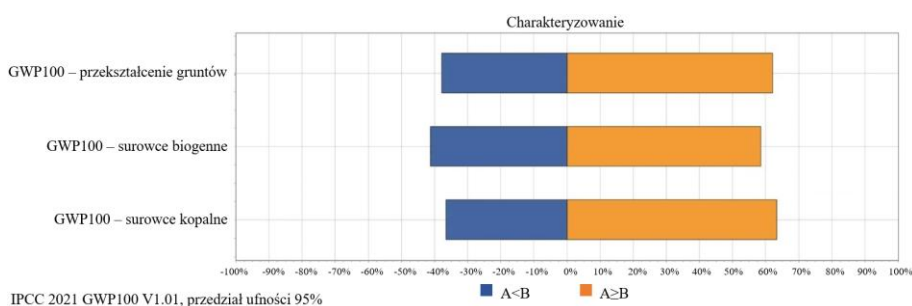
wpływu na otoczenie technologii monokrystalicznej była większa aniżeli perowskitowej.



Rys. 5.135. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem obszarów oddziaływania (model IMPACT World+)

5.6.2.2. Model IPCC 2021

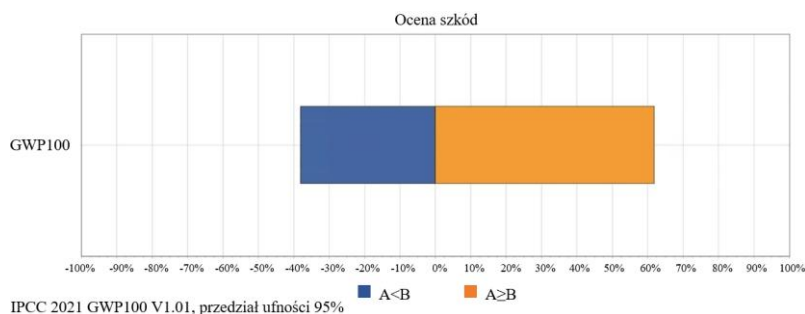
Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem w formie składowania na wysypisku odpadów, przedstawiono na rysunku 5.136. Ponownie uwzględniono wszystkie kategorie wpływu dostępne dla modelu IPCC 2021 (GWP V1.01). W każdej z ocenianych kategorii, elektrownia A wyróżniała się istotnie wyższym poziomem emisji gazów szklarniowych w porównaniu do elektrowni B. Największy niekorzystny wpływ zauważono w ramach kategorii obejmującej emisję gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (62,5%) oraz procesów związanych z przekształceniem gruntów (61,4%).



Rys. 5.136. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IPCC)

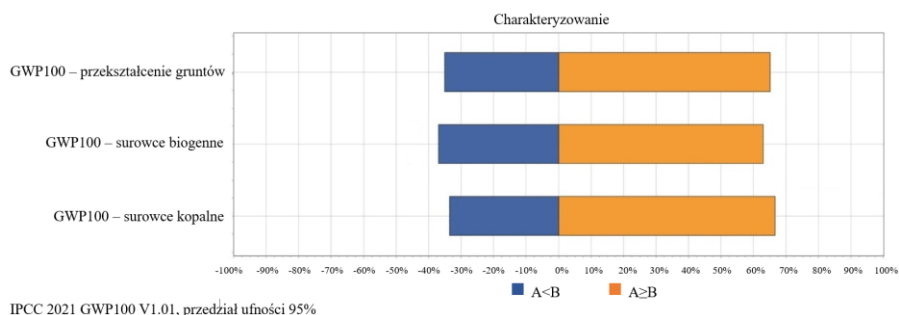
Dzięki zestawieniu łącznych emisji w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz

zagospodarowania poużytkowego w formie składowania, widocznym stało się, że ich poziom dla technologii monokrystalicznej był wyraźnie wyższy w porównaniu do perowskitowej (rys. 5.137).



Rys. 5.137. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem całkowitej emisji gazów cieplarnianych (model IPCC)

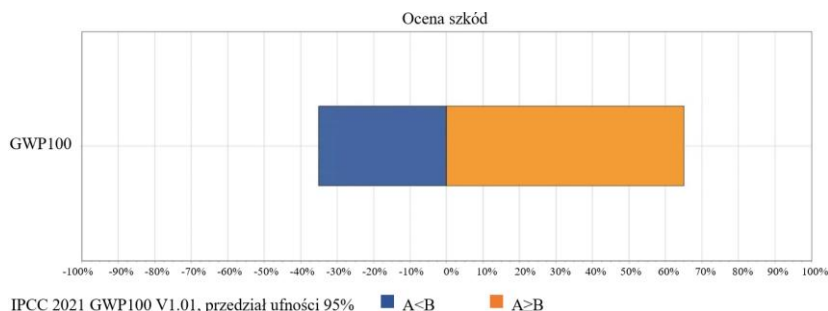
Na rysunku 5.138 przybliżono z kolei wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (z podziałem na 3 kategorie wpływu modelu IPCC 2021). We każdej z badanych kategorii, elektrownia A charakteryzowała się dużo wyższym poziomem emisji gazów szklarniowych aniżeli elektrownia B. Maksymalne destrukcyjne oddziaływanie i tym razem odnotowano dla kategorii obejmującej emisję gazów cieplarnianych na skutek procesów związanych z eksploatacją surowców kopalnych (65,5%) oraz procesów związanych z przekształcaniem gruntów (64,1%).



Rys. 5.138. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model IPCC)

Zestawienie całkowitych emisji GHG występujących w cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających

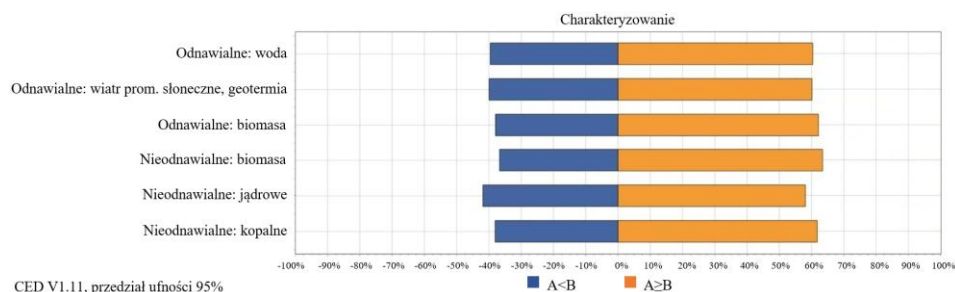
scenariusz zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie procesów recyklingu, ponownie potwierdza, że ich poziom dla technologii monokrystalicznej był wyraźnie wyższy w porównaniu do perowskitowej (rys. 5.139).



Rys. 5.139. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, całkowitej emisji gazów cieplarnianych (model IPCC)

5.6.2.3. Model CED

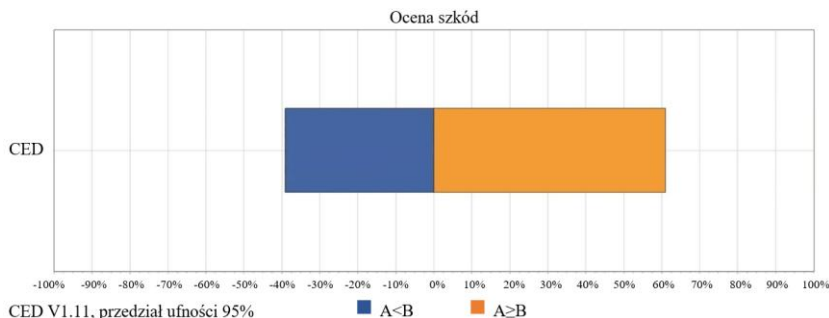
Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, zilustrowano na rysunku 5.140. Ponownie uwzględniono wszystkie kategorie wpływu dla modelu CED (V1.11). Dla każdej ocenianej kategorii, elektrownia A cechowała się wyższym poziomem zapotrzebowania na energię aniżeli elektrownia B. Maksymalny szkodliwy wpływ charakteryzował kategorię obejmującą źródła nieodnawialne w formie biomasy (62,6%).



Rys. 5.140. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model CED)

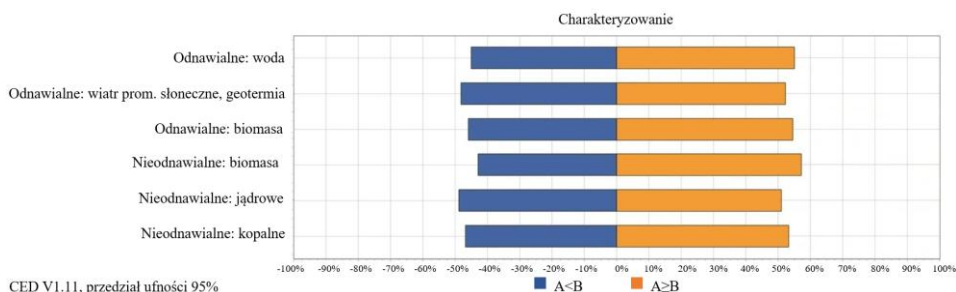
W efekcie zestawienia łącznego poziomu zapotrzebowania na energię w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki

odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania poużytkowego w formie składowania na wysypisku odpadów, zauważono, że jego wartość dla technologii monokrystalicznej była istotnie większa w porównaniu do perowskitowej (rys. 5.141).



Rys. 5.141. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie składowania na wysypisku odpadów, z uwzględnieniem całkowitego zapotrzebowania na energię (model CED)

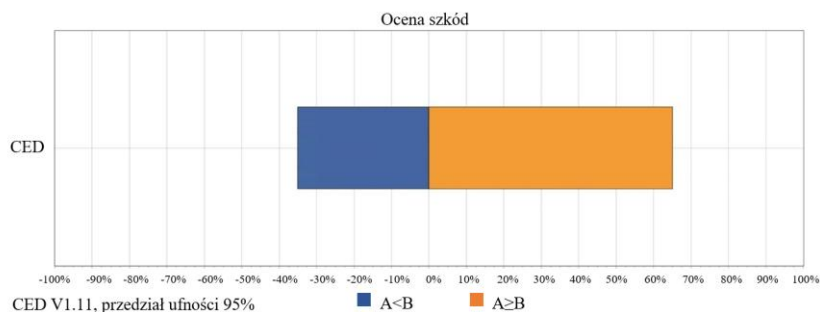
Na rysunku 5.142 przedstawiono wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B), jednak obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu (uwzględniające 7 kategorii wpływu modelu CED). W każdej z rozważanych kategorii, elektrownia A wyróżniała się wyższym poziomem zapotrzebowania na energię w porównaniu do elektrowni B. Maksymalne destrukcyjne oddziaływanie odnotowano ponownie dla kategorii obejmującej źródła nieodnawialne w formie biomasy (56,9%).



Rys. 5.142. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, z uwzględnieniem kategorii wpływu (model CED)

Zestawienie łącznego zapotrzebowania na energię w całym cyklu istnienia obu ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej, uwzględniających scenariusz zagospodarowania poużytkowego tworzy,

materiałów, elementów i zespołów roboczych w formie recyklingu, obrazuje, że jego poziom dla technologii monokrystalicznej również był zdecydowanie wyższy aniżeli dla perowskitowej (rys. 5.143).



Rys. 5.143. Wyniki analizy Monte Carlo dla elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych (A) i perowskitowych (B) obejmujące cykle istnienia z zagospodarowaniem poużytkowym w formie recyklingu, całkowitego zapotrzebowania na energię (model CED)

5.7. AUTORSKIE WSKAŹNIKI ZRÓWNOWAŻONEJ EFEKTYWNOŚCI CYKLU ISTNIENIA OBIEKTÓW TECHNICZNYCH ENERGETYKI ODNAWIALNEJ

W celu oceny zrównoważonej efektywności cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych zaproponowano trzy autorskie wskaźniki: zrównoważonej efektywności energetycznej, ekonomicznej oraz ekologicznej. Każdy z nich został zdefiniowany w sposób umożliwiający ilościową analizę i porównanie różnych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Podstawą konstrukcji wskaźników są założenia metodologii oceny cyklu istnienia (model IMPACT World+, CED, IPCC), gospodarki o obiegu zamkniętym oraz idei zrównoważonego rozwoju. Zastosowanie odrębnych miar umożliwia wielokryterialną ocenę technologii fotowoltaicznych, bez konieczności agregacji do jednego syntetycznego indeksu, co pozwala na większą transparentność interpretacji wyników. Chociaż każdy ze wskaźników może zostać potraktowany jako równorzędny element oceny, możliwe jest także wprowadzenie systemu wag, które pozwolą na różnicowanie znaczenia kryteriów w sposób odzwierciedlający cele i założenia badawcze.

5.7.1. Wskaźnik zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en})

Wskaźnik zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en}) opisuje relację pomiędzy całkowitą ilością energii elektrycznej wytworzonej przez elektrownię fotowoltaiczną w pełnym cyklu jej istnienia (E_w) a skumulowanym zapotrzebowaniem na energię w tym samym cyklu (CED_{sx}), określonym metodą CED:

$$ZE_{en} = \frac{E_w}{CED_{Sx}} \quad (5.1)$$

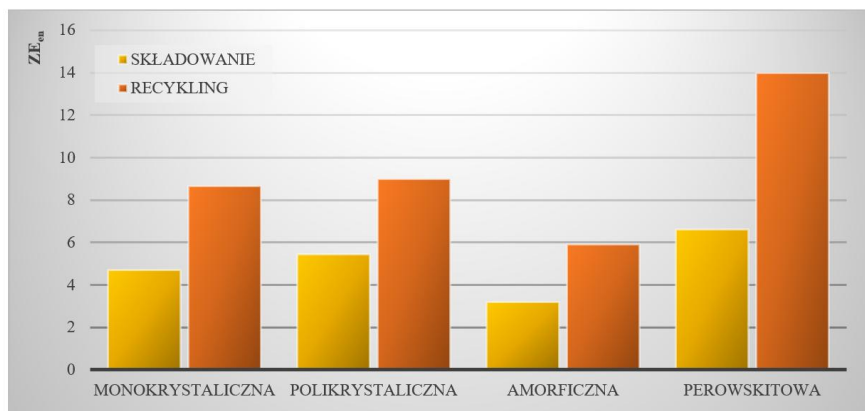
gdzie:

E_w – całkowita energia elektryczna wytworzona w cyklu istnienia (z uwzględnieniem zjawiska degradacji modułów PV, wpływającego na zmniejszanie uzysków energetycznych w kolejnych latach eksploatacji) [MWh],

CED_{Sx} – skumulowane zapotrzebowanie na energię (Cumulative Energy Demand) w całym cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej [MWh], z uwzględnieniem scenariusza zagospodarowania użytkowego (np. CED_{Ss} – składowanie, CED_{Sr} – recykling).

Wskaźnik ZE_{en} stanowi narzędzie do oceny stopnia samowystarczalności energetycznej obiektu technicznego oraz jego podatności na optymalizację procesów projektowych, wytwórczych, eksploatacyjnych i zagospodarowania użytkowego. Im wyższa wartość wskaźnika, tym większa efektywność energetyczna danej technologii oraz jej opłacalność w kontekście gospodarowania zasobami energetycznymi. Sterowanie w kierunku zwiększenia wartości ZE_{en} obejmuje m.in. minimalizację energo- i materiałochłonności procesów, zwiększenie udziału lokalnie wytwarzanych tworzyw, materiałów, elementów, zespołów roboczych, rozwój technologii zwiększających produkcję energii z promieniowania słonecznego, itd.

Korzystając z zależności (5.1) obliczono wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en}) dla analizowanych elektrowni fotowoltaicznych (rys. 5.144).



Rys. 5.144. Wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en}) badanych elektrowni fotowoltaicznych dla nominalnej długości cyklu istnienia (25 lat) oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego

Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na istotne zwiększenie wskaźnika dla wszystkich rozważanych obiektów technicznych (od 13,97 dla elektrowni perowskitowej do 5,92 dla amorficznej). Składowanie tworzyw,

materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni wpływa negatywnie na bilans energetyczny wszystkich ocenianych cykli istnienia, co przekłada się na wyraźne obniżenie wartości wskaźnika ZE_{en} (rys. 5.144).

5.7.2. Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE_{ek})

Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE_{ek}) odnosi się z kolei do relacji między całkowitymi przychodami uzyskanymi ze sprzedaży energii elektrycznej (P_e) a sumą kosztów cyklu istnienia elektrowni (K_e), powiększonych o potencjalne koszty środowiskowe (IW_{sx}), obliczone na podstawie modelu IMPACT World+:

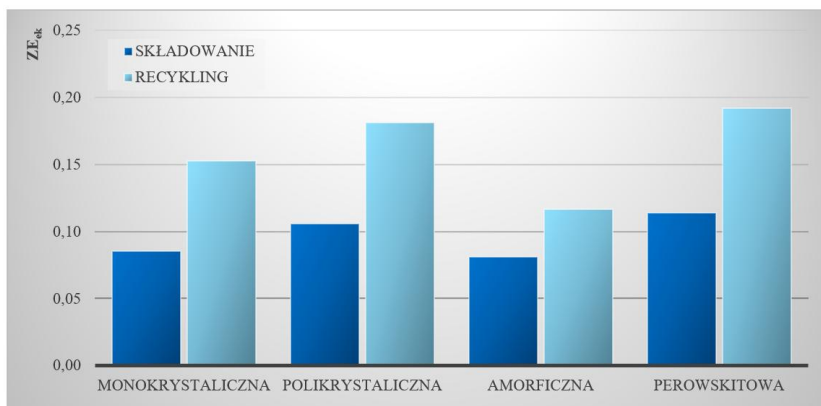
$$ZE_{ek} = \frac{P_e}{K_e + IW_{sx}} \quad (5.2)$$

gdzie:

- P_e – przychody ze sprzedaży energii [EUR],
- K_e – suma kosztów inwestycyjnych (CAPEX), eksploatacyjnych (OPEX) oraz ponoszonych z tytułu demontażu i zagospodarowania [EUR],
- IW_{sx} – potencjalne koszty środowiskowe cyklu istnienia [EUR] dla danego scenariusza zagospodarowania (np. IW_{ss} – składowanie, IW_{sr} – recykling).

Wskaźnik ZE_{ek} umożliwia integrację aspektów finansowych z kosztami środowiskowymi, dostarczając narzędzia do oceny opłacalności technologii w perspektywie zrównoważonego rozwoju. Wyróżnia się on dopasowaniem do założeń filozofii prawdziwego rachunku kosztów (ang. *true-cost accounting*), ściśle integrując się z ideą gospodarki obiegu zamkniętego. Jego konstrukcja opiera się na zasadach odpowiedzialnego podejścia do zarządzania zasobami, uwzględniając pełen cykl istnienia obiektów technicznych oraz rzeczywiste koszty związane z ich wpływem na otoczenie. Dzięki temu narzędzie staje się elementem wspierającym zrównoważony rozwój i promującym efektywne gospodarowanie, zgodne z współczesnymi wyzwaniami ekonomicznymi i ekologicznymi. Wskaźnik odzwierciedla poziom opłacalności ekonomicznej przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów środowiskowych, a sterowanie w kierunku zwiększenia wartości ZE_{ek} może być osiągnięte m.in. przez optymalizację nakładów inwestycyjnych i operacyjnych (CAPEX, OPEX), redukcję kosztów środowiskowych (IW_{sx}) czy podnoszenie sprawności przetwarzania energii słonecznej na elektryczną, co przekłada się na zwiększenie wartości P_e .

Na podstawie zależności (5.2) wyznaczono wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE_{ek}) dla badanych elektrowni fotowoltaicznych. Do obliczenia wartości przychodów założono cenę sprzedaży energii elektrycznej równą 330 zł/MWh, kurs euro wynoszący 4,50 zł oraz stopę dyskonta na poziomie 5% (rys. 5.145).



Rys. 5.145. Wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE_{ek}) badanych elektrowni fotowoltaicznych dla nominalnej długości cyklu istnienia (25 lat) oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego

Wykorzystanie procesów recyklingu przynosi zauważalny wzrost poziomu wskaźnika, który można zaobserwować we wszystkich analizowanych przypadkach (od 0,19 dla elektrowni perowskitowej do 0,12 dla amorficznej). Jednocześnie widocznym jest istotny wpływ składowania tworzyw, materiałów, elementów oraz zespołów roboczych elektrowni. Proces ten działa niekorzystnie na ogólny bilans energetyczny i obniża efektywność w całym cyklu istnienia rozważanych obiektów technicznych. W rezultacie dochodzi do wyraźnego spadku wartości wskaźnika ZE_{ek} , co zostało zilustrowane na rysunku 5.145.

5.7.3. Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec})

Wskaźnik zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec}) określa stosunek wielkości redukcji emisji gazów cieplarnianych w następstwie zastosowania źródeł odnawialnych zamiast konwencjonalnych, do całkowitej emisji GHG powstałej w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej, określonej metodą IPCC:

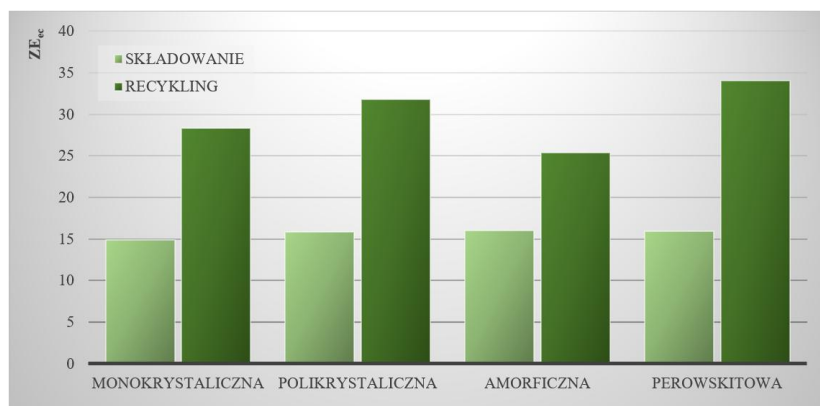
$$ZE_{ec} = \frac{E_w \cdot W_{ue}}{IPCC_{Sx}} \quad (5.3)$$

gdzie:

- E_w – całkowita energia elektryczna wytworzona w cyklu istnienia [MWh],
- W_{ue} – wskaźnik zredukowanej emisji gazów cieplarnianych w następstwie zastosowania źródeł odnawialnych zamiast konwencjonalnych, (do obliczeń przyjęto wartość równą 597 kg CO₂ eq/MWh zgodnie z raportem KOBiZE – Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami, za rok 2024) [kg CO₂ eq/MWh],
- $IPCC_{Sx}$ – łączna emisja gazów szklarniowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej (na etapie wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania) [kg CO₂ eq].

Wskaźnik ZE_{ec} pozwala na identyfikację potencjału danej technologii w zakresie redukcji emisji oraz wskazuje obszary wymagające działań naprawczych i innowacyjnych. Im wyższa jego wartość tym dana technologia przyczynia się do większej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Sterowanie w kierunku zwiększania poziomu ZE_{ec} obejmuje działania takie jak redukcja energochłonności i emisji procesowych, ograniczenie zużycia zasobów naturalnych, zwiększanie udziału materiałów pochodzących z recyklingu czy rozwój technologii wspierających odzysk surowców.

W oparciu o zależność (5.3) obliczono wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec}) dla ocenianych elektrowni fotowoltaicznych. Procesy recyklingu przyczyniają się do znaczącego wzrostu efektywności ekologicznej, co potwierdzają wszystkie analizowane przypadki. Wskaźnik ZE_{ec} osiąga poziom od 25,4 dla elektrowni amorficznej do 34,1 w przypadku perowskitowej, ukazując pozytywny wpływ tych działań na środowisko. Jednocześnie istotnym problemem pozostaje jednak składowanie tworzyw, materiałów, elementów oraz zespołów roboczych elektrowni. Proces ten generuje negatywne oddziaływanie na otoczenie, znacząco obniżając efektywność ekologiczną w całym cyklu istnienia rozpatrywanych obiektów technicznych. W konsekwencji obserwuje się wyraźny spadek wartości wskaźnika ZE_{ec} (rys. 5.146).



Rys. 5.146. Wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec}) badanych elektrowni fotowoltaicznych dla nominalnej długości cyklu istnienia (25 lat) oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego

5.7.4. Porównanie wartości wskaźników zrównoważonej efektywności dla analizowanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej

Recykling podwaja (lub prawie podwaja) wartość wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej we wszystkich technologiach, co oznacza istotne oszczędności energetyczne dzięki odzyskowi surowców i materiałów.

Elektrownia perowskitowa wyróżnia się najwyższymi jego wartościami zarówno w przypadku składowania, jak i recyklingu, co obrazuje najlepszy bilans energetyczny w przypadku zastosowania tego rozwiązania. Elektrownia amorficzna wyróżnia się najniższymi wartościami wskaźnika w obu scenariuszach zagospodarowania, co wskazuje na jej najmniejszą konkurencyjność energetyczną w porównaniu do pozostałych badanych obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

Wartość wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej w dużym stopniu zależy od wysokości kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Elektrownie perowskitowa oraz polikrystaliczna cechują się jego najwyższymi wartościami (0,19 i 0,18 przy założeniu recyklingu), co obrazuje korzystniejsze relacje kosztów do efektów. Recykling zwiększa wartość wskaźnika dla wszystkich rozważanych technologii fotowoltaicznych.

Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznych niemal podwaja wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej, co uwiadamia duże znaczenie redukcji emisji oraz wpływów środowiskowych dzięki odzyskowi materiałów. Cykle istnienia elektrowni perowskitowej (34,07) i polikrystalicznej (31,75) w przypadku scenariusza recyklingu, charakteryzują się najwyższymi wartościami tego wskaźnika.

Recykling jest decydującym czynnikiem poprawiającym wskaźniki efektywności w całym cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych. W wymiarze energetycznym i ekologicznym pozwala on na podwojenie efektywności, a w wymiarze ekonomicznym – na istotne zmniejszenie kosztów jednostkowych. Największy potencjał zrównoważonego rozwoju mają obecnie technologie perowskitowe i polikrystaliczne (tab. 5.13).

Tab. 5.13. Porównanie wartości wskaźników zrównoważonej efektywności badanych elektrowni fotowoltaicznych dla nominalnej długości cyklu istnienia (25 lat) oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego

Wskaźnik zrównoważonej efektywności	Scenariusz zagospodarowania użytkowego	Cykl istnienia elektrowni			
		monokrystal icznej	polikrystalic znej	amorficznej	perowskito wej
energetycznej (ZE_{en})	składowanie (S_s)	4,69	5,43	3,20	6,62
	recykling (S_r)	8,67	8,55	5,92	13,97
ekonomicznej (ZE_{ek})	składowanie (S_s)	0,09	0,11	0,08	0,11
	recykling (S_r)	0,15	0,18	0,12	0,19
ekologicznej (ZE_{ec})	składowanie (S_s)	14,92	15,84	16,01	15,90
	recykling (S_r)	28,31	31,75	25,40	34,07

5.7.5. Współczynnik wydłużenia cyklu istnienia (Φ_{ci})

Wydłużenie okresu eksploatacji elektrowni fotowoltaicznej oddziałuje bezpośrednio na poziom jej efektywności w trzech wymiarach analitycznych: energetycznym, ekonomicznym oraz ekologicznym. W celu ilościowego ujęcia tego wpływu wprowadzono współczynnik wydłużenia cyklu istnienia (Φ_{ci}), który stanowi narzędzie umożliwiające precyzyjne odwzorowanie korzyści wynikających z przedłużenia okresu użytkowania obiektu technicznego (lub ewentualnych strat w efekcie jego skracania). Uwzględnienie Φ_{ci} pozwala nie tylko na wskazanie relatywnego wzrostu efektywności poszczególnych wskaźników, lecz także na uwypuklenie znaczenia innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, materiałowych i eksploatacyjnych, prowadzących do redukcji zapotrzebowania na nowe zasoby, zmniejszenia energo- i materiałochłonności procesów oraz ograniczenia negatywnego oddziaływania na otoczenie. Współczynnik wydłużenia cyklu istnienia został zdefiniowany następująco:

$$\Phi_{ci}^j = 1 + (\delta_{ci} \cdot \alpha_j) \quad (5.4)$$

gdzie:

- j – ZE_{en} , ZE_{ek} , ZE_{ec} (typ wskaźnika zrównoważonej efektywności),
- δ_{ci} – względny przyrost efektywności będący bezpośrednim rezultatem wydłużenia cyklu istnienia. Wartość δ_{ci} jest proporcjonalna do stopnia wydłużenia, tj. dla 10% przyrostu czasu trwania cyklu istnienia przyjmuje ona wartość 0,1, a dla 50% – wartość 0,5,
- α_j – współczynnik wrażliwości dla danego wskaźnika, odzwierciedlający udział obciążeń stałych i zmiennych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej, wyznaczany na podstawie wyników analizy LCA i kosztów cyklu istnienia.

W cyklu istnienia obiektów technicznych występują zarówno stałe, jak i zmienne obciążenia oraz zyski. Do stałych można zaliczyć te związane m.in. z produkcją tworzyw, materiałów, elementów oraz zespołów roboczych, transportem, montażem, część kosztów inwestycyjnych, emisje i koszty środowiskowe w fazie wytwarzania, koszty oraz emisje związane z końcem cyklu istnienia (demontaż, recykling, składowanie). Z kolei do zmiennych – te związane z m.in. ilością wyprodukowanej energii, przychodami z jej sprzedaży, część kosztów operacyjnych (np. serwis, utrzymanie) czy emisje procesowe w trakcie eksploatacji.

Wydłużenie czasu eksploatacji danego obiektu technicznego energetyki odnawialnej sprawia, że stałe obciążenia rozkładają się na dłuższy okres, co w praktyce wpływa na zmniejszenie ich oddziaływania w przeliczeniu na jednostkę czasu. Efekt wydłużenia czasu eksploatacji staje się szczególnie istotny w przypadku, gdy stałe obciążenia stanowią dużą część całkowitego bilansu obciążeń danego obiektu technicznego. Im większy udział obciążeń stałych, tym bardziej widoczny jest pozytywny wpływ wydłużenia czasu eksploatacji, co może prowadzić np. do bardziej efektywnego sterowania cyklem istnienia.

Aby określić dokładną postać efektu wydłużenia cyklu dla wskaźnika j , przyjęto następujące założenia:

T_0 – bazowy okres referencyjny rozumiany jako nominalny czas istnienia obiektu technicznego (w przypadku elektrowni fotowoltaicznej: 25 lat);

$T_1 = T_0 (1 + \delta_{ci})$ – nowy okres eksploatacji po wydłużeniu czasu istnienia obiektu.

Dodatkowo dla wskaźnika efektywności I_j gdzie $j \in \{en, ek, ec\}$ oznacza odpowiednio efektywność energetyczną, ekonomiczną lub ekologiczną, założono, że:

- 1) licznik wskaźnika (N) stanowi wielkość skalującą się liniowo z długością cyklu istnienia, a zatem:

$$N_1 = N_0 (1 + \delta_{ci}) \quad (5.5)$$

- 2) mianownik wskaźnika (D_j) składa się ze składnika stałego $D_j^{(f)}$ niezależnego od czasu użytkowania (np. koszty inwestycyjne, emisje początkowe) oraz składnika zmiennego $D_j^{(v)}$ proporcjonalnego do długości cyklu istnienia (np. koszty eksploatacyjne, emisje podczas użytkowania):

W takim przypadku względna zmiana wartości wskaźnika przy wydłużeniu cyklu istnienia wynosi:

$$D_0 = D_j^{(f)} + D_j^{(v)} \quad (5.6)$$

$$D_1 = D_j^{(f)} + D_j^{(v)} (1 + \delta_{ci}) \quad (5.7)$$

W takim przypadku względna zmiana wartości wskaźnika przy wydłużeniu cyklu istnienia wynosi:

$$\phi_{ci}^{(j)} = \frac{I_{j,1}}{I_{j,0}} = \frac{(1 + \delta_{ci}) D_0}{D_j^{(f)} + D_j^{(v)} (1 + \delta_{ci})} = \frac{(1 + \delta_{ci}) (D_j^{(f)} + D_j^{(v)})}{D_j^{(f)} + D_j^{(v)} (1 + \delta_{ci})} \quad (5.8)$$

Wartość wskaźnika I_j po uwzględnieniu wydłużonego cyklu istnienia można zatem zapisać jako:

$$I_{j,1} = I_{j,0} \cdot \phi_{ci}^{(j)} \quad (5.9)$$

I_j to wartość wskaźnika efektywności w wymiarze j (I_{en} dla efektywności energetycznej, I_{ek} – ekonomicznej, I_{ec} – ekologicznej). Jego postać zależy od zysków (licznik: ilość wytworzonej energii, przychody finansowe, uniknięte emisje, itd.) i kosztów (mianownik: nakłady energetyczne, ekonomiczne, środowiskowe). Jest wyznaczany bezpośrednio na podstawie z danych LCA i analizy kosztów.

Dla małych δ_{ci} wykonano rozwinięcie pierwszego rzędu i otrzymano zależności:

$$s_j^{(f)} = \frac{D_j^{(f)}}{D_j^{(f)} + D_j^{(v)}} \quad (5.10)$$

$$s_j^{(v)} = \frac{D_j^{(v)}}{D_j^{(f)} + D_j^{(v)}} = 1 - s_j^{(f)} \quad (5.11)$$

Zatem, przy $\delta_{ci} \ll 1$:

$$\phi_{ci}^{(j)} \approx 1 + \delta_{ci} s_j^{(f)} \quad (5.12)$$

W efekcie, możliwym staje się wyprowadzenie współczynnika wrażliwości α_j :

$$\alpha_j = s_j^{(f)} = \frac{D_j^{(f)}}{D_j^{(f)} + D_j^{(v)}} \quad (5.13)$$

Zgodnie z powyższym, im większy jest udział obciążeń stałych w mianowniku danego wskaźnika, tym większa (w przybliżeniu liniowym) jest korzyść z wydłużenia cyklu istnienia obiektu technicznego.

Współczynnik wrażliwości wskaźnika efektywności ($\alpha_j = s_j^{(f)}$) stanowi zatem pomocniczy parametr służący do oszacowania, jak bardzo wartość wskaźnika I_j zmieni się na skutek wydłużeniu cyklu istnienia. Dla badanych elektrowni fotowoltaicznych współczynnik α_j przyjmuje wartość ok. 0,83 dla ZE_{en} , ok. 0,15 dla ZE_{ek} , oraz ok. 0,74 dla ZE_{ec} .

W przypadku wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en}), $D_{en}^{(f)}$ obejmuje ilość energii zużywanej w procesach wytwarzania, transportu i zagospodarowania użytkowego, z kolei $D_{en}^{(v)}$ – energię niezbędną w fazie eksploatacji, zależną od czasu trwania cyklu istnienia (np. serwis, czyszczenie, części zamienne).

Podczas analizy wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej (ZE_{ek}), przyjęto, że $D_{ek}^{(f)}$ uwzględnia koszty inwestycyjne (CAPEX), koszty demontażu i zagospodarowania użytkowego oraz część potencjalnych kosztów środowiskowych (IW) wynikających z wytwarzania i zagospodarowania użytkowego, natomiast do $D_{ek}^{(v)}$ zaliczono koszty eksploatacyjne (OPEX) oraz potencjalne koszty środowiskowe (IW) związane z eksploatacją.

W ramach oceny wykonywanej z wykorzystaniem wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec}), założono, że $D_{ec}^{(f)}$ obejmuje emisje na etapie wytwarzania i zagospodarowania użytkowego, z kolei $D_{ec}^{(v)}$ – emisje podczas eksploatacji.

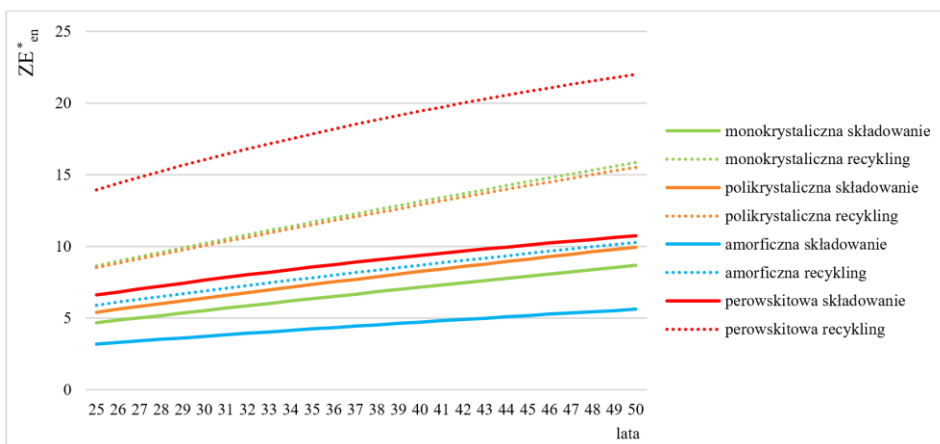
W przypadku efektywności energetycznej, wydłużenie cyklu istnienia prowadzi do zwiększenia łącznej ilości energii elektrycznej wytworzonej przez obiekt, przy jednoczesnym relatywnym zmniejszeniu udziału nakładów energetycznych ponoszonych w fazie wytwarzania i montażu:

$$ZE_{en}^* = \frac{E_w}{CED_{Sx}} \cdot \phi_{ci}^{Ze_{en}} \quad (5.14)$$

gdzie:

ZE_{en}^* – wskaźnik zrównoważonej efektywności energetycznej z uwzględnieniem wydłużenia cyklu istnienia.

Korzystając ze wzoru (5.14) dokonano analizy zmiany wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej badanych elektrowni fotowoltaicznych dla długości cyklu istnienia wynoszącej od 25 do 50 lat oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego. Największy względny wzrost procentowy odnotowano dla technologii polikrystalicznej oraz amorficznej (dla wariantu składowania wartość wskaźnika uległa podwojeniu). Najmniejszą dynamikę wzrostu wykazuje technologia perowskitowa (wzrost wartości wskaźnika o ok. 37%), pomimo że charakteryzuje się ona najwyższymi wartościami absolutnymi wskaźnika w obu wariantach zagospodarowania poużytkowego. Technologie monokrystaliczne i polikrystaliczne dla scenariusza recyklingu osiągają bardzo zbliżone wartości, co wskazuje na porównywalny potencjał poprawy efektywności w ujęciu długoterminowym (rys. 5.147).



Rys. 5.147. Zmiana wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej badanych elektrowni fotowoltaicznych dla długości cyklu istnienia wynoszącej od 25 do 50 lat oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego

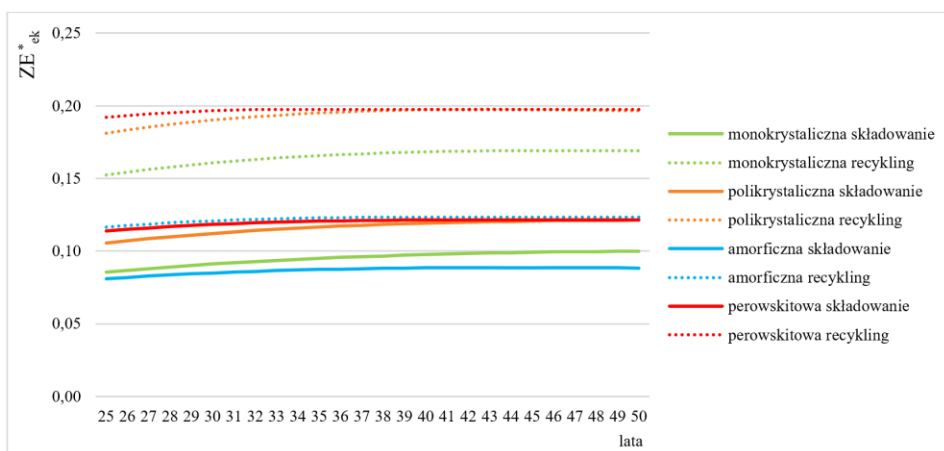
Biorąc pod uwagę efektywność ekonomiczną badanych obiektów technicznych, dłuższy okres eksploatacji umożliwia rozłożenie kosztów inwestycyjnych i środowiskowych na większą ilość energii sprzedanej, co przekłada się na korzystniejsze relacje przychodów do kosztów całkowitych:

$$ZE_{ek}^* = \frac{P_e}{K_e + IW_{sx}} \cdot \phi_{ci}^{Ze_{ek}} \quad (5.15)$$

gdzie:

ZE_{ek}^* – wskaźnik zrównoważonej efektywności ekonomicznej z uwzględnieniem wydłużenia cyklu istnienia.

W oparciu o wzór (5.15) przeprowadzono szczegółową analizę zmienności wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej dla grupy badanych elektrowni fotowoltaicznych. Analiza uwzględniała różne długości cyklu istnienia, obejmujące przedział od 25 do 50 lat, oraz uwzględniała odmienne scenariusze zagospodarowania po zakończeniu eksploatacji. W ujęciu bezwzględny najwyższe wartości wskaźnika w ostatnim ocenianym roku cechują technologie polikrystaliczną i perowskitową (wariant recyklingu). W ujęciu procentowego wzrostu najwyższe wartości (o ok. 14%) cechują elektrownie monokrystaliczną oraz polikrystaliczną. Widocznym jest jednak, że po ok. 30-35 latach eksploatacji ocenianych elektrowni fotowoltaicznych nie odnotowuje się istotnego wzrostu wartości badanego wskaźnika (rys. 5.148).



Rys. 5.148. Zmiana wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekonomicznej badanych elektrowni fotowoltaicznych dla długości cyklu istnienia wynoszącej od 25 do 50 lat oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego

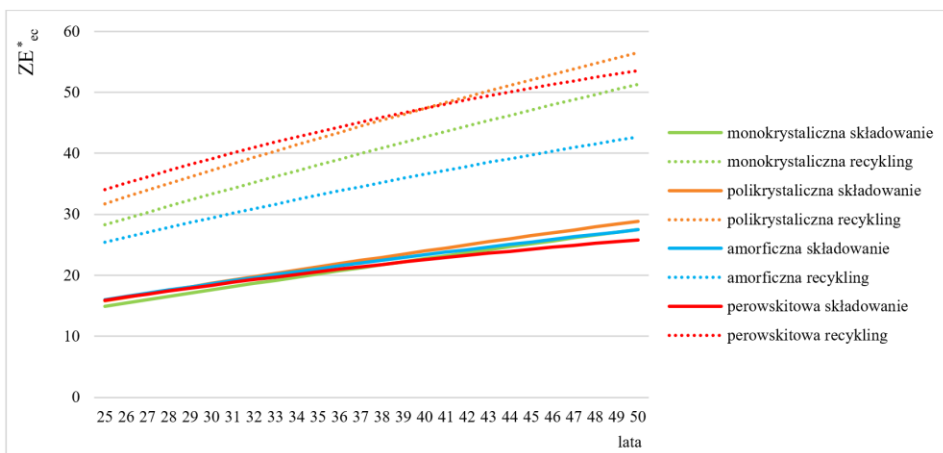
Wydłużenie cyklu istnienia zmniejsza również względny poziom emisji GHG przypadających na jednostkę wyprodukowanej energii, co sprzyja ograniczeniu presji środowiskowej oraz poprawia bilans zredukowanych emisji:

$$ZE_{ec}^* = \frac{E_w \cdot W_{ue}}{IPCC_{Sx}} \cdot \phi_{ci}^{Ze_{ec}} \quad (5.16)$$

gdzie:

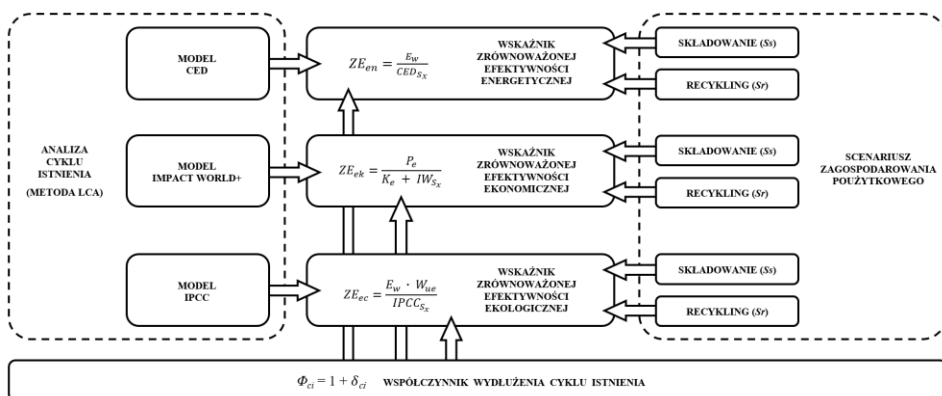
ZE_{ek}^* – wskaźnik zrównoważonej efektywności ekologicznej z uwzględnieniem wydłużenia cyklu istnienia.

Na podstawie wzoru (5.16) przeanalizowano zmiany wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej dla badanych elektrowni fotowoltaicznych, uwzględniając różne długości cyklu istnienia (od 25 do 50 lat) oraz alternatywne scenariusze zagospodarowania. Wszystkie analizowane technologie wykazują systematyczny wzrost wskaźnika w miarę wydłużania okresu eksploatacji, co świadczy o poprawie efektywności ekologicznej z biegiem czasu. Najbardziej dynamiczny przyrost procentowy cechuje elektrownię monokrystaliczną, zarówno w wariancie składowania, jak i recyklingu. Najwyższa wartość bezwzględna wskaźnika w ostatnim analizowanym roku eksploatacji wyróżnia elektrownię polikrystaliczną (recykling). W ujęciu procentowym, najniższy przyrost wskaźnika odnotowano dla elektrowni perowskitowej (o ok. 37%), natomiast najwyższy – dla mono- i polikrystalicznej (o ok. 45%) (rys. 5.149).



Rys. 5.149. Zmiana wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej badanych elektrowni fotowoltaicznych dla długości cyklu istnienia wynoszącej od 25 do 50 lat oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania poużytkowego

Uwzględnienie współczynnika Φ_{ci} w poszczególnych wskaźnikach zrównoważonej efektywności pozwala na modelowanie scenariuszy rozwoju technologicznego, w których kluczową rolę odgrywa trwałość, niezawodność i możliwość wydłużania okresu użytkowania elektrowni fotowoltaicznych. Dzięki temu podejściu możliwe jest bardziej realistyczne oraz wielowymiarowe ujęcie efektywności w kontekście gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym i założeń zrównoważonego rozwoju (rys. 5.150).



Rys. 5.150. Rozszerzony model autorskich wskaźników zrównoważonej efektywności cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, energetyka odnawialna odgrywa kluczową rolę w transformacji systemów energetycznych. Szczególnie dynamiczny rozwój odnotowuje sektor fotowoltaiki, który pozwala na bezpośrednią konwersję promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Równocześnie rosnąca liczba instalacji PV wymusza konieczność sterowania ich cyklami istnienia, obejmującymi etapy projektowania i konstruowania, wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania poużytkowego. Efektywne (energetycznie, ekonomicznie i ekologicznie) sterowanie cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej może znacząco wpłynąć na zmniejszenie ponoszonych kosztów środowiskowych, redukcję ilości wykorzystywanej energii elektrycznej oraz ograniczenie szkodliwych emisji i zużycia zasobów surowców.

Obiekt badań w niniejszej rozprawie doktorskiej stanowiły cztery elektrownie fotowoltaiczne wykonane w różnych technologiach: monokrystalicznej, polikrystalicznej, amorficznej oraz perowskitowej. Różnorodność rozważanych technologii PV umożliwiła dokonanie analizy porównawczej pod kątem zapotrzebowania na energię, wpływu na otoczenie oraz środowiskowych kosztów cyklu istnienia. Każdy oceniany obiekt techniczny charakteryzuje się odmiennymi właściwościami materiałowymi, sprawnością konwersji promieniowania słonecznego czy zapotrzebowaniem na energię i surowce w procesach wytwarzania oraz zagospodarowania, co w konsekwencji wpływa na dobór strategii sterowania cyklem istnienia i decyzje dotyczące jego poszczególnych etapów.

Ocenie poddano również dwa scenariusze zagospodarowania poużytkowego: składowanie i recykling. Zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi Unii Europejskiej oraz ustawodawstwem krajowym, odpady z elektrowni fotowoltaicznych, klasyfikowane jako zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny (WEEE), nie mogą być kierowane na składowiska odpadów. Zakaz ten wynika zarówno z potencjalnych zagrożeń środowiskowych (m.in. możliwość uwalniania metali ciężkich i substancji toksycznych), jak i z konieczności realizacji założeń gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym, której istotą jest odzysk i ponowne wykorzystanie surowców. Uwzględnienie scenariusza składowania w przeprowadzonych analizach miało jednak charakter porównawczy i pozwoliło na wyraźne ukazanie zasadności stosowania procesów recyklingu w wymiarze energetycznym, ekonomicznym i ekologicznym, a także na podkreślenie znaczenia rozwoju technologii odzysku w perspektywie długoterminowej. Dodatkowo scenariusz składowania pełnił on rolę punktu odniesienia (ang. *baseline*) w przeprowadzonych badaniach zgodnych z metodologią LCA.

Analizy LCA dotyczące instalacji fotowoltaicznych skupiają się przede wszystkim na procesach wytwarzania modułów PV. Głównym przedmiotem badań są materiały, z których je wytworzono, przy czym największą uwagę

poświęca się elementom wykonanym z krzemu. Badania przeprowadzone przez Alsemę [4], Frankla i in. [58], Fthenakisa oraz Kima [64], a także Donesa i Frischknechta [37] czy Kato i in. [113] koncentrowały się na analizie cyklu istnienia modułów PV z krzemu monokrystalicznego. Natomiast ocenę modułów z krzemu polikrystalicznego przeprowadzili m.in. Alsema [4], Fthenakis i Alsema [63], Fthenakis i Kim [64] Dones i Frischknecht [37], Ito i in. [98, 99], Kato i in. [113], Nomura i in. [174] oraz Oliver i Jackson [176]. Z kolei badania dotyczące modułów z krzemu amorficznego zrealizowali np. Alsema [4], Ito i in. [98] oraz Kato i in. [113]. Inną perspektywę wnieśli Bravi i in. [19], którzy podjęli się oceny modułów PV bazujących na wielozłączowych, cienkowarstwowych ogniwach krzemowych. W literaturze dostępne są także prace poświęcone analizie cyklu istnienia modułów opartych na innych materiałach niż krzem, np. Fthenakis i Alsema [63], Fthenakis i Kim [64] oraz Ito i in. [98] poświęcili swoje badania elementom bazującym na tellurku kadmu (CdTe). Z kolei Bravi i in. [19] analizowali moduły z diselenku miedziowo-indowo-galowego (CIGS), a Greijer i in. [79] zajmowali się ogniwami uczulanymi barwnikiem (DSSC). W literaturze można również znaleźć pojedyncze analizy całych elektrowni fotowoltaicznych, m.in. pracę Schaefera i Hagedorna [199] dotyczącą instalacji o mocy 2,5 MW (bazujących na ogniwach mono- i polikrystalicznych oraz amorficznych), Kato i in., którzy oceniali systemy o mocach 10, 30 i 100 MW wykorzystujące ogniwa polikrystaliczne i amorficzne [112] oraz CdTe [111]. Ponadto powstało kilka prac oceniających wpływ systemów fotowoltaicznych na środowisko w kontekście lokalnym. Schaefer i Hagedorn [199] skoncentrowali się na Niemczech, Dones i Frischknecht [37] – na Szwajcarii, Alsema [4] – na Holandii, Bravi i in. [19] oraz Frankl i in. [58] – na Włoszech, Fthenakis i Kim [64] – na Stanach Zjednoczonych, Kato i in. oraz Nomura i in. [111, 112, 113, 174] analizowali oddziaływanie tego rodzaju instalacji w Japonii, natomiast Ito i in. [98, 99] – w Chinach. Mimo zauważalnego rozwoju badań w tej dziedzinie, w globalnej literaturze wciąż brakuje prac wykorzystujących model IMPACT Word+ do oceny cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych. Aktualne badania najczęściej koncentrują się na pomiarze emisji CO₂ oraz innych gazów cieplarnianych [4, 37, 58, 63, 64, 98, 99, 113, 174].

Zaistniała zatem potrzeba opracowania zintegrowanych metod sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, w tym elektrowni fotowoltaicznych, które będą pozwalały na zwiększenie ich efektywności w ujęciu energetycznym, ekonomicznym i ekologicznym. Dotychczas nie przeprowadzono kompleksowych analiz w tym obszarze. Niniejsza dysertacja miała za zadanie wypełnić tę lukę, poprzez analizę możliwości efektywnego sterowania cyklami istnienia wybranych elektrowni PV, uwzględniając różnice technologiczne między nimi. Pozwoliło to na sformułowanie praktycznych rekomendacji dotyczących optymalizacji procesów w całym cyklu istnienia badanych obiektów technicznych, uwzględniających główne założenia rozwoju zrównoważonego oraz gospodarki w obiegu (możliwie) zamkniętym.

Wnioski o charakterze merytorycznym

Zrealizowane w pracy postępowanie analityczne pozwoliło określić wnioski o charakterze merytorycznym, które odpowiadają celom przeprowadzonych badań.

Cel poznawczy rozprawy doktorskiej został zrealizowany dzięki przeprowadzeniu analizy aktualnego stanu wiedzy i techniki z obszaru budowy oraz eksploatacji elektrowni fotowoltaicznych. Z kolei cel użyteczny dysertacji został zrealizowany poprzez dokonanie oceny efektywnego sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Cele pracy zostały osiągnięte dzięki skutecznemu wykonaniu następujących zadań szczegółowych:

- 1) przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy i techniki z zakresu cykli istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej oraz koncepcji efektywnego sterowania nimi. Omówiono poszczególne etapy cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych oraz dokonano identyfikacji cech opisujących jakość i efektywność obiektów technicznych OZE. Realizacja tego zadania pozwoliła umiejscowić problematykę badawczą w szerszym kontekście naukowym i technicznym;
- 2) dokonano charakterystyki wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej, stanowiącego studium przypadku. Obiekt badań stanowiły cztery elektrownie fotowoltaiczne o mocy 1 MW opierające się na modułach PV wykonanych w odmiennych technologiach (mono- i polikrystalicznej, amorficznej oraz perowskitowej). To zadanie umożliwiło praktyczne odniesienie zagadnień teoretycznych do konkretnych przykładów technologii odnawialnych;
- 3) opracowano autorską metodykę badań oraz wybrano narzędzia analityczne do jej realizacji. Obejmowała ona ocenę wpływu cykli istnienia na otoczenie (jakość ekosystemów, zdrowie człowieka) wywieranego przez całe elektrownie fotowoltaiczne, jak i przez ich poszczególne tworzywa, materiały, elementy oraz zespoły robocze (konstrukcja wsporcza, panele PV, stacja inwerterowa, instalacja elektryczna, transformator). Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem modeli IMPACT World+ (oddziaływanie na środowisko), IPCC 2021 (emisje gazów cieplarnianych) oraz CED (skumulowane zapotrzebowanie na energię). Uwzględniono dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego – składowanie na wysypisku odpadów lub zastosowanie procesów recyklingu. Dodatkowo przeprowadzono również analizę Monte Carlo oraz opracowano autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności (energetycznej, ekonomicznej, ekologicznej) i współczynnik wydłużenia cyklu istnienia (Φ_{ci}), który posłużył do oceny zmian wartości wskaźników w zależności od przyjętej długości okresu eksploatacji. Realizacja tego zadania umożliwiła przejrzyste przedstawienie podstaw zaplanowanych analiz i przyjętych kryteriów oceny;
- 4) przeprowadzono analizę możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia ocenianego obiektu technicznego w oparciu o autorską metodologię

badan. Zidentyfikowano obszary charakteryzujące się najwyższym poziomem destrukcyjnego oddziaływania na jakość ekosystemów oraz zdrowie człowieka, wymagających wdrożenia odpowiednich działań sterujących, optymalizacyjnych. Porównano ze sobą wpływ na otoczenie (w tym ilość i rodzaj szkodliwych emisji), poziom zapotrzebowania na energię oraz wielkość potencjalnych kosztów środowiskowych ponoszonych na poszczególnych etapach cykli istnienia badanych elektrowni fotowoltaicznych oraz ich tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych. Wykonanie tego zadania pozwoliło na przybliżenie wyników oceny energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, które w efekcie umożliwiły udzielenie odpowiedzi na postawiony problem badawczy oraz weryfikację hipotezy badawczej, poprzez porównanie różnych scenariuszy sterowania i wskazanie najbardziej efektywnych rozwiązań (z uwzględnieniem głównych założeń zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki w obiegu zamkniętym);

- 5) dokonano podsumowania wyników, ostatecznego rozstrzygnięcia problemu badawczego, zweryfikowano hipotezę oraz sformułowano wnioski teoretyczne i praktyczne zalecenia. Realizacja tego zadania umożliwiła krytyczną ocenę uzyskanych rezultatów oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Przeprowadzone w oparciu o autorską metodykę badania umożliwiły ocenę możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej, co w konsekwencji pozwoliło na identyfikację następujących zależności:

- 1) wszystkie analizowane typy elektrowni fotowoltaicznych cechują się najwyższym poziomem szkodliwego oddziaływania na otoczenie w przypadku zagospodarowania w formie składowania ich tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych po zakończeniu eksploatacji, w porównaniu z wariantem obejmującym procesy recyklingu (model IMPACT Word+);
- 2) cykl istnienia elektrowni opartych na modułach monokrystalicznych wiąże się z najwyższymi potencjalnymi kosztami środowiskowymi, obejmującymi zarówno usuwanie szkód powstałych w środowisku, jak i działania prewencyjne ograniczające emisję substancji szkodliwych. Najniższe nakłady finansowe odnotowano natomiast dla cyklu istnienia elektrowni amorficznych. Wdrożenie procesów recyklingu pozwala na istotne zmniejszenie kosztów środowiskowych we wszystkich analizowanych technologiach – o ok. 38% w przypadku elektrowni amorficznych do ok. 47% dla monokrystalicznych (model IMPACT Word+);
- 3) spośród wszystkich ocenianych grup elementów elektrowni fotowoltaicznych, cykl istnienia paneli PV generuje potencjalnie najwyższe koszty środowiskowe, przyjmując maksymalne wartości dla modułów monokrystalicznych, a minimalne – w przypadku amorficznych. Najniższym poziomem oddziaływań środowiskowych, a tym samym najniższymi

- łącznymi potencjalnymi obciążeniami finansowymi, charakteryzuje się cykl istnienia instalacji elektrycznej. Zastosowanie procesów recyklingu prowadzi do istotnej redukcji kosztów środowiskowych w cyklach istnienia wszystkich grup elementów: średnio o ok. 59% w przypadku konstrukcji wsporczych, ok. 68% dla stacji inwerterowych, ok. 67% w odniesieniu do instalacji elektrycznych, ok. 63% dla transformatorów oraz w zakresie od ok. 28% (ogniwa amorficzne) do ok. 45% (ogniwa monokrystaliczne) dla paneli fotowoltaicznych (model IMPACT Word+);
- 4) wśród wszystkich analizowanych obiektów technicznych, najwyższymi potencjalnymi kosztami środowiskowymi wyróżniają się elektrownie oparte na modułach monokrystalicznych. Średnio ok. 65% tych obciążeń stanowią nakłady związane z pogorszeniem stanu zdrowia człowieka. W przypadku elektrowni polikrystalicznych udział ten wynosi ok. 67%, natomiast dla perowskitowych kształtuje się w przedziale od ok. 68% (składowanie) do ok. 74% (recykling). Dla elektrowni opartych na modułach amorficznych wskaźnik ten jest najniższy i wynosi od ok. 59% (składowanie) do ok. 67% (recykling) (model IMPACT Word+);
 - 5) wpływ badanych elektrowni na środowisko został przeanalizowany w dwóch obszarach: zdrowia człowieka oraz jakości ekosystemów. Najwyższy poziom negatywnych oddziaływań w zakresie całkowitego wpływu na zdrowie odnotowano w cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej dla scenariusza składowania tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych po zakończeniu eksploatacji. Najniższym poziomem obciążeń w tym obszarze charakteryzuje się cykl elektrowni amorficznej uwzględniający procesy recyklingu. Zastosowanie zagospodarowania w formie recyklingu pozwala na istotne ograniczenie szkodliwego wpływu na zdrowie – o ok. 35% w przypadku elektrowni polikrystalicznych do ok. 48% dla amorficznych (model IMPACT Word+);
 - 6) we wszystkich analizowanych grupach elementów elektrowni PV najwyższy poziom negatywnych oddziaływań w obszarze zdrowia człowieka generowały panele fotowoltaiczne – przyjmując maksymalne wartości dla technologii monokrystalicznej, a minimalne – dla amorficznej. Zastosowanie procesów recyklingu paneli prowadzi do ograniczenia ich niekorzystnego wpływu w tym obszarze o ok. 32% (polikrystaliczne) do ok. 44% (monokrystaliczne i amorficzne). Najniższy poziom oddziaływań środowiskowych w zakresie zdrowia odnotowano dla cyklu istnienia instalacji elektrycznej (model IMPACT Word+);
 - 7) spośród ocenianych kategorii wpływu, najwyższy poziom negatywnych oddziaływań na zdrowie człowieka odnotowano w obszarach związanych z procesami wpływającymi na dostępność wody oraz emisją substancji powodujących zmiany klimatu w perspektywie długoterminowej. Najbardziej obciążającą środowiskowo technologią w obu kategoriach okazały się elektrownie oparte na modułach monokrystalicznych, natomiast

- wśród poszczególnych komponentów – panele fotowoltaiczne (model IMPACT Word+);
- 8) wśród procesów mających największy wpływ na ograniczenie dostępności wody odnotowano przede wszystkim jej pobór z różnych źródeł (m.in. jezior, rzek) oraz wykorzystanie w procesach chłodzenia turbin podczas wytwarzania energii elektrycznej. Natomiast do substancji w największym stopniu przyczyniających się do zmian klimatu w perspektywie długoterminowej zalicza się emisje: ditlenku węgla, metanu, tlenu diazotu, heksafluorku siarki, tetrafluorometanu (CFC-14), heksafluoroetanu (HFC-116) oraz trifluorometanu (HFC-23) (model IMPACT Word+);
 - 9) w obszarze oddziaływań środowiskowych związanych z jakością ekosystemów, najwyższy poziom całkowitych negatywnych wpływów odnotowano dla elektrowni opartych na modułach monokrystalicznych, natomiast najniższy – dla amorficznych. We wszystkich rozważanych przypadkach zastosowanie recyklingu prowadziło do znaczącego obniżenia wartości oddziaływań na jakość ekosystemów – o ok. 54% dla elektrowni polikrystalicznych do ok. 60% dla amorficznych i perowskitowych (model IMPACT Word+);
 - 10) wśród wszystkich ocenianych grup elementów elektrowni, panele PV generują najwyższy poziom negatywnych oddziaływań w obszarze jakości ekosystemów – przyjmując maksymalne wartości dla technologii monokrystalicznej, z kolei minimalne – dla amorficznej. Wdrożenie procesów recyklingu pozwala na ograniczenie tych oddziaływań o ok. 50% dla paneli polikrystalicznych do ok. 55% dla perowskitowych. Najniższy poziom niekorzystnych wpływów na środowisko odnotowano natomiast w przypadku instalacji elektrycznych (model IMPACT Word+);
 - 11) w odniesieniu do analizowanych kategorii wpływu, najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań na jakość ekosystemów odnotowano w obszarach związanych z emisją substancji o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych oraz substancji przyczyniających się do zmian klimatu w perspektywie długoterminowej. Największe wartości szkodliwego wpływu w obu kategoriach zaobserwowano w przypadku elektrowni opartych na modułach monokrystalicznych, a wśród poszczególnych grup elementów – dla paneli PV (model IMPACT Word+);
 - 12) spośród materiałów konstrukcyjnych obiektów badań, których cykl istnienia wywiera największy wpływ na ekotoksyczność ekosystemów wodnych, wyróżnia się: miedź, aluminium, żelazo, stront, nikiel, cynk, mangan, kadm oraz wanad. Natomiast do związków chemicznych, których obecność w cyklu istnienia elektrowni powoduje największe niekorzystne oddziaływania w obszarze zmian klimatycznych, zalicza się: ditlenek węgla, metan, tlenek diazotu, heksafluorek siarki, tetrafluorometan (CFC-14), heksafluoroetan (HFC-116) i trifluorometan (HFC-23) (model IMPACT Word+);

- 13) najwyższy poziom emisji gazów cieplarnianych dla wszystkich rodzajów elektrowni fotowoltaicznych stwierdzono w scenariuszu składowania odpadów po zakończeniu eksploatacji, który generuje od o ok. 37% do ok. 53% więcej emisji w porównaniu z wariantem obejmującym recykling. Wśród analizowanych obiektów technicznych, największe destrukcyjne oddziaływania cechowały instalacje oparte na modułach monokrystalicznych, natomiast najmniejsze – elektrownie amorficzne (model IPCC 2021);
- 14) cykle istnienia paneli fotowoltaicznych we wszystkich analizowanych elektrowniach generują najwyższy poziom emisji gazów szklarniowych w porównaniu z pozostałymi grupami elementów. W scenariuszu składowania odpadów odpowiadają one za od ok. 83% do ok. 94% całkowitych emisji, natomiast w przypadku recyklingu – za od ok. 95% do ok. 97%. Najniższy poziom emisji GHG odnotowano dla cykli istnienia instalacji elektrycznych wszystkich ocenianych elektrowni (model IPCC 2021);
- 15) analiza kategorii wpływu w ramach modelu IPCC 2021 wskazuje, że eksploatacja surowców kopalnych stanowi dominujące źródło emisji gazów cieplarnianych w cyklach istnienia wszystkich badanych obiektów technicznych. Zastosowanie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego prowadzi do istotnego ograniczenia emisji – o od ok. 40% w przypadku technologii amorficznych do ok. 53% dla perowskitowych (model IPCC 2021);
- 16) wśród rozważanych typów elektrowni PV najwyższy poziom skumulowanego zapotrzebowania na energię odnotowano w przypadku instalacji opartych na modułach monokrystalicznych. Najniższe zapotrzebowanie odnotowano w cyklu istnienia elektrowni amorficznych. Zastosowanie procesów recyklingu prowadzi do istotnego ograniczenia zapotrzebowania na energię – redukcja wynosi o od ok. 28% dla elektrowni perowskitowych do ok. 45% dla monokrystalicznych (model CED);
- 17) największy udział w całkowitym zapotrzebowaniu na energię przypada na panele fotowoltaiczne – w scenariuszu składowania odpowiada on za od ok. 82% w przypadku technologii perowskitowej do ok. 94% dla monokrystalicznej. Zagospodarowanie użytkowe w formie recyklingu pozwala na zmniejszenie zapotrzebowania na energię o od ok. 24% (panele perowskitowe) do ok. 44% (monokrystaliczne). Spośród wszystkich grup elementów elektrowni najniższe zapotrzebowanie wykazuje cykl istnienia konstrukcji wsporczych zakończony recyklingiem ich tworzyw i materiałów (model CED);
- 18) analiza kategorii wpływu w ramach modelu CED wskazuje, że największe zapotrzebowanie na energię w cyklach istnienia badanych elektrowni PV przypada na energię pochodzącą ze źródeł nieodnawialnych, kopalnych. Zastosowanie scenariusza zagospodarowania użytkowego obejmującego procesy recyklingu pozwala na ograniczenie zapotrzebowania w cyklach istnienia poszczególnych obiektów technicznych o od ok. 28% dla

- technologii perowskitowych do ok. 46% dla monokrystalicznych (model CED);
- 19) oddziaływanie elektrowni fotowoltaicznych na zdrowie człowieka w przeliczeniu na 1 m² ogniw PV jest najwyższe dla cyklu istnienia elektrowni opartych na modułach monokrystalicznych, natomiast najniższe – na amorficznych. Wdrożenie recyklingu jako formy zagospodarowania użytkowego pozwala na ograniczenie negatywnego oddziaływania na zdrowie o ok. 35% dla elektrowni polikrystalicznych do ok. 48% dla amorficznych (model IMPACT World+);
 - 20) w przypadku wpływu na jakość ekosystemów w przeliczeniu na 1 m² ogniw PV, elektrownie oparte na modułach monokrystalicznych wyróżniają się najwyższymi wartościami szkodliwego oddziaływania, natomiast najniższe – obserwuje się dla technologii amorficznych. Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na ograniczenie destrukcyjnego wpływu na środowisko o ok. 55% dla elektrowni mono- i polikrystalicznych do ok. 60% dla amorficznych oraz perowskitowych (model IMPACT World+).
 - 21) dla wszystkich badanych elektrowni wyższe koszty środowiskowe w przeliczeniu na 1 m² powierzchni ogniw PV związane są z unikaniem bądź usuwaniem destrukcyjnych oddziaływań w obszarze zdrowia człowieka, w porównaniu do ich wpływu na jakość ekosystemów. Udział tego rodzaju nakładów finansowych kształtuje się w granicach od ok. 59% (technologia amorficzna, składowanie) do ok. 75% kosztów całkowitych (technologia perowskitowa, recykling). Najwyższe koszty całkowite na jednostkę powierzchni stwierdzono dla cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej, natomiast najniższe – w odniesieniu do amorficznej. Zastosowanie procesów recyklingu istotnie redukuje potencjalne obciążenia finansowe, zarówno w obszarze zdrowia człowieka (o ok. 30% dla elektrowni amorficznej do ok. 46% dla monokrystalicznej), jak i jakości ekosystemów (o ok. 46% dla polikrystalicznej do ok. 53% dla perowskitowej) (model IMPACT World+);
 - 22) cykl istnienia elektrowni monokrystalicznych wyróżniał się najwyższą emisją GHG na 1 m² ogniw PV natomiast amorficznych – najniższą. Zastosowanie procesów recyklingu pozwala na istotne ograniczenie emisji gazów szklarniowych. Poziom ich redukcji wynosi od ok. 37% dla technologii amorficznej do ok. 53% dla perowskitowej (model IPCC 2021);
 - 23) maksymalne skumulowane zapotrzebowanie energetyczne na jednostkę powierzchni ogniw PV cechowało cykl istnienia elektrowni monokrystalicznych, a minimalne – amorficznych. Wdrożenie procesów recyklingu pozwala na istotne obniżenie zużycia energii w porównaniu ze składowaniem, a redukcja ta mieści się w przedziale od ok. 28% dla elektrowni perowskitowych do ok. 46% dla monokrystalicznych (model CED);
 - 24) elektrownie amorficzne charakteryzują się najwyższym, a perowskitowe – najniższym niepożądanym oddziaływaniem na zdrowie człowieka

- w przeliczeniu na 1 MWh wyprodukowanej przez nie energii elektrycznej (w perspektywie 25 lat eksploatacji). Zastosowanie recyklingu pozwala jednak na istotne ograniczenie negatywnego wpływu na zdrowie względem scenariusza składowania, a procentowa redukcja wynosi od ok. 35% (elektrownie polikrystaliczne) do ok. 48% (amorficzne) (model IMPACT World+);
- 25) w zakresie oddziaływania na jakość ekosystemów, najwyższy poziom destrukcyjnych oddziaływań w odniesieniu do 1 MWh wyprodukowanej energii odnawialnej cechuje cykl istnienia elektrowni amorficznej, natomiast najniższy – polikrystalicznej i perowskitowej. Procentowa redukcja niepożądanego wpływu na jakość ekosystemów w wyniku zastosowania zagospodarowania w formie recyklingu kształtuje się w przedziale od ok. 55% (elektrownie mono- i polikrystaliczne) do ok. 60% (amorficzne i perowskitowe) (model IMPACT World+);
- 26) dla wszystkich analizowanych typów elektrowni najwyższe koszty środowiskowe w odniesieniu do 1 MWh wyprodukowanej energii, związane są z zapobieganiem bądź eliminowaniem negatywnych skutków oddziaływania cyklu istnienia na zdrowie człowieka i przewyższają koszty odnoszące się do jakości ekosystemów. Udział tych obciążeń w wartości całkowitej waha się od ok. 60% (technologia amorficzna, scenariusz składowania) do ok. 76% (technologia perowskitowa, scenariusz recyklingu). Najwyższymi całkowitymi kosztami środowiskowymi charakteryzuje się cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej, z kolei najniższe wartości odnotowano dla elektrowni perowskitowej. Wdrożenie procesów recyklingu przyczynia się do znaczącego ograniczenia nakładów finansowych – zarówno w obszarze oddziaływania na zdrowie człowieka (od ok. 54% w przypadku technologii monokrystalicznej do ok. 70% dla amorficznej), jak i w odniesieniu do jakości ekosystemów (od ok. 50% dla amorficznej do ok. 54% dla polikrystalicznej) (model IMPACT World+);
- 27) recykling prowadzi do istotnego obniżenia emisji gazów cieplarnianych we wszystkich ocenianych przypadkach. W odniesieniu do jednostki wyprodukowanej energii, najwyższe wartości emisji GHG występują dla technologii amorficznej, natomiast najniższe dla perowskitowej. Analiza porównawcza obu scenariuszy zagospodarowania jednoznacznie wskazuje na znaczną redukcję emisji gazów szklarniowych w wyniku wdrożenia zagospodarowania w formie recyklingu, mieszczącą się w przedziale od ok. 37% (technologia amorficzna) do ok. 53% (perowskitowa) (model IPCC 2021);
- 28) w przeliczeniu na 1 MWh ze źródła odnawialnego, zastosowanie procesów recyklingu prowadzi do znaczącego obniżenia zapotrzebowania na energię, szczególnie w przypadku elektrowni monokrystalicznej. Najniższe zapotrzebowanie występuje natomiast dla technologii amorficznej. Recykling pozwala zatem na ograniczenie całkowitego zużycia energii

- w przedziale od o ok. 28% (elektrownie amorficzne) do ok. 46% (monokrystaliczne) (model CED);
- 29) wyniki analizy Monte Carlo jednoznacznie wskazują, że cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej charakteryzuje się wyraźnie większym negatywnym oddziaływaniem na środowisko niż elektrowni amorficznej. Ma to miejsce we wszystkich kategoriach wpływu uwzględnionych w modelu IMPACT World+, zarówno dla scenariusza składowania, jak i recyklingu. Technologia monokrystaliczna odznacza się także istotnie silniejszym destrukcyjnym wpływem w obszarze zdrowia człowieka oraz jakości ekosystemów. Analogiczne zależności potwierdzono w badaniach przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu IPCC 2021, gdzie dla wszystkich rozważanych kategorii odnotowano wyraźnie wyższy poziom emisji gazów cieplarnianych dla cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej w porównaniu z amorficzną. Tożsamą tendencję ujawniła także ocena z zastosowaniem modelu CED, w ramach której technologię monokrystaliczną cechuje wyższe skumulowane zapotrzebowanie na energię we wszystkich kategoriach wpływu (analiza Monte Carlo);
- 30) rezultaty analizy Monte Carlo wyraźnie potwierdzają, że cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej wyróżnia się zdecydowanie silniejszym niekorzystnym oddziaływaniem na otoczenie w porównaniu do elektrowni perowskitowej. Zależność tą odnotowano dla wszystkich kategorii wpływu modelu IMPACT World+, niezależnie od przyjętego scenariusza końcowego zagospodarowania (składowanie lub recykling). Technologię monokrystaliczną cechuje również wyraźnie większy negatywny efekt w zakresie zdrowia człowieka oraz jakości ekosystemów. Podobne wyniki przyniosły analizy wykonane w oparciu o model IPCC 2021, w których odnotowano jednoznacznie wyższy poziom emisji gazów szklarniowych dla cyklu istnienia elektrowni monokrystalicznej względem perowskitowej. Analogiczną zależność ujawniła także ocena oparta na modelu CED, gdzie w każdym z rozważanych obszarów technologia monokrystaliczna charakteryzowała się większym skumulowanym zapotrzebowaniem na energię (analiza Monte Carlo);
- 31) otrzymane wartości autorskich wskaźników zrównoważonej efektywności (energetycznej, ekonomicznej, ekologicznej) dla cykli istnienia analizowanych elektrowni fotowoltaicznych jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie recyklingu prowadzi do istotnej poprawy wszystkich rozważanych parametrów (w niektórych przypadkach niemal dwukrotnej). Odmienne efekty przynosi scenariusz składowania, skutkujący wyraźnym obniżeniem poziomu efektywności, co dowodzi, iż sposób zagospodarowania poużytkowego stanowi istotny czynnik decydujący o stopniu zrównoważenia technologii PV (autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności);
- 32) elektrownię perowskitową cechują najwyższe wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności energetycznej (ZE_{en}), co wskazuje na

szczególnie korzystny bilans energetyczny jej cyklu istnienia. W przypadku technologii polikrystalicznej najwyższe wartości wskaźnika zrównoważonej efektywności ekologicznej (ZE_{ec}) uzyskano dla scenariusza zagospodarowania w formie recyklingu, co potwierdza znaczący potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych. Technologie monokrystaliczne odznaczają się wysokimi wartościami badanych parametrów w każdym z analizowanych wariantów, przy czym szczególnie wyraźny wzrost wartości wskaźników zaobserwowano w ramach analiz obejmujących wydłużenie ich cykli istnienia. Technologia amorficzna, ze względu na najniższe wartości uzyskanych wskaźników, nie stanowi korzystnego rozwiązania zarówno w aspekcie energetycznym, jak i ekonomicznym oraz ekologicznym (autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności);

- 33) przeprowadzone analizy dowodzą, że wydłużenie czasu eksploatacji elektrowni PV prowadzi do poprawy ich efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej. W największym stopniu efekt ten ujawnia się w przypadku technologii polikrystalicznej i monokrystalicznej, gdzie wartości wskaźników rosną o ponad 40% przy wydłużeniu cyklu z 25 do 50 lat. Elektrownie perowskitowe, cechując się kolejno najwyższe wartości absolutne wskaźników, przy jednocześnie mniejszej względnej dynamice wzrostu (autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności);
- 34) biorąc pod uwagę wszystkie trzy autorskie wskaźniki efektywności, największy potencjał zrównoważonego rozwoju wykazują technologie perowskitowe, które łączą korzystny bilans energetyczny z wysoką efektywnością ekologiczną i akceptowalną opłacalnością ekonomiczną. Elektrownie amorficzne zajmują ostatnie miejsce w hierarchii efektywności, co czyni je najmniej perspektywicznym rozwiązaniem w kontekście długoterminowego rozwoju (autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności).

W świetle przeprowadzonych analiz zauważono, że cykle istnienia elektrowni amorficznych oraz perowskitowych najlepiej odpowiadają kluczowym zasadom zrównoważonego rozwoju w porównaniu do pozostałych badanych technologii. We wszystkich cyklach istnienia ocenianych obiektów technicznych energetyki odnawialnej koniecznym jest jednak wdrożenie działań sterujących, mających na celu minimalizację ich negatywnego wpływu przy jednoczesnym maksymalizowaniu konstruktywnych efektów oddziaływań na otoczenie.

W odpowiedzi na postawiony problem badawczy należy stwierdzić, że sterowanie cyklami istnienia elektrowni fotowoltaicznych powinno opierać się na całościowym, systemowym podejściu, które uwzględnia wszystkie fazy ich cykli istnienia. W ramach tego podejścia istotnym jest zachowanie głównych założeń eko-projektowania, które minimalizuje zużycie surowców i energii, ogranicza emisje zanieczyszczeń oraz zwiększają efektywność procesów recyklingu i możliwość ponownego wykorzystania elementów. Sterowanie cyklem istnienia powinno obejmować także optymalizację procesów eksploatacyjnych w celu zwiększenia efektywności energetycznej, trwałości i niezawodności obiektów

technicznych, a jednocześnie minimalizować negatywne oddziaływania na środowisko i zdrowie człowieka. W kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym szczególne znaczenie ma tworzenie systemów umożliwiających efektywny odzysk surowców wtórnych, ponowne wykorzystanie elementów konstrukcyjnych oraz integrację działań serwisowych i utylizacyjnych z planowaniem inwestycyjnym. Tego rodzaju kompleksowe sterowanie cyklem istnienia elektrowni fotowoltaicznych nie tylko wspiera realizację głównych założeń zrównoważonego rozwoju, lecz również przyczynia się do minimalizacji śladu środowiskowego sektora energetyki odnawialnej oraz zwiększenia jego konkurencyjności ekonomicznej.

Otrzymane wyniki badań potwierdzają postawioną hipotezę, że zastosowanie zintegrowanych metod sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej pozwala na jednoczesne obniżenie zapotrzebowania na energię, wielkości ponoszonych kosztów środowiskowych, jak również redukcję obciążeń ekologicznych, przy jednoczesnym zachowaniu głównych założeń zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki w obiegu (możliwie) zamkniętym. Autorska metodologia oceny możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej oraz opracowane wskaźniki zrównoważonej efektywności cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, mogą stać się narzędziami wspierającymi realizację założeń zrównoważonego rozwoju w obszarze inżynierii mechanicznej. Umożliwiają one systematyczne doskonalenie konstrukcji, procesów wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego elektrowni fotowoltaicznych, wpisując się we współczesne podejście do oceny jakości, zwiększania efektywności oraz innowacyjności maszyn i urządzeń.

Wnioski o charakterze metodycznym

Postępowanie analityczne przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej umożliwiło również sformułowanie wniosków o charakterze metodycznym:

- 1) realizacja przyjętego celu badawczego wykazała zasadność zaproponowanej, autorskiej metodologii analiz. Zastosowana metodyka została nie tylko potwierdzona jako prawidłowa z formalnego punktu widzenia, ale także uznana za odpowiednio dopasowaną do przyjętych założeń badawczych, co czyni ją użytecznym narzędziem w rozwiązywaniu postawionych problemów z zakresu inżynierii mechanicznej;
- 2) proponowana metodologia umożliwiła dokonanie szczegółowej identyfikacji wpływów wybranych technologii elektrowni fotowoltaicznych na otoczenie. Analiza obejmowała zarówno pozytywne aspekty ich oddziaływania, jak i potencjalne negatywne konsekwencje, rozszerzając te badania na całość cyklu istnienia obiektów technicznych, a także na jego konkretne etapy. Takie podejście pozwala na pełniejsze zrozumienie technologicznych i środowiskowych uwarunkowań budowy i eksploatacji maszyn oraz urządzeń energetyki odnawialnej;

- 3) metodyka analiz przyjęta w pracy umożliwia kompleksową i wielowymiarową ocenę efektywności sterowania cyklem istnienia wybranych obiektów technicznych odnawialnych źródeł energii. Może ona funkcjonować jako istotny mechanizm wspierania transformacji sektora OZE zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju oraz koncepcją gospodarki o (możliwie) zamkniętym obiegu zasobów. Dzięki temu metodologia ta staje się narzędziem integrującym podejścia energetyczne, ekonomiczne, ekologiczne oraz techniczne w dążeniu do neutralności klimatycznej;
- 4) dzięki zgromadzeniu rozległego zestawu danych jakościowych i ilościowych dotyczących badanych obiektów technicznych, zapewniona została pełna wykonalność przeprowadzenia ocen zgodnie z przyjętymi założeniami badawczymi. Prawidłowo zebrane dane stanowią fundament dla rzetelnego i obiektywnego analizowania oddziaływań na otoczenie oraz dla projektowania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych obiektów technicznych;
- 5) opracowana metodologia jest także uniwersalna w zastosowaniu, sprawdzając się zarówno na poziomie poszczególnych procesów czy etapów, jak i w analizie pełnego cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych. Tak szerokie możliwości praktyczne pozwalają na skuteczne wdrażanie zasad eko-projektowania, które odgrywają coraz ważniejszą rolę w nowoczesnym podejściu do budowy i eksploatacji obiektów technicznych;
- 6) dzięki opracowanym narzędziom analitycznym możliwe jest także tworzenie skutecznych strategii na rzecz minimalizacji negatywnego wpływu elektrowni fotowoltaicznych na otoczenie oraz maksymalizacji pozytywnych efektów związanych z ich wytwarzaniem, eksploatacją i zagospodarowaniem użytkowym. W rezultacie, zaproponowana w niniejszej pracy metodologia otwiera nowe perspektywy dla rozwijania strategicznych działań zmierzających ku bardziej efektywnej energetycznie, ekonomicznie i ekologicznie przyszłości energetyki odnawialnej.

Wnioski o charakterze aplikacyjnym

Wyniki przeprowadzonych badań mogą znaleźć istotne zastosowanie praktyczne, co stanowi podstawę sformułowania wniosków o charakterze aplikacyjnym. Uzyskane rezultaty mogą znaleźć zastosowanie w działalności podmiotów zajmujących się projektowaniem, wytwarzaniem, eksploatacją oraz zagospodarowaniem użytkowym tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych wykorzystywanych w maszynach oraz urządzeniach odnawialnych źródeł energii, a także w jednostkach odpowiedzialnych za rozwój i utrzymanie infrastruktury energetycznej. Istotnym kierunkiem wykorzystania wyników jest również ich potencjalna komercjalizacja, np. w formie usług doradczych adresowanych do przedsiębiorstw dążących do podniesienia swojej konkurencyjności rynkowej. Działania tego rodzaju mogą obejmować wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technicznych i organizacyjnych, które charakteryzują się wyższą efektywnością energetyczną, ekonomiczną oraz ekologiczną,

a jednocześnie są zgodne z ideą zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym. Prostota i uniwersalność zaproponowanej procedury sprzyja jej upowszechnianiu także w sektorze małych oraz średnich przedsiębiorstw, co zwiększa dostępność tego typu usług oraz wzmacnia pozytywny wpływ na gospodarkę.

Analiza konstruktywnych i destrukcyjnych oddziaływań w cyklu istnienia wybranych typów elektrowni fotowoltaicznych umożliwiła sformułowanie rekomendacji ukierunkowanych na minimalizację efektów negatywnych i wzmocnienie efektów pozytywnych, odnoszących się zarówno do ochrony zdrowia człowieka, jakości środowiska naturalnego, jak i problematyki ograniczonych zasobów surowców. W tym kontekście, w ramach działań sprzyjających zrównoważonemu oraz proekologicznemu rozwojowi sektora obiektów technicznych energetyki odnawialnej, zaleca się w szczególności:

- 1) zmniejszenie udziału w rynku elektrowni opartych na modułach mono- i polikrystalicznych na rzecz technologii perowskitowych, w obszarze których trwają nieustanne prace w zakresie zwiększenia efektywności konwersji energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną;
- 2) wprowadzenie działań sterujących w zakresie ograniczania energo- i materiałochłonności procesów wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania poużytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznych;
- 3) intensyfikację badań nad metodami odzysku i recyklingu tworzyw oraz materiałów maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej w sposób efektywny, opłacalny i przyjazny dla środowiska;
- 4) modyfikację konstrukcji elementów i zespołów roboczych na możliwie modułową w celu ułatwienia demontażu oraz identyfikacji materiałów, w kierunku usprawniania procesów recyklingu;
- 5) rozwój nowych tworzyw i materiałów charakteryzujących się wyższą efektywnością energetyczną, ekonomiczną oraz ekologiczną przy zachowaniu wymaganych parametrów użytkowych;
- 6) redukcję materiałochłonności poprzez zmniejszenie wykorzystania stali, aluminium, betonu i polimerów, przy równoczesnym wdrażaniu materiałów niskoemisyjnych, takich jak kompozyty, stal niskowęglowa czy biopolimery;
- 7) zwiększenie udziału wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu oraz niskoemisyjnych w kolejnych cyklach istnienia obiektów technicznych;
- 8) wydłużenie trwałości elementów np. poprzez wykorzystanie nowoczesnych powłok ochronnych i materiałów bardziej odpornych na czynniki atmosferyczne;
- 9) poprawę efektywności energetycznej procesów wytwarzania i eksploatacji, m.in. poprzez ograniczenie strat w inwerterach oraz stosowanie lekkich konstrukcji montażowych;
- 10) opracowywanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych elementów i zespołów roboczych z uwzględnieniem faktu, że etap wytwarzania (szczególnie paneli PV) generuje największe obciążenia dla otoczenia;

- 11) zwiększenie wykorzystania energii odnawialnej w całym cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych, szczególnie w najbardziej energochłonnych procesach wytwarzania i zagospodarowania poużytkowego;
- 12) minimalizację ingerencji w ekosystemy poprzez projektowanie fundamentów i systemów wsporczych o ograniczonym wpływie na glebę, wody gruntowe oraz krajobraz;
- 13) projektowanie w myśl zasad gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym, umożliwiające ponowne, efektywne energetycznie, ekonomicznie i energetycznie, użycie elementów konstrukcyjnych po zakończeniu eksploatacji;
- 14) upowszechnianie badań nad całościowym wpływem obiektów technicznych energetyki odnawialnej na otoczenie w perspektywie ich cykli istnienia.

Postępujący rozwój technologiczny oraz wzrastająca świadomość zagrożeń antropogenicznych prowadzą do coraz powszechniejszej integracji aspektów środowiskowych w modernizacji sektora energetycznego i przemysłowego. Współcześnie właściwości ekologiczne, obok jakości i bezpieczeństwa, stanowią istotny wyznacznik rozwoju technologicznego. W celu ograniczenia negatywnego oddziaływania elektrowni fotowoltaicznych podejmowane są prace nad innowacyjnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi obejmującymi m.in.: redukcję materiałochłonności systemów wsporczych, wprowadzanie konstrukcji modułowych i demontowalnych, stosowanie materiałów recyklingowanych i niskoemisyjnych, integrację instalacji z otoczeniem przyrodniczym, wydłużanie trwałości komponentów czy konstruowanie zgodne z zasadami eko-projektowania. Zastosowanie technologii opartych na modułach perowskitowych pozwala dodatkowo na istotne ograniczenie emisji substancji szkodliwych dla zdrowia oraz ekosystemów.

Oddziaływanie obiektów technicznych energetyki odnawialnej na otoczenie charakteryzuje się wysokim stopniem złożoności, co wymaga stosowania wieloaspektowych metod oceny. Kluczowe znaczenie ma uwzględnienie w analizie pełnego cyklu istnienia maszyn i urządzeń – od etapu wytwarzania, poprzez eksploatację, aż po zagospodarowanie poużytkowe. Odpowiedzią na te potrzeby jest autorska metodyka zaprezentowana w niniejszej rozprawie, która umożliwia ilościową ocenę możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej. Do jej zalet można zaliczyć m.in. zastosowanie kwantyfikacji uzyskiwanych wyników. Zrealizowane badania traktowały elektrownie fotowoltaiczne nie jako wyizolowane obiekty, lecz elementy większego systemu obejmującego zakłady produkcyjne, materiały eksploatacyjne, cykle energetyczne, procesy zagospodarowania poużytkowego oraz inne, powiązane z nimi elementy wpływające na otoczenie. Dodatkowo zaproponowana metoda łączy praktyczną użyteczność z możliwością wypełnienia luki pomiędzy ogólnymi raportami LCA a szczegółowymi analizami przygotowywanymi na potrzeby dużych przedsiębiorstw. Stanowiła ona również punkt wyjścia do opracowania praktycznych wytycznych oraz dobrych praktyk

w zakresie zrównoważonego rozwoju sektora maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej.

Kierunki dalszych prac i badań

Na podstawie wykonanej oceny możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, w zakresie prowadzenia dalszych prac i badań postuluje się:

- 1) pogłębienie analizy rzeczywistych scenariuszy przebiegu poszczególnych etapów cyklu istnienia różnych (w tym innych niż rozważane) typów elektrowni fotowoltaicznych oraz ich tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych, z uwzględnieniem szerszego spektrum scenariuszy zagospodarowania użytkowego;
- 2) rozbudowanie informatycznych baz danych dotyczących procesów wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego specyficznych tworzyw, materiałów oraz elementów wchodzących w skład zespołów roboczych elektrowni fotowoltaicznych, ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań lokalnych;
- 3) stworzenie nowych procedur umożliwiających szersze praktyczne zastosowanie wyników oceny możliwości efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej w procesach decyzyjnych, ukierunkowanych na redukcję negatywnych oraz intensyfikację pozytywnych oddziaływań na zdrowie człowieka, stan środowiska oraz dostępność zasobów surowców;
- 4) poszerzenie zakresu analiz o inne typy obiektów technicznych energetyki odnawialnej, np. elektrownie wiatrowe czy pompy ciepła;
- 5) rozwijanie metod oceny ryzyka środowiskowego i technologicznego w kontekście stosowania nowych materiałów w modułach PV, w szczególności związanego z toksycznością i możliwością migracji substancji niebezpiecznych w całym cyklu istnienia;
- 6) prowadzenie badań nad cyfryzacją i wykorzystaniem technologii sztucznej inteligencji do monitorowania cyklu istnienia elektrowni PV, przewidywania degradacji elementów konstrukcyjnych oraz optymalizacji procesów recyklingu;
- 7) dokonanie pogłębionej analizy potencjału gospodarki obiegu (możliwie) zamkniętego w sektorze fotowoltaicznym poprzez opracowanie nowych modeli opartych na ponownym wykorzystaniu komponentów, usługach typu *product-as-a-service* (dostęp do funkcjonalności obiektu jako usługi) czy systemach depozytowych dla modułów PV;
- 8) prowadzenie badań interdyscyplinarnych nad integracją elektrowni fotowoltaicznych z przestrzenią rolną i miejską obejmujących analizę synergii pomiędzy produkcją energii, funkcjami rolniczymi (agrofotowoltaika), ochroną bioróżnorodności oraz urbanistyką zrównoważoną.

Dobór rodzaju technologii wykorzystanej w elektrowni fotowoltaicznej powinien być determinowany wieloaspektową analizą obejmującą zarówno kryteria techniczne, jak i energetyczne, ekonomiczne oraz ekologiczne. Z perspektywy technicznej i energetycznej kluczowe znaczenie mają parametry sprawności konwersji energii, stabilność pracy w zróżnicowanych warunkach klimatycznych, odporność na degradację czy przewidywana trwałość eksploatacyjna. Równocześnie istotnym czynnikiem jest wpływ środowiskowy związany z całym cyklem istnienia obiektu technicznego – począwszy od energo- i materiałochłonności procesów wytwarzania, poprzez oddziaływania w fazie eksploatacji, aż po możliwości zagospodarowania poużytkowego. Z punktu widzenia gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym szczególnie istotna staje się podatność elementów i zespołów roboczych na odzysk surowców wtórnych oraz ich efektywna integracja z istniejącymi technologiami recyklingu. Decydujące znaczenie mają również uwarunkowania ekonomiczne i społeczne, w tym relacja koszt-efekt, dostępność surowców krytycznych, a także zgodność ze strategią zrównoważonego rozwoju. Kompleksowa ocena uwzględniająca powyższe czynniki pozwala na racjonalny wybór technologii fotowoltaicznej, który sprzyja nie tylko maksymalizacji korzyści energetycznych, lecz także minimalizacji negatywnego wpływu na jakość środowiska i zdrowie człowieka.

Poszukiwanie optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego elektrowni fotowoltaicznej powinno zatem uwzględniać zintegrowane podejście, obejmujące zarówno aspekty techniczne, energetyczne, ekonomiczno-społeczne, jak i środowiskowe. Z perspektywy inżynierskiej kluczowe znaczenie ma m.in. zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości i stabilności konstrukcji nośnych, odporności na obciążenia dynamiczne oraz czynniki atmosferyczne czy efektywna integracja z systemami energetycznymi. Równolegle należy analizować oddziaływanie elektrowni na środowisko w całym cyklu jej istnienia, ze szczególnym naciskiem na minimalizację energo- i materiałochłonności procesów produkcji, ograniczanie zajmowanego terenu, a także możliwości demontażu i zagospodarowania zużytych elementów zgodnie z założeniami gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym. Ważnym kryterium jest także opłacalność ekonomiczna, rozumiana nie tylko jako koszt inwestycyjny, lecz również jako długoterminowa efektywność eksploatacyjna oraz potencjał ograniczenia kosztów środowiskowych oraz społecznych. Kompleksowa ocena powyższych czynników umożliwia wybór rozwiązania konstrukcyjnego, które łączy wysoką niezawodność techniczną z niskim śladem środowiskowym i racjonalnością ekonomiczną, wspierając tym samym realizację założeń zrównoważonego rozwoju.

Bibliografia

- [1] Abbass K., Zeeshan Qasim M., Song H., Murshed M., 2022. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*. 29(28). 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>.
- [2] Adamczyk W., 2004. *Ekologia wyrobów. Jakość Cykl Życia. Projektowanie*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa. ISBN: 8320815061.
- [3] Akinyele D. O., Rayudu R. K., Nair N. K., 2017. Life cycle impact assessment of photovoltaic power generation from crystalline silicon-based solar modules in Nigeria. *Renew. Energy*. 101. 537-549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.017>.
- [4] Alsema E. A., 2012. Energy pay-back time and CO₂ emissions of PV systems. In *Practical Handbook of Photovoltaics*. 1097-1117. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(200001/02\)8:1%3C17::AID-PIP295%3E3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1%3C17::AID-PIP295%3E3.0.CO;2-C).
- [5] Azzopardi B., Mutale J., 2010. Life cycle analysis for future photovoltaic systems using hybrid solar cells. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14(3). 1130-1134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.016>.
- [6] Bałdowska-Witos P., Piotrowska K., Kruszelnicka W., Błaszczak M., Tomporowski A., Opielak M., Kasner R., 2020. Managing the Uncertainty and Accuracy of Life Cycle Assessment Results for the Process of Beverage Bottle Moulding. *Polymers*. 12 (6). 1320-1346. <https://doi.org/10.3390/polym12061320>.
- [7] Bałdowska-Witos P., Piasecka I., Flizikowski J., Tomporowski A., Idzikowski A., Zawada M., 2021. Life Cycle Assessment of Two Alternative Plastics for Bottle Production. *Materials*. 14(16). 4552. <https://doi.org/10.3390/ma14164552>.
- [8] Bałdowska-Witos P., Doerffer K., Pysz M., Doerffer P., Tomporowski A., Opielak M., 2021. Manufacturing and Recycling Impact on Environmental Life Cycle Assessment of Innovative Wind Power Plant Part 2/2. *Materials*. 14(1). 204. <https://doi.org/10.3390/ma14010204>
- [9] Baran J., 2019. Life cycle approach-based methods – overview, applications and implementation barriers. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie. Politechnika Śląska*. 136. 9-23. <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2019.136.1>.
- [10] Batic M., Stanojevic M., Vranes S., 2017. *Renewable Energy Technologies*. Springer-Verlag. Londyn. ISBN: 9781447162773.
- [11] Beccali M., Cellura M., Finocchiaro P., Guarino F., Longo S., Nocke B., 2012. Life Cycle Assessment performance comparison of small solar thermal cooling systems with conventional plants assisted with photovoltaics. *Energy Procedia*. 30. 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.101>.
- [12] Benda V., 2020. Including New Technologies (Thin Film) and a Discussion on Module Efficiency. *Photovoltaics*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00018-9>.
- [13] Benoît C., 2014. Data for social LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 19. 261-265. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0644-7>.
- [14] Berger W., Simon F. G., Weimann K., Alsema E. A., 2010. A novel approach for the recycling of thin film photovoltaic modules. *Resour. Conserv. Recycl.* 54. 711-718. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.001>.

- [15] Bhati N., Khaja Nazeeruddin M., Maréchal F., 2024. Environmental impacts as the key objectives for perovskite solar cells optimization. *Energy*. 299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131492>.
- [16] Bieliński K., Flizikowski J. B., 1999. Projektowanie środowiskowe procesorów energii. Wyd. ATR. Bydgoszcz. ISBN: 8387274372.
- [17] Bontempi E., 2017. *Raw Materials Substitution Sustainability*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60831-0>.
- [18] Borkowski S., Selejdak J., Salamo S., 2006. Efektywność eksploatacji maszyn i urządzeń. Wydaw. Wyd. Zarządzania PCz. Częstochowa. ISBN: 8388469142.
- [19] Bravi M., Parisi M. L., Tiezzi E., Basosi R., 2011. Life cycle assessment of a micro morph photovoltaic system. *Energy*. 36(7). 4297-4306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.012>.
- [20] Cécile B., Manuele M., Patouillard L. i inni, 2019. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 24(9). 1653-1674. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01583-0>.
- [21] Cempel C., 2008. Teoria i inżynieria systemów. Zasady i zastosowania myślenia systemowego. ITE-PIB. Radom. ISBN: 9788372047113.
- [22] Cempel M., Nikel G.J., 2006. A Review of Its Sources and Environmental Toxicology. *Polish Journal of Environmental Studies*. 15(3). 375-382.
- [23] Chatzisideris M. D., Espinosa N., Laurent A., Krebs F. 2016. Ecodesign perspectives of thinfilm photovoltaic technologies: a review of life cycle assessment studies. *Sol Energy Mater Sol Cell*. 156. 2-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.048>.
- [24] Chomczyk W., 2013. Podstawy konstrukcji maszyn. WNT. Warszawa. ISBN: 9788379261239.
- [25] Chowdhury M. S., Rahman K. S., Chowdhury T., Nuthammachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M., Tiong S. K., Sopian K., Amin N., 2020. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Rev*. 27. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.
- [26] Chybowski L., 2014. Ważność elementów w strukturze złożonych systemów technicznych. ITE-PIB. Radom. ISBN: 9788377893098.
- [27] Ciambrone D. F., 2018. *Environmental Life Cycle Analysis*, CRC Press. ISBN: 9780203757031.
- [28] Cullen J. T., Maldonado M. T., 2013. *Biogeochemistry of Cadmium and Its Re-lease to the Environment*. Springer. Dordrecht. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_2.
- [29] Darren M., Bagnall D., Boreland M., 2008. Photovoltaic technologies. *Energy Policy*. 36(12). 4390-4396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.070>.
- [30] De Schryver A. M., Brakkee K. W., Goedkoop M., Huijb, 2009. Characterization factors for global warming in life cycle assessment based on damages to humans and ecosystems. *Environmental Science and Technology*. 43(6). 1689-1695. <http://dx.doi.org/10.1021/es800456m>.
- [31] Demin S., Barbie E., Heistrene L., Belikov J., Petlenkov E., Levron Y., Baimel D., 2024. Implementation of Series Resonance-Based Fault Current Limiter for Enhanced

- Transient Stability of Grid-Connected Photovoltaic Farm. *Electronics*. 13(15). <https://doi.org/10.3390/electronics13152987>.
- [32] Deng R., Chang N. L., Ouyang Z., Chong C. M., 2019. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renew. Sustain. Energy Re.* 109. 532-550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>.
- [33] Di Sabatino M., Stokkan G., 2013. Defect generation, advanced crystallization, and characterization methods for high-quality solar-cell silicon. *Appl. Mater. Sci.* 210. 641-648. <https://doi.org/10.1002/pssa.201200639>.
- [34] Dicks A. P., Hent A., 2015. *An introduction to Life Cycle Assessment*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10500-0_5.
- [35] Dietrich M., 2017. *Podstawy konstrukcji maszyn*. PWN. Warszawa. ISBN: 9788301191177.
- [36] Domy C A., 2001. *Trace Elements in Terrestrial Environments*. Springer. Nowy Jork. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>.
- [37] Dones R., Frischknecht R., 2018. Life cycle assessment of photovoltaic systems: Results of Swiss studies on energy chains. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 6(2). 117-125. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.614>.
- [38] Downarowicz O., 2005. *System eksploatacji. Zarządzanie zasobami techniki*. ITE-PIB. Gdańsk-Radom. ISBN: 8372040060.
- [39] Drelichowski L., Bojar W., Żółtowski M., 2012. *Elementy zarządzania eksploatacją maszyn*. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISSN: 2451-4543.
- [40] Dubey S., Jadhav N. Y., Zakirova i B., 2013. Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia*. 33. 322-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073>.
- [41] Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K. Adler A., 2014. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate change 2014: mitigation of climate change. Cambridge. ISBN: 978-1-107-05821-7.
- [42] Espinosa N., García-Valverde R., Urbina A., Lenzenmann F., Manceau M., Angmo D., Krebs F.C., 2012. Life cycle assessment of ITO-free flexible polymer solar cells prepared by roll-to-roll coating and printing. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 97. 3-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.048>.
- [43] European commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2011. *International reference life cycle data system (ILCD) handbook—recommendations for life cycle impact Assessment in the European context*, 1st edn. Luxembourg. ISBN: 9789279174513.
- [44] European Commission, 2011. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD)*. Publication Office of the European Union. Luxembourg. ISBN: 9789279158551.
- [45] European Parliament and Council of the European, 2012. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council. 4 July 2012 on waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Text with EEA Relevance. Bruksela.
- [46] European Parliament and Council of the European, 2017. CEI EN 50625-2-4:2017; Collection, Logistics & Treatment Requirements for WEEE, Part 2: Treatment Requirements for Photovoltaic Panels. Bruksela.

- [47] Farrell C. C., Osman A. I., Saad M., Doherty R., Zhang X., Murphy A., Harrison J., Vennard A. S., Kumaravel V., Al-Muhtaseb A. H., 2020. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renew.Sustain. Energy Rev.* 128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109911>.
- [48] Felis J., Jaworowski H., Cieřlik J., 2008. *Teoria maszyn i mechanizmów. Częć I. Analiza mechanizmów*. Wyd. AGH. Kraków. ISBN: 9788374641814.
- [49] Ficoń K., 2015. Podejście ontologiczno-inżynierskie w ogólnej teorii systemów. *Systemy Logistyczne Wojsk.* 43. 19-35. <http://dx.doi.org/10.5604/01.3001.0012.7169>.
- [50] Fidali M., 2020. *Metody diagnostyki maszyn i urządzeń w predykcijnym utrzymaniu ruchu*. Elamed Media Group. Katowice. ISBN: 9788365883094.
- [51] Finkbeiner M., 2016. *Special Types of Life Cycle Assessment*. Springer. Dordrecht. ISBN: 978-94-017-7610-3.
- [52] Finkbeiner M., Inaba A., Tan R. B., Christiansen K., Klüppel H. J., 2006. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 11(2). 80-85. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.02.002>.
- [53] Flizikowski B.J., Bieliński K., 2000. *Projektowanie środowiskowych procesorów energii*. Wyd. ATR. Bydgoszcz. ISBN: 83-87274-37-2.
- [54] Flizikowski B.J., 2002. *Rozprawa o konstrukcji*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytut technologii Eksploatacji. Bydgoszcz. ISBN 978-83-7204-280-4.
- [55] Flizikowski J. F., Bieliński K., 2013. *Technology and energy sources monitoring: control, efficiency and optimization*. IGI Global. USA. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-2664-5>.
- [56] Förstner U., Wittmann G. T., 2012. *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer-Verlag. Berlin – Heidelberg – Nowy Jork – Tokio. ISBN: 9783540128564.
- [57] Franco M. A., Groesser S. N., 2021. A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy. *Sustainability.* 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179615>.
- [58] Frankl P., Masini A., Gamberale M., Toccaceli i D., 2008. Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings: Present situation and future trends. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 6(2). 173-146. ISSN: 1062-7995.
- [59] Friberg L., 2017. *Cadmium in the Environment*. CRC Press. Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781351070379>.
- [60] Frischknecht R., Itten R., Sinha P., De Scholten M., Zhang J., Heath G. A., Olson C., 2015. Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems. No. NREL/TP-6A20-73853; IEA-PVPS-TASK-12; IEA-PVPS-12-04: 2015. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States). ISBN: 9783906042282.
- [61] Frischknecht R., Wyss F., Büsser-Knöpfel S., Lützkendorf T., Balouktsi M., 2015. Cumulative energy demand in LCA: The energy harvested approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 20(7). 957-969. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>.
- [62] Fthenakis R., Frischknecht M., Rauei H. C., Kim M., Alsema M. H., De Wild-Scholten M., 2011. *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic*

Electricity, 2nd edition, IEA PVPS Task 12. International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. ISBN: 9783906042398.

[63] Fthenakis V. M., Alsema i E., 2016. Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2014 early 2015 status. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 14(3). 275-280. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.706>.

[64] Fthenakis V. M., Kim H. C., 2017. Greenhouse-gas emissions from solar electric and nuclear power: A life-cycle study. *Energy Policy*. 35(4). 2549-2557. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.06.022>.

[65] Fthenakis V. M., Kim H. C., Alsema E., 2008. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environmental Science Technology*. 42(6). 2168-2174. <https://doi.org/10.1021/es071763q>.

[66] Fu Y., Liu X., Yuan Z., 2015. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *J. Clean. Prod.* 86. 180-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.057>.

[67] [148] Fu Z., Xu M., Sheng Y., Yan Z., Meng J., Tong Ch., Li D., Wan Z., Ming Y., Mei A., Hu Y., Rong Y., Han H., 2019. Encapsulation of printable mesoscopic perovskite solar cells enables high temperature and long-term outdoor stability. *Advanced Functional Materials*. 29(16). <https://doi.org/10.1002/adfm.201809129>.

[68] Fukurozaki S. H., Zilles R., Sauer I. L., 2012. Energy Payback Time and CO₂ Emissions of 1.2 kWp Photovoltaic Roof-Top System in Brazil. *Int. J. Smart Grid Clear Energy*. 2(2). 164-1699. <https://doi.org/10.3390/en13010252>.

[69] Galagan Y., 2020. Perovskite solar cells from lab to fab: the main challenges to access the market. *Oxford Open Materials Science*. 1(1). <https://doi.org/10.1093/oxfmat/itaa007>.

[70] Galarowicz J., 2014. Karol Wojtyła. Myśl o człowieku. Wyd. Petrus. Kraków. ISBN: 9788377201114.

[71] Gao L. L., Li C.X., Li C.J., Yang i G.J., 2014. Large-area high-efficiency perovskite solar cells based on perovskite films dried by the multi-flow air knife method in air. *Journal of Materials Chemistry*. 5(4). <https://doi.org/10.1039/C6TA09565H>.

[72] Georgopoulos P. G., Roy A., Yonone-Lioy M. J., 2011. Environmental copper: its dynamics and human exposure issues. *J. Toxicol. Environ. Health*. 4(4). 341-394. <https://doi.org/10.1080/109374001753146207>.

[73] Georgopoulos P., Roy A., Yonone-Lioy M. J., Opiekun R. Lioy P. J., 2001. Environmental copper: Its dynamics and human exposure issues. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B*. 4(4). 341-394. <http://dx.doi.org/10.1080/109374001753146207>.

[74] Glasson J., Therivel R., Chadwick A., 2005. Introduction to environmental impact assessment, 3rd edition. Routledge. Londyn, Nowy Jork. <https://doi.org/10.4324/9780203023068>.

[75] Goodrich A., Hacke P., Wang Q., Soporì B., Margolis R., James T., 2013. A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 114. 110-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.030>.

[76] Górzynski J., 2007. Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa. ISBN: 9788320432527.

- [77] Green M. A., 2006. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. Springer Series in Photonics. Springer. Berlin. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1878345>.
- [78] Green M., Emery K., Hishikawa Y., Dunlop E., Levi D., Hohl-Ebinger J., 2018. Solar cell efficiency tables (version 52). Prog Photovolt Res Appl. 26(1). 3-12. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>.
- [79] Greijer H., Karlson L., Lindquist S. E., Hagfeldt A., 2021. Environmental aspects of electricity generation from a nanocrystalline dye sensitized solar cell system. Renew. Energy. 23(1). 27-39. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00111-7).
- [80] Grzesiak K., 2006. Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) – nowej techniki w ochronie środowiska. Inżynieria Środowiska. 11(1). 101-113. ISSN: 1426-2908.
- [81] Guinée J. B., 2004. Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. Moskwa, Londyn, Nowy Jork, Boston, Dordrecht. ISBN: 0306480557.
- [82] Hammons T. J., 2008. Integrating renewable energy sources into European grids. Electrical Power and Energy Systems. 30(8). 462-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2008.04.010>.
- [83] Harding K., 2011. An Introduction to Life Cycle Assessment (LCA). Chemical Technology. 23-25. ISSN: 1843-3707.
- [84] Hauschild M. Z., Huijbregts i M. A., 2015. Life cycle impact assessment, Springer. Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10.
- [85] Heller M., Życiński J., 2010. Matematyczność przyrody. Wyd. Petrus. Kraków. ISBN: 9788377201923.
- [86] Hernandez-Lopez D. A., Rasikh T., El Mekaoui A., Bassam A., Vega De Lille M., Ricalde L. J., Riech I., 2022. Does recycling solar panels make this renewable resource sustainable? Evidence supported by environmental, economic, and social dimensions. Sustain. Cities Soc. 77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2021.103539>
- [87] Hironori K., Jimbo K., Maw W.S., Koichiro O., Yamazaki M., Araki H., Takeuchi A., 2009. Development of CZTS-based thin film solar cells. Thin Solid Films. 517(7). 2455-2460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2021.103539>.
- [88] Hou G., Sun H., Jiang Z., Pan Z., Wang Y., Zhang X., Zhao Y., Yao Q., 2016. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. Appl. Energy. 164. 882-890. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.023>.
- [89] Ibrahim M., El-Haes H., 2005. Computational spectroscopic study of copper, cadmium, lead and zinc interactions in the environment. Int. J. of Environ. and Pollution. 23(4). 417-424. <http://dx.doi.org/10.1504/IJEP.2005.007604>.
- [90] Idzikowski, A., Cierlicki, T., Bałdowska-Witos, P., Piasecka, I., 2021. Impact world+ a new method for life cycle assessment. Quality Production Improvement-QPI. 3(1). 77-83. <https://doi.org/10.2478/cqpi-2021-0008>.
- [91] Ilias A., Rentoumis M., Katsigiannis Y., Bilali N., 2018. Integration & assessment of recycling into c-Si photovoltaic module's life cycle. Int. J. Sustain. Eng. 11. 1-10. <http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2018.1428833>.
- [92] Instytutu Energetyki Odnawialnej, 2023. Rynek fotowoltaiki w Polsce 2023. Warszawa. ISBN 978-83-7204-280-4.

- [93] International Renewable Energy Agency, 2016. End-of-Life Management Solar Photovoltaic Panels. ISBN: 978-92-95111-98-1.
- [94] International Renewable Energy Agency, 2023. Renewable capacity statistics 2023. Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-525-4.
- [95] International Standard ISO 14001:2015. Environmental management systems – Requirements with guidance for use.
- [96] International Standard ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- [97] International Standard ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- [98] Ito M., Kato K., Komoto K., Kichimi T., Kurokawa K. A., 2018. A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 16(1). 17-30. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.770>.
- [99] Ito M., Kato K., Sugihara H., Kichimi T., Song J., Kurokawa K. A., 2013. A preliminary study on potential for very large scale photovoltaic power generation (VLS-PV) system in the Gobi desert from economic and environmental viewpoints. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells.* 75(3-4). 507-517. ISBN: 978-15-10836-51-8 .
- [100] Iwaszczuk N., Posłuszny K., 2021. *Gospodarka o obiegu zamkniętym*. Wyd. AGH. Kraków. ISBN: 978-83-66727-06-9.
- [101] Jastrzębska G., 2017. *Energia ze źródeł odnawialnych i jej wykorzystanie*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa. ISBN: 978-83-20619-83-6.
- [102] Jeppesen E., Moss B., Bennion H., Carvalho L., De Meester L., Feuchtmayr H., Friberg N., 2010. *Interaction of Climate Change and Eutrophication*. Wiley-Blackwell Press. Oxford. <https://doi.org/10.1002/9781444327397.ch6>.
- [103] Jędrzejczyk Z., Kukuła K., Skrzypek I., Walkosz A., 2011. *Badania operacyjne w przykładach i zadaniach*. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01184-68-1.
- [104] Jia F., Sun H., Koh L., 2016. Global solar photovoltaic industry: An overview and national competitiveness of Taiwan. *J. Clean. Prod.* 126. 550-562. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.068>.
- [105] Jolliet O. i inni, 2014. Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: findings of the scoping phase. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 19(4). 962-967. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1025-1>.
- [106] Jolliet O., Saade-Sbeih M., Shaked S., Jolliet A., 2015. *Environmental Life Cycle Assessment*. CRC Press. Boca Raton. <http://dx.doi.org/10.1201/b19138>.
- [107] Jungbluth N., Stucki M., Flury K., Frischknecht R., Büsser S., 2012. *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*. ESU-services Ltd. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17977.19041>.
- [108] Kaczorek T., Dąbrowski W., Dzieliński A., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania*. WNT. Warszawa. ISBN: 978-83-01185-91-6.
- [109] Kahoul N., Chenni R., Cheghib H., Mekhilef S., 2017. Evaluating the reliability of crystalline silicon photovoltaic modules in harsh environment. *Renew. Energy.* 109. 66-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.078>.
- [110] Kalotka J., 2006. *Odnawialne źródła energii*. ITE-PIB. Radom. ISBN: 978-83-77892-67-1.

- [111] Kato K., Hibino T., Komoto K., Ihara S., Yamamoto S., Fujihara H. A., 2001. A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells.* 67(1-4). 279-287. [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00293-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00293-2).
- [112] Kato K., Murata A., Sakuta K., 1998. Energy pay-back time and lifecycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 6(2). 105-115. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(199803/04\)6:2<105::AID-PIP212>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-159X(199803/04)6:2<105::AID-PIP212>3.0.CO;2-C).
- [113] Kato K., Murata A., Sakuta K., 1997. An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon. *Sol. Energy Mat. Sol. Cells.* 47 (1-4). 95-100. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00029-9)
- [114] Klöpffer W., Grahl B., 2014. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. John Wiley&Sons. Weinheim. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527655625>.
- [115] Kłos Z.S., Kurczewski P., Kasprzak J., 2005. Środowiskowe charakteryzowanie maszyn i urządzeń. Wyd. PP. Poznań. ISSN: 1642-6606.
- [116] Kłos Z. S., 2018. Environmental evaluation of technical objects-machines and devices. *Journal of Mechanical and Transport Engineering.* 70. <http://dx.doi.org/10.21008/j.2449-920X.2018.70.2.01>.
- [117] Knopik L., 2010. Metoda wyboru efektywnej strategii eksploatacji obiektów technicznych. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISSN: 02090597.
- [118] Koellner T. i inni, 2013. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 18(6). 1188-1202. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z>.
- [119] Korbicz J., Kościelny J., Kowalczyk Z., Cholewa W., 2002. Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. WNT. Warszawa. ISBN: 8320427347.
- [120] Kossakowski P., 2013. Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing. *Results in Engineering.* 23. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102566>.
- [121] Kowalczyk P., Holyst R., 2008. Nanotubes, Efficient Adsorption of Super Greenhouse Gas (Tetrafluoromethane) in Carbon. *Environmental Science & Technology.* 42(8). 2931-2936. <https://doi.org/10.1021/es071306+>.
- [122] Kowalski Z., Kulczycka J., Góralczyk M., 2007. Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA). PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01151-84-3.
- [123] Król M. H., 2013. Wprowadzenie do metodologii nauk technicznych. Wyd. PK. Kraków. ISBN: 978-83-66781-04-7.
- [124] Kruszelnicka W., 2020. A New Model for Environmental Assessment of the Comminution Process in the Chain of Biomass Energy Processing. *Energies.* 13(2). 330. <https://doi.org/10.3390/en13020330>.
- [125] Krynke M., Czaja P., Zasadziński M., 2016. Systemy techniczne: technologia, jakość, eksploatacja. Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menedżerów Jakości i Produkcji. Częstochowa. ISBN: 978-83-63978-45-7.
- [126] Krystek J., 2018. Ochrona środowiska dla inżynierów. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01200-59-6.
- [127] Kubiak P., Zalewski M., 2012. Pracownia diagnostyki pojazdów samochodowych. WKŁ. Warszawa. ISBN: 978-83-20618-28-0.

- [128] Kubiak P., Woźniak M., Zakrzewski S., Siczek K., Rylski A., Mrowicki A., Matej J., Deda J., Knap L., 2022. Research of damage to the rear wheel rim in a tipper-truck, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. 70. <http://dx.doi.org/10.24425/bpasts.2022.141000>.
- [129] Kulczycka J., 2019. *Gospodarka o obiegu zamkniętym w polityce i badaniach naukowych*. Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN. Kraków. ISBN: 978-83-95554-45-2.
- [130] Kulczycka J., Góralczyk M., 2001. *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego*. Wyd. Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Kraków. ISBN: 83-87854-29-8.
- [131] Kulczycka J., Lelek Ł., Lewandowska A., Zarębska J., 2015. Life Cycle Assessment of municipal solid waste management – comparison of results using different LCA models. *Polish Journal of Environmental Studies*. 24(1). 125-140. <http://dx.doi.org/10.15244/pjoes/26960>.
- [132] Kupczyk M., 2007. *Budowa maszyn i zarządzanie produkcją*. Wyd. PP. Poznań. ISBN: 17331919.
- [133] Kurczewski P., Kłos Z., 2005. Technical objects classification for environmental analyses. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. 40 (2). 127-138. ISSN: 0137-5474.
- [134] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., 2009. *Optymalizacja. Wybrane metody z przykładami zastosowań*. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01159-61-0.
- [135] Kwiatkowski W., 2002. *Podstawy teorii sterowanie, wybrane zagadnienia*. WNT. Warszawa. ISBN: 978-83-89968-76-0.
- [136] Lee T., Ebong A., 2017. A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Renew Sustain Energy Rev*. 70. 1286-1297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.028>.
- [137] Leda P., Idzikowski A., Piasecka I., Bałdowska-Witos P., Cierlicki T., Zawada M., 2023. Management of Environmental Life Cycle Impact Assessment of a Photovoltaic Power Plant on the Atmosphere, Water, and Soil Environment. *Energies*. 16(10). 4230. <https://doi.org/10.3390/en16104230>.
- [138] Legutko S., 2004. *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa. ISBN: 978-83-02089-98-5.
- [139] Legutko S., 2007. *Eksploatacja maszyn*. Wyd. PP. Poznań. ISBN: 978-83-71432-55-2.
- [140] Lelek Ł., Kulczycka J., Lewandowska A., Zarębska J., 2016. Life cycle assessment of energy generation in Poland. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 21(1). 1-14. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0979-3>.
- [141] Lewandowska A., 2006. Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych. Wyd. Akademii Ekonomicznej. Poznań. ISBN: 978-83-7417-133-2.
- [142] Lewandowska A., 2011. Environmental life cycle assessment as a tool for identification and assessment of environmental aspects in environmental management systems (EMS) part 1: Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16. 178-186. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0253-2>.
- [143] Lewandowska A., Kurczewski P., Kulczycka J., Joachimiak-Lechman K., Baumann H., Ciroth A., 2012. LCA as an element in environmental management systems – comparison of conditions in selected organisations in Poland, Sweden and Germany

Part 1: Background and initial assumptions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 18(2). 472-480. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0480-1>.

[144] Lewandowski W., Klugmann-Radziemska E., 2017. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Kompendium. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01190-67-5.

[145] Lunardi M. M., Alvarez-Gaitan J. P., Bilbao J. I., 2018. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. *Solar panels and photovoltaic materials*. 9. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.74390>.

[146] Luo W., Khoo Y. S., Kumar A., Low J. S., Li Y., Tan Y. S., Wang Y., Aberle A. G., Ramakrishna M., 2018. A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 174. 157-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.040>.

[147] Lupi F., Mabkhot M. M., Finžgar M., Minetola P., Stadnicka D., Maffei A., Litwin P., Boffa E., Ferreira P., Podrżaj P., Chelli R., Lohse N., Lanzetta M., 2022. Toward a sustainable educational engineer archetype through Industry 4.0. *Computers in Industry*. 134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2021.103543>.

[148] Luque A., Hegedus i S., 2003. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons. England. ISBN: 978-04-71491-96-5.

[149] Macha E., 2001. *Niezawodność maszyn*. Wyd. PO. Opole. ISSN: 14279932.

[150] Madziara S., Najbert S., Woźniak M., Kubiak P., Ozuna G., De La Fuente P., Józwiak P., 2015. Design and Build Vehicle Witch Solar Drive for World Solar Challenge Competition. *Mechanization in Agriculture*. 11. 23-26. <http://dx.doi.org/10.13189/ujme.2015.030402>.

[151] Mahmoudi S., Huda N., Behnia M., 2021. Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework. *J. Clean. Prod.* 294(14). 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126252>.

[152] Mar K. A., Unger C., Walderdorff L., Butler T., 2022. Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. *Environ. Sci. Policy*. 134. 127-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126252>.

[153] Marzec K., 2022. *Wprowadzenie do inżynierii mechanicznej*. Oficyna Wydawnicza PRz. Rzeszów. ISBN: 978-83-79345-56-4.

[154] Matsumoto M., Hu A. H., Kuo T. C., Smith S., 2019. *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1181-9>.

[155] Matsumoto M., Masui K., Fukushige S., Kondoh S., 2017. *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design*. Springer. <https://doi.org/doi:10.1007/978-981-10-0471-1>.

[156] Matuszczak K., Flizikowski J., 2015. Zagadnienia ogólne dotyczące obciążenia środowiska w cyklu życia elektrowni wiatrowej. *Postępy w inżynierii mechanicznej*. 6(3). 35-42. ISSN: 2300-3383.

[157] Meijer A., Huijbregts M. A. J., Schermer J. J., Reijnders L., 2003. Life cycle assessment of photovoltaic modules: Comparison of mcSi, InGaP and InGaP/mc-si solar modules. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 11. 275-287. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.489>.

[158] Merkisz J., Pielecha J., Radzimirski S., 2014. *New trends in emission control in the European Union*. Springer Verlag. Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02705-0>.

- [159] Merkisz, J., Fuć, P., Lijewski, P., Siedlecki, M., Galant, M., Gallas, D., Rymaniak, Ł., 2015. Możliwości zastosowania paneli słonecznych w pojazdach samochodowych. *Logistyka*. 3. 3178-3187. ISSN: 1231-5478.
- [160] Merkisz, J., Lijewski, P., Fuc, P., 2014. The Ecological Aspects of the Production of Electricity in Power Generator Systems. *Indian J. Ecol.* 41(1), 10-15. ISSN: 0304-5250.
- [161] Merkisz-Guranowska A., 2007. Ekoprojektowanie a recykling samochodów. *Recykling*. 3. 30-31. ISSN: 1731-9927.
- [162] Merkisz-Guranowska A., 2007. *Recykling samochodów w Polsce*. ITE-PIB. Poznań-Radom. ISBN: 978-83-72045-84-3.
- [163] Mertens K., 2000. *Photovoltaics-Fundamentals, Technology and Practice*. John Wiley&Sons Inc. New York. ISBN: 978-11-19401-33-9.
- [164] Migawa K., 2013. Using genetic algorithm in making optimal control decisions. *Archiwum Motoryzacji*. 2. 35-51. <http://dx.doi.org/10.5604/1234754X.1066767>.
- [165] Miller S. M., Wofsy S. C., Michalak A. M., Kort E., 2013. Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110(50). 200018-20222. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1314392110>.
- [166] Mroziak M., Merkisz-Guranowska A., 2024. Modeling of material and energy inputs in the life cycle of a vehicle. *Archives of Transport*. 70. 117-136. <http://dx.doi.org/10.61089/aot2024.vzsv6b46>.
- [167] Mudryk K., 2018. *Renewable Energy Sources Engineering Technology Innovation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6>.
- [168] Mushtaq B., Bandh S. A., Shafi S., 2020. *Environmental Management. Environmental Issues. Awareness and Abatement*. Springer. Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-3813-1>.
- [169] Muślewski Ł., 2011. Analysis of problems connected with quality of operation systems functioning. *Zeszyty Naukowe: Akademia Morska w Szczecinie*. 2(27). 36-42. ISBN: 1733-8670.
- [170] Muteri V., Cellura M., Curto D., Franzitta V., Longo S., Mistretta M., Parisi M. L., 2020. Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. *Energies*. 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010252>.
- [171] Niederliński S., 1987. *System i sterowanie*. PWN. Warszawa. ISBN: 8301047909.
- [172] Niyaz M.H., Meena R., Gupta R., 2021. Impact of cracks on crystalline silicon photovoltaic modules temperature distribution. *Sol. Energy*. 225. 148-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.038>.
- [173] Niziński S., 2002. *Eksploracja obiektów technicznych*. ITEE-PIB. Radom. ISBN: 978-83-72042-84-2.
- [174] Nomura N., Inaba A., Tonooka Y., Akai M., 2021. Life-cycle emission of oxidic gases from power-generation systems. *Appl. Energ.* 68(2). 15-227. [http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619\(00\)00046-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00046-5).
- [175] Nosal S., 2002. *Metody stabilizacji niezawodności maszyn w fazie eksploatacji*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji. Poznań. ISBN: 83-7204-151-2.
- [176] Oliver M., Jackson T., 2020. The evolution of economic and environmental cost for crystalline silicon photovoltaics. *Energy Policy*. 28(14). 1011-1021. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00088-4).

- [177] Osiński Z., 2010. Podstawy konstrukcji maszyn. PWN. Warszawa. ISBN: 83-01-12806-2.
- [178] Osman B., Abdolkader T., Ahmed I., 2021. A review of perovskite solar cells. *International Journal of Materials Technology and Innovation*. 1. 48-66. <https://doi.org/10.21608/ijmti.2021.78369.1032>.
- [179] Pachauri R. K., Meyer L. A., 2014. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Genewa. ISBN 978-92-9169-143-2.
- [180] Paiano A., 2015. Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 41. 99-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.208>.
- [181] Panchenko V., Izmailov A., Kharchenko V., Lobachevskiy Y., 2020. Photovoltaic Solar Modules of Different Types and Designs for Energy Supply. *Int. J. Energy Optim. Eng.* 9. 74-94. <http://dx.doi.org/10.4018/IJEOE.2020040106>.
- [182] Parisi M. L., Basosi R., 2015. Environmental Life Cycle Analysis of Non Conventional Thin-Film Photovoltaics: The case of Dye-Sensitized solar devices. *Energy Security and Development: The Global Context and Indian Perspectives*. Springer. New Delhi. 195-210. <http://dx.doi.org/10.3390/en15197278>.
- [183] Parisi M. L., Maranghi S., Basosi R., 2014. The evolution of the dye sensitized solar cells from Grätzel prototype to up-scaled solar applications: A life cycle assessment approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39. 124-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.079>.
- [184] Paszkowski S., 2002. Podstawy teorii systemów i analizy systemowej. WAT. Warszawa. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.9489>.
- [185] Paś J., 2017. Model sterowania procesem eksploatacji złożonego obiektu technicznego. *Biuletyn WAT*. 66(1). 127-138. ISSN: 1234-5865.
- [186] Piasecka I., Bałdowska-Witos P., Piotrowska K., Tomporowski A., 2020. Eco-Energetical Life Cycle Assessment of Materials and Components of Photovoltaic Power Plant. *Energies*. 13(6). <http://dx.doi.org/10.3390/en13061385>.
- [187] Piasecka I., Kłos Z., 2024. An Assessment of the Environmental Impact of Construction Materials of Monocrystalline and Perovskite Photovoltaic Power Plants Toward Their Sustainable Development. *Materials*. 17(23). 5787. <https://doi.org/10.3390/ma17235787>.
- [188] Piasecka, I., Bałdowska-Witos, P., Piotrowska, K., Kruszelnicka, W., Flizikowski, J., Tomporowski A., 2021. Ekologiczna analiza cyklu życia farmy fotowoltaicznej o mocy 1 MW w polskich warunkach środowiskowych. *Przemysł Chemiczny*. 100. ISSN 0033-2496.
- [189] Piotrowska K., Piasecka I., 2021. Specification of Environmental Consequences of the Life Cycle of Selected Post-Production Waste of Wind Power Plants Blades. *Materials*. 14(17). 4975–5008. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14174975>.
- [190] Polmear I., StJohn D., Nie J.F., Qian M., 2017. *Light alloys:metallurgy of the light metals*. Elsevier. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-00-80994-30-7.
- [191] Powierża L., 1997. Zarys inżynierii maszyn, urządzeń lub instalacji bioagrotechnicznych. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom-Płock. ISBN: 83-87039-07-1.

- [192] Praca zbiorowa, 2012. Podstawy konstrukcji maszyn Część 2: Techniki wytwarzania i maszynoznawstwo. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa. ISBN: 978-83-20618-27-3.
- [193] Przystupa F. W., Rajkowski R., Szczyrek P., 2007. Diagnostyczna ocena systemu eksploatacji maszyn roboczych. *Przegląd Mechaniczny*. 5. 35-40. ISSN: 0033-2259.
- [194] Puig R., Fullana-Palmer P., Baquero G., Riba J. R., Bala A. A., 2013. Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making. *Waste Management*. 33(12). 2789-2797. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.004>.
- [195] Qin T. F., Plattner D., Tignor G. K., Allen M., Boschung S. K., Nauels J., Xia Y., 2013. IPCC: Climate change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Stocker, Cambrige. ISBN 978-1-107-05799-1.
- [196] Rebitzer G., Loerincik Y., Jolliet O., 2002. Input-output life cycle assessment: From theory to applications, 16th Discussion Forum on life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 7(3). 174-176. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02994053>.
- [197] Rosenbaum R. K., 2018. Overview of existing LCIA methods. Springer. Heidelberg. ISBN: 978-33-19564-75-3.
- [198] Rosenbaum R. K., Hauschild M. Z., Boulay A. M., Fantke P., Laurent A., Núñez M., Vieira M., 2018. Life Cycle Impact Assessment. In *Life Cycle Assessment: Theory and practice*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10.
- [199] Rosenbaum R.K., 2016. Selection of impact categories, category indicators and characterization models in goal and scope definition. *Goal and scope definition in life cycle assessment*. Springer. Dordrecht. 63-122. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-024-0855-3_2.
- [200] Rosik-Dulewska C., 2008. Podstawy gospodarki odpadami. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-011807-74-4.
- [201] Rutkowska M., Popławski Ł., 2017. Model zrównoważonej gospodarki o obiegu zamkniętym. *Studia i Prace Wydziału Nauk Ekonomicznych i Zarządzania*. 47(2). 119-128. <http://dx.doi.org/10.18276/sip.2017.47/2-11>.
- [202] S. Kahandal S., Tupke R. S., S.Bobade D., Kim H., Piao G., R. Sankapal B., Said Z., P.Pagar B., C.Pawar A., Kim J.M., Bulakhe R., 2024. Perovskite solar cells: Fundamental aspects, stability challenges, and future prospects. *Progress in Solid State Chemistry*. 74. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2024.100022>.
- [203] Salehi M., 2022. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International* 158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>.
- [204] Sam A. A., Nur K. Y., Atef M. G., Mohd A. L., 2024. Recycling aluminium for sustainable development: A review of different processing technologies in green manufacturing. *Results in Engineering*. 3(9). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102566>.
- [205] Sampaio P., González M. A., 2017. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74. 590-601. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>.

- [206] Santarek K., Duda J., Oleszek S., 2022. Zarządzanie cyklem życia produktu. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa. ISBN: 978-83-20825-01-5.
- [207] Sasmal J., 2016. Resources, Technology and Sustainability. Springer. Singapur. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-0895-5>.
- [208] Say D, Manning A. J., Western L. M., Young D., 2021. Global trends and European emissions of tetrafluoromethane (CF₄), hexafluoroethane (C₂F₆) and octafluoropropane (C₃F₈). Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 21(3). 2149-2164. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2149-2021>.
- [209] Schaefer H., Hagedorn G., 2022. Hidden energy and correlated environmental characteristics of PV power generation. Renew. Energy. 2(2). 159-166. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90101-8](https://doi.org/10.1016/0960-1481(92)90101-8).
- [210] Schultz H.S., Carvalho M., 2022. Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System. Energies. 15(16). <https://doi.org/10.3390/en15166098>.
- [211] Seo B., Kim J. Y., Chung J., 2021. Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts. Waste Manag. 128. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.045>.
- [212] Shi A., Zhang M., Cho Y., L Young T., Wang D., Yi H., Kim J.Ch., Huang S., HoBaillie A., 2019. Effect of pressing pressure on the performance of perovskite solar cells. ACS Applied Energy Materials. 2(4). <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01608>.
- [213] Sibiński M., Znajdek K., 2021. Postępy w fotowoltaice. PWN. Warszawa. ISBN: 978-83-01216-66-5.
- [214] Singh R., Kumar i S., 2002. Green Technologies and Environmental Sustainability. Springer. Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50654-8>.
- [215] Słowiński B., 2008. Podstawy sprawnego działania. Wyd. PK. Koszalin. ISBN: 978-83-73651-56-2.
- [216] Słowiński B., 2014. Inżynieria Eksploatacji Maszyn. Wyd. PK. Koszalin. ISBN: 978-83-73652-48-4.
- [217] Sonnemann G., Margni M., 2015. Life Cycle Management. Springer. Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7221-1%0A>.
- [218] Sreekanth T. V., Nagajyoti P. C., Lee K., 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. Environmental Chemistry Letters. 8(3). 199-216. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>.
- [219] Stachurski S., Wierzbicki A., 2001. Podstawy optymalizacji. Oficyna Wydawnicza PW. Warszawa. ISBN: 8372070857.
- [220] Stadnicka D., Antosz K., 2017. Overall equipment effectiveness: analysis of different ways of calculations and improvements. Advances in manufacturing. Cham. Springer International Publishing. 45-55. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_5.
- [221] Stadnicka D., Arkhipov D., Battaia O., Ratnayake R. C., 2017. Skills management in the optimization of aircraft maintenance processes. IFAC-PapersOnLine. 50(1). 6912-6917. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1216>.
- [222] Stadnicki J., 2006. Teoria i praktyka rozwiązania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych. WNT. Warszawa. ISBN: 978-83-01195-89-2.

- [223] Strachala D., Hylský J., Vanek J., Fafílek G., 2017. Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction. *Acta Montan. Slovaca*. 22(3). 257-269. ISSN: 1335-1788.
- [224] Stylos N., Koroneos C., 2014. Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems, *J. Clean. Prod.* 64. 639-645. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.014>.
- [225] Szadziul R., 2006. *Studium eksploatacji maszyn*. Wyd. PK. Koszalin. ISBN: 978-83-66514-71-3.
- [226] Szadziul R., Słowiński B., 2007. Kierowanie systemem eksploatacji. *ZN Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej*. 40. 257-263. ISBN: 978-83-7365-248-4.
- [227] Szlanta W., 2022. Podstawy konstrukcji maszyn czyli inżynieria i jego sztuka według profesora Janusza Dietrycha. Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn PŚ. Gliwice. ISBN: 978-83-60759-30-1.
- [228] Szopa T. S., 2018. *Niezawodność i bezpieczeństwo*. Oficyna Wydawnicza PW. Warszawa. ISBN: 9788378145554.
- [229] Sztumski W., 2006. Idea zrównoważonego rozwoju a możliwości jej urzeczywistnienia. *Problemy ekorozwoju*. 73-76. ISSN: 2080-1971.
- [230] Tarnowski W., 2004. *Modelowanie systemów*. Wyd. PK. Koszalin. ISBN: 83-73650-52-0.
- [231] Terełko W., 2011. *Metodologia projektowania właściwości eksploatacyjnych złożonych obiektów technicznych*. ITE-PIB. Gdynia-Radom. ISBN: 978-83-7493-683-5.
- [232] Tomporowski A., Flizikowski J., Opielak M., Kasner R., Kruszelnicka W., 2017. Assessment of energy use and elimination of CO₂ emissions in the life cycle of an offshore wind power plant farm. *Polish Maritime Research*. 24 (4). 93-101. <http://dx.doi.org/10.1515/pomr-2017-0140>.
- [233] Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kruszelnicka, W., Piasecka, I., Kasner, R., Mroziński, A., Kovalyshyn, S., 2018. Destructiveness of profits and outlays associated with operation of offshore wind electric power plant. Part 1: Identification of a model and its components. *Polish Maritime Research*, 25(2), 132-139. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0064>.
- [234] Tomporowski, A., Flizikowski, J., Opielak, M., Kasner, R., Kruszelnicka, W., 2017. Assessment of energy use and elimination of CO₂ emissions in the life cycle of an offshore wind power plant farm. *Polish Maritime Research*. 24(4). 93-101. <http://dx.doi.org/10.1515/pomr-2017-0140>.
- [235] Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kasner, R., Kruszelnicka, W., 2017. Environmental control of wind power technology. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 19. 694-714. ISSN: 2720-7501.
- [236] Twidell J., Weir T., 2015. *Renewable Energy Resource*. Londyn. <https://doi.org/10.4324/9781315766416>.
- [237] Tylicki H., 2001. Badanie ewolucji stanu maszyn. *Diagnostyka*. 25. 13-20. ISSN: 1641-6414.
- [238] Tylicki H., Żółtowski B., 2010. *Rozpoznawanie stanu maszyn*. ITE-PIB. Radom. ISSN: 1733-8670.
- [239] Tytko R., 2023. *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*. ECO Investment Sp. z o.o. Kraków. ISBN: 978-83-8113-17-5.

- [240] Tytyk E., 2001. Projektowanie ergonomiczne. PWN. Warszawa – Poznań. ISBN: 978-83-01136-11-6.
- [241] Verones F. i inni., 2017. LCIA framework and cross-cutting issues guidance within the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative. *Journal of cleaner production*. 161. 957-967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.206>.
- [242] Walker G. R., Sernia P. C., 2004. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules. *IEEE Trans. Power Electron.* 19. 1130-1139. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2004.830090>.
- [243] Walter J. C., Barkema G. T., 2015. An introduction to Monte Carlo methods. *Physica A. Statistical Mechanics and its Applications*. 418. 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.06.014>.
- [244] Wang Q., Lu T., Chen H., Wang L., Jia J., Chen W., 2024. Tracing environmental footprint of copper wire rod manufacturing in China. *Resources, Conservation and Recycling*. 204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107503>.
- [245] Wang T. Y., 2016. Recycling of Solar Cell Materials at the End of Life. In *Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*. Green Energy and Technology Springer. Berlin. 287-317. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-50521-2_11.
- [246] World Health Organization, 2021. WHO global air quality guidelines. Genewa. ISBN: 978-92-40034-22-8.
- [247] Woropay M., 1996. Podstawy racjonalnej eksploatacji maszyn. Instytut Technologii Eksploatacji. Bydgoszcz. ISBN: 838703908.
- [248] Wyczewska E., Stadnicka D., 2020. Sustainable development supported by lean tools in assembly processes - a systematic literature review. *Technologia i Automatyzacja Montażu*. 4. 51-61. <http://dx.doi.org/10.15199/160.2020.4.7>.
- [249] Yadav S., Chattopadhyay K., Singh C. V., 2017. Solar grade silicon production: A review of kinetic, thermodynamic and fluid dynamics based continuum scale modeling. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78(C). 1288-1314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.019>.
- [250] Yang B., Li W., Zhao Y., He X., 2010. Design and Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic Power System. *IEEE Trans. Power Electron.* 25(4). 992-1000. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2036432>.
- [251] Yu H. F., Hasanuzzaman M., Rahim N. A., Amin N., Adzman N. N., 2022. Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148567>.
- [252] Yu, Z., 2018. China's photovoltaic industry policy performance from the perspective of global value chain. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 40(14). 1737-1742. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1486905>.
- [253] Ziola A., Soboczyński T., 2004. Chemiczna i biochemiczna charakterystyka różnych form. *Ekologia i Technika*. 12(1). 11-14. ISSN: 1230-462X.
- [254] Ziola-Frankowska A., Frankowski M., Siepak J., 2008. Analiza specjacyjna w oznaczeniach. *Ochrona Środowiska*. 9. 58-62. ISSN: 1506-218X.
- [255] Żebrowska M., 2013. Związki fluoroorganiczne - przemysłowe zastosowanie i skutki obecności w środowisku przyrodniczym. *Nauki inżynierskie i technologie*. 9(9). 107-127. ISSN: 2080-5985.

- [256] Żelazna A., 2016. Ocena zrównoważoności systemów solarnych oparta na analizie cyklu życia. Komitet Inżynierii Środowiska PAN. Lublin. ISBN: 978-83-63714-24-6.
- [257] Żółtowski B., 2011. Podstawy diagnozowania maszyn. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISBN : 978-83-61314-22-6.
- [258] Żółtowski B., 2012. Metody inżynierii wirtualnej w badaniu stanu, zagrożeń bezpieczeństwa i środowiska eksploatowanych maszyn. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISSN: 2451-4543.
- [259] Żółtowski B., 2013. Badanie zagrożeń utraty zdolności środowiskowych systemów technicznych. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISBN: 83-87274-37-2.
- [260] Żółtowski B., Landowski B., Przybyliński B., 2012. Projektowanie eksploatacji maszyn. Wyd. UTP. Bydgoszcz. ISBN: 978-83-61314-58-5.
- [261] Żółtowski B., Łukasiewicz M., 2012. Zagrożone środowisko. Wyd. UTP. Bydgoszcz.
- [262] Żółtowski B., Żółtowski M., 2016. Zarządzanie systemem utrzymania stanu zdolności. Studies & Proceedings of Polish Association for Knowledge Management. 79. 5-23. ISSN: 1732-324X.
- [263] Żółtowski J., 2004. Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji i niezawodności maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. ISBN: 83-72074-59-3.

STRESZCZENIE

Efektywne sterowanie cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej

mgr inż. Tomasz Cierlicki

Słowa kluczowe: sterowanie, obiekt techniczny, energetyka odnawialna, elektrownia fotowoltaiczna, ocena cyklu istnienia (LCA)

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej była analiza efektywnego sterowania cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej. Z każdym kolejnym rokiem obserwuje się znaczący wzrost mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii. Szczególnie dynamiczny rozwój dotyczy fotowoltaiki, która w ostatnich latach odgrywa coraz istotniejszą rolę w sektorze energetycznym. W części teoretycznej pracy scharakteryzowano istotę cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, począwszy od fazy sformułowania potrzeby, projektowania i konstruowania, poprzez wytwarzanie, eksploatację, aż po zagospodarowanie użytkowe. Omówiono podstawowe założenia cyklu istnienia w obiegu (możliwie) zamkniętym oraz mechanizmy sterowania nim. Dokonano również identyfikacji wybranych parametrów funkcjonalnych maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej, takich jak efektywność, destrukcyjność, zdatność, funkcjonalność oraz użyteczność, pod kątem możliwości zwiększania ich jakości i efektywności.

W części badawczej opracowano autorską procedurę analityczną opartą na metodologii LCA, pozwalającą na dokonanie oceny możliwości sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej w kontekście gospodarki obiegu zamkniętego. Obiekty badań stanowiły cztery elektrownie fotowoltaiczne (każda o mocy 1 MW) oparte na modułach PV wykonanych w czterech odmiennych technologiach (od tradycyjnych, powszechnie wykorzystywanych, po najnowocześniejsze i najbardziej innowacyjne rozwiązania) – monokrystalicznej, polikrystalicznej, amorficznej oraz perowskitowej. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem modeli Impact World+ (oddziaływanie na otoczenie w ramach 27 kategorii wpływu i 2 obszarów oddziaływania obejmujących zdrowie człowieka i jakość ekosystemów), IPCC 2021 (emisje gazów cieplarnianych) oraz CED (skumulowane zapotrzebowanie na energię). W ramach zrealizowanych badań uwzględniono dwa scenariusze zagospodarowania użytkowego tworzyw, materiałów, elementów i zespołów roboczych uwzględniające składowanie na wysypisku odpadów lub zastosowanie procesów recyklingu. Uwzględnienie wariantu składowania (współcześnie już niedopuszczalnego pod względem prawnym) miało charakter porównawczy: po pierwsze – pozwoliło wykazać wielkość przewagi recyklingu w ujęciu energetycznym, ekonomicznym i ekologicznym, po drugie – ukazało konsekwencje braku wdrożenia zasad gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym, a po trzecie – pełniło funkcję scenariusza odniesienia

(ang. *baseline*), niezbędnego w badaniach zgodnych z metodologią LCA. W końcowym etapie oceny cyklu istnienia analizowanych obiektów technicznych zastosowano analizę Monte Carlo oraz opracowano trzy autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności (energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej), a także zdefiniowano współczynnik wydłużenia cyklu istnienia.

Uzyskane wyniki badań wykazały, że potencjalnie najwyższym poziomem destrukcyjnego oddziaływania na otoczenie charakteryzuje się cykl istnienia elektrowni monokrystalicznej, a w szczególności jej paneli fotowoltaicznych. Obiektem technicznym najlepiej wpisującym się w założenia zrównoważonego rozwoju jest natomiast elektrownia perowskitowa. Badania potwierdzają wagę zwiększania efektywności recyklingu jako kluczowego elementu sterowania cyklami istnienia maszyn i urządzeń energetyki odnawialnej.

W ostatniej sekcji rozprawy zawarto jej podsumowanie oraz najważniejsze wnioski. Sformułowano zalecenia w kierunku efektywnego sterowania cyklami istnienia obiektów technicznych na przykładzie elektrowni fotowoltaicznych. Zaprezentowana procedura oceny może stanowić narzędzie wspierające proces projektowania, wytwarzania, eksploatacji i zagospodarowania maszyn oraz urządzeń sektora OZE w zgodzie z założeniami gospodarki o obiegu (możliwie) zamkniętym i rozwoju zrównoważonego.

ABSTRACT

Effective control of the life cycle of a selected renewable energy technical object

M.Sc. Eng. Tomasz Cierlicki

Key words: control, technical object, renewable energy, photovoltaic power plant, life cycle assessment (LCA)

The subject of this doctoral dissertation is the analysis of effective life cycle control of a selected technical object in the renewable energy sector. In recent years, a significant increase in installed capacity from renewable energy sources has been observed worldwide, with photovoltaics experiencing particularly dynamic growth and playing an increasingly important role in the energy sector. The theoretical part of the dissertation characterizes the essence of the life cycle of renewable energy technical systems, from the stage of need identification, through design and construction, manufacturing, and operation, to end-of-life management. The fundamental principles of a (potentially) closed-loop life cycle and mechanisms for its control are discussed. Selected functional parameters of renewable energy machinery and equipment – such as efficiency, destructiveness, availability, functionality, and utility – are identified and analyzed in terms of opportunities for improving their quality and performance.

In the research section, a proprietary analytical procedure based on Life Cycle Assessment (LCA) methodology was developed to evaluate the potential for managing the life cycles of renewable energy technical systems within the framework of a circular economy. The study focused on four 1 MW photovoltaic power plants utilizing modules manufactured with four distinct technologies – monocrystalline, polycrystalline, amorphous, and perovskite – ranging from conventional, widely used designs to the most advanced and innovative solutions. Analyses were conducted using the Impact World+ model (assessing 27 impact categories and two areas of influence: human health and ecosystem quality), the IPCC 2021 method (greenhouse gas emissions), and Cumulative Energy Demand (CED). As part of the conducted research, two end-of-life management scenarios for materials, components, and working units of photovoltaic power plants were considered: landfilling and recycling. The inclusion of the landfilling scenario (although legally prohibited today) was of a comparative nature: first – it allowed for a clear demonstration of the advantages of recycling in energetic, economic, and environmental terms, second – it highlighted the consequences of not implementing the principles of a (potentially) circular economy, and third – it served as a reference scenario (baseline), essential for analyses performed in accordance with the LCA methodology. In the final stage of the life cycle assessment of the analyzed technical systems, a Monte Carlo simulation was conducted, three original indicators of sustainable efficiency (energetic,

economic, and ecological) were developed, and a life cycle extension coefficient was defined.

The obtained results demonstrated that the life cycle of monocrystalline photovoltaic power plants, particularly their modules, exhibits the highest potential for destructive environmental impact. In contrast, perovskite-based systems proved to be the most consistent with the principles of sustainable development. The findings also underscore the importance of improving recycling efficiency as a key factor in managing the life cycles of renewable energy technologies.

The final section of the dissertation presents a comprehensive summary and the most significant conclusions. Recommendations were formulated regarding the effective management of life cycles of technical systems, illustrated by the example of photovoltaic power plants. The proposed assessment procedure may serve as a valuable tool to support the design, manufacturing, operation, and end-of-life management of renewable energy technologies, in line with the principles of a (potentially) circular economy and sustainable development.

ZALĄCZNIKI

Tabela Z.1. Wykaz kluczowych surowców do produkcji modułu monokrystalicznego

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
Produkcja krzemu klasy metalurgicznej (MG-Si)			
1	Grafit	263,20	kg
2	Węgiel drzewny	447,44	kg
3	Koks naftowy	1 316,00	kg
4	Piasek	7 106,40	kg
5	Tlen (ciekły)	52,64	kg
6	Drewno (zrębki)	8,55	kg
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	28 952,00	kWh
8	Węgiel kamienny	60 799,20	MJ
9	Transport morski	6 711,60	tkm
10	Transport kolejowy	181,61	tkm
11	Transport drogowy	410,59	tkm
Produkcja krzemu klasy solarnej, o odpowiedniej jakości dla przemysłu fotowoltaicznego			
1	Krzem klasy metalurgicznej (MG-Si)	2 974,16	kg
2	Kwas solny (30% w H ₂ O)	4 211,20	kg
3	Wodór, ciekły	131,86	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	915,94	kg
5	Energia elektryczna (spalanie kogeneracyjne)	46 060,00	kWh
6	Energia elektryczna (wytworzona w hydroelektrowni)	10 343,76	kWh
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	72 827,44	kWh
8	Ciepło sieciowe (kogeneracyjne)	75 801,60	MJ
9	Transport kolejowy	9 606,80	tkm
10	Transport drogowy	7 553,84	tkm
Produkcja krzemu monokrystalicznego (proces Czochralskiego)			
1	Krzem klasy solarnej	2 632,00	kg
2	Argon (ciekły)	2 632,00	kg
3	Fluorowodór	26,32	kg
4	Kwas azotowy (50% w H ₂ O)	175,82	kg
5	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	109,23	kg
6	Kaolin	439,54	kg
7	Wodorotlenek wapnia	58,43	kg
8	Woda dejonizowana	10 554,32	kg
9	Woda na cele chłodzenia	13 396,88	m ³
10	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	84 224,00	kWh
11	Gaz ziemny	179 502,40	MJ
12	Transport kolejowy	3 711,12	tkm
13	Transport drogowy	2 974,16	tkm
Produkcja wafli z krzemowych			
1	Krzem monokrystaliczny (wytworzony w procesie Czochralskiego)	1 566,04	kg
2	Szkło (niepowlekane)	26,29	kg

3	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	39,48	kg
4	Kwas solny (30% w H ₂ O)	7,11	kg
5	Kwas octowy (98% w H ₂ O)	102,65	kg
6	Eter metylowy glikolu propylenowego	789,60	kg
7	Alkilobenzenosulfonian	631,68	kg
8	Spoivo akrylowe (34% w H ₂ O)	5,26	kg
9	Mosiądz	19,58	kg
10	Stal chromowana	3,97	kg
11	Drut stalowy	23,56	kg
12	Woda dejonizowana	146 339,20	kg
13	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	12 528,32	kWh
14	Gaz ziemny	10 528,00	MJ
15	Transport kolejowy	3 290,00	tkm
16	Transport drogowy	621,15	tkm
Produkcja ogniwa fotowoltaicznego			
1	Wafle krzemowe	2 710,96	m ²
2	Amoniak, ciekły	57,64	kg
3	Trójdychlorek fosforu	35,00	kg
4	Izopropanol	465,86	kg
5	Kwas solny (30% w H ₂ O)	1,66	kg
6	Fluorowodór	1,69	kg
7	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	1 589,73	kg
8	Wodorotlenek wapnia	39,74	kg
9	Czynnik chłodniczy (R134a)	0,08	kg
10	Azot (ciekły)	3 026,80	kg
11	Krzemowodory	7,66	kg
12	Pasta metalizacyjna	157,60	kg
13	Woda	450 072,00	kg
14	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	46 586,40	kWh
15	Gaz ziemny	160,03	MJ
16	Transport kolejowy	4 000,64	tkm
17	Transport drogowy	721,17	tkm
Produkcja modułu fotowoltaicznego			
1	Ogniwa fotowoltaiczne	2 460,92	m ²
2	Diody	7,39	kg
3	Klej silikonowy	321,10	kg
4	Szkło solarne	23 187,92	kg
5	Szkło hartowane	23 187,92	kg
6	Folia z polifluorku winylu	294,78	kg
7	Fluorowodór	164,24	kg
8	1-propanol	41,85	kg
9	Izopropanol	0,39	kg
10	Wodorotlenek potasu	135,29	kg
11	Aluminium	5 606,16	kg
12	Miedź	542,20	kg

14	Cyna	33,95	kg
15	Ołów	1,91	kg
16	Tworzywo polimerowe wzmocnione włóknem szklanym	776,44	kg
17	Politereftalan etylenu	910,67	kg
18	Polietylen, HDPE	62,64	kg
19	Octan etylowinyłu	2 303,00	kg
20	Tektura	2 008,22	kg
21	Palety	131,60	unit
22	Woda	13 238,96	kg
23	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	36 848,00	kWh
24	Olej napędowy	23,03	MJ
25	Transport kolejowy	40 532,80	tkm
26	Transport drogowy	6 737,80	tkm

Tabela Z.2. Wykaz kluczowych surowców do produkcji modułu polikrystalicznego

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
Produkcja krzemu klasy metalurgicznej (MG-Si)			
1	Grafit	357,20	kg
2	Węgiel drzewny	607,24	kg
3	Koks naftowy	1 786,00	kg
4	Piasek	9 644,00	kg
5	Tlen (ciekły)	71,44	kg
6	Drewno (zrębki)	11,61	kg
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	39 292,00	kWh
8	Węgiel kamienny	82 513,00	MJ
9	Transport morski	9 108,00	tkm
10	Transport kolejowy	246,47	tkm
11	Transport drogowy	557,23	tkm
Produkcja krzemu klasy solarnej, o odpowiedniej jakości dla przemysłu fotowoltaicznego			
1	Krzem klasy metalurgicznej (MG-Si)	4 036,36	kg
2	Kwas solny (30% w H ₂ O)	5 715,20	kg
3	Wodór (ciekły)	178,96	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	1 243,06	kg
5	Energia elektryczna (spalanie kogeneracyjne)	62 510,00	kWh
6	Energia elektryczna (wytworzona w hydroelektrowni)	14 037,06	kWh
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	98 837,24	kWh
8	Ciepło sieciowe (kogeneracyjne)	102 873,60	MJ
9	Transport kolejowy	13 037,80	tkm
10	Transport drogowy	10 251,64	tkm
Produkcja krzemu polikrystalicznego			
1	Krzem (mieszanek produkcyjna)	3 573,00	kg
2	Argon (ciekły)	900,14	kg
3	Hel	0,28	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	17,86	kg
5	Azot (ciekły)	108,59	kg
6	Kaolin	764,41	kg
8	Woda (na cele chłodzenia)	3 368,40	m ³
9	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	25 004,00	kWh
10	Transport kolejowy	714,40	tkm
11	Transport drogowy	3 750,60	tkm
Produkcja wafli krzemowych			
1	Krzem polikrystaliczny	2 268,22	kg
2	Szkło (niepowlekane)	145,74	kg
3	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	53,58	kg
4	Kwas solny (30% w H ₂ O)	9,64	kg
5	Kwas octowy (98% w H ₂ O)	139,31	kg
6	Eter metylowy glikolu propylenowego	1 071,60	kg
7	Alkilobenzenosulfonian	857,28	kg

8	Spoiwo akrylowe (34% w H ₂ O)	13,75	kg
9	Mosiądz	26,58	kg
10	Stal chromowana	5,39	kg
11	Drut stalowy	31,97	kg
12	Woda dejonizowana	198 603,20	kg
13	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	19 860,32	kWh
14	Gaz ziemny	14 288,00	MJ
15	Transport kolejowy	4 536,44	tkm
16	Transport drogowy	989,44	tkm
Produkcja ogniwa fotowoltaicznego			
1	Wafle krzemowe	3 573,04	m ²
2	Amoniak (ciekły)	31,86	kg
3	Kwas fosforowy (70% w H ₂ O)	30,83	kg
4	Trójchlorek fosforu	97,87	kg
5	Izopropanol	2,89	kg
6	Rozpuszczalniki organiczne	40,36	kg
7	Chlorek wapnia	112,52	kg
8	Kwas solny (30% w H ₂ O)	30,68	kg
9	Fluorek wodoru	1 439,52	kg
10	Kwas azotowy (50% w H ₂ O)	1 046,60	kg
11	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	252,54	kg
12	Wapno	778,70	kg
13	Nadtlenek wodoru (50% w H ₂ O)	1,61	kg
14	Kwas siarkowy	360,77	kg
15	Czynnik chłodniczy (R134a)	0,10	kg
16	Wodorotlenek potasu	107,16	kg
17	Siarczan amonu	75,01	kg
18	Tlen (ciekły)	29,36	kg
19	Azot (ciekły)	4 822,20	kg
20	Krzemowodory	9,32	kg
21	Pasta metalizacyjna	213,89	kg
22	Woda	896 572,00	kg
23	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	63 224,40	kWh
24	Gaz ziemny	882,28	MJ
25	Olej opałowy	9,64	MJ
26	Transport kolejowy	1 407,37	tkm
27	Transport drogowy	1 864,58	tkm
Produkcja modułu fotowoltaicznego			
1	Ogniwa fotowoltaiczne	3 572,94	m ²
2	Diody	10,04	kg
3	Klej silikonowy	435,78	kg
4	Szkło solarne	31 469,32	kg
5	Szkło hartowane	31 469,32	kg
6	Folia z polifluorku winylu	400,06	kg
7	Fluorowodór	222,69	kg

8	1-propanol	56,79	kg
9	Izopropanol	0,53	kg
10	Wodorotlenek potasu	183,60	kg
11	Stop aluminium	7 608,36	kg
12	Miedź	765,84	kg
13	Cyna	46,08	kg
14	Ołów	2,59	kg
15	Tworzywo polimerowe wzmocnione włóknem szklanym	1 053,74	kg
16	Politereftalen etylenu	1 235,91	kg
17	Polietylen, HDPE	85,01	kg
18	Octan etylowinyłu	3 125,50	kg
19	Tektura	2 725,44	kg
20	Palety	178,60	unit
21	Woda	17 967,16	kg
22	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	50 008,00	kWh
23	Olej napędowy	31,26	MJ
24	Transport kolejowy	55 008,80	tkm
25	Transport drogowy	9 144,32	tkm

Tabela Z.3. Wykaz kluczowych surowców do produkcji modułu amorficznego

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
Produkcja krzemu klasy metalurgicznej (MG-Si)			
1	Grafit	500,00	kg
2	Węgiel drzewny	850,00	kg
3	Koks naftowy	2 500,00	kg
4	Piasek	13 500,00	kg
5	Tlen (ciekły)	100,00	kg
6	Drewno (zrębki)	16,25	kg
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	55 000,00	kWh
8	Węgiel kamienny	115 500,00	MJ
9	Transport morski	12 750,00	tkm
10	Transport kolejowy	345,00	tkm
11	Transport drogowy	780,00	tkm
Produkcja krzemu klasy solarnej, o odpowiedniej jakości dla przemysłu fotowoltaicznego			
1	Krzem klasy metalurgicznej (MG-Si)	5 650,00	kg
2	Kwas solny (30% w H ₂ O)	8 000,00	kg
3	Wodór (ciekły)	250,50	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	1 740,00	kg
5	Energia elektryczna (spalanie kogeneracyjne)	87 500,00	kWh
6	Energia elektryczna (wytworzona w hydroelektrowni)	19 650,00	kWh
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	138 350,00	kWh
8	Ciepło sieciowe (kogeneracyjne)	144 000,00	MJ
9	Transport kolejowy	18 250,00	tkm
10	Transport drogowy	14 350,00	tkm
Produkcja krzemu amorficznego			
1	Krzem (mieszanka produkcyjna)	5 000,00	kg
2	Argon (ciekły)	1 260,00	kg
3	Hel	0,39	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	25,00	kg
5	Azot (ciekły)	152,00	kg
6	Kaolin	1 070,00	kg
7	Woda	4 715,00	m ³
8	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	35 000,00	kWh
9	Transport kolejowy	1 000,00	tkm
10	Transport drogowy	5 250,00	tkm
Produkcja waflí krzemowych			
1	Krzem amorficzny	3 700,00	kg
2	Grafit	33,00	kg
3	Argon (ciekły)	26 050,00	kg
4	Polistyren	1 000,00	kg
5	Folia LDPE	500,00	kg
6	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	211 500,00	kWh
7	Transport kolejowy	4 095,00	tkm

8	Transport drogowy	1 570,00	tkm
Produkcja ogniw fotowoltaicznych			
1	Wafle krzemowe	54 000,00	m ²
2	Amoniak (ciekły)	33,70	kg
3	Kwas fosforowy (70% w H ₂ O)	38,35	kg
4	Trójdychlorek fosforu	7,95	kg
5	Dwutlenek tytanu	0,01	kg
6	Etanol	3,21	kg
7	Izopropanol	394,50	kg
8	Rozpuszczalniki organiczne	7,15	kg
9	Klej silikonowy	6,05	kg
10	Krzemian sodu	374,00	kg
11	Chlorek wapnia	108,00	kg
12	Kwas octowy (98% w H ₂ O)	14,15	kg
13	Kwas solny (30% w H ₂ O)	228,00	kg
14	Fluorek wodoru	188,50	kg
15	Kwas azotowy (50% w H ₂ O)	133,50	kg
16	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	785,00	kg
17	Argon	128,50	kg
18	Tlen (ciekły)	510,00	kg
19	Azot (ciekły)	9 250,00	kg
20	Pasta metalizacyjna	421,15	kg
21	Tetrafluoroetylen	15,80	kg
22	Polistyren	2,04	kg
23	Woda	4 995,00	m ³
24	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	1 510 000,00	kWh
25	Gaz ziemny	23 850,00	MJ
26	Olej opałowy	5 800,00	MJ
27	Transport morski	4 425,00	tkm
28	Transport kolejowy	7 600,00	tkm
29	Transport drogowy	2 790,00	tkm
Produkcja modułów fotowoltaicznych			
1	Folia poliwinylfluorkowa	615,00	kg
2	Krzemowodory	17,90	kg
3	Ind	4,47	kg
4	Tellurek kadmu	4,47	kg
5	Kwas fosforowy (70% w H ₂ O)	0,38	kg
6	Tlen (ciekły)	2,43	kg
7	Wodór (ciekły)	109,00	kg
8	Miedź	668,00	kg
9	Blacha stalowa walcowana	9 640,00	kg
10	Aluminium	71,50	kg
11	Lut twardy (bez kadmu)	13,10	kg
12	Lut miękki	48,55	kg
13	Polietylen HDPE	5 500,00	kg

14	Folia LDPE	1 550,00	kg
15	Tworzywo polimerowe wzmocnione włóknem szklanym	179,00	kg
16	Kauczuk syntetyczny	338,00	kg
17	Polietylen LDPE	92,00	kg
18	Woda	198 500,00	unit
19	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	241 000,00	kWh
20	Olej napędowy	29 450,00	MJ
21	Transport morski	45 350,00	tkm
22	Transport kolejowy	7 500,00	tkm
23	Transport drogowy	42,45	tkm

Tabela Z.4. Wykaz kluczowych surowców do produkcji modułu perowskitowego

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
Produkcja krzemu klasy metalurgicznej (MG-Si)			
1	Grafit	555,60	kg
2	Węgiel drzewny	944,52	kg
3	Koks naftowy	2 778,00	kg
4	Piasek	15 001,20	kg
5	Tlen (ciekły)	111,12	kg
6	Drewno (zrębki)	18,06	kg
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	61 116,00	kWh
8	Węgiel kamienny	128 343,00	MJ
9	Transport morski	14 167,00	tkm
10	Transport kolejowy	383,36	tkm
11	Transport drogowy	866,74	tkm
Produkcja krzemu klasy solarnej, o odpowiedniej jakości dla przemysłu fotowoltaicznego			
1	Krzem klasy metalurgicznej (MG-Si)	6 278,28	kg
2	Kwas solny (30% w H ₂ O)	8 889,60	kg
3	Wodór (ciekły)	278,36	kg
4	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	1 933,49	kg
5	Energia elektryczna (spalanie kogeneracyjne)	97 230,00	kWh
6	Energia elektryczna (wytworzona w hydroelektrowni)	21 835,08	kWh
7	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	153 734,52	kWh
8	Ciepło sieciowe (kogeneracyjne)	160 012,80	MJ
9	Transport kolejowy	20 279,40	tkm
10	Transport drogowy	15 945,72	tkm
Produkcja krzemu monokrystalicznego (proces Czochralskiego)			
1	Krzem klasy solarnej	5 557,00	kg
2	Argon (ciekły)	5 556,00	kg
3	Fluorowodór	55,56	kg
4	Kwas azotowy (50% w H ₂ O)	371,14	kg
5	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	230,57	kg
6	Kaolin	927,85	kg
7	Wodorotlenek wapnia	123,34	kg
8	Woda dejonizowana	22 279,56	kg
9	Woda	28 280,04	kg
10	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	177 792,00	kg
11	Gaz ziemny	378 919,20	kg
12	Transport kolejowy	7 833,96	kg
13	Transport drogowy	6 278,28	kg
Produkcja wafli krzemowych			
1	Krzem monokrystaliczny (wytworzony w procesie Czochralskiego)	3 305,82	kg
2	Szkło (niepowlekane)	55,50	kg
3	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	83,34	kg
4	Kwas solny (30% w H ₂ O)	15,00	kg

5	Kwas octowy (98% w H ₂ O)	216,68	kg
6	Eter metylowy glikolu propylenowego	1 666,80	kg
7	Alkilobenzenosulfonian	1 333,44	kg
8	Spoivo akrylowe (34% w H ₂ O)	11,11	kg
9	Mosiądz	41,34	kg
10	Stal chromowana	8,39	kg
11	Drut stalowy	49,73	kg
12	Woda dejonizowana	308 913,60	kg
13	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	26 446,56	kWh
14	Gaz ziemny	22 224,00	MJ
15	Transport kolejowy	6 945,00	tkm
16	Transport drogowy	1 311,22	tkm
Produkcja ogniw fotowoltaicznych			
1	Wafle krzemowe	5 557,03	kg
2	Amoniak (ciekły)	121,68	kg
3	Trójtlenek fosforu	73,89	kg
4	Izopropanol	983,41	kg
5	Kwas solny (30% w H ₂ O)	3,49	kg
6	Fluorowodór	3,58	kg
7	Wodorotlenek sodu (50% w H ₂ O)	3 355,82	kg
8	Wodorotlenek wapnia	83,90	kg
9	Czynnik chłodniczy (R134a)	0,17	kg
10	Azot (ciekły)	6 389,40	kg
11	Krzemowodory	16,17	kg
12	Pasta metalizacyjna	332,69	kg
13	Woda	950 076,00	kg
14	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	98 341,20	kWh
15	Gaz ziemny	337,80	MJ
16	Transport kolejowy	8 445,12	tkm
17	Transport drogowy	1 522,34	tkm
Produkcja modułu fotowoltaicznego			
1	Ogniwa fotowoltaiczne	5 194,86	m ²
2	Jodek metylu	2,19	kg
3	Bromek etylenu	2,19	kg
4	Rozpuszczalniki nieorganiczne	2 355,74	kg
5	Rozpuszczalniki organiczne	218,91	kg
6	Żywica fenolowa	0,52	kg
7	Żywica epoksydowa	0,52	kg
8	Związki difenyleteryne	2,06	kg
9	Szkło solarne	45 170,28	kg
10	Szkło hartowane	72 672,48	kg
11	1-propanol	88,34	kg
12	Diody	15,61	kg
13	Klej silikonowy	677,83	kg
14	Aluminium	11 834,28	kg
15	Ołów	13,03	kg

16	Ind	41,67	kg
17	Cyna	113,34	kg
18	Srebro	19,56	kg
19	Pasta metalizacyjna	52,12	kg
20	Miedź	1 144,54	kg
21	Octan etylowinylowy	5 417,10	kg
22	Tworzywo polimerowe wzmocnione włóknem szklanym	1 639,02	kg
23	Tektura	4 238,23	kg
24	Palety	173,90	kg
25	Woda	4 061,44	kg
26	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	130 010,40	kWh
27	Transport kolejowy	341 138,40	tkm
28	Transport drogowy	25 613,16	tkm

Tabela Z.5. Wykaz kluczowych surowców do produkcji stacji inwerterowej

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
1	Farba	44,00	kg
2	Olej smarowy	1 762,00	kg
3	Diody	0,09	kg
4	Aluminium	262,00	kg
5	Miedź	670,00	kg
6	Stal niskostopowa	2 880,00	kg
7	Płytki obwodu drukowanego (PCB)	0,45	kg
8	Złącza (połączenia zaciskowe)	4,80	kg
9	Cewka indukcyjna (dławik z rdzeniem pierścieniowym)	0,70	kg
10	Układ scalony typu logicznego	0,06	kg
11	Tranzystor	0,08	kg
12	Kondensator (foliowy)	0,68	kg
13	Kondensator (elektrolitowy)	0,51	kg
14	Kondensator (tantalowy)	0,05	kg
15	Rezystor	0,01	kg
16	Stalowa blacha walcowana	2 880,00	kg
17	Drut miedziany	670,00	kg
18	Wyłaczany profil aluminiowy	262,00	kg
19	Polietylen HDPE	44,60	kg
20	Tworzywo polimerowe wzmocnione włóknem szklanym	230,00	kg
21	Płyta styropianowa	3,20	kg
23	Tektura	27,20	kg
24	Tworzywa formowane wtryskowo	142,00	kg
25	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	9 160,00	kWh
26	Transport morski	2 080,00	tkm
27	Transport kolejowy	2 140,00	tkm
28	Transport drogowy	612,00	tkm

Tabela Z.6. Wykaz kluczowych surowców do produkcji transformatora

Lp.	Surowiec	Ilość	Jednostka
1	Farba	150,00	kg
2	Olej transformatorowy	6 001,00	kg
3	Diody	53,69	kg
4	Stal	9 792,00	kg
5	Aluminium	894,00	kg
6	Miedź	2 277,00	kg
7	Poliamid	485,00	kg
8	Poliester	300,00	kg
9	Polietylen	150,00	kg
10	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	16 698,00	kWh
11	Transport morski	2 541,00	tkm
12	Transport kolejowy	2 678,00	tkm
13	Transport drogowy	691,00	tkm

Tabela Z.7. Wykaz kluczowych surowców do produkcji konstrukcji wsporczej

Lp.	Surowiec	Elektrownia monokrystaliczna	Elektrownia polikrystaliczna	Elektrownia amorficzna	Elektrownia perowskitowa	Jednostka
1	Miedź	2 976,92	4 167,69	3 542,53	2 679,23	kg
2	Mosiądz	5,77	8,08	6,87	5,19	kg
3	Cynk	11,54	16,16	13,73	10,39	kg
4	Stal niskostopowa	223,08	312,31	265,47	200,77	kg
5	Polikaprolaktam	66,38	92,93	78,99	59,74	kg
6	Polietylen HDPE	2 869,23	4 016,92	3 414,38	2 582,31	kg
7	Polichlorek winylu	181,54	254,16	216,03	163,39	kg
8	Poliwęglan	0,58	0,81	0,69	0,52	kg
9	Żywica epoksydowa	0,58	0,81	0,69	0,52	kg
10	Drut miedziany	2 976,92	4 167,69	3 542,53	2 679,23	kg
11	Energia elektryczna (ze źródeł konwencjonalnych)	12 365,00	17 311,00	14 714,35	11 128,50	kWh
12	Transport kolejowy	2 553,85	3 575,39	3 039,08	2 298,47	tkm
13	Transport drogowy	380,00	532,00	452,20	342,00	tkm

Tabela Z.8. Wykaz kluczowych surowców do produkcji instalacji elektrycznej

Lp.	Surowiec	Elektrownia monokrystaliczna	Elektrownia polikrystaliczna	Elektrownia amorficzna	Elektrownia perowskitowa	Jednostka
1	Piasek	1 639,74	3 115,00	2 225,36	3 461,38	kg
2	Aluminium	11 844,00	22 500,00	16 037,00	25 002,00	kg
3	Stal niskostopowa	1 052,80	2 000,00	1 428,80	2 222,40	kg
4	Polietylen HDPE	74,22	141,00	100,73	156,68	kg
5	Polistyren	15,84	30,10	21,50	33,48	kg
6	Poliuretan	48,43	92,00	65,72	102,23	kg
7	Kauczuk syntetyczny	3 263,68	6 200,00	4 429,28	6 889,44	kg
8	Tektura	300,01	570,00	407,21	633,38	kg
9	Transport kolejowy	2 242 047,00	4 260,00	3 043,34	4 733,71	tkm
10	Transport drogowy	1 631,82	2 910,00	2 078,90	3 233,59	tkm

Tabela Z.9. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator		Jednostka
	Forma zagospodarowania poużytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	
	Kategoria wpływu											
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	3,30·10 ⁻⁵	2,97·10 ⁻⁶	3,57·10 ⁻³	2,76·10 ⁻³	5,99·10 ⁻⁵	5,39·10 ⁻⁵	2,88·10 ⁻⁵	1,82·10 ⁻⁵	4,32·10 ⁻⁵	4,29·10 ⁻⁵	DALY
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	9,97·10 ⁻⁵	-8,07·10 ⁻⁶	2,82·10 ⁻²	2,13·10 ⁻²	1,79·10 ⁻⁴	1,27·10 ⁻⁴	8,93·10 ⁻⁵	4,40·10 ⁻⁵	1,25·10 ⁻⁴	1,04·10 ⁻⁴	DALY
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	4,39·10 ⁻⁷	1,58·10 ⁻⁷	2,99·10 ⁻⁵	1,69·10 ⁻⁵	6,62·10 ⁻⁷	4,89·10 ⁻⁷	4,29·10 ⁻⁷	2,20·10 ⁻⁷	4,69·10 ⁻⁷	3,99·10 ⁻⁷	DALY
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	1,75·10 ⁻⁷	-1,19·10 ⁻⁷	1,81·10 ⁻⁵	9,99·10 ⁻⁶	2,82·10 ⁻⁷	2,30·10 ⁻⁷	1,03·10 ⁻⁷	5,11·10 ⁻⁸	1,87·10 ⁻⁷	1,23·10 ⁻⁷	DALY
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	7,54·10 ⁻⁹	-4,77·10 ⁻⁹	1,50·10 ⁻⁶	6,35·10 ⁻⁷	1,34·10 ⁻⁸	4,86·10 ⁻⁹	5,82·10 ⁻⁹	2,21·10 ⁻⁹	1,08·10 ⁻⁸	3,34·10 ⁻⁹	DALY
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	8,57·10 ⁻⁵	9,92·10 ⁻⁶	7,30·10 ⁻⁴	4,38·10 ⁻⁴	1,33·10 ⁻⁴	7,02·10 ⁻⁵	6,67·10 ⁻⁵	7,96·10 ⁻⁶	1,11E-04	8,18·10 ⁻⁵	DALY
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	3,69·10 ⁻⁶	2,31·10 ⁻⁶	3,14·10 ⁻⁵	1,68·10 ⁻⁵	9,51·10 ⁻⁶	4,44·10 ⁻⁶	1,82·10 ⁻⁶	6,37·10 ⁻⁷	3,84·10 ⁻⁶	1,76·10 ⁻⁶	DALY
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	1,81·10 ⁻⁴	4,24·10 ⁻⁵	1,07·10 ⁻³	4,60·10 ⁻⁴	2,78·10 ⁻⁴	4,28·10 ⁻⁵	1,41·10 ⁻⁴	3,69·10 ⁻⁵	2,22·10 ⁻⁴	3,39·10 ⁻⁵	DALY
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	2,12·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻⁴	1,75·10 ⁻³	9,21·10 ⁻⁴	3,27·10 ⁻⁴	1,51·10 ⁻⁴	1,59·10 ⁻⁴	1,15·10 ⁻⁴	2,63·10 ⁻⁴	1,08·10 ⁻⁴	DALY
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	6,14·10 ⁻⁵	1,69·10 ⁻⁵	4,32·10 ⁻³	2,42·10 ⁻³	1,10·10 ⁻⁴	5,80·10 ⁻⁵	4,38·10 ⁻⁵	1,87·10 ⁻⁵	6,43·10 ⁻⁵	3,84·10 ⁻⁵	DALY
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	2,00·10 ⁻²	-1,95·10 ⁻²	2,88·10 ⁰	1,61·10 ⁰	2,95·10 ⁻²	9,85·10 ⁻³	1,24·10 ⁻²	2,34·10 ⁻³	2,41·10 ⁻²	9,58·10 ⁻³	DALY
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	8,15·10 ⁻⁸	7,34·10 ⁻⁹	3,55·10 ⁻⁵	2,02·10 ⁻⁵	1,30·10 ⁻⁷	1,17·10 ⁻⁷	6,24·10 ⁻⁸	3,93·10 ⁻⁸	9,34·10 ⁻⁸	9,27·10 ⁻⁸	gatunek/rok
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość	2,50·10 ⁻⁷	-2,01·10 ⁻⁸	1,11·10 ⁻⁴	6,20·10 ⁻⁵	3,94·10 ⁻⁷	2,80·10 ⁻⁷	1,96·10 ⁻⁷	9,71·10 ⁻⁸	2,75·10 ⁻⁷	2,28·10 ⁻⁷	gatunek/rok

	ekosystemów, perspektywa długoterminowa											
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$6,23 \cdot 10^{-9}$	$7,97 \cdot 10^{-9}$	$2,90 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$7,29 \cdot 10^{-9}$	$4,99 \cdot 10^{-9}$	$2,48 \cdot 10^{-9}$	$7,07 \cdot 10^{-9}$	$5,85 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$5,74 \cdot 10^{-8}$	$7,34 \cdot 10^{-9}$	$2,67 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-8}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$	$4,60 \cdot 10^{-8}$	$2,28 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	$5,39 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$6,39 \cdot 10^{-6}$	$3,04 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$3,91 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$5,42 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$1,89 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$8,83 \cdot 10^{-6}$	gatunek/rok
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$1,42 \cdot 10^{-8}$	$2,26 \cdot 10^{-9}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$7,93 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$4,09 \cdot 10^{-9}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$9,15 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$9,77 \cdot 10^{-6}$	$5,19 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$8,42 \cdot 10^{-8}$	$3,07 \cdot 10^{-8}$	$9,98 \cdot 10^{-8}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,25 \cdot 10^{-10}$	$-8,54 \cdot 10^{-11}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$4,12 \cdot 10^{-9}$	$2,19 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$	$8,17 \cdot 10^{-11}$	$3,93 \cdot 10^{-11}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-10}$	gatunek/rok
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,23 \cdot 10^{-9}$	$1,56 \cdot 10^{-9}$	$1,95 \cdot 10^{-7}$	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$1,57 \cdot 10^{-9}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$1,91 \cdot 10^{-16}$	$-1,02 \cdot 10^{-16}$	$3,61 \cdot 10^{-14}$	$1,84 \cdot 10^{-14}$	$3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,41 \cdot 10^{-16}$	$1,79 \cdot 10^{-16}$	$4,13 \cdot 10^{-17}$	$1,99 \cdot 10^{-16}$	$7,52 \cdot 10^{-17}$	gatunek/rok
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$4,57 \cdot 10^{-8}$	$3,58 \cdot 10^{-9}$	$7,94 \cdot 10^{-6}$	$3,72 \cdot 10^{-6}$	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^{-8}$	$3,95 \cdot 10^{-8}$	$2,46 \cdot 10^{-8}$	$5,02 \cdot 10^{-8}$	$3,23 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$7,61 \cdot 10^{-9}$	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$	$7,77 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,06 \cdot 10^{-10}$	$-1,67 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^{-9}$	$8,01 \cdot 10^{-10}$	$3,34 \cdot 10^{-10}$	$6,24 \cdot 10^{-12}$	$1,62 \cdot 10^{-10}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$2,56 \cdot 10^{-10}$	$7,66 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$1,58 \cdot 10^{-11}$	$6,42 \cdot 10^{-12}$	$6,48 \cdot 10^{-9}$	$3,09 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$1,70 \cdot 10^{-11}$	$1,24 \cdot 10^{-11}$	$6,28 \cdot 10^{-12}$	$1,65 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-11}$	gatunek/rok
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$1,20 \cdot 10^{-12}$	$5,57 \cdot 10^{-13}$	$8,07 \cdot 10^{-10}$	$4,79 \cdot 10^{-10}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$1,34 \cdot 10^{-12}$	$1,16 \cdot 10^{-12}$	$3,53 \cdot 10^{-13}$	$2,08 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok

Tabela Z.10. Normalizowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$5,31 \cdot 10^{-3}$	$8,10 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^0$	$7,67 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	$7,38 \cdot 10^{-3}$	$3,95 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$-2,21 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^0$	$2,31 \cdot 10^0$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$6,03 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$6,06 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$-1,14 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$5,80 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$5,30 \cdot 10^{-5}$	$-2,68 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$	$7,53 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$3,28 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$6,09 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$3,85 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-1}$	$2,53 \cdot 10^{-1}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$2,57 \cdot 10^{-2}$	$3,08 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$1,41 \cdot 10^{-2}$	$8,86 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-1}$	$7,72 \cdot 10^{-2}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$6,97 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$7,17 \cdot 10^{-3}$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$3,82 \cdot 10^{-1}$	$1,64 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$8,91 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$	$8,07 \cdot 10^{-3}$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$3,69 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	$4,57 \cdot 10^{-1}$	$2,40 \cdot 10^{-1}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$2,77 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$8,42 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$8,87 \cdot 10^{-1}$	$4,98 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$2,49 \cdot 10^0$	$-1,66 \cdot 10^0$	$5,91 \cdot 10^2$	$3,30 \cdot 10^2$	$3,53 \cdot 10^0$	$1,18 \cdot 10^0$	$2,26 \cdot 10^0$	$4,27 \cdot 10^{-1}$	$2,84 \cdot 10^0$	$1,12 \cdot 10^0$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$8,30 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$-3,56 \cdot 10^{-5}$	$8,98 \cdot 10^{-2}$	$4,99 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$9,78 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$5,91 \cdot 10^{-6}$	$7,04 \cdot 10^{-7}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$8,58 \cdot 10^{-6}$	$5,04 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$7,15 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$5,91 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$2,31 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$4,93 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^0$	$5,13 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$8,05 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$6,39 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-5}$	$8,22 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$7,89 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-5}$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$-8,61 \cdot 10^{-8}$	$8,95 \cdot 10^{-6}$	$3,33 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$8,25 \cdot 10^{-8}$	$3,97 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	$1,58 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$1,93 \cdot 10^{-13}$	$-1,59 \cdot 10^{-13}$	$2,91 \cdot 10^{-11}$	$1,48 \cdot 10^{-11}$	$3,11 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$1,70 \cdot 10^{-13}$	$3,91 \cdot 10^{-14}$	$2,62 \cdot 10^{-13}$	$9,87 \cdot 10^{-14}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$6,16 \cdot 10^{-5}$	$4,83 \cdot 10^{-6}$	$6,42 \cdot 10^{-3}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$5,32 \cdot 10^{-5}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,00 \cdot 10^{-7}$	$-1,13 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$6,47 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$4,73 \cdot 10^{-9}$	$1,64 \cdot 10^{-7}$	$2,70 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$8,15 \cdot 10^{-9}$	$5,24 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$1,57 \cdot 10^{-8}$	$7,91 \cdot 10^{-9}$	$2,16 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$2,42 \cdot 10^{-9}$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$6,45 \cdot 10^{-7}$	$3,92 \cdot 10^{-7}$	$3,39 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-10}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$	$6,41 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$

Tabela Z.11. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach monokrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EURO)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$6,16 \cdot 10^3$	$6,08 \cdot 10^2$	$4,77 \cdot 10^5$	$2,69 \cdot 10^5$	$9,57 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^3$	$4,04 \cdot 10^3$	$2,79 \cdot 10^3$	$6,59 \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^3$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$9,22 \cdot 10^3$	$8,20 \cdot 10^2$	$9,52 \cdot 10^5$	$5,78 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$8,25 \cdot 10^3$	$4,46 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$9,34 \cdot 10^1$	$2,22 \cdot 10^0$	$4,53 \cdot 10^3$	$2,54 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^0$	$8,15 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^0$	$1,30 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^0$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$2,41 \cdot 10^1$	$3,60 \cdot 10^0$	$8,41 \cdot 10^2$	$4,89 \cdot 10^2$	$3,48 \cdot 10^1$	$3,11 \cdot 10^1$	$1,90 \cdot 10^1$	$1,04 \cdot 10^1$	$2,59 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$3,73 \cdot 10^1$	$5,30 \cdot 10^{-1}$	$6,94 \cdot 10^2$	$2,72 \cdot 10^2$	$6,95 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-1}$	$2,71 \cdot 10^1$	$6,14 \cdot 10^{-1}$	$4,14 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^0$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$7,07 \cdot 10^3$	$9,86 \cdot 10^2$	$3,37 \cdot 10^4$	$2,00 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$1,96 \cdot 10^2$	$5,63 \cdot 10^3$	$8,08 \cdot 10^2$	$9,39 \cdot 10^3$	$7,58 \cdot 10^2$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$3,41 \cdot 10^2$	$2,34 \cdot 10^2$	$1,45 \cdot 10^4$	$8,77 \cdot 10^3$	$5,01 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^2$	$2,81 \cdot 10^2$	$1,07 \cdot 10^2$	$3,55 \cdot 10^2$	$1,58 \cdot 10^2$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$1,80 \cdot 10^4$	$4,60 \cdot 10^3$	$2,47 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	$3,66 \cdot 10^4$	$4,95 \cdot 10^3$	$1,57 \cdot 10^4$	$2,24 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^3$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$1,03 \cdot 10^4$	$7,74 \cdot 10^3$	$3,81 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$	$2,11 \cdot 10^4$	$8,53 \cdot 10^3$	$9,62 \cdot 10^3$	$3,83 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^3$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,21 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^3$	$4,34 \cdot 10^5$	$2,62 \cdot 10^5$	$2,05 \cdot 10^4$	$9,52 \cdot 10^3$	$8,62 \cdot 10^3$	$4,04 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^3$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$5,49 \cdot 10^4$	$5,29 \cdot 10^3$	$4,38 \cdot 10^6$	$2,42 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^5$	$6,49 \cdot 10^4$	$2,50 \cdot 10^4$	$4,32 \cdot 10^3$	$7,00 \cdot 10^4$	$2,53 \cdot 10^4$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$8,94 \cdot 10^3$	$8,82 \cdot 10^2$	$9,21 \cdot 10^5$	$5,50 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$7,82 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^4$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$9,37 \cdot 10^3$	$8,26 \cdot 10^2$	$9,68 \cdot 10^5$	$5,87 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^4$	$8,39 \cdot 10^3$	$4,54 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,07 \cdot 10^4$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$9,57 \cdot 10^1$	$1,35 \cdot 10^1$	$1,03 \cdot 10^4$	$5,95 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^2$	$8,76 \cdot 10^1$	$4,78 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$8,81 \cdot 10^2$	$1,24 \cdot 10^2$	$9,53 \cdot 10^5$	$3,65 \cdot 10^5$	$1,87 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$8,07 \cdot 10^2$	$4,40 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$6,93 \cdot 10^2$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,95 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^2$	$2,46 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^4$	$6,42 \cdot 10^2$	$2,89 \cdot 10^2$	$2,35 \cdot 10^2$	$9,35 \cdot 10^1$	$3,49 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^2$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$9,51 \cdot 10^4$	$7,08 \cdot 10^4$	$6,63 \cdot 10^5$	$3,97 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^4$	$7,93 \cdot 10^4$	$2,36 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^4$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$3,48 \cdot 10^2$	$6,07 \cdot 10^1$	$7,51 \cdot 10^3$	$4,48 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^2$	$2,86 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$	$4,02 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^2$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,57 \cdot 10^3$	$2,98 \cdot 10^2$	$3,43 \cdot 10^4$	$2,06 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^3$	$1,23 \cdot 10^3$	$4,93 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^3$	$8,86 \cdot 10^2$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,37 \cdot 10^1$	$1,22 \cdot 10^1$	$2,16 \cdot 10^2$	$9,53 \cdot 10^1$	$2,84 \cdot 10^1$	$2,76 \cdot 10^1$	$7,97 \cdot 10^0$	$5,46 \cdot 10^0$	$1,46 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^1$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$3,90 \cdot 10^1$	$3,00 \cdot 10^1$	$7,41 \cdot 10^2$	$4,44 \cdot 10^2$	$7,69 \cdot 10^1$	$6,18 \cdot 10^1$	$2,85 \cdot 10^1$	$1,93 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^1$	$3,22 \cdot 10^1$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,08 \cdot 10^{-1}$	$5,43 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^0$	$1,09 \cdot 10^0$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-1}$	$6,90 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$5,11 \cdot 10^{-3}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$7,13 \cdot 10^2$	$3,06 \cdot 10^2$	$2,79 \cdot 10^4$	$1,55 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^2$	$6,93 \cdot 10^2$	$4,74 \cdot 10^2$	$8,81 \cdot 10^2$	$6,21 \cdot 10^2$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,30 \cdot 10^2$	$1,87 \cdot 10^2$	$1,29 \cdot 10^4$	$7,49 \cdot 10^3$	$8,18 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^2$	$2,21 \cdot 10^2$	$1,50 \cdot 10^2$	$2,53 \cdot 10^2$	$2,02 \cdot 10^2$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$3,49 \cdot 10^1$	$1,27 \cdot 10^1$	$8,56 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$	$7,85 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-4}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$2,77 \cdot 10^{-1}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$2,28 \cdot 10^1$	$1,29 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^{-1}$	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$2,18 \cdot 10^{-1}$	$1,21 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$3,15 \cdot 10^{-2}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$3,15 \cdot 10^0$	$1,82 \cdot 10^0$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$6,79 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
RAZEM		$2,36 \cdot 10^5$	$9,76 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^7$	$5,80 \cdot 10^6$	$4,73 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$5,80 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^5$

Tabela Z.12. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator		Jednostka
	Forma zagospodarowania poużytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	
	Kategoria wpływu											
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	3,92 · 10 ⁻⁵	3,54 · 10 ⁻⁶	5,02 · 10 ⁻³	3,99 · 10 ⁻³	5,99 · 10 ⁻⁵	5,39 · 10 ⁻⁵	3,37 · 10 ⁻⁵	2,13 · 10 ⁻⁵	4,3 · 10 ⁻⁵	4,29 · 10 ⁻⁵	DALY
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	1,19 · 10 ⁻⁴	-9,60 · 10 ⁻⁶	2,53 · 10 ⁻²	1,92 · 10 ⁻²	1,79 · 10 ⁻⁴	1,27 · 10 ⁻⁴	1,04 · 10 ⁻⁴	5,15 · 10 ⁻⁵	1,25 · 10 ⁻⁴	1,04 · 10 ⁻⁴	DALY
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	5,23 · 10 ⁻⁷	1,88 · 10 ⁻⁷	3,62 · 10 ⁻⁶	2,56 · 10 ⁻⁶	6,62 · 10 ⁻⁷	4,89 · 10 ⁻⁷	5,02 · 10 ⁻⁷	2,57 · 10 ⁻⁷	4,69 · 10 ⁻⁷	3,99 · 10 ⁻⁷	DALY
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	2,09 · 10 ⁻⁷	-1,41 · 10 ⁻⁷	1,52 · 10 ⁻⁵	1,05 · 10 ⁻⁵	2,82 · 10 ⁻⁷	2,30 · 10 ⁻⁷	1,20 · 10 ⁻⁷	5,98 · 10 ⁻⁸	1,87 · 10 ⁻⁷	1,23 · 10 ⁻⁷	DALY
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	8,97 · 10 ⁻⁹	-5,67 · 10 ⁻⁹	1,13 · 10 ⁻⁶	3,73 · 10 ⁻⁷	1,34 · 10 ⁻⁸	4,86 · 10 ⁻⁹	6,81 · 10 ⁻⁹	2,59 · 10 ⁻⁹	1,08 · 10 ⁻⁸	3,34 · 10 ⁻⁹	DALY
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	1,02 · 10 ⁻⁴	1,18 · 10 ⁻⁵	6,15 · 10 ⁻⁴	4,54 · 10 ⁻⁴	1,33 · 10 ⁻⁴	7,02 · 10 ⁻⁵	7,81 · 10 ⁻⁵	9,31 · 10 ⁻⁶	1,11 · 10 ⁻⁴	8,18 · 10 ⁻⁵	DALY
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	4,39 · 10 ⁻⁶	2,75 · 10 ⁻⁶	2,42 · 10 ⁻⁵	1,87 · 10 ⁻⁵	9,51 · 10 ⁻⁶	4,44 · 10 ⁻⁶	2,13 · 10 ⁻⁶	7,45 · 10 ⁻⁷	3,84 · 10 ⁻⁶	1,76 · 10 ⁻⁶	DALY
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	2,16 · 10 ⁻⁴	5,04 · 10 ⁻⁵	8,17 · 10 ⁻⁴	5,26 · 10 ⁻⁴	2,78 · 10 ⁻⁴	4,28 · 10 ⁻⁵	1,65 · 10 ⁻⁴	4,31 · 10 ⁻⁵	2,22 · 10 ⁻⁴	3,39 · 10 ⁻⁵	DALY
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	2,53 · 10 ⁻⁴	1,73 · 10 ⁻⁴	1,32 · 10 ⁻³	1,02 · 10 ⁻³	3,27 · 10 ⁻⁴	1,51 · 10 ⁻⁴	1,86 · 10 ⁻⁴	1,35 · 10 ⁻⁴	2,63 · 10 ⁻⁴	1,08 · 10 ⁻⁴	DALY
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	7,31 · 10 ⁻⁵	2,02 · 10 ⁻⁵	3,26 · 10 ⁻³	2,61 · 10 ⁻³	1,10 · 10 ⁻⁴	5,80 · 10 ⁻⁵	5,13 · 10 ⁻⁵	2,19 · 10 ⁻⁵	6,43 · 10 ⁻⁵	3,84 · 10 ⁻⁵	DALY
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	2,38 · 10 ⁻²	-3,75 · 10 ⁻²	2,34 · 10 ⁰	1,58 · 10 ⁰	2,95 · 10 ⁻²	9,85 · 10 ⁻³	1,45 · 10 ⁻²	2,73 · 10 ⁻³	2,41E-02	9,58 · 10 ⁻³	DALY
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	9,70 · 10 ⁻⁸	8,74 · 10 ⁻⁹	3,06 · 10 ⁻⁵	2,43 · 10 ⁻⁵	1,30 · 10 ⁻⁷	1,17 · 10 ⁻⁷	7,30 · 10 ⁻⁸	4,60 · 10 ⁻⁸	9,34 · 10 ⁻⁸	9,27 · 10 ⁻⁸	gatunek/rok

13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$2,98 \cdot 10^{-7}$	$-2,39 \cdot 10^{-8}$	$9,46 \cdot 10^{-5}$	$5,52 \cdot 10^{-5}$	$3,94 \cdot 10^{-7}$	$2,80 \cdot 10^{-7}$	$2,29 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$	gatunek/rok
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$7,42 \cdot 10^{-9}$	$9,48 \cdot 10^{-10}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$7,29 \cdot 10^{-9}$	$5,84 \cdot 10^{-9}$	$2,90 \cdot 10^{-9}$	$7,07 \cdot 10^{-9}$	$5,85 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$6,83 \cdot 10^{-8}$	$8,74 \cdot 10^{-9}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-8}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$	$5,38 \cdot 10^{-8}$	$2,67 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$5,39 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,00 \cdot 10^{-8}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$5,83 \cdot 10^{-6}$	$3,40 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$	$4,58 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$6,45 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$7,87 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$5,28 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$8,83 \cdot 10^{-6}$	gatunek/rok
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$1,69 \cdot 10^{-8}$	$2,69 \cdot 10^{-9}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$	$9,77 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$4,78 \cdot 10^{-9}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$1,89 \cdot 10^{-8}$	$8,38 \cdot 10^{-6}$	$6,39 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$9,85 \cdot 10^{-8}$	$3,59 \cdot 10^{-8}$	$9,98 \cdot 10^{-8}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$-1,02 \cdot 10^{-10}$	$9,54 \cdot 10^{-9}$	$514 \cdot 10^{-9}$	$2,19 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$	$9,56 \cdot 10^{-11}$	$4,60 \cdot 10^{-11}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-10}$	gatunek/rok
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,65 \cdot 10^{-9}$	$1,86 \cdot 10^{-9}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-7}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$184 \cdot 10^{-9}$	$1,73 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,27 \cdot 10^{-16}$	$-1,22 \cdot 10^{-16}$	$3,33 \cdot 10^{-14}$	$2,19 \cdot 10^{-14}$	$3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,41 \cdot 10^{-16}$	$2,10 \cdot 10^{-16}$	$4,83 \cdot 10^{-17}$	$1,99 \cdot 10^{-16}$	$7,52 \cdot 10^{-17}$	gatunek/rok
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$5,44 \cdot 10^{-8}$	$4,26 \cdot 10^{-9}$	$6,74 \cdot 10^{-6}$	$4,63 \cdot 10^{-6}$	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^{-8}$	$4,62 \cdot 10^{-8}$	$2,88 \cdot 10^{-8}$	$5,02 \cdot 10^{-8}$	$3,23 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$1,62 \cdot 10^{-8}$	$9,06 \cdot 10^{-9}$	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$2,44 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$9,10 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,45 \cdot 10^{-10}$	$-1,99 \cdot 10^{-10}$	$2,97 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{-9}$	$3,34 \cdot 10^{-10}$	$6,24 \cdot 10^{-12}$	$1,89 \cdot 10^{-10}$	$1,25 \cdot 10^{-11}$	$2,56 \cdot 10^{-10}$	$7,66 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$1,88 \cdot 10^{-11}$	$7,64 \cdot 10^{-12}$	$5,58 \cdot 10^{-9}$	$3,77 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$1,70 \cdot 10^{-11}$	$1,46 \cdot 10^{-11}$	$7,35 \cdot 10^{-12}$	$1,65 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-11}$	gatunek/rok
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$1,42 \cdot 10^{-12}$	$6,63 \cdot 10^{-13}$	$7,29 \cdot 10^{-10}$	$5,57 \cdot 10^{-10}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$1,34 \cdot 10^{-12}$	$1,36 \cdot 10^{-12}$	$4,13 \cdot 10^{-13}$	$2,08 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok

Tabela Z.13. Normalizowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$9,64 \cdot 10^{-4}$	$9,38 \cdot 10^{-1}$	$5,96 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	$7,38 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$-2,63 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^0$	$1,80 \cdot 10^0$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$7,05 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$2,58 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$6,15 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$-1,36 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$6,79 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$6,31 \cdot 10^{-5}$	$-3,19 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$5,51 \cdot 10^{-5}$	$7,53 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$3,83 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$6,09 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$5,30 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$7,31 \cdot 10^{-2}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$8,16 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$7,17 \cdot 10^{-3}$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$5,14 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-1}$	$7,79 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$8,91 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-2}$	$4,10 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$	$8,07 \cdot 10^{-3}$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$4,39 \cdot 10^{-2}$	$3,01 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$7,56 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{-1}$	$3,86 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$7,02 \cdot 10^{-3}$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$2,97 \cdot 10^0$	$-1,97 \cdot 10^0$	$3,72 \cdot 10^2$	$2,78 \cdot 10^2$	$3,53 \cdot 10^0$	$1,18 \cdot 10^0$	$2,64 \cdot 10^0$	$4,99 \cdot 10^{-1}$	$2,84 \cdot 10^0$	$1,12 \cdot 10^0$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$9,71 \cdot 10^{-5}$	$4,65 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$2,88 \cdot 10^{-4}$	$-4,23 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-2}$	$3,64 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$7,03 \cdot 10^{-7}$	$8,38 \cdot 10^{-7}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$9,45 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$8,58 \cdot 10^{-6}$	$5,90 \cdot 10^{-6}$	$2,94 \cdot 10^{-6}$	$7,15 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$7,04 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-2}$	$8,72 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$5,43 \cdot 10^{-5}$	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$5,77 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$1,30 \cdot 10^{-1}$	$5,87 \cdot 10^{-2}$	$8,01 \cdot 10^{-1}$	$4,30 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$9,42 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$3,41 \cdot 10^{-5}$	$5,41 \cdot 10^{-6}$	$6,36 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,69 \cdot 10^{-5}$	$9,62 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$3,80 \cdot 10^{-5}$	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$6,96 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-5}$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,50 \cdot 10^{-7}$	$-1,03 \cdot 10^{-7}$	$4,72 \cdot 10^{-6}$	$2,48 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$9,66 \cdot 10^{-8}$	$4,65 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$7,05 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	$1,85 \cdot 10^{-6}$	$1,40 \cdot 10^{-6}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,29 \cdot 10^{-13}$	$-1,89 \cdot 10^{-13}$	$1,65 \cdot 10^{-11}$	$1,06 \cdot 10^{-11}$	$3,11 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$1,99 \cdot 10^{-13}$	$4,57 \cdot 10^{-14}$	$2,62 \cdot 10^{-13}$	$9,87 \cdot 10^{-14}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-6}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-5}$	$3,88 \cdot 10^{-5}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,40 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,38 \cdot 10^{-7}$	$-1,34 \cdot 10^{-7}$	$7,70 \cdot 10^{-7}$	$5,59 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$4,73 \cdot 10^{-9}$	$1,91 \cdot 10^{-7}$	$3,16 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$2,37 \cdot 10^{-8}$	$9,70 \cdot 10^{-9}$	$2,76 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$1,84 \cdot 10^{-8}$	$9,25 \cdot 10^{-9}$	$2,16 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$2,88 \cdot 10^{-9}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$3,43 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-7}$	$3,39 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-10}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$7,50 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$

Tabela Z.14. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach polikrystalicznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EURO)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$7,33 \cdot 10^3$	$7,24 \cdot 10^2$	$2,58 \cdot 10^5$	$1,70 \cdot 10^5$	$9,57 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^3$	$4,73 \cdot 10^3$	$3,26 \cdot 10^3$	$6,59 \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^3$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,10 \cdot 10^4$	$9,76 \cdot 10^2$	$8,64 \cdot 10^5$	$5,39 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$9,66 \cdot 10^3$	$5,22 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$1,11 \cdot 10^2$	$2,64 \cdot 10^0$	$1,86 \cdot 10^3$	$1,09 \cdot 10^3$	$1,54 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^0$	$9,53 \cdot 10^1$	$1,39 \cdot 10^0$	$1,30 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^0$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$2,87 \cdot 10^1$	$4,29 \cdot 10^0$	$4,69 \cdot 10^2$	$2,69 \cdot 10^2$	$3,48 \cdot 10^1$	$3,11 \cdot 10^1$	$2,22 \cdot 10^1$	$1,22 \cdot 10^1$	$2,59 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$4,44 \cdot 10^1$	$6,31 \cdot 10^{-1}$	$2,91 \cdot 10^2$	$1,48 \cdot 10^2$	$6,95 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^1$	$7,18 \cdot 10^{-1}$	$4,14 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^0$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$8,41 \cdot 10^3$	$1,17 \cdot 10^3$	$7,91 \cdot 10^4$	$4,84 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$1,96 \cdot 10^2$	$6,58 \cdot 10^3$	$9,46 \cdot 10^2$	$9,39 \cdot 10^3$	$7,58 \cdot 10^2$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$4,06 \cdot 10^2$	$2,79 \cdot 10^2$	$3,11 \cdot 10^3$	$2,00 \cdot 10^3$	$5,01 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^2$	$3,29 \cdot 10^2$	$1,26 \cdot 10^2$	$3,55 \cdot 10^2$	$1,58 \cdot 10^2$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$2,14 \cdot 10^4$	$5,47 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^5$	$5,61 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$	$4,95 \cdot 10^3$	$1,83 \cdot 10^4$	$2,62 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^3$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$1,23 \cdot 10^4$	$9,21 \cdot 10^3$	$1,69 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^5$	$2,11 \cdot 10^4$	$8,53 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^4$	$4,49 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^3$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,44 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$	$2,05 \cdot 10^4$	$9,52 \cdot 10^3$	$1,01 \cdot 10^4$	$4,73 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^3$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$6,53 \cdot 10^4$	$6,30 \cdot 10^3$	$3,85 \cdot 10^6$	$2,27 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^5$	$6,49 \cdot 10^4$	$2,93 \cdot 10^4$	$5,06 \cdot 10^3$	$7,00 \cdot 10^4$	$2,53 \cdot 10^4$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,06 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^3$	$5,89 \cdot 10^5$	$3,47 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$9,15 \cdot 10^3$	$6,32 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^4$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$1,12 \cdot 10^4$	$9,82 \cdot 10^2$	$6,63 \cdot 10^5$	$3,84 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^4$	$9,82 \cdot 10^3$	$5,31 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,07 \cdot 10^4$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$1,14 \cdot 10^2$	$1,60 \cdot 10^1$	$7,68 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^2$	$5,59 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$1,05 \cdot 10^3$	$1,47 \cdot 10^2$	$6,55 \cdot 10^5$	$3,80 \cdot 10^5$	$1,87 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$9,44 \cdot 10^2$	$5,15 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$6,93 \cdot 10^2$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$3,50 \cdot 10^2$	$1,61 \cdot 10^2$	$9,09 \cdot 10^3$	$3,94 \cdot 10^3$	$6,42 \cdot 10^2$	$2,89 \cdot 10^2$	$2,76 \cdot 10^2$	$1,09 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^2$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$1,13 \cdot 10^5$	$8,43 \cdot 10^4$	$5,71 \cdot 10^5$	$3,09 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^4$	$9,27 \cdot 10^4$	$2,76 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^4$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$4,14 \cdot 10^2$	$7,23 \cdot 10^1$	$5,01 \cdot 10^3$	$2,77 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^2$	$3,34 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^2$	$4,02 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^2$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,87 \cdot 10^3$	$3,55 \cdot 10^2$	$3,27 \cdot 10^4$	$1,81 \cdot 10^4$	$2,93 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^3$	$1,44 \cdot 10^3$	$5,77 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^3$	$8,86 \cdot 10^2$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,63 \cdot 10^1$	$1,45 \cdot 10^1$	$3,72 \cdot 10^2$	$1,65 \cdot 10^2$	$2,84 \cdot 10^1$	$2,76 \cdot 10^1$	$9,32 \cdot 10^0$	$6,39 \cdot 10^0$	$1,46 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^1$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$4,65 \cdot 10^1$	$3,57 \cdot 10^1$	$7,88 \cdot 10^2$	$4,14 \cdot 10^2$	$7,69 \cdot 10^1$	$6,18 \cdot 10^1$	$3,33 \cdot 10^1$	$2,26 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^1$	$3,22 \cdot 10^1$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,47 \cdot 10^{-1}$	$6,47 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^1$	$6,19 \cdot 10^0$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,11 \cdot 10^{-1}$	$8,07 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$5,11 \cdot 10^{-3}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$8,49 \cdot 10^2$	$3,64 \cdot 10^2$	$2,62 \cdot 10^4$	$1,31 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^2$	$8,11 \cdot 10^2$	$5,54 \cdot 10^2$	$8,81 \cdot 10^2$	$6,21 \cdot 10^2$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,73 \cdot 10^2$	$2,23 \cdot 10^2$	$5,85 \cdot 10^3$	$3,33 \cdot 10^3$	$8,18 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^2$	$2,59 \cdot 10^2$	$1,76 \cdot 10^2$	$2,53 \cdot 10^2$	$2,02 \cdot 10^2$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-5}$	$7,69 \cdot 10^1$	$3,36 \cdot 10^1$	$8,56 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$9,18 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-4}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$3,29 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^{-1}$	$4,35 \cdot 10^1$	$2,14 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^{-1}$	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$2,55 \cdot 10^{-1}$	$1,41 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^1$	$9,48 \cdot 10^0$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$7,94 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
RAZEM		$2,81 \cdot 10^5$	$1,16 \cdot 10^5$	$8,11 \cdot 10^6$	$4,80 \cdot 10^6$	$4,73 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^5$	$2,06 \cdot 10^5$	$6,78 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^5$

Tabela Z.15. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator		Jednostka
	Forma zagospodarowania poużytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	
	Kategoria wpływu											
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$4,61 \cdot 10^{-5}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$8,19 \cdot 10^{-3}$	$5,99 \cdot 10^{-5}$	$5,39 \cdot 10^{-5}$	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	DALY
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$-1,13 \cdot 10^{-5}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$6,07 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	DALY
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$6,15 \cdot 10^{-7}$	$2,21 \cdot 10^{-7}$	$7,08 \cdot 10^{-5}$	$4,44 \cdot 10^{-5}$	$6,62 \cdot 10^{-7}$	$4,89 \cdot 10^{-7}$	$5,92 \cdot 10^{-7}$	$3,04 \cdot 10^{-7}$	$4,69 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	DALY
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$-1,66 \cdot 10^{-7}$	$6,35 \cdot 10^{-5}$	$4,86 \cdot 10^{-5}$	$2,82 \cdot 10^{-7}$	$2,30 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$	$7,05 \cdot 10^{-8}$	$1,87 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$	DALY
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$1,06 \cdot 10^{-8}$	$-6,67 \cdot 10^{-9}$	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-8}$	$4,86 \cdot 10^{-9}$	$8,03 \cdot 10^{-9}$	$3,05 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$	$3,34 \cdot 10^{-9}$	DALY
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$	$2,48 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$7,02 \cdot 10^{-5}$	$9,21 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$8,18 \cdot 10^{-5}$	DALY
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$5,17 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$9,51 \cdot 10^{-6}$	$4,44 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$8,78 \cdot 10^{-7}$	$3,84 \cdot 10^{-6}$	$1,76 \cdot 10^{-6}$	DALY
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$2,54 \cdot 10^{-4}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-5}$	$2,22 \cdot 10^{-4}$	$3,39 \cdot 10^{-5}$	DALY
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$2,97 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	DALY
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$8,60 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$5,80 \cdot 10^{-5}$	$6,05 \cdot 10^{-5}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$6,43 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-5}$	DALY
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$2,80 \cdot 10^{-2}$	$-2,21 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^0$	$7,23 \cdot 10^{-1}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$	$9,58 \cdot 10^{-3}$	DALY
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$8,61 \cdot 10^{-8}$	$5,42 \cdot 10^{-8}$	$9,34 \cdot 10^{-8}$	$9,27 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok

13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$-2,81 \cdot 10^{-8}$	$5,71 \cdot 10^{-6}$	$4,32 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-7}$	$2,80 \cdot 10^{-7}$	$2,71 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$	gatunek/rok
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$8,72 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$	$2,21 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$7,29 \cdot 10^{-9}$	$6,89 \cdot 10^{-9}$	$3,43 \cdot 10^{-9}$	$7,07 \cdot 10^{-9}$	$5,85 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$8,04 \cdot 10^{-8}$	$1,03 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$9,34 \cdot 10^{-8}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$	$6,34 \cdot 10^{-8}$	$3,15 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$5,39 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,35 \cdot 10^{-8}$	$1,97 \cdot 10^{-8}$	$2,67 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,48 \cdot 10^{-8}$	5,40E-09	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$7,59 \cdot 10^{-5}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$6,23 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$8,83 \cdot 10^{-6}$	gatunek/rok
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$3,17 \cdot 10^{-9}$	$1,73 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$1,57 \cdot 10^{-8}$	$5,64 \cdot 10^{-9}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,28 \cdot 10^{-7}$	$2,22 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$	$6,75 \cdot 10^{-7}$	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$4,23 \cdot 10^{-8}$	$9,98 \cdot 10^{-8}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,75 \cdot 10^{-10}$	$-1,20 \cdot 10^{-10}$	$2,11 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{-9}$	$2,19 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$5,42 \cdot 10^{-11}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-10}$	gatunek/rok
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$3,12 \cdot 10^{-9}$	$2,19 \cdot 10^{-9}$	$2,12 \cdot 10^{-8}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$2,17 \cdot 10^{-9}$	$2,05 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,67 \cdot 10^{-16}$	$-1,43 \cdot 10^{-16}$	$5,13 \cdot 10^{-15}$	$3,51 \cdot 10^{-15}$	$3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,41 \cdot 10^{-16}$	$2,48 \cdot 10^{-16}$	$5,70 \cdot 10^{-17}$	$1,99 \cdot 10^{-16}$	$7,52 \cdot 10^{-17}$	gatunek/rok
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$6,40 \cdot 10^{-8}$	$5,01 \cdot 10^{-9}$	$5,28 \cdot 10^{-7}$	$3,57 \cdot 10^{-7}$	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^{-8}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$3,40 \cdot 10^{-8}$	$5,02 \cdot 10^{-8}$	$3,23 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$1,91 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$2,31 \cdot 10^{-7}$	$1,59 \cdot 10^{-7}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,89 \cdot 10^{-10}$	$-2,34 \cdot 10^{-10}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$	$8,67 \cdot 10^{-10}$	$3,34 \cdot 10^{-10}$	$6,24 \cdot 10^{-12}$	$2,23 \cdot 10^{-10}$	$1,48 \cdot 10^{-11}$	$2,56 \cdot 10^{-10}$	$7, \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$2,21 \cdot 10^{-11}$	$8,99 \cdot 10^{-12}$	$3,66 \cdot 10^{-10}$	$2,57 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$1,70 \cdot 10^{-11}$	$1,72 \cdot 10^{-11}$	$8,66 \cdot 10^{-12}$	$1,65 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-11}$	gatunek/rok
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$1,67 \cdot 10^{-12}$	$7,80 \cdot 10^{-13}$	$5,13 \cdot 10^{-11}$	$3,40 \cdot 10^{-11}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$1,34 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-12}$	$4,87 \cdot 10^{-13}$	$2,08 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok

Tabela Z.16. Normalizowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$7,44 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^0$	$1,63 \cdot 10^0$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	$7,38 \cdot 10^{-3}$	$5,45 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$-3,10 \cdot 10^{-3}$	$2,97 \cdot 10^0$	$2,21 \cdot 10^0$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$8,32 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	$6,98 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$7,26 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$-1,60 \cdot 10^{-4}$	$3,48 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$7,43 \cdot 10^{-5}$	$-3,76 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$9,49 \cdot 10^{-4}$	$7,53 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^{-5}$	$6,09 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
6.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa krótkoterminowa	$5,39 \cdot 10^{-2}$	$6,23 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^0$	$6,53 \cdot 10^{-1}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$
7.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa długoterminowa	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$6,56 \cdot 10^{-1}$	$3,60 \cdot 10^{-1}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$9,62 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$7,17 \cdot 10^{-3}$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa krótkoterminowa	$6,05 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^0$	$8,43 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$8,91 \cdot 10^{-3}$	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$4,84 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$	$8,07 \cdot 10^{-3}$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa długoterminowa	$5,17 \cdot 10^{-2}$	$3,54 \cdot 10^{-2}$	$1,70 \cdot 10^0$	$9,46 \cdot 10^{-1}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$3,82 \cdot 10^{-2}$	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$3,25 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^0$	$1,85 \cdot 10^0$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$3,49 \cdot 10^0$	$-2,32 \cdot 10^0$	$1,80 \cdot 10^2$	$9,90 \cdot 10^1$	$3,53 \cdot 10^0$	$1,18 \cdot 10^0$	$3,12 \cdot 10^0$	$5,89 \cdot 10^{-1}$	$2,84 \cdot 10^0$	$1,12 \cdot 10^0$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$3,39 \cdot 10^{-4}$	$-4,98 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^3$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$8,27 \cdot 10^{-6}$	$9,86 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$8,58 \cdot 10^{-6}$	$6,96 \cdot 10^{-6}$	$3,47 \cdot 10^{-6}$	$7,15 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$

15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$8,28 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$6,41 \cdot 10^{-5}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$
16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$3,56 \cdot 10^{-5}$	$2,98 \cdot 10^{-5}$	$6,30 \cdot 10^{-4}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$6,80 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$1,52 \cdot 10^{-1}$	$6,91 \cdot 10^{-2}$	$6,27 \cdot 10^{-1}$	$3,44 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$4,01 \cdot 10^{-5}$	$6,37 \cdot 10^{-6}$	$8,75 \cdot 10^{-5}$	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$2,59 \cdot 10^{-4}$	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$5,68 \cdot 10^{-4}$	$3,43 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	$8,21 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-5}$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,77 \cdot 10^{-7}$	$-1,21 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$6,85 \cdot 10^{-7}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$5,48 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,83 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$7,56 \cdot 10^{-6}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	$2,19 \cdot 10^{-6}$	$1,65 \cdot 10^{-6}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$1,86 \cdot 10^{-6}$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,70 \cdot 10^{-13}$	$-2,22 \cdot 10^{-13}$	$2,59 \cdot 10^{-12}$	$1,77 \cdot 10^{-12}$	$3,11 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$2,34 \cdot 10^{-13}$	$5,40 \cdot 10^{-14}$	$2,62 \cdot 10^{-13}$	$9,87 \cdot 10^{-14}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$8,62 \cdot 10^{-5}$	$6,77 \cdot 10^{-6}$	$6,66 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$7,34 \cdot 10^{-5}$	$4,57 \cdot 10^{-5}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,82 \cdot 10^{-5}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$8,66 \cdot 10^{-5}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,80 \cdot 10^{-7}$	$-1,58 \cdot 10^{-7}$	$7,68 \cdot 10^{-7}$	$4,52 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$4,73 \cdot 10^{-9}$	$2,26 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$2,79 \cdot 10^{-8}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$7,76 \cdot 10^{-7}$	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$	$2,16 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$3,38 \cdot 10^{-9}$	$1,58 \cdot 10^{-9}$	$2,59 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$3,39 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-10}$	$2,92 \cdot 10^{-9}$	$8,85 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$

Tabela Z.17. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach amorficznych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EURO)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$8,62 \cdot 10^3$	$8,51 \cdot 10^2$	$3,09 \cdot 10^5$	$3,43 \cdot 10^5$	$9,57 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^3$	$5,58 \cdot 10^3$	$3,85 \cdot 10^3$	$6,59E \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^3$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,29 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^3$	$4,22 \cdot 10^5$	$4,04 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^4$	$6,15 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$1,31 \cdot 10^2$	$3,11 \cdot 10^0$	$9,73 \cdot 10^2$	$7,61 \cdot 10^2$	$1,54 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^0$	$1,12 \cdot 10^2$	$1,64 \cdot 10^0$	$1,30 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^0$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$3,37 \cdot 10^1$	$5,04 \cdot 10^0$	$5,03 \cdot 10^2$	$3,59 \cdot 10^2$	$3,48 \cdot 10^1$	$3,11 \cdot 10^1$	$2,62 \cdot 10^1$	$1,43 \cdot 10^1$	$2,59 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$5,22 \cdot 10^1$	$7,42 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^2$	$1,73 \cdot 10^2$	$6,95 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-1}$	$3,73 \cdot 10^1$	$8,47 \cdot 10^{-1}$	$4,14 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^0$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$9,90 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^3$	$3,76 \cdot 10^4$	$2,05 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$1,96 \cdot 10^2$	$7,77 \cdot 10^3$	$1,12 \cdot 10^3$	$9,39 \cdot 10^3$	$7,58 \cdot 10^2$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$4,78 \cdot 10^2$	$3,28 \cdot 10^2$	$3,80 \cdot 10^3$	$2,10 \cdot 10^3$	$5,01 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^2$	$3,88 \cdot 10^2$	$1,48 \cdot 10^2$	$3,55 \cdot 10^2$	$1,58 \cdot 10^2$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$2,52 \cdot 10^4$	$6,44 \cdot 10^3$	$3,26 \cdot 10^4$	$7,22 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$	$4,95 \cdot 10^3$	$2,16 \cdot 10^4$	$3,09 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^3$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$1,44 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^4$	$1,56 \cdot 10^5$	$1,66 \cdot 10^5$	$2,11 \cdot 10^4$	$8,53 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^4$	$5,29 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^3$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,69 \cdot 10^4$	$5,12 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^5$	$2,15 \cdot 10^5$	$2,05 \cdot 10^4$	$9,52 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^4$	$5,58 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^3$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$7,68 \cdot 10^4$	$7,41 \cdot 10^3$	$9,60 \cdot 10^5$	$5,05 \cdot 10^5$	$1,70 \cdot 10^5$	$6,49 \cdot 10^4$	$3,45 \cdot 10^4$	$5,96 \cdot 10^3$	$7,00 \cdot 10^4$	$2,53 \cdot 10^4$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$1,25 \cdot 10^4$	$1,24 \cdot 10^3$	$2,29 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^4$	$7,45 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^4$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$1,31 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^3$	$4,93 \cdot 10^5$	$2,50 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^4$	$6,26 \cdot 10^3$	$1,18E+04$	$1,07 \cdot 10^4$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$1,34 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^1$	$2,04 \cdot 10^3$	$7,75 \cdot 10^2$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^2$	$6,60 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$1,23 \cdot 10^3$	$1,73 \cdot 10^2$	$2,46 \cdot 10^5$	$1,25 \cdot 10^5$	$1,87 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$1,11 \cdot 10^3$	$6,07 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$6,93 \cdot 10^2$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$4,12 \cdot 10^2$	$1,89 \cdot 10^2$	$3,05 \cdot 10^3$	$9,51 \cdot 10^2$	$6,42 \cdot 10^2$	$2,89 \cdot 10^2$	$3,25 \cdot 10^2$	$1,29 \cdot 10^2$	$3,49 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^2$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$1,33 \cdot 10^5$	$9,91 \cdot 10^4$	$3,22 \cdot 10^5$	$2,15 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^5$	$3,25 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^4$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$4,88 \cdot 10^2$	$8,50 \cdot 10^1$	$9,98 \cdot 10^2$	$2,95 \cdot 10^2$	$5,40 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^2$	$3,94 \cdot 10^2$	$1,54 \cdot 10^2$	$4,02 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^2$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$2,20 \cdot 10^3$	$4,18 \cdot 10^2$	$6,48 \cdot 10^3$	$1,99 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^3$	$1,70 \cdot 10^3$	$6,81 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^3$	$8,86 \cdot 10^2$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,91 \cdot 10^1$	$1,71 \cdot 10^1$	$6,95 \cdot 10^1$	$2,11 \cdot 10^1$	$2,84 \cdot 10^1$	$2,76 \cdot 10^1$	$1,10 \cdot 10^1$	$7,53 \cdot 10^0$	$1,46 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^1$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$5,47 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^1$	$1,78 \cdot 10^2$	$5,31 \cdot 10^1$	$7,69 \cdot 10^1$	$6,18 \cdot 10^1$	$3,93 \cdot 10^1$	$2,66 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^1$	$3,22 \cdot 10^1$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$2,91 \cdot 10^{-1}$	$7,61 \cdot 10^{-4}$	$5,91 \cdot 10^{-1}$	$2,04 \cdot 10^{-1}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$9,52 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$5,11 \cdot 10^{-3}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$9,98 \cdot 10^2$	$4,28 \cdot 10^2$	$3,04 \cdot 10^3$	$1,04 \cdot 10^3$	$1,08 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^2$	$9,57 \cdot 10^2$	$6,53 \cdot 10^2$	$8,81 \cdot 10^2$	$6,21 \cdot 10^2$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$3,22 \cdot 10^2$	$2,62 \cdot 10^2$	$1,86 \cdot 10^3$	$7,49 \cdot 10^2$	$8,18 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^2$	$3,05 \cdot 10^2$	$2,07 \cdot 10^2$	$2,53 \cdot 10^2$	$2,02 \cdot 10^2$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$3,76 \cdot 10^{-5}$	$2,41 \cdot 10^0$	$7,75 \cdot 10^{-1}$	$8,56 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$2,40 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-4}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$3,87 \cdot 10^{-1}$	$1,74 \cdot 10^{-1}$	$1,27 \cdot 10^0$	$4,47 \cdot 10^{-1}$	$4,20 \cdot 10^{-1}$	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$3,01 \cdot 10^{-1}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$4,41 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$1,78 \cdot 10^0$	$5,93 \cdot 10^{-1}$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-2}$	9,37E-03	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
RAZEM		$3,30 \cdot 10^5$	$1,37 \cdot 10^5$	$3,40 \cdot 10^6$	$2,45 \cdot 10^6$	$4,73 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^5$	$2,43 \cdot 10^5$	$8,00 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^5$

Tabela Z.18. Charakteryzowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator		Jednostka
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	
	Kategoria wpływu											
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	2,97 · 10 ⁻⁵	2,67 · 10 ⁻⁶	4,48 · 10 ⁻³	3,02 · 10 ⁻³	5,99 · 10 ⁻⁵	5,39 · 10 ⁻⁵	2,54 · 10 ⁻⁵	1,60 · 10 ⁻⁵	4,32 · 10 ⁻⁵	4,29 · 10 ⁻⁵	DALY
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	8,97 · 10 ⁻⁵	-7,26 · 10 ⁻⁶	2,35 · 10 ⁻²	1,73 · 10 ⁻²	1,79 · 10 ⁻⁴	1,27 · 10 ⁻⁴	7,86 · 10 ⁻⁵	3,87 · 10 ⁻⁵	1,25 · 10 ⁻⁴	1,04 · 10 ⁻⁴	DALY
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	3,95 · 10 ⁻⁷	1,42 · 10 ⁻⁷	1,29 · 10 ⁻⁵	7,80 · 10 ⁻⁷	6,62 · 10 ⁻⁷	4,89 · 10 ⁻⁷	3,77 · 10 ⁻⁷	1,94 · 10 ⁻⁷	4,69 · 10 ⁻⁷	3,99 · 10 ⁻⁷	DALY
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	1,58 · 10 ⁻⁷	-1,07 · 10 ⁻⁷	1,28 · 10 ⁻⁵	8,89 · 10 ⁻⁶	2,82 · 10 ⁻⁷	2,30 · 10 ⁻⁷	9,04 · 10 ⁻⁸	4,50 · 10 ⁻⁸	1,87 · 10 ⁻⁷	1,23 · 10 ⁻⁷	DALY
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	6,79 · 10 ⁻⁹	-4,29 · 10 ⁻⁹	9,02 · 10 ⁻⁷	2,60 · 10 ⁻⁷	1,34 · 10 ⁻⁸	4,86 · 10 ⁻⁹	5,12 · 10 ⁻⁹	1,95 · 10 ⁻⁹	1,08 · 10 ⁻⁸	3,34 · 10 ⁻⁹	DALY
6.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa krótkoterminowa	7,72 · 10 ⁻⁵	8,93 · 10 ⁻⁶	5,82 · 10 ⁻⁴	3,74 · 10 ⁻⁴	1,33 · 10 ⁻⁴	7,02 · 10 ⁻⁵	5,87 · 10 ⁻⁵	7,00 · 10 ⁻⁶	1,11 · 10 ⁻⁴	8,18 · 10 ⁻⁵	DALY
7.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa długoterminowa	3,32 · 10 ⁻⁶	2,08 · 10 ⁻⁶	2,11 · 10 ⁻⁵	1,43 · 10 ⁻⁵	9,51 · 10 ⁻⁶	4,44 · 10 ⁻⁶	1,60 · 10 ⁻⁶	5,60E-07	3,84 · 10 ⁻⁶	1,76 · 10 ⁻⁶	DALY
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa krótkoterminowa	1,63 · 10 ⁻⁴	3,81 · 10 ⁻⁵	7,15 · 10 ⁻⁴	4,04 · 10 ⁻⁴	2,78 · 10 ⁻⁴	4,28 · 10 ⁻⁵	1,24 · 10 ⁻⁴	3,24 · 10 ⁻⁵	2,22 · 10 ⁻⁴	3,39 · 10 ⁻⁵	DALY
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa długoterminowa	1,91 · 10 ⁻⁴	1,31 · 10 ⁻⁴	6,73 · 10 ⁻⁴	3,96 · 10 ⁻⁵	3,27 · 10 ⁻⁴	1,51 · 10 ⁻⁴	1,40 · 10 ⁻⁴	1,02 · 10 ⁻⁴	2,63 · 10 ⁻⁴	1,08 · 10 ⁻⁴	DALY
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	5,53 · 10 ⁻⁵	1,52 · 10 ⁻⁵	2,88 · 10 ⁻³	1,98 · 10 ⁻³	1,10 · 10 ⁻⁴	5,80 · 10 ⁻⁵	3,86 · 10 ⁻⁵	1,65 · 10 ⁻⁵	6,43 · 10 ⁻⁵	3,84 · 10 ⁻⁵	DALY
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	1,80 · 10 ⁻²	-1,64 · 10 ⁻²	2,02 · 10 ⁰	1,21 · 10 ⁰	2,95 · 10 ⁻²	9,85 · 10 ⁻³	1,09 · 10 ⁻²	2,06 · 10 ⁻³	2,41 · 10 ⁻²	9,58 · 10 ⁻³	DALY
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	7,33 · 10 ⁻⁸	6,61 · 10 ⁻⁹	2,06 · 10 ⁻⁵	1,39 · 10 ⁻⁵	1,30 · 10 ⁻⁷	1,17 · 10 ⁻⁷	5,49 · 10 ⁻⁸	3,46 · 10 ⁻⁸	9,34 · 10 ⁻⁸	9,27 · 10 ⁻⁸	gatunek/rok
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość	2,25 · 10 ⁻⁷	-1,81 · 10 ⁻⁸	6,31 · 10 ⁻⁵	4,34 · 10 ⁻⁵	3,94 · 10 ⁻⁷	2,80 · 10 ⁻⁷	1,73 · 10 ⁻⁷	8,54 · 10 ⁻⁸	2,75 · 10 ⁻⁷	2,28 · 10 ⁻⁷	gatunek/rok

	ekosystemów, perspektywa długoterminowa											
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$5,61 \cdot 10^{-9}$	$7,17 \cdot 10^{-10}$	$1,64 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$	$7,29 \cdot 10^{-9}$	$4,39 \cdot 10^{-9}$	$2,18 \cdot 10^{-9}$	$7,07 \cdot 10^{-9}$	$5,85 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$5,17 \cdot 10^{-8}$	$6,61 \cdot 10^{-9}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-8}$	$6,72 \cdot 10^{-8}$	$4,05 \cdot 10^{-8}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$5,39 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$1,51 \cdot 10^{-8}$	$1,26 \cdot 10^{-8}$	$3,86 \cdot 10^{-6}$	$1,95 \cdot 10^{-6}$	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$9,45 \cdot 10^{-9}$	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$4,88 \cdot 10^{-5}$	$2,20 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$6,46 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-5}$	$8,83 \cdot 10^{-6}$	gatunek/rok
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$1,28 \cdot 10^{-8}$	$2,04 \cdot 10^{-9}$	$8,38 \cdot 10^{-7}$	$5,63 \cdot 10^{-7}$	$3,78 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-8}$	$3,60 \cdot 10^{-9}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$	$7,23 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$8,23 \cdot 10^{-8}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$5,46 \cdot 10^{-6}$	$3,69 \cdot 10^{-6}$	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$7,41 \cdot 10^{-8}$	$2,70 \cdot 10^{-8}$	$9,98 \cdot 10^{-8}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,13 \cdot 10^{-10}$	$-7,69 \cdot 10^{-11}$	$5,89 \cdot 10^{-9}$	$2,46 \cdot 10^{-9}$	$2,19 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-10}$	$7,19 \cdot 10^{-11}$	$3,46 \cdot 10^{-11}$	$1,50 \cdot 10^{-10}$	$1,16 \cdot 10^{-10}$	gatunek/rok
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$2,00 \cdot 10^{-9}$	$1,41 \cdot 10^{-9}$	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$7,78 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$2,47 \cdot 10^{-9}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$1,30 \cdot 10^{-9}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-9}$	gatunek/rok
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$1,72 \cdot 10^{-16}$	$-9,20 \cdot 10^{-17}$	$2,11 \cdot 10^{-14}$	$1,38 \cdot 10^{-16}$	$3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,41 \cdot 10^{-16}$	$1,58 \cdot 10^{-16}$	$3,64 \cdot 10^{-17}$	$1,99 \cdot 10^{-16}$	$7,52 \cdot 10^{-17}$	gatunek/rok
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$3,22 \cdot 10^{-9}$	$4,42 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-6}$	$8,07 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$5,02 \cdot 10^{-8}$	$3,23 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$1,23 \cdot 10^{-8}$	$6,85 \cdot 10^{-9}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$	$6,84 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$	gatunek/rok
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$1,86 \cdot 10^{-10}$	$-1,50 \cdot 10^{-10}$	$2,26 \cdot 10^{-9}$	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$3,34 \cdot 10^{-10}$	$6,24 \cdot 10^{-12}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$	$9,43 \cdot 10^{-12}$	$2,56 \cdot 10^{-10}$	$7,66 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$1,42 \cdot 10^{-11}$	$5,78 \cdot 10^{-12}$	$3,62 \cdot 10^{-9}$	$2,21 \cdot 10^{-9}$	$2,52 \cdot 10^{-11}$	$1,70 \cdot 10^{-11}$	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$5,52 \cdot 10^{-12}$	$1,65 \cdot 10^{-11}$	$1,20 \cdot 10^{-11}$	gatunek/rok
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$1,08 \cdot 10^{-12}$	$5,01 \cdot 10^{-13}$	$4,95 \cdot 10^{-10}$	$3,15 \cdot 10^{-10}$	$2,47 \cdot 10^{-12}$	$1,34 \cdot 10^{-12}$	$1,02 \cdot 10^{-12}$	$3,10 \cdot 10^{-13}$	$2,08 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-12}$	gatunek/rok

Tabela Z.19. Normalizowanie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$4,78 \cdot 10^{-3}$	$7,29 \cdot 10^{-4}$	$7,67 \cdot 10^{-1}$	$4,80 \cdot 10^{-1}$	$8,21 \cdot 10^{-3}$	$7,38 \cdot 10^{-3}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$-1,99 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^0$	$1,48 \cdot 10^0$	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$9,82 \cdot 10^{-4}$	$3,53 \cdot 10^{-4}$	$5,50 \cdot 10^{-3}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$9,01 \cdot 10^{-4}$	$4,63 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$-1,03 \cdot 10^{-4}$	$8,59 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$4,77 \cdot 10^{-5}$	$-2,41 \cdot 10^{-5}$	$3,09 \cdot 10^{-4}$	$8,27 \cdot 10^{-5}$	$7,53 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$2,88 \cdot 10^{-5}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$6,09 \cdot 10^{-5}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
6.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa krótkoterminowa	$3,47 \cdot 10^{-2}$	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-1}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$
7.	Substancje toksyczne o działaniu rakotwórczym, perspektywa długoterminowa	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$7,17 \cdot 10^{-3}$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa krótkoterminowa	$3,89 \cdot 10^{-2}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-1}$	$1,28 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$8,91 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-2}$	$8,07 \cdot 10^{-3}$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania rakotwórczego, perspektywa długoterminowa	$3,32 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$3,03 \cdot 10^{-1}$	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$8,86 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$7,57 \cdot 10^{-3}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-1}$	$3,15 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-3}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	$8,80 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$2,25 \cdot 10^0$	$-1,49 \cdot 10^0$	$3,46 \cdot 10^2$	$1,92 \cdot 10^2$	$3,53 \cdot 10^0$	$1,18 \cdot 10^0$	$1,99 \cdot 10^0$	$3,76 \cdot 10^{-1}$	$2,84 \cdot 10^0$	$1,12 \cdot 10^0$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$9,45 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$	$7,66 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$7,31 \cdot 10^{-5}$	$3,49 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$9,34 \cdot 10^{-5}$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$-3,20 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$3,94 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	$8,61 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$5,32 \cdot 10^{-6}$	$6,34 \cdot 10^{-7}$	$7,81 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$8,56 \cdot 10^{-6}$	$4,44 \cdot 10^{-6}$	$2,21 \cdot 10^{-6}$	$7,15 \cdot 10^{-6}$	$5,91 \cdot 10^{-6}$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$5,32 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-5}$	$4,09 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^{-4}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$4,34 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$9,85 \cdot 10^{-2}$	$4,44 \cdot 10^{-2}$	$7,14 \cdot 10^{-1}$	$3,57 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-2}$	$7,08 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$1,78 \cdot 10^{-2}$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$2,58 \cdot 10^{-5}$	$4,09 \cdot 10^{-6}$	$3,98 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$7,24 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-5}$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$-7,75 \cdot 10^{-8}$	$2,80 \cdot 10^{-6}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$7,26 \cdot 10^{-8}$	$3,49 \cdot 10^{-8}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-7}$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$1,82 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$5,75 \cdot 10^{-5}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	$1,39 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$186 \cdot 10^{-6}$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$1,73 \cdot 10^{-13}$	$-1,43 \cdot 10^{-13}$	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$7,61 \cdot 10^{-12}$	$3,11 \cdot 10^{-13}$	$1,42 \cdot 10^{-13}$	$1,50 \cdot 10^{-13}$	$3,44 \cdot 10^{-14}$	$2,62 \cdot 10^{-13}$	$9,87 \cdot 10^{-14}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$5,54 \cdot 10^{-5}$	$4,35 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$8,15 \cdot 10^{-5}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$4,68 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$	$7,10 \cdot 10^{-5}$	$4,56 \cdot 10^{-5}$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$9,73 \cdot 10^{-4}$	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$1,49 \cdot 10^{-5}$	$9,25 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$1,59 \cdot 10^{-5}$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$1,80 \cdot 10^{-7}$	$-1,01 \cdot 10^{-7}$	$4,96 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-7}$	$2,54 \cdot 10^{-7}$	$4,73 \cdot 10^{-9}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$2,38 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$1,79 \cdot 10^{-8}$	$7,34 \cdot 10^{-9}$	$1,72 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-8}$	$6,96 \cdot 10^{-9}$	$2,16 \cdot 10^{-8}$	$1,58 \cdot 10^{-8}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$2,17 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$	$2,35 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$3,39 \cdot 10^{-9}$	$6,24 \cdot 10^{-10}$	$1,86 \cdot 10^{-9}$	$5,64 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-9}$	$1,85 \cdot 10^{-9}$

Tabela Z.20. Grupowanie i ważenie następstw środowiskowych w cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznej opartej na modułach perowskitowych dla rozpatrywanych kategorii wpływu oraz odmiennych scenariuszy zagospodarowania użytkowego (model IMPACT World+, jednostka: EURO)

Lp.	Element obiektu technicznego	Konstrukcja wsporcza		Panele fotowoltaiczne		Stacja inwerterowa		Instalacja elektryczna		Transformator	
	Forma zagospodarowania użytkowego	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling	składowanie	recykling
	Kategoria wpływu										
1.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa krótkoterminowa	$5,54 \cdot 10^3$	$5,47 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^5$	$1,00 \cdot 10^5$	$9,57 \cdot 10^3$	$7,55 \cdot 10^3$	$3,56 \cdot 10^3$	$2,45 \cdot 10^3$	$6,59 \cdot 10^3$	$6,05 \cdot 10^3$
2.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na zdrowie człowieka, perspektywa długoterminowa	$8,30 \cdot 10^3$	$7,38 \cdot 10^2$	$6,03 \cdot 10^5$	$4,29 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^4$	$1,18 \cdot 10^4$	$7,26 \cdot 10^3$	$3,92 \cdot 10^3$	$1,16 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$
3.	Substancje indukujące tworzenie utleniaczy fotochemicznych	$8,41 \cdot 10^1$	$2,00 \cdot 10^0$	$1,57 \cdot 10^3$	$9,60 \cdot 10^2$	$1,54 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^0$	$7,17 \cdot 10^1$	$1,05 \cdot 10^0$	$1,30 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^0$
4.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na zdrowie człowieka	$2,17 \cdot 10^1$	$3,24 \cdot 10^0$	$9,68 \cdot 10^2$	$4,52 \cdot 10^2$	$3,48 \cdot 10^1$	$3,11 \cdot 10^1$	$1,67 \cdot 10^1$	$9,15 \cdot 10^0$	$2,59 \cdot 10^1$	$1,25 \cdot 10^1$
5.	Substancje powodujące uszczuplanie warstwy ozonowej	$3,36 \cdot 10^1$	$4,77 \cdot 10^{-1}$	$2,79 \cdot 10^2$	$1,26 \cdot 10^2$	$6,95 \cdot 10^1$	$4,70 \cdot 10^{-1}$	$2,38 \cdot 10^1$	$5,40 \cdot 10^{-1}$	$4,14 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^0$
6.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa krótkoterminowa	$6,36 \cdot 10^3$	$8,87 \cdot 10^2$	$6,78 \cdot 10^4$	$4,35 \cdot 10^4$	$1,09 \cdot 10^4$	$1,96 \cdot 10^2$	$4,95 \cdot 10^3$	$7,11 \cdot 10^2$	$9,39 \cdot 10^3$	$7,58 \cdot 10^2$
7.	Substancje toksyczne o działaniu kancerogennym, perspektywa długoterminowa	$3,07 \cdot 10^2$	$2,11 \cdot 10^2$	$2,92 \cdot 10^3$	$1,52 \cdot 10^3$	$5,01 \cdot 10^2$	$2,06 \cdot 10^2$	$2,47 \cdot 10^2$	$9,45 \cdot 10^1$	$3,55 \cdot 10^2$	$1,58 \cdot 10^2$
8.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa krótkoterminowa	$1,62 \cdot 10^4$	$4,14 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^5$	$8,60 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$	$4,95 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^4$	$1,97 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^4$	$3,43 \cdot 10^3$
9.	Substancje toksyczne nie wykazujące działania kancerogennego, perspektywa długoterminowa	$9,27 \cdot 10^3$	$6,97 \cdot 10^3$	$1,60 \cdot 10^5$	$8,44 \cdot 10^4$	$2,11 \cdot 10^4$	$8,53 \cdot 10^3$	$8,46 \cdot 10^3$	$3,37 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^4$	$5,35 \cdot 10^3$
10.	Substancje indukujące tworzenie cząstek stałych (PM)	$1,09 \cdot 10^4$	$3,29 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^5$	$7,55 \cdot 10^4$	$2,05 \cdot 10^4$	$9,52 \cdot 10^3$	$7,59 \cdot 10^3$	$3,56 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^3$
11.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na zdrowie człowieka	$4,94 \cdot 10^4$	$4,76 \cdot 10^3$	$2,84 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^5$	$6,49 \cdot 10^4$	$2,20 \cdot 10^4$	$3,80 \cdot 10^3$	$7,00 \cdot 10^4$	$2,53 \cdot 10^4$
12.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa krótkoterminowa	$8,04 \cdot 10^3$	$7,94 \cdot 10^2$	$2,50 \cdot 10^5$	$1,37 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$6,88 \cdot 10^3$	$4,75 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^4$
13.	Substancje powodujące zmiany klimatu, wpływające na jakość ekosystemów, perspektywa długoterminowa	$8,44 \cdot 10^3$	$7,43 \cdot 10^2$	$5,58 \cdot 10^5$	$2,60 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^4$	$7,39 \cdot 10^3$	$3,99 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^4$	$1,07 \cdot 10^4$
14.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa krótkoterminowa	$8,61 \cdot 10^1$	$1,21 \cdot 10^1$	$3,23 \cdot 10^3$	$1,58 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^2$	$1,28 \cdot 10^2$	$7,71 \cdot 10^1$	$4,21 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^2$
15.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słonych, perspektywa długoterminowa	$7,93 \cdot 10^2$	$1,11 \cdot 10^2$	$2,43 \cdot 10^5$	$1,10 \cdot 10^5$	$1,87 \cdot 10^3$	$1,18 \cdot 10^3$	$7,10 \cdot 10^2$	$3,87 \cdot 10^2$	$1,14 \cdot 10^3$	$6,93 \cdot 10^2$

16.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa krótkoterminowa	$2,65 \cdot 10^2$	$1,22 \cdot 10^2$	$2,26 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^4$	$6,42 \cdot 10^2$	$2,89 \cdot 10^2$	$2,07 \cdot 10^2$	$8,23 \cdot 10^1$	$3,49 \cdot 10^2$	$1,35 \cdot 10^2$
17.	Substancje o działaniu ekotoksycznym dla ekosystemów słodkowodnych, perspektywa długoterminowa	$8,56 \cdot 10^4$	$6,37 \cdot 10^4$	$5,32 \cdot 10^5$	$2,95 \cdot 10^5$	$1,39 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^4$	$6,97 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^4$
18.	Substancje wpływające na zakwaszenie wód słodkich	$3,13 \cdot 10^2$	$5,47 \cdot 10^1$	$2,11 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^2$	$1,98 \cdot 10^2$	$2,52 \cdot 10^2$	$9,85 \cdot 10^1$	$4,02 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^2$
19.	Substancje wpływające na zakwaszenie ekosystemów lądowych	$1,42 \cdot 10^3$	$2,68 \cdot 10^2$	$1,80 \cdot 10^4$	$8,62 \cdot 10^3$	$2,93 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^3$	$1,08 \cdot 10^3$	$4,34 \cdot 10^2$	$1,75 \cdot 10^3$	$8,86 \cdot 10^2$
20.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słodkich	$1,23 \cdot 10^1$	$1,10 \cdot 10^1$	$1,56 \cdot 10^2$	$6,98 \cdot 10^1$	$2,84 \cdot 10^1$	$2,76 \cdot 10^1$	$7,01 \cdot 10^0$	$4,80 \cdot 10^0$	$1,46 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^1$
21.	Substancje wpływające na eutrofizację wód słonych	$3,51 \cdot 10^1$	$2,70 \cdot 10^1$	$2,74 \cdot 10^2$	$1,61 \cdot 10^2$	$7,69 \cdot 10^1$	$6,18 \cdot 10^1$	$2,51 \cdot 10^1$	$1,70 \cdot 10^1$	$4,93 \cdot 10^1$	$3,22 \cdot 10^1$
22.	Substancje emitujące promieniowanie jonizujące, wpływające na jakość ekosystemów	$1,87 \cdot 10^{-1}$	$4,89 \cdot 10^{-4}$	$5,08 \cdot 10^0$	$2,61 \cdot 10^0$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$6,07 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$5,11 \cdot 10^{-3}$
23.	Procesy związane z przekształcaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$6,42 \cdot 10^2$	$2,75 \cdot 10^2$	$2,19 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^2$	$6,10 \cdot 10^2$	$4,17 \cdot 10^2$	$8,81 \cdot 10^2$	$6,21 \cdot 10^2$
24.	Procesy związane z zajmowaniem gruntów, wpływające na bioróżnorodność	$2,07 \cdot 10^2$	$1,69 \cdot 10^2$	$2,59 \cdot 10^3$	$1,35 \cdot 10^3$	$8,18 \cdot 10^2$	$5,10 \cdot 10^2$	$1,95 \cdot 10^2$	$1,32 \cdot 10^2$	$2,53 \cdot 10^2$	$2,02 \cdot 10^2$
25.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy słodkowodne	$1,79 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^0$	$3,41 \cdot 10^0$	$8,56 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$6,91 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^{-4}$
26.	Procesy wpływające na dostępność wody, oddziałujące na ekosystemy lądowe	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$1,12 \cdot 10^{-1}$	$5,53 \cdot 10^0$	$2,62 \cdot 10^0$	$4,20 \cdot 10^{-1}$	$2,49 \cdot 10^{-1}$	$1,92 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$	$1,55 \cdot 10^{-1}$
27.	Procesy powodujące termiczne zanieczyszczenie wody	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^0$	$2,98 \cdot 10^0$	$6,18 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-2}$	$5,98 \cdot 10^{-3}$	$3,66 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$
RAZEM		$2,12 \cdot 10^5$	$8,79 \cdot 10^4$	$5,82 \cdot 10^6$	$3,62 \cdot 10^6$	$4,73 \cdot 10^5$	$1,51 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$	$5,10 \cdot 10^4$	$2,73 \cdot 10^5$	$1,02 \cdot 10^5$