



**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INŻYNIERIA MECHANICZNA**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Patrycja Walichnowska

**Wpływ cech i parametrów pakowania butelek w folię termokurczliwą na
szkodliwość w systemie technicznym**

*The impact of the features and parameters of packaging bottles in
heat-shrinkable film on the harmfulness of the technical system*

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE
DYSCYPLINA: INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR PRACY

prof. dr hab. inż. Andrzej Tomporowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Weronika Kruszelnicka
Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

Bydgoszcz, październik 2023

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania Promotorowi, Panu prof. dr. hab. inż. Andrzejowi Tomporowskiemu za wyrozumiałość, motywację oraz pomoc udzieloną w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej. Dziękuję również Promotor Pomocniczej, Pani dr inż. Weronice Kruszelnickiej za cenne wskazówki merytoryczne.

Podziękowania kieruję również do Pana prof. dr. hab. inż. Józefa Flizikowskiego za cenne rady podczas redagowania rozprawy.

Chciałabym również podziękować wszystkim pracownikom Katedry Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii i Systemów Technicznych za wsparcie i atmosferę sprzyjającą realizacji pracy naukowej.

Wyrazy wdzięczności kieruję do Pani dr inż. Anety Raszkowskiej-Kaczor, Pana dr. inż. Tomasza Żuka oraz Pani dr Marleny Maślanki za możliwość realizacji badań laboratoryjnych w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu oraz za pomoc przy analizie wyników.

W sposób szczególny dziękuję Panu Januszowi Czaczykowi oraz Panu Piotrowi Balcerzakowi za życzliwość i możliwość realizacji badań przemysłowych na terenie przedsiębiorstwa zajmującego się pakowaniem butelek w folię termokurczliwą.

Wyjątkowe podziękowania należą się moim Rodzicom oraz Mężowi, bez których wsparcia, cierpliwości i motywacji niniejsza praca by nie powstała.

SPIS TREŚCI

UŻYWANE W ROZPRAWIE SKRÓTY:	4
DEFINICJA OKREŚLEŃ UŻYTYCH W ROZPRAWIE:	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. PROBLEMATYKA PRACY	7
1.2. CEL I PROBLEM PRACY	10
1.3. ZAKRES PRACY	11
2. ANALIZA STANU WIEDZY	13
2.1. SZKODLIWOŚĆ SYSTEMÓW TECHNICZNYCH ORAZ METODY JEJ OCENY W CYKLU ŻYCIA	13
2.2. PROCESY PRODUKCYJNE, PRZETWÓRCZE I ICH WPLYW NA OTOCZENIE SYSTEMU TECHNICZNEGO	19
2.3. CHARAKTERYSTYKA OPAKOWAŃ Z TWORZYW SZTUCZNYCH	21
2.4. ROLA OPAKOWAŃ	24
2.5. FOLIE TERMOKURCZLIWE	27
3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ	30
3.1. PAKOWARKA SP A-M Z TUNELEM GRZEWCZYM ZASILANYM GAZEM ZIEMNYM	32
3.2. PAKOWARKA VEGA HT100 Z TUNELEM GRZEWCZYM ZASILANYM ENERGIĄ ELEKTRYCZNĄ	37
4. METODY BADAŃ	43
4.1. METODY BADAŃ LABORATORYJNYCH	46
4.1.1. Wyznaczenie grubości folii	47
4.1.2. Badanie swobodnej kurczliwości liniowej	48
4.1.3. Badanie odporności na uderzenie metodą swobodnie spadającego grotu	49
4.1.4. Oznaczenie wytrzymałości na rozdzieranie metodą Elmendorfa	50
4.1.5. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu	51
4.2. METODY BADAŃ SYMULACYJNYCH	52
4.3. METODY BADAŃ PRZEMYSŁOWYCH	58
5. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ I ICH ANALIZA	63
5.1. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ LABORATORYJNYCH	63
5.1.1. Wyznaczenie grubości folii	63
5.1.2. Badanie swobodnej kurczliwości liniowej folii termokurczliwej	64
5.1.3. Badanie odporności na uderzenie metodą swobodnie spadającego grotu	68
5.1.4. Oznaczenie wytrzymałości na rozdzieranie (metoda Elmendorfa)	69
5.1.5. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu	69
5.2. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH	81
5.2.1. Wpływ zużycia materiałów i surowców na szkodliwość procesu masowego pakowania butelek	81
5.2.2. Wpływ procesu masowego pakowania butelek na szkodliwość w systemie technicznym	84
5.2.3. Wpływ zmiany źródła pozyskiwania energii do zasilania procesu masowego pakowania butelek na jego szkodliwość	96
5.3. WYNIKI BADAŃ PRZEMYSŁOWYCH	100
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	104
LITERATURA	110
STRESZCZENIE	119
ABSTRACT	120
SPIS RYSUNKÓW	121
SPIS TABEL	125

Używane w rozprawie skróty:

LCA	analiza pełnego cyklu istnienia (ang. Life Cycle Assessment)
LCI	analiza zbioru wejść i wyjść (ang. Life Cycle Inventory)
LCIA	ocena wpływu cyklu życia (ang. Life Cycle Impact Assessment)
LDPE	polietylen o niskiej gęstości (ang. Low Density Polyethylene)
rLDPE	polietylen o niskiej gęstości pochodzący z recyklingu (ang. Recycled Low Density Polyethylene)
KM	kierunek maszynowy w badaniu próbek folii
KP	kierunek poprzeczny w badaniu próbek folii
Pt	punkt środowiskowy w LCA
CO ₂	dwutlenek węgla
CH ₄	metan
N ₂ O	podtlenek azotu
SF ₆	heksafluorek siarki

Definicja określeń użytych w rozprawie:

Brak	produkt nienadający do dalszego użytkowania (w procesie masowego pakowania zgrzewka nienadająca się do transportu);
Cechy konstrukcyjne foliowych opakowań termokurczliwych	geometryczne, materiałowe, dynamiczne i środowiskowe cechy konstrukcji opakowań: postać, wymiar, tolerancja elementu opakowania foliowego. Kształt elementów, ich powierzchni, obciążenia, rodzaju smarowania, rodzaju zastosowanych ze środowiska materiałów itd.;
Charakterystyki szkodliwości systemowych	intensywność i produkty obróbki mechanicznej, chemicznej, montażu opakowań, maszyn i urządzeń procesów wytwarzania, docierania elementów (niestacjonarnych), transportu itd.;
Charakterystyki szkodliwości środowiskowych	intensywność i produkty zużywania umiarkowanego opakowań, maszyn i urządzeń procesów, zwykle o stałej intensywności. Intensywność zużywania przyspieszonego (awaryjnego) opakowań, maszyn i urządzeń procesów, zwykle o rosnącej intensywności;
Cykl istnienia wyrobu	kolejne i powiązane ze sobą etapy życia wyrobu, od momentu pozyskania surowców i wytworzenia wyrobu z zasobów naturalnych aż do etapu jego likwidacji;
Granice systemu	zestaw kryteriów określający przynależność danych procesów jednostkowych do systemu wyrobu;
Jednostka funkcjonalna	ilościowy efekt danego obiektu badań stosowany w celu odniesienia;
Materiały	dane wejściowe do procesu termokurczliwego pakowania, do których należą np. surowce użyte do produkcji foli oraz energia;
Ocena	określenie efektywności procesu termokurczliwego pakowania zgrzewek napojów w wyniku prowadzonych analiz;
Ocena cyklu życia	zebranie i ocena wszystkich wejść i wyjść podczas całego cyklu życia badanego obiektu badań;
Parametry procesów foliowych opakowań termokurczliwych	parametry technologiczne: rodzaju ostatecznej obróbki, operacji, zabiegów, czynności, jakości obróbki cieplnej lub ciepłno-chemicznej, chropowatości powierzchni, jakości montażu, cech eksploatacji, prawidłowego użytkowania, konserwacji i obsługi między naprawami; również składowania i recyklingu;

Proces	zbiór wszystkich działań powiązanych ze sobą lub wzajemnie na siebie oddziałujących, przekształcających wejścia w wyjścia;
Punkty środowiskowe (Pt)	wartość jednego punktu odpowiada 1/1000 rocznego obciążenia środowiska generowanego przez jednego Europejczyka. Wartość ta jest obliczana przez podzielenie całego obciążenia w Europie przez liczbę mieszkańców i pomnożenie przez 1000;
Recykling	proces mający na celu przetworzenie odpadów z produktów wycofanych z użytkowania w celu przywrócenia ich do gospodarki;
System techniczny	zbiór elementów wzajemnie na siebie oddziałujących w obrębie granic danego systemu;
Szkodliwości	suma powstałych w procesie masowego pakowania braków w postaci bezużytecznych zgrzewek oraz zanieczyszczenia w postaci emisji gazów;
Szkodliwość	wszystkie działania powodujące szkody w obrębie systemu technicznego;
Ślad węglowy	suma emisji gazów cieplarnianych emitowanych bezpośrednio lub pośrednio przez badany obiekt badań.

1. Wprowadzenie

1.1. Problematyka pracy

Próby rozwiązania problemów naukowych inżynierii mechanicznej produktów, maszyn, urządzeń i instalacji produktów technologicznych systemów opakowań, w tym recyklingu, podejmowane są w Polsce i na świecie od lat 90. ubiegłego stulecia. Z uwagi na wzrastającą świadomość społeczeństwa w aspektach zachowania równowagi (balansu) między rozwojem gospodarczym a ograniczaniem jego negatywnych wpływów rośnie również zainteresowanie metodami, które badają i umożliwiają zmniejszenie szkodliwości maszyn i procesów technologicznych. Dla badań i podstaw inżynierii mechanicznej szczególnego znaczenia nabiera określenie wpływu cech konstrukcyjnych i parametrów pakowania butelek w folię termokurczliwą na szkodliwość w systemie technicznym. Określenie i poznanie związków konstrukcji foliowania produktów, np. butelek, parametrów procesów będzie podstawą do sygnalizowanego rozwiązania problemów środowiskowych i systemowych, tych i podobnych układów inżynieryjno-technicznych. W procesach pakowania istotny jest odpowiedni dobór surowca, z którego wyprodukowane są folie termokurczliwe, jak i poszukiwanie rozwiązań wpływających na ograniczenie zużycia energii. Wpływ procesu masowego pakowania oraz każdego innego procesu technologicznego na otoczenie powinien być rozpatrywany zgodnie z przyjętymi przez osobę badającą granicami systemu stanowiącymi ograniczenia zakresu analiz, polegających na przetworzeniu danych wejściowych (np. zużycie materiałów, energii) w wyjściowe i oszacowaniu emisji substancji mających negatywny wpływ na zasoby naturalne oraz życie i zdrowie ludzkie [116, 131].

Od lat funkcjonuje system zarządzania środowiskowego zgodny z normą PN EN ISO 14001, który obejmuje strukturę organizacyjną, procedury oraz środki niezbędne do opracowania i wdrożenia, a także utrzymania polityki środowiskowej. Głównym celem wprowadzania zmian jest zastosowanie w konkretnym przedsiębiorstwie rozwiązań mających wpływ na zmniejszenie szkodliwości maszyn. Wprowadzane zmiany nie powinny zaburzać możliwości przeprowadzania procesów produkcyjnych przy równoczesnym minimalnym wykorzystaniu zasobów naturalnych i braku pogorszenia ich jakości oraz ekonomii [115, 116, 142].

Istnieje wiele metod służących określeniu szkodliwości produktu lub procesu. Jedną z nich jest proekologiczna ocena szkodliwości LCA (z ang. Life Cycle Assessment). Do zalet tej metody należy fakt, że dąży ona do uwzględnienia wszystkich czynników, które mają wpływ na otoczenie danego wyrobu. Przeprowadzenie badań i analiz z wykorzystaniem tej metody to zadanie czasochłonne, bowiem konieczne jest zebranie dokładnych danych wejściowych i wyjściowych o materiałach, energii, paliwach, emisji itd. badanego obiektu. Często w takich analizach uwzględnia się również wpływ transportu występującego podczas różnych faz cyklu życia rozpatrywanego obiektu [154,

28, 24]. W przypadku ograniczonej dostępności do danych rzeczywistych z systemu technicznego pomocne okazują się bazy danych, m.in. Ecoinvent, Agri-footprint, AGRIBALYSE, Carbon Minds, Environmental Footprint database, ESU world food LCA database (optional), Quantis World Food LCA Database (optional), US Life Cycle Inventory Database, uwzględniające uśrednione wartości wpływów środowiskowych dla produktów, materiałów i procesów, jednakże nadal brakuje ich wartości w odniesieniu do polskich realiów. Podczas przeglądu literatury naukowej napotkać można wiele przykładów badań szkodliwości różnych obiektów. W większości opracowań, w tym np. autorstwa Lenzen i Munksgaard, badania dotyczą analizy wpływu na otoczenie procesu polegającego na wytworzeniu energii ze źródeł odnawialnych [78]. Z uwagi na fakt, że energia stanowi podstawowy element niezbędny w każdym przedsiębiorstwie, pojawia się potrzeba analiz dla efektywnego jej gospodarowania oraz minimalizowania oddziaływania procesów przekształcania energii [3]. Autorzy w analizie obiektów technicznych skupiają się szczególnie na etapie eksploatacji, który jest ich kluczowym i najdłuższym etapem cyklu życia [68]. Z uwagi na różnorodność, liczebność danych niezbędnych do przeprowadzenia analizy LCA etapu eksploatacji danego obiektu – nadal większość badań dotyczy procesów wytwórczych. Powodem takiego stanu jest także fakt, że w Polsce nie ma jasnego, prawnego nakazu wykonywania analiz obiektów przez przedsiębiorstwa w okresie ich eksploatacji [20, 75]. Zbyt mała wiedza w zakresie wpływu poszczególnych cech i parametrów procesu pakowania butelek w folię termokurczliwą na system techniczny oraz jego efektywność stały się istotnym powodem do podjęcia przedmiotowej problematyki badawczej, co w konsekwencji doprowadziło do powstania oryginalnej metody badań przedmiotowego procesu.

Analizując literaturę przedmiotu, znaleziono wiele przykładów badania szkodliwości różnych obiektów technicznych czy produktów. Bulim Choi et al. [20] w swoim artykule poddali badaniu szkodliwość wyrażoną jako ślad węglowy folii opakowaniowych wykonanych z LDPE, PLA oraz mieszanki PLA/PBAT przy użyciu trzech różnych scenariuszy przetwarzania odpadów, opartych na bazie danych Korei Południowej, za pomocą oceny cyklu życia. Autorzy zauważają, że mieszanki bioplastików z PLA, takie jak PLA/PBAT, mogą być bardziej szkodliwe pod względem emisji dwutlenku węgla niż popularne dotychczas materiały na przykład LDPE. Majewski i Sobolewska [84] w swoim artykule przedstawili analizę porównawczą szkodliwości pudeł wykonanych z polipropylenu, re-HDPE i tektury służących do transportu deserów z jabłek. Uzyskane wyniki wskazały na największy negatywny wpływ opakowań kartonowych wśród analizowanych. Abbate et al. [1] zaprezentowali zmienność wartości szkodliwości związanych z substytucją polietylenu małej gęstości (LDPE) pozyskiwanego z paliw kopalnych, biopolietylenem LDPE (bio-LDPE) i kwasem polimlekowym (PLA), stosowanymi jako folia do opakowań. Autorzy zwrócili uwagę na potencjalne problemy związane z ogólną analizą cyklu życia, która nie uwzględnia w wystarczającym stopniu kontekstu przedsiębiorstwa.

Wykazali oni konieczność wzmocnienia dokładności LCA jako narzędzia wspomagającego podejmowanie decyzji, otwierając tym dyskusję na temat sposobów poprawy wiarygodności praktycznych zaleceń analizy cyklu życia. Costamagna et al. [76] przedstawili ocenę nie tylko technicznej wykonalności, ale przede wszystkim zrównoważenia środowiskowego efektywnego procesu umożliwiającego recykling wielowarstwowych folii poliamidowo-polietylenowych stosowanych w opakowalnictwie. Wyniki wskazały, że proces recyklingu, prowadzony poprzez selektywne rozpuszczanie folii, pozwala na zmniejszenie ogólnego, negatywnego wpływu tych materiałów w całym ich cyklu życia. Delnavaz et al. [28] zbadali właściwości wytrzymałościowe i mechaniczne betonu zawierającego pył krzemionkowy jako materiał cementowy uzupełniający oraz wodę z odzysku jako alternatywne źródło świeżej wody, a także ocenili szkodliwość betonu. Wyniki dowiodły, że dodanie odpowiedniej ilości pyłu krzemionkowego jest pożądane ze względów kosztowych, właściwości mechanicznych, trwałościowych betonu oraz z uwagi na ograniczenie szkodliwości. Koining et al. [70] porównali szkodliwość folii jednowarstwowych i wielowarstwowych w celu ilościowego określenia wpływu zmiany sposobu gospodarowania odpadami folii z tworzyw sztucznych na otoczenie. Autorzy zwrócili szczególnie uwagę na potrzebę zwiększonej zbiórki, recyklingu i znacznej poprawy w sortowaniu folii, aby zminimalizować globalne ocieplenie oraz zużycie zasobów. Toniolo et al. [133] ocenili za pomocą LCA, w jakim stopniu innowacyjne opakowanie nadające się do recyklingu jest korzystniejsze dla ludzkości niż opakowanie nienadające się do recyklingu. Autorzy wskazali, że wybór metodyki porównawczej opartej na wynikach LCA jest słusznym rozwiązaniem do określenia, w jakim stopniu nowe opakowanie nadające się do recyklingu jest mniej szkodliwe. Ocenę oddziaływania procesów na otoczenie zaprezentowano w artykule Deboraha et al. [26]. Badaniom poddano cztery procesy związane z cementem. W ramach przeprowadzonej analizy otrzymano wynik, że najbardziej intensywnym energetycznie i emisyjnie procesem podczas produkcji cementu jest wytwarzanie klinkieru [26].

W większości badania opisywane w dostępnej literaturze dotyczą analizy szkodliwości procesów wytwarzania folii, opakowań, butelek i innych produktów. Wciąż mało jest rozważań, które dotyczyłyby oceny procesów technologicznych masowego pakowania pod względem energetyczno-środowiskowym, w celu ich udoskonalenia, tak aby w przyszłości charakteryzowały się możliwie największą efektywnością ekonomiczną, technologiczną i środowiskową oraz mniejszą szkodliwością. Niewystarczająca liczba informacji w zakresie wpływu poszczególnych cech i parametrów procesu pakowania na szkodliwość w systemie technicznym stała się główną przyczyną podjęcia przedmiotowej problematyki, dlatego za słusne i innowacyjne przyjmuje się realizację badań w zakresie niniejszej rozprawy doktorskiej. Efektem rozważań są:

- opracowane autorskie modele matematyczne wskaźników opisujących proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą,

- zidentyfikowane i scharakteryzowane wpływy poszczególnych cech i parametrów procesu na jego szkodliwość w systemie technicznym,
- zalecenia mające na celu zmniejszenie szkodliwości przedmiotowego procesu,
- wnioski z badań laboratoryjnych weryfikujących właściwości użytkowe folii termokurczliwych: powszechnie stosowanych w przemyśle materiałów polietylenowych z foliami z dodatkiem recyklatów.

W zrównoważonym projektowaniu, konstruowaniu i użytkowaniu twórcy maszyn oraz nowych technologii muszą brać pod uwagę nie tylko aspekty techniczne i ekonomiczne, ale także potencjalny wpływ na otoczenie systemowe podczas wszystkich etapów działania maszyn. Wciąż poszukiwane są wysokoefektywne, wysokosprawne, a zarazem nieszkodliwe procesy produkcyjne. Badania te powinny dążyć do opracowywania nowych, oryginalnych modeli odwzorowujących charakterystyki procesów [20, 21, 70, 84, 127].

1.2. Cel i problem pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy i praktyki za cel pracy przyjęto:

1. Badanie, analizę, ocenę i wskazanie możliwości opisu i doskonalenia elementów oraz relacji zbioru cech konstrukcyjnych i zbioru cech parametrów procesu masowego pakowania w folię termokurczliwą butelek z napojami na szkodliwość w systemie technicznym.
2. Opracowanie modeli matematycznych podstawowych oraz prorozwojowych wskaźników charakteryzujących proces masowego pakowania butelek.

Dla osiągnięcia celu rozprawy postanowiono rozwiązać trzy problemy badawcze inżynierii mechanicznej w obrębie procesów technologicznych pakowania produktów:

1. Jakie są cechy konstrukcyjne termokurczliwych opakowań foliowych i jaki jest wpływ tych cech konstrukcyjnych na obciążenie środowiska technologicznego (naturalnego), w tym systemu technicznego maszyn i urządzeń procesów ich wytwarzania oraz eksploatacji?
2. Jakie są parametry procesów wytwarzania i eksploatacji termokurczliwych opakowań foliowych i jaki jest wpływ tych parametrów na obciążenie środowiska naturalnego maszyn i urządzeń procesów ich wytwarzania oraz eksploatacji?
3. Czy zastosowanie nowego tworzywa konstrukcyjnego do produkcji opakowań foliowych wpłynie na zwiększenie efektywności w procesie masowego pakowania butelek do napojów oraz przyczyni się do zmniejszenia negatywnych skutków przedmiotowego procesu?

Realizacja przyjętych celów rozprawy była możliwa poprzez wykonanie sześciu zadań badawczych:

- a) szczegółowej analizie stanu wiedzy i techniki, zebraniu i uporządkowaniu danych wejściowych wybranych faz cyklu życia masowego procesu pakowania butelek z napojami za pomocą folii termokurczliwej,
- b) opracowaniu modeli matematycznych wskaźników charakteryzujących badany proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą,
- c) wyznaczeniu cech użytkowych oraz określeniu wpływu na końcowe parametry procesu pakowania stosowanych w przemyśle folii termokurczliwych, w tym folii zawierających dodatek w postaci recyklatów,
- d) identyfikacji dominujących, szkodliwych oddziaływań poszczególnych etapów procesu masowego pakowania butelek z napojami,
- e) wyznaczeniu poziomów szkodliwości procesu masowego pakowania butelek na otoczenie systemu technicznego,
- f) opracowaniu nowych wskazań dla projektowania, zasilania, sterowania, monitorowania, a w konsekwencji i rozwoju systemów technicznych zawierających maszyny do masowego pakowania butelek.

Po zrealizowaniu badań laboratoryjnych, symulacyjnych, przemysłowych i uzyskaniu odpowiedzi na przedstawione wyżej problemy badawcze, będzie można stwierdzić, czy cele rozprawy doktorskiej pt. „Wpływ cech i parametrów pakowania butelek w folię termokurczliwą na szkodliwość w systemie technicznym” zostały osiągnięte.

1.3. Zakres pracy

Praca zawiera sześć rozdziałów. W pierwszym rozdziale omówiono problematykę pracy oraz określono przyczyny podjęcia tematyki rozprawy doktorskiej. Określono cel, problem oraz zakres pracy. W drugim rozdziale przedstawiona została analiza stanu wiedzy z zakresu realizowanego tematu. Wskazano współczesne trendy dotyczące procesów technologicznych opakowań, a także omówiono politykę Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonego rozwoju. Scharakteryzowano aspekty wpływu procesów technologicznych na otoczenie oraz sposoby oceny szkodliwości z wykorzystaniem metody LCA. W trzecim rozdziale scharakteryzowano obiekt badań, za który przyjęto proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą, przeprowadzany na dwóch pakowarkach różniących się źródłem energii zasilającej piec zgrzewający folię, tj. zasilanie gazem ziemnym lub energią elektryczną oraz użytym w procesie pakowania rodzajem folii termokurczliwej. W kolejnym rozdziale szczegółowo opisano przyjętą metodykę badań:

- laboratoryjnych, polegających na wyznaczeniu właściwości użytkowych stosowanych w procesie pakowania folii termokurczliwych,
- symulacyjnych, mających na celu wyznaczenie i porównanie szkodliwości procesu masowego pakowania w czterech wariantach oraz wskazanie najbardziej obciążającego środowisko etapu procesu,

- przemysłowych, polegających na obserwacji i zebraniu niezbędnych danych ilościowych oraz sformułowaniu autorskich modeli matematycznych wskaźników charakteryzujących przedmiotowy proces.

W rozdziale piątym opracowano i przedstawiono powstałe w ramach przeprowadzonych badań laboratoryjnych, symulacyjnych i przemysłowych wyniki. W ostatnim rozdziale zawarto podsumowanie oraz wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Wskazano możliwe do realizacji kierunki analiz oraz działania konieczne dla dalszego rozwoju konstrukcji maszyn oraz ulepszania cech i parametrów procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.

2. Analiza stanu wiedzy

2.1. Szkodliwość systemów technicznych oraz metody jej oceny w cyklu życia

Podczas procesów produkcyjnych, poza zużyciem energii oraz surowców do wytworzenia końcowego produktu, występuje emisja niepożądanych substancji w postaci gazów cieplarnianych oraz odpadów [33]. Istotne jest wprowadzanie w życie działań mających na celu rozwój gospodarki przy równoległym ograniczeniu nadmiernego zużycia zasobów naturalnych, w myśl założeń ekorozwoju [83]. Pojęcie ekorozwoju pojawiło się w latach 70. minionego wieku na konferencjach ONZ dotyczących ochrony środowiska. W początkowych fazach stosowanie tego terminu odnosiło się do działań mających na celu zmniejszenie szkodliwości przemysłu przy utrzymaniu określonego tempa wzrostu gospodarczego [43, 131]. Od kilku lat coraz częściej używany jest w tym zakresie termin rozwoju zrównoważonego, który – zgodnie z podawaną definicją – postrzegany jest jako rozwój mający na celu zapewnienie potrzeb ludzkości, z jednoczesnym respektowaniem wymagań ochrony środowiska bez ryzyka narażenia na niebezpieczeństwo przyszłych pokoleń [100, 126, 135].

W roku 2015 przyjęta została przez 193 państwa Organizacji Narodów Zjednoczonych Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju, która stanowi kontynuację globalnych starań mających na celu poprawę jakości życia społeczeństwa. Agenda 2030 po części opiera się na realizowanych w latach 2000–2015 Milenijnych Celach Rozwoju, jednakże skupia się również na przekształceniu gospodarek tak, aby możliwe było stworzenie długotrwałego i zrównoważonego wzrostu gospodarczego na całym świecie [43]. Pomimo znacznego postępu, gospodarka w Polsce nadal pozostaje w czołówce tych, które wytwarzają najwięcej dwutlenku węgla, dlatego niezbędne jest wprowadzanie fundamentalnych zmian w przemyśle krajowym, w tym również w procesach produkcyjnych. Aby krajowy przemysł stawał się bardziej ekologiczny, konieczne jest stałe kontrolowanie emisji zanieczyszczeń u źródła ich powstawania oraz zachęcanie do wprowadzania zmian, w tym wdrażania innowacyjnych rozwiązań w procesach przemysłowych, mających na celu minimalizowanie ich negatywnych skutków [1, 57]. Powinno dążyć się do zmian w wytwarzaniu energii, opierając jej produkcję w znacznej części na proekologicznych źródłach, w tym na przykład na energii pochodzącej z wiatru. Taka zmiana przyczyni się do ograniczenia nadmiernej emisji CO₂ do atmosfery oraz wpłynie na powstanie nowych miejsc pracy dla specjalistów z zakresu odnawialnych źródeł energii [60, 86].

Szkodliwość według słownika języka polskiego definiowana jest jako „cecha czegoś, co szkodzi komuś lub czemuś” [129]. W pracy za definicję szkodliwości przyjęto oddziaływanie wywoływane przez proces masowego pakowania prowadzące bezpośrednio lub pośrednio do pogorszenia jego otoczenia systemowego m.in. środowiska naturalnego, zdrowia ludzkiego oraz

zubożenia zasobów. W celu dostarczenia informacji mających na celu zminimalizowanie negatywnych oddziaływań danego systemu technicznego przeprowadza się ocenę szkodliwości, która powinna dotyczyć:

- zidentyfikowania głównych zagrożeń stwarzanych przez badany system techniczny oraz ich źródeł,
- przeprowadzenia analiz w zakresie wariantów zmian w danym systemie technicznym w celu zmniejszenia jego negatywnego wpływu na otoczenie,
- poszukiwania optymalnego rozwiązania i wdrożenia go w życie, w konsekwencji czego nastąpi poprawa wskaźnika szkodliwości danego systemu technicznego.

W ocenie szkodliwości procesu technologicznego istotne jest dostarczenie informacji niezbędnych w realizacji działań zwiększających jego bezpieczeństwo. Taką ocenę powinno przeprowadzać się na etapie projektowania, eksploatacji, a w szczególności podczas rozruchu maszyn. Podczas oceny szkodliwości na etapie projektowania powinny zostać określone zagrożenia stwarzane przez proces, które należałoby zweryfikować i poprawić w celu powstania optymalnego wariantu procesu zarówno pod względem produkcyjnym, jak i bezpieczeństwa. Ocena szkodliwości procesu na etapie funkcjonowania zostaje przeprowadzona, aby sprawdzić zgodność z przepisami oraz ograniczyć ryzyko nadmiernego oddziaływania procesu na całe jego otoczenie systemowe. Głównym celem procesów technologicznych jest dążenie do prawidłowego wytworzenia wyrobu końcowego przy jednoczesnym monitorowaniu ilości emisji i ich oddziaływań na otoczenie systemu technicznego. Istniejące w przedsiębiorstwach systemy zarządcze, logistyczne oraz produkcyjne są podstawą do powstania obszaru, gdzie realizuje się cele zakładów produkcyjnych [33]. Należy podkreślić, że każda aktywność człowieka, również działalność gospodarcza, pełni istotną rolę w zachowaniu równowagi środowiskowej. Wszystkie podmioty, w tym także branże bazujące na maszynach pakujących, odpowiedzialne są za wdrażanie i rozpowszechnienie zrównoważonych praktyk, ponieważ współpracują bezpośrednio z jednostkami wywierającymi bezpośredni wpływ na środowisko [7, 54].

W działalności gospodarczej człowieka zużywane są zasoby przyrody w celu przekształcenia ich w wyrób końcowy. Zarówno procesom wytwarzania produktu końcowego, jak i pozyskiwania surowca towarzyszy powstawanie czynników, rozpatrywanych w kategoriach szkodliwości, np. substancji i odpadów, które obciążają w znacznym stopniu elementy środowiskowe [144, 44]. Teraźniejszy oraz przyszły rozwój gospodarczy wymaga określenia i wprowadzenia w życie właściwej relacji występującej pomiędzy gospodarką a środowiskiem. Nieuniknione jest wprowadzenie modyfikacji procesów produkcyjnych w postaci zasilania ich energią ze źródeł odnawialnych czy użycia do produkcji opakowań materiałów pochodzących z recyklingu. Przeprowadzenie analizy cyklu życia (LCA) umożliwi uzyskanie globalnego

obrazu szkodliwości środowiskowej ocenianego obiektu technicznego i poszczególnych faz jego istnienia. Duża szczegółowość tej metody niesie możliwość analizowania konkretnych elementów, z których dany obiekt został wyprodukowany [53, 10, 6]. Na podstawie wyników powstałych w badaniu porównawczym kilku wariantów badanego obiektu możliwe jest wybranie rozwiązania, które ograniczy lub całkowicie wyeliminuje jego negatywny wpływ na otoczenie, przy zachowaniu odpowiedniej jakości i właściwości. Takie wnioski są możliwe tylko poprzez przeprowadzenie na wstępie badań szczegółowej inwentaryzacji badanego obiektu [84, 108, 39].

Wśród programów do oceny cyklu życia, takich jak GaBi, MiLCA, OpenLCA wskazać należy oprogramowanie SimaPro, które bazuje na szacowaniu wpływów środowiskowych z wykorzystaniem baz danych np. Ecoinvent oraz zaawansowanych metod kalkulacyjnych (np. ReCiPe 2016) i opiera się na założeniach zbliżonych do filozofii G. Taguchiego, przy czym miejsce strat wymienia się na szkody wywołane w środowisku przez cykl życia badanego obiektu. Ocenę szkód przeprowadza się na podstawie oszacowania obciążeń przypisanych do odpowiedniej kategorii oddziaływań. W celu zmniejszenia liczby oddziaływań, środowisko zostało zdefiniowane jako zestaw biologicznych, fizycznych i chemicznych parametrów, stanowiących warunki konieczne do funkcjonowania ludzi i przyrody, na które w sposób pośredni lub bezpośredni oddziałuje działalność człowieka. Ocena może zostać przeprowadzona pod warunkiem doboru odpowiedniej metody badań do celu jej prowadzenia. Wiele metod nie uwzględnia wpływu na cały obszar oddziaływania badanego obiektu, ograniczają one dane do oddziaływania tylko na dany region [8]. Na przykład Ekowskażnik 99, Metody EDIP, IMPACT 2002+ i EPS są reprezentatywne dla Europy Zachodniej, LIME 2.0 dla warunków japońskich, TRACI dla warunków amerykańskich i LUCAS dla warunków kanadyjskich. Istnieje również uniwersalna metoda IMPACT WORLD +, która jest globalnie zregionalizowana i daje możliwość oceny cyklu życia obiektu niezależnie od regionu geograficznego. Metoda Impact World + jest aktualizacją Impact 2002+, LUCAS i EDIP [19]. Jak podają źródła literaturowe, większość regionalnych kategorii oddziaływań badanego obiektu została tutaj określona przestrzennie, a wszystkie szkody długoterminowe podzielono na szkody o zakresie krótkoterminowym (do 100 lat po emisji) oraz długoterminowym.

Powszechnie stosowaną metodą oceny szkodliwości w cyklu życia jest ReCiPe 2016. Jest to przede wszystkim zaktualizowana i poszerzona wersja ReCiPe 2008, gdzie jako nowsza wersja metod używanych w LCA została przeniesiona z kategorii europejskiej do światowej [128]. W tabeli 1. przedstawiono związek przyczynowo-skutkowy między środowiskową ingerencją (np. emisja danej substancji chemicznej) i jego potencjalnym wpływem. Przykładem takiego związku może być np. emisja szkodliwej substancji chemicznej do powietrza, która doprowadza do zwiększenia jej stężenia w zbiornikach słodkowodnych, co w konsekwencji przyczynia się do zanikania gatunków w danym akwenie. Metody punktu środkowego mierzą efekt

występujący przed uszkodzeniem obszaru ochrony, natomiast metody punktów końcowych skupiają się na konsekwencjach określonej emisji, aż nie dojdzie do spowodowania przez nią szkód. Przekształcenie punktów środkowych na punkty końcowe przyczynia się do uproszczenia interpretacji wyników na etapie LCIA. Należy pamiętać, że z każdym krokiem agregacji rośnie niepewność wyników. Do punktów środkowych (kategorii oddziaływań) należą globalne ocieplenie, zubożenie warstwy ozonowej w stratosferze, promieniowanie jonizujące, tworzenie ozonu (zdrowie ludzkie), tworzenie się drobnych cząstek stałych, tworzenie ozonu (lądowe ekosystemy), zakwaszenie lądowe, eutrofizacja wód słodkich, eutrofizacja morska, lądowa ekotoksyczność, ekotoksyczność słodkowodna, ekotoksyczność morska, rakotwórcza toksyczność dla ludzi, toksyczność nierakotwórcza, użytkowanie gruntów, niedobór zasobów mineralnych, niedobór zasobów kopalnych, zużycie wody [127, 125, 139].

Tab. 1. Zależności między szkodami a wskaźnikami punktu środkowego oraz punktu końcowego w metodzie ReCiPe 2016 [51]

Lp.	Punkt środkowy	Szkoda	Punkt końcowy
1	cząstki stałe	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na choroby układu oddechowego 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
2	tworzenie ozonu	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na choroby układu oddechowego 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
3	promieniowanie jonizujące	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na nowotwory wzrost zachorowań na inne choroby 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
4	zubożenie warstwy ozonowej	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na nowotwory wzrost zachorowań na inne choroby 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
5	toksyczność rakotwórcza	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na nowotwory 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
6	toksyczność nierakotwórcza	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na inne choroby 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
7	tworzenie się drobnych cząstek stałych	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na inne choroby 	szkodliwość wpływająca na zdrowie ludzkie
8	globalne ocieplenie	<ul style="list-style-type: none"> wzrost zachorowań na inne choroby uszkodzenie gatunków fauny i flory wód słodkich oraz lądowych 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów

cd. Tab. 2. Zależności między szkodami a wskaźnikami punktu środkowego oraz punktu końcowego w metodzie ReCiPe 2016 [51]

9	zużycie wody	<ul style="list-style-type: none"> wzrost niedożywienia uszkodzenie gatunków lądowych fauny i flory uszkodzenie gatunków wód morskich fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
10	ekotoksyczność wód słodkich	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków fauny i flory wód słodkich 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
11	eutrofizacja wód słodkich	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków fauny i flory wód słodkich 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
12	tworzenie się ozonu	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków lądowych fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
13	ekotoksyczność lądowa	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków lądowych fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
14	zakwaszenie gleby	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków lądowych fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
15	zmiany terenu	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków lądowych fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
16	morska ekotoksyczność	<ul style="list-style-type: none"> uszkodzenie gatunków wód morskich fauny i flory 	szkodliwość wpływająca na jakość ekosystemów
17	zasoby minerałów	<ul style="list-style-type: none"> zwiększone koszty wydobycia 	szkodliwość w zakresie dostępności zasobów
18	zasoby kopalniane	<ul style="list-style-type: none"> koszty paliw/gazu/węgla 	szkodliwość w zakresie dostępności zasobów

Ocena obiektu badań za pomocą metody punktu środkowego powiązana jest z niską niepewnością wyników. Wiąże się jednak z pewnymi trudnościami w interpretacji, biorąc pod uwagę liczbę i złożoność uwzględnianych kategorii wpływów. Przekształcenie wpływów punktu środkowego (kategorii wpływów) do punktu końcowego (kategorii szkód) wprowadza dodatkową niepewność, ale zwiększa czytelność i łatwość interpretacji wyników. Powstałe w ramach punktu końcowego wartości oddziaływań można agregować, aby uzyskać jeden końcowy wynik. Stosowane w tej metodzie jednostki często wydają się skomplikowane, dlatego w celu ułatwienia interpretacji wyników wprowadzana jest normalizacja np. przez odniesienie wartości wpływu do udziału przeciętnego

obywatela we wszystkich emisjach i zużyciach zasobów podczas jednego roku [109]. Wykorzystanie normalizacji wpływa na obliczenie wartości wskaźnika kategorii względem informacji odniesienia, co w konsekwencji przyczynia się do uzyskania wpływów środowiskowych odniesionych do różnych kategorii w formie wspólnej, bezwymiarowej wartości. Takie działanie pozwala na przeprowadzanie porównania kategorii wpływu między sobą [57, 62, 74].

Wskaźniki punktu końcowego mają za zadanie pokazanie szkód danego obiektu na trzech poziomach agregacji [52, 128]:

- a) zdrowie ludzkie – wyrażone jako liczba utraconych lat życia oraz okresu życia w niepełnej sprawności. Lata te są łączone i określane jako lata życia obciążone niepełnosprawnością. Jednostką tych oddziaływań jest parametr DALY, którego twórcami byli Christopher Murray oraz Alan Lopez. Wskaźnik ten służy do pomiaru obciążenia różnymi chorobami danej populacji. Jeden DALY odpowiada utracie jednego roku życia w pełnym zdrowiu, gdzie do przyczyn tej utraty przypisuje się przedwczesną śmierć lub inwalidztwo;
- b) ekosystemy – wyrażone jako utrata gatunków na danym obszarze w określonym czasie. Jednostką jest utrata lokalnego gatunku w ciągu roku [species.yr];
- c) zubożenie zasobów – wyrażone jako nadwyżka kosztów przyszłej produkcji zasobów ponad nieskończone ramy czasowe (przy założeniu stałej rocznej produkcji). Jednostką są dolary amerykańskie (\$).

Do ilościowego określenia gazów cieplarnianych stosuje się metodę IPCC 2021, która jest następcą metody IPCC 2013. Metoda została opracowana przez Międzynarodowy Zespół do Spraw Zmiany Klimatu i jest używana do przedstawienia wpływu badanych produktów lub procesów na emisję gazów cieplarnianych wyrażoną w kg CO_{2eq} [128]. Współczynniki charakteryzujące IPCC dla bezpośredniego potencjału globalnego ocieplenia emisji do powietrza nie obejmują pośredniego powstawania podtlenku diazotu w wyniku emisji azotu, powstawania CO₂ w wyniku emisji CO czy radiacji spowodowanej emisją NO_x. Według Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu wśród gazów cieplarnianych wyróżnia się m.in. dwutlenek węgla (CO₂), metan (CH₄), podtlenek azotu (N₂O), fluoropochodne węglowodorów (HFCs), perfluoropochodne związki węgla (PFCs), sześćfluorek siarki (SF₆).

Stosowanie analiz oceny cyklu życia wpisuje się w światowe trendy poszukiwania energooszczędnych i efektywnych procesów, jest również realizacją założeń zasobooszczędnej gospodarki europejskiej. Z uwagi na fakt istnienia szeregu produktów, których oddziaływanie na otoczenie na etapie użytkowania zależy od konsumenta, istotna jest odpowiednia edukacja dotycząca prawidłowego postępowania z zużytym produktem w celu zminimalizowania negatywnego jego oddziaływania na etapie użytkowym i poużytkowym zagospodarowaniu. Jak pokazują światowe przykłady, wyniki LCA mogą nieść ze sobą konkretne zmiany, np. na podstawie przeprowadzonej przez niemiecką Federalną Agencję Środowiska wprowadzono system kaucji

zwrotnej za jednorazowe opakowania do napojów, co przyczyniło się do zmniejszenia liczby nieodpowiednio zagospodarowanych użytkowo opakowań [7, 84].

2.2. Procesy produkcyjne, przetwórcze i ich wpływ na otoczenie systemu technicznego

Zarówno zanieczyszczenia w postaci gazów, jak i pyłów mają znaczący wpływ na kondycję zdrowia ludzkiego, jakość ekosystemów i zmianę klimatu. Nadmierna obecność gazów cieplarnianych przyczynia się do wzrostu liczby zachorowań na choroby związane z układem oddechowym i krwionośnym człowieka. Ponadto wpływa na zakwaszenie gleb i wód oraz eutrofizację ekosystemów wodnych. Zjawisko zakwaszenia jest konsekwencją obecności w powietrzu substancji zakwaszających, do których należą dwutlenek siarki, amoniak i tlenek azotu [59, 153]. Do podstawowych źródeł emisji gazów cieplarnianych związanych z działalnością człowieka należą:

- procesy spalania paliw kopalnianych w ramach produkcji energii,
- procesy produkcyjne,
- procesy spalania występujące w przemyśle,
- transport,
- wydobycie i dystrybucja paliw kopalnych,
- użytkowe zagospodarowanie odpadów,
- rolnictwo.

Głównym antropogenicznym źródłem emisji gazów do atmosfery są procesy spalania paliw kopalnianych. Wielkość tej emisji zależy od struktury i ilości zużycia paliw w gospodarce danego kraju oraz stosowanej do tego technologii. W Polsce nadal podstawowym nośnikiem energii pozostaje węgiel kamienny. Jak podaje Agencja Rynku Energii, udział węgla w produkcji krajowej energii w 2021 roku wyniósł ponad 70%, a wyprodukowanie energii ze źródeł odnawialnych nie przekroczyło 15%. W porównaniu z innymi krajami nadal produkuje się zbyt mało energii pochodzącej ze źródeł niekonwencjonalnych [145, 59, 27].

Istotne znaczenie w emisji zanieczyszczeń trafiających do atmosfery mają procesy produkcyjne. Wprowadzanie rozwiązań w kierunku zmniejszenia szkodliwości procesów dotyczy każdego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Pożądany efekt można osiągnąć poprzez inwestycje w firmie, czyli np. zakup nowej maszyny pakującej lub bez nakładów finansowych poprzez wprowadzanie zmian w płynności przebiegu procesu [72]. Zmniejszenie szkodliwości procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą powiązane jest z uzyskiwaniem użytecznych (prawidłowo powstałe zgrzewki) i nieużytecznych (zanieczyszczenia, wadliwe zgrzewki, hałas, ciepło) produktów procesu. Zwiększenie liczby produktów użytecznych przyczynia się do zwiększenia jego efektywności, ale również zmniejszenia zapotrzebowania na energię oraz zmniejszenie ilości odpadów powstających w procesie masowego pakowania,

czyli ostatecznie na zminimalizowanie szkodliwego oddziaływania na system techniczny [25, 120].

Z uwagi na wzrastającą ilość zanieczyszczeń na świecie szczególnie ważnym zagadnieniem staje się efekt cieplarniany, który jest zjawiskiem polegającym na podnoszeniu się temperatury na Ziemi wskutek dostania się do atmosfery nadmiernej ilości gazów cieplarnianych, m.in. dwutlenku węgla (CO_2), pary wodnej, ozonu (O_3) czy metanu (CH_4) [42, 30]. Powszechnie uważa się, że najwięcej dwutlenku węgla dostaje się do atmosfery w konsekwencji działalności człowieka. Nie należy jednak zapominać, że emisja CO_2 pochodzi również z naturalnych źródeł, jakimi są wybuchy wulkanów, które skutkują wprowadzeniem także niebezpiecznych pyłów do atmosfery. Jednym ze wskaźników oceny emisji gazów cieplarnianych jest ślad węglowy (ang. carbon footprint), który stanowi sumę emisji gazów cieplarnianych, emitowanych bezpośrednio lub pośrednio przez badany obiekt [155]. Należy do wskaźników mierzalnych, który można wyznaczyć na podstawie odpowiedniej liczby danych dla konkretnego przedsięwzięcia, procesu, usługi czy produktu.

W śladzie węglowym uwzględniane są emisje dwutlenku węgla, podtlenku azotu, metanu i innych gazów cieplarnianych. Wyrażany jest w jednostce masy ekwiwalentu dwutlenku węgla, który umożliwia porównanie emisji różnych gazów niejednakowo wpływających na globalne ocieplenie na wspólnej skali. Ślad węglowy dla konkretnego produktu obejmuje emisje występujące w całym cyklu jego życia – od wydobycia surowców do powstania produktu, poprzez proces produkcyjny, użytkowanie, aż do momentu zakończenia cyklu życia, np. w formie składowania lub recyklingu [20, 141].

W dostępnej literaturze znaleźć można wiele wyników badań odnoszących się do ilości wydzielanego dwutlenku węgla w efekcie procesu produkcyjnego materiałów do tworzenia opakowań foliowych, brakuje jednak analiz, które określałyby ślad węglowy procesu masowego pakowania w folie termokurczliwe [30, 64]. Ślad węglowy stanowi istotny czynnik, który obrazuje wpływ każdego aspektu życia na postępujące globalne ocieplenie. Każdy proces, produkt i działanie ludzkie niosą za sobą konsekwencje w postaci gazów dostających się do atmosfery. Z tego względu w pracy podjęto skuteczną próbę wyznaczenia śladu węglowego procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.

Proces masowego pakowania, tak jak każdy proces technologiczny, generuje obciążenia w systemie technicznym, do których należą:

- a) zużycie energii elektrycznej,
- b) wytwarzanie odpadów,
- c) emisja hałasu,
- d) emisja szkodliwych gazów,
- e) emisja ciepła.

Dostępne na rynku maszyny pakujące zgodne są z obowiązującymi w momencie składania zamówienia, sprawdzonymi w rzeczywistości zasadami, normami, technikami obniżania emisji hałasu w przemyśle spożywczym. Wartości emisji obecne na stanowiskach roboczych maszyn zależą nie tylko od

emisji hałasu samej maszyny, ale również od: przestrzennego rozmieszczenia innych jego źródeł, od wentylacji oraz w dużym stopniu od akustyki pomieszczenia, gdzie dana maszyna pracuje. Aby stłumić dźwięk w danym obiekcie, używa się pokryw dźwiękochłonnych oraz pochłaniających dźwięki okładzin ścian. Do parametrów akustyki pomieszczenia zalicza się czas pogłosu oraz średni spadek ciśnienia akustycznego [143]. Według aktualnego stanu wiedzy i techniki dla pasm ósemkowych pomiędzy 500 Hz i 4kHz, w zależności od powierzchni pomieszczenia, czas pogłosu musi mieścić się w przedziale 0,5–0,8, a średni spadek poziomu ciśnienia akustycznego na każde podwojenie odległości nie powinien być mniejszy niż 4,5 dB(A). Poziom ciśnienia akustycznego emisji występującego w obszarze roboczym mierzony jest w dB(A) w odległości 1 m od zewnętrznej krawędzi danej maszyny i na wysokości 160 cm. Zgodnie z przyjętymi normami, przedsiębiorstwa muszą monitorować proces produkcji i gwarantować, że ich działalność nie prowadzi do nadmiernej emisji hałasu do otoczenia zewnętrznego [38, 140]. Przedsiębiorstwa mają za zadanie wyznaczanie poziomu emitowanego hałasu i – w przypadku przekroczenia dopuszczalnych norm – zminimalizowania do dopuszczalnego zgodnie z Prawem Ochrony Środowiska art. 112 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 roku [138].

Emisja zanieczyszczeń obecna podczas procesu tworzenia zgrzewek stanowi tylko część całkowitego obciążenia danego produktu. Podczas innych działań, które odpowiadają za dostarczenie do procesu surowca oraz energii niezbędnej do jego realizacji, dochodzi również do emisji niepożądanych substancji. W efekcie emisje zanieczyszczeń przypisane do gotowego produktu występują nie tylko w bezpośrednim procesie produkcyjnym danego wyrobu, ale również we wcześniejszych procesach, które są niezbędne do wytworzenia końcowego produktu [8]. W schemacie przedstawionym w pracy Górzyńskiego pt. „Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektu” skumulowana emisja zanieczyszczeń obejmuje procesy zarówno bezpośredniego, jak i pośredniego zużycia surowców, materiałów oraz nośników energii w procesie wytwarzania wyrobu użytecznego w poszczególnych etapach procesów niezbędnych do powstania założonego wyrobu [44].

2.3. Charakterystyka opakowań z tworzyw sztucznych

W styczniu 2018 roku Unia Europejska opublikowała strategię na rzecz tworzyw sztucznych (ang. Plastic Strategy), która skupia się na konieczności zwiększenia liczby tworzyw będących w obiegu zwrotnym oraz na zmniejszeniu ich negatywnego wpływu na otoczenie. W strategii znalazły się postulaty, które zobowiązują kraje europejskie, aby do 2030 roku wszystkie opakowania wykonane na bazie tworzyw sztucznych nadawały się do recyklingu lub mogły być wykorzystane ponownie. Strategia obejmuje również aspekty dotyczące selektywnej zbiórki odpadów, która ma ułatwić proces recyklingu [63, 103, 136].

Tworzywa polimerowe to produkty, których głównym składnikiem są związki wielkocząsteczkowe, tzw. polimery, otrzymane z substancji małowcząsteczkowych (monomerów) w wyniku przeprowadzenia procesu ich syntezy. Do wyrobu opakowań wykorzystuje się tworzywa sztuczne w postaci granulatu, proszków lub półproduktów. Według definicji zawartej w rozdziale pierwszym art. 3.1 ustawy z dnia 13 czerwca 2013 roku o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi: „opakowaniem w rozumieniu ustawy jest wyrób, w tym wyrób bezzwrotny, wykonany z jakiegokolwiek materiału, przeznaczony do przechowywania, ochrony, przewozu, dostarczania lub prezentacji produktów, od surowców do towarów przetworzonych” [137]. Współcześnie opakowania wytwarzane są z różnych materiałów i w zależności od funkcji, jaką mają pełnić, produkowane są w różnych kształtach [35]. Opakowania sztywne pozwalają uchronić produkty delikatne przed zniszczeniem, natomiast opakowania elastyczne, które są lżejsze, skutecznie chronią wyroby podczas transportu, a także – gdy stosowane są przez producentów transparentne wersje – pozwalają konsumentowi na ocenę jakości danego towaru. W Polsce w latach 2013–2017 wzrost zużycia do produkcji opakowań tworzyw sztucznych wyniósł ok. 20% [117]. Przyczyną takiego stanu był wzrost zastosowania opakowań polimerowych w każdym sektorze gospodarki. Wzrastająca popularność tworzyw sztucznych w procesach produkcyjnych opakowań ma również negatywne aspekty. Największym z nich jest obciążenie dla środowiska [59, 80]. Według badań przeprowadzonych przez firmę Conversio, w 2020 roku w Polsce zebrano ponad 2050 tys. ton odpadów z tworzyw sztucznych, co stanowiło 14,6% wszystkich odpadów komunalnych. Największy procentowy udział w tej liczbie stanowiły opakowania (56%), pozostałe 44% dotyczyły odpadów budowlanych, motoryzacyjnych i elektronicznych [117].

Dostępne na rynku folie wykonywane są z różnych rodzajów tworzyw sztucznych, m.in. polichlorek winylu (PVC), polietylen (PE) i polipropylen (PP). W zależności od zastosowania danej folii, możliwe jest tworzenie różnych mieszanek tworzyw i dodatków, w celu zwiększenia odporności na rozciąganie czy przepuszczalności powietrza. Na właściwości folii (m.in. wytrzymałość, grubość, transparentność) ma również wpływ sposób jej wytworzenia. Folie powstałe w wyniku rozdmuchu są cieńsze i transparentne, natomiast folie produkowane metodą wylewu – grubsze oraz posiadające lepsze wartości wytrzymałościowe [13, 41, 119].

Opakowania z tworzyw sztucznych swoją popularność w sektorze opakowań zawdzięczają przede wszystkim dobrym własnościom higienicznym oraz małym kosztom produkcji [5, 122]. Do największych zalet tych opakowań należą niska masa oraz elastyczność, co skutkuje łatwością tworzenia z nich dowolnych kształtów. Są także wytrzymałe, co zapobiega ich uszkodzeniom podczas transportu. Jak wykazano w raporcie rocznym *Plastics Europe, 2021/2022* opracowanym przez Fundację *Plastics Europe Polska*, choć produkcji opakowań z tworzyw polimerowych towarzyszy wprowadzanie do atmosfery

CO₂, to jednak korzyści dla otoczenia z mniejszego marnowania jedzenia są wielokrotnie większe (rys. 1).



Rys. 1. Emisja CO₂ z produkcji opakowań w porównaniu z zaoszczędzoną emisją wynikającą z ograniczenia strat żywności [118]

Obecnie w krajach rozwijających się aż do 50% zasobów żywnościowych marnuje się z powodu zbyt niskiej produkcji opakowań z tworzyw sztucznych, które przyczyniają się do przedłużenia trwałości przechowywanych w nich produktów [90, 118]. Zupełnie inaczej sytuacja wygląda w krajach rozwiniętych, gdzie poprzez przechowywanie produktów spożywczych w takich opakowaniach marnowanie żywności szacuje się na poziomie do 3%. Zatem ważną zaletą opakowań z tworzyw sztucznych jest ograniczenie strat żywności i emisji CO₂. Dodatkowo stosowanie opakowań z tworzyw sztucznych przyczynia się do zmniejszania ilości paliwa podczas transportu, bowiem ich masa stanowi zaledwie 3,5% całej masy danego produktu, podczas gdy opakowania z tradycyjnych tworzyw osiągają wagę nawet dziesięciokrotnie większą [46, 141, 145].

Unia Europejska jako priorytet przyjmuje dążenie do zrównoważonego rozwoju, który może zostać osiągnięty poprzez łączenie nieszkodliwości działań ludzkich z rozwojem gospodarczym. W wyniku analiz tworzyw sztucznych na potrzeby planów i długoterminowej strategii rozwoju, zauważono zagrożenie, które płynie z nadmiernej eksploatacji zasobów naturalnych, wzrastającej konsumpcji i braku poszanowania dla otaczającego świata [118]. Z uwagi na taki stan rzeczy w 2015 roku Komisja Unii Europejskiej wprowadziła w życie pierwsze plany działania na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym. Koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym odwołuje się do cyklu życia produktu, procesu produkcyjnego będącego w równowadze z naturą, minimalizacją odpadów procesowych i ostatecznie ponownego wykorzystania produktów [2, 73, 100]. Opracowana została przez praktyków i rozpowszechniona przez fundacje, takie jak np. Fundacja Ellen MacArthur oraz organizacje pozarządowe. Według Korhonen et al. [73] gospodarkę o obiegu zamkniętym można scharakteryzować jako system z maksymalizacją usług, które są wytwarzane z liniowego przepływu

materiałów w połączeniu natura – społeczeństwo – przyroda. Założeniem gospodarki o obiegu zamkniętym jest m.in. maksymalizacja wykorzystania energii pochodzącej z odnawialnych źródeł, a także zwiększenie efektywności wytwarzania np. przez kogenerację, czyli równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Korhonen podkreśla również możliwość wystąpienia zagrożenia, że zwiększenie obiegu zamkniętego w danym systemie może spowodować przenoszenie się obciążeń, a wraz z nimi niekorzystnych skutków oddziaływań na środowisko w innych miejscach [73].

Obowiązujące akty prawne wymuszają rozpowszechnienie idei zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym i wdrażanie ich przez firmy w strategiach rozwoju [155]. Czynniki dodatkowymi przemawiającymi za wprowadzaniem zmian są: rosnące zapotrzebowanie na opakowania z tworzyw sztucznych, większa świadomość konsumentów w zakresie produktów jednorazowych oraz możliwości ich ponownego przetworzenia [85, 92].

2.4. Rola opakowań

W literaturze dostępne są różne podejścia naukowców do poszczególnych funkcji opakowań. Ze względu na fakt, że funkcji nie da się uogólnić do wszystkich kategorii opakowań, warto postrzegać opakowanie zgodnie z definicją pochodzącą z dyrektywy 94/62/WE [94]. Definicja ta określa opakowanie jako wyrób, który jest przeznaczony do przechowywania, przewozu i ochrony danego produktu. Zgodnie z tą definicją określa się cztery główne funkcje opakowań [5, 79, 154]:

- ochrona,
- prezentacja,
- możliwość przewozu,
- przechowywanie.

Funkcja ochronna jest jedną z kluczowych funkcji opakowań. Ma na celu utrzymanie jakości danego produktu. Podczas transportu opakowania powinny uniemożliwić pogorszenie jakości ich zawartości [5]. Transport nie może wpłynąć negatywnie na zawartość opakowania, które chroni towar przed działaniem czynników zewnętrznych, takich jak wilgotność, zbyt wysoka lub zbyt niska temperatura czy światło. Ważną rolę w tym aspekcie pełnią opakowania transportowe, do których należy m.in. folia termokurczliwa. Opakowania tego typu powinny charakteryzować się dużą wytrzymałością podczas czynności manipulacyjnych i piętreniu [134, 12, 152].

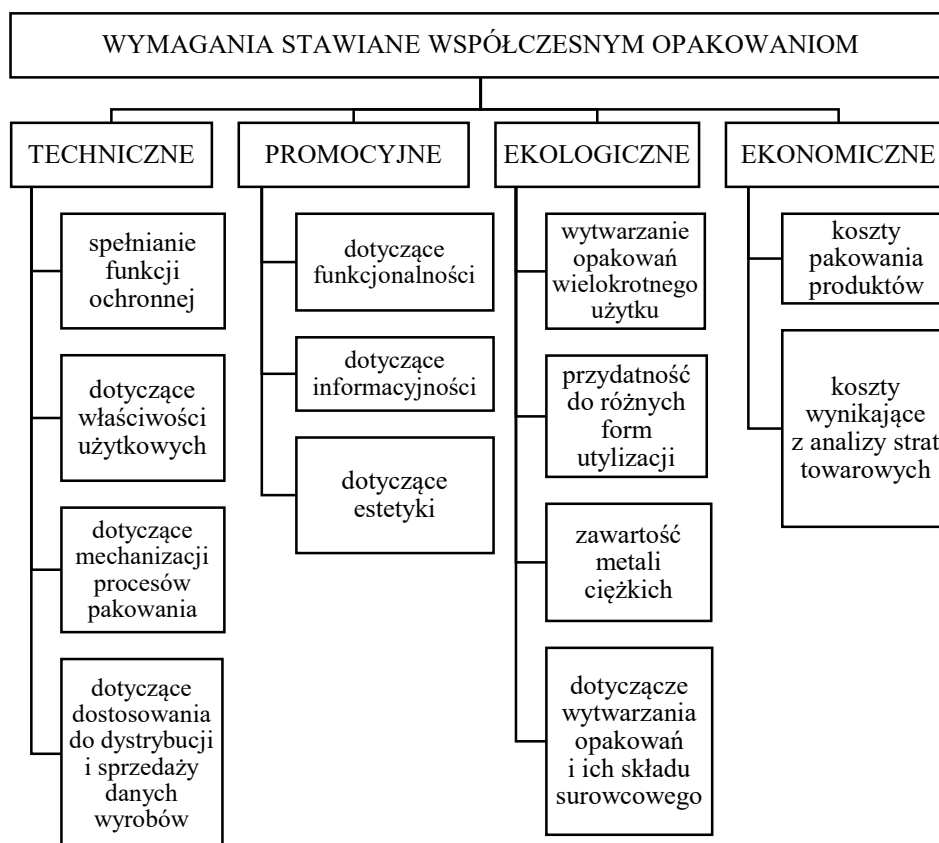
Wymagania techniczne stawiane opakowaniom w związku z realizowaną funkcją ochronną, a związane z minimalizacją wpływu czynników endogennych i egzogennych na dany produkt, zależą od jego stanu skupienia, kształtu, masy oraz od cech fizycznych i chemicznych. Wymienione cechy i właściwości określają:

- wrażliwość produktu na warunki atmosferyczne,

- podatność na piętrzenie,
- łatwopalność,
- szkodliwość na zdrowie ludzkie,
- możliwość negatywnego wpływu na wyroby będące w pobliżu danego produktu.

Im więcej powyższych cech występuje w danym produkcie, tym trudniejsze jest dobranie odpowiedniego opakowania spełniającego wszystkie wymagania techniczne [4, 9].

Na rysunku 2. wskazano podział wymagań stawianych przed współczesnymi opakowaniami, które powinny spełniać swoje funkcje w zakresie technicznym, promocyjnym, ekologicznym i ekonomicznym.



Rys. 2. Klasyfikacja funkcji opakowań [134]

Wymogi dotyczące ochrony zapakowanych produktów są zależne również od rodzaju transportu i warunków składowania. Przy wybieraniu odpowiedniego opakowania należy zwrócić uwagę na wysokość piętrenia w stosach, metody

stosowane przy przeładunku towaru, a także na jego rozmieszczenie w danym środku transportu [33, 142].

W pakowaniu produktów spożywczych duże znaczenie ma ich zabezpieczenie przed zanieczyszczeniem i skażeniem bakteryjnym [63]. Ważne, aby takie opakowania spełniały wszystkie wymagania higieniczno-sanitarne. Materiał wybrany do produkcji tego typu opakowań powinien chronić zawartość przed przedostaniem się do niej szkodliwych substancji, m.in. metali ciężkich, barwników, stabilizatorów, pozostałości niespolimeryzowanych monomerów czy zmiękczaczy [85].

Z uwagi na zwiększającą się mechanizację procesu pakowania pojawia się zapotrzebowanie na dobór opakowań pod względem kształtu i właściwości dostosowanych do zakresów pracy pakowarek oraz wielkości pakowanego przedmiotu. Zakres tych wymagań jest ściśle powiązany z faktem, czy opakowanie będzie formowane przed wypełnieniem go produktem, czy formowane na produkcie, np. przy owinięciach. Zapakowane produkty należy również przygotować do dalszej mechanicznej obróbki, a następnie do systemu dystrybucji i sprzedaży. Opakowania jednostkowe połączone dalej w zbiorcze muszą swoją postacią spełniać specyficzne wymogi, np. wymiarowe, określone indywidualnie na potrzeby procesu transportowego oraz sprzedaży [126, 152].

Wymagania promocyjne wywierają na opakowaniu posiadanie odpowiednich cech, które sprawiają, że dany produkt staje się bardziej atrakcyjny dla konsumentów. Na atrakcyjność wpływa wiele takich elementów, jak: kolorystyka opakowania, forma, grafika umieszczona na etykiecie, a także rodzaj użytego materiału podczas produkcji opakowania. Ważne jest zatem, aby opakowania miały ergonomiczny kształt, który ułatwia ich przenoszenie i chroni przed wyslizgnięciem się z ręki. Powinny posiadać łatwość otwierania, a zarazem możliwość ponownego szczelnego zamknięcia, najlepiej jakby te czynności mogły być wykonywane za pomocą jednej ręki [47]. Istotna jest również dodatkowa ochrona w postaci bezpiecznikowych zamknięć chroniących przed niepożądanym wyciekami substancji. Jest to szczególnie ważna cecha, która powinna być zastosowana w przypadku opakowań do substancji niebezpiecznych lub żrących [46, 80].

W momencie gdy liczba odpadów opakowaniowych osiąga obecnie wysoki poziom, coraz większego znaczenia nabiera ekologiczna funkcja opakowań [81, 87]. Działania związane z ekologiczną funkcją opakowań określane są przez koncepcję 4R – reduce, reuse, recycle, remover. Według założeń tej koncepcji należy zmniejszyć masę opakowania, używać tego samego opakowania kilkakrotnie, odzyskać surowiec opakowania oraz przetworzyć ponownie wykorzystane opakowanie [73, 145]. Z ekologicznego punktu widzenia, opakowania w cyklu życia powinny pochłaniać jak najmniejszą ilość surowca i energii, a także posiadać jak najmniejszą masę, co doprowadzi do oszczędności podczas transportu [121]. Opakowania powinny nadawać się do ponownego użycia lub podlegać recyklingowi, dlatego tak ważny jest dobór odpowiedniego surowca, gdyż to jego właściwości warunkują możliwość wykorzystania

poużytkowego odpadu jako surowca wtórnego. Wskazane jest wykonywanie opakowania z jednorodnego materiału, tak aby możliwy był recykling określonej procentowo jego masy i wykorzystanie do powtórnego wytworzenia wyrobu zgodnie z obowiązującymi normami prawnymi [134, 144].

Pod względem ekonomicznym opakowania powinny spełniać swoje funkcje przy jak najmniejszych kosztach przeznaczonych na pakowanie produktów oraz utrzymaniu wysokiej efektywności systemu pakowania przy uwzględnionych stratach towarowych, towarzyszących procesowi magazynowania i transportowania [124, 134]. Wpływa to na konieczność stałego analizowania kosztów procesu pakowania. Analizie podlega m.in. technologia pakowania, stopień automatyzacji procesu, ceny stosowanych opakowań czy warunki ich składowania [5, 72].

2.5. Folie termokurczliwe

Specyficznymi opakowaniami produktów są te wykonane z folii termokurczliwych. Po raz pierwszy folie termokurczliwe zaczęto wykorzystywać w Polsce w 1970 roku. Pochodziły one z importu. Po upływie dwóch lat zaczęto je produkować na rynku krajowym. Początkowo tworzywa te znalazły zastosowanie w hutach szkła, przemyśle chemicznym i meblarskim [11, 77]. Dopiero z upływem czasu nastąpił rozwój stosowania ich w przemyśle spożywczym, głównie w zakładach przetwórstwa owocowo-warzywnego i przemysłu rybnego. Proces termokurczliwego pakowania jest to termin, który dotyczy opisu metody obkurczania folii wokół pojedynczego artykułu lub ich grupy w celu uzyskania szczelnego opakowania produktów. Do przeprowadzenia takiej operacji stosuje się folie termokurczliwe, które posiadają zdolność kurczenia się pod wpływem działania ciepła [23, 66].

Do powstania zgrzewek, w ramach procesu masowego pakowania, stosuje się folie termoplastyczne, które posiadają właściwości kurczenia się pod wpływem działania odpowiedniej temperatury. Prawidłowe zapakowanie w folię termokurczliwą obejmuje dwa etapy. W pierwszym kroku owija się w folię, a następnie nagrzewa z zewnątrz, w wyniku czego folia obkurcza się, tworząc szczelne i gotowe do transportu opakowanie. W ostatnich latach zauważalna jest popularyzacja stosowania folii z dodatkiem recyklatów oraz folii biodegradowalnych, które mają na celu zmniejszenie negatywnego oddziaływania na otoczenie [22, 65, 90].

W celu uzyskania wiedzy na temat właściwości użytkowych folii termokurczliwych przeprowadzane są badania laboratoryjne, w których wyznacza się m.in. [17, 41]:

- grubość,
- kurczliwość,
- odporność na uderzenie,
- wytrzymałość na rozdieranie,
- wytrzymałość na rozciąganie.

Poprawnie przeprowadzone badania dają producentom folii informacje o tym, czy ich produkt może zostać wykorzystany na skalę przemysłową. W artykule autorstwa Panev [93] dokonano analizy porównawczej dostępnych na rynku folii. Wynika z niej, że termokurczliwe folie polietylenowe charakteryzują się niską przepuszczalnością pary wodnej, łatwo przepuszczają opary organiczne. Są odporne na roztwory kwaśne, zasadowe i solne oraz na niską temperaturę. Charakteryzują się niską odpornością na węglowodory i ich pochodne [93].

W dostępnej literaturze obecne są liczne rozważania dotyczące właściwości i poprawy charakterystyk użytkowych folii opakowaniowych. Pietrosanto et al. [102], w celu ograniczenia śladu węglowego, przeprowadzili badania właściwości funkcjonalnych w pełni biodegradowalnych folii do zastosowań w opakowaniach ekologicznych. Zbadali wpływ parametrów procesu wytłaczania z rozdmuchem na zachowanie folii. W badaniu podkreślono szczególną istotność składu mieszanki i wariantów rozciągania na charakterystyki folii. Autorzy wykazali, że kurczliwość folii wzrasta w kierunku maszynowym wraz z większą zawartością PLA w mieszance. Ilość PLA w mieszance folii wpływa również na większą przezroczystość i sztywność powstałych w procesie folii. Patel et al. [96] w swojej pracy porównali właściwości folii termokurczliwej o trzech zawartościach mieszanki polietylenu. Autorzy wykazali, że wzrost zawartości polietylenu o małej gęstości w składzie folii spowodował spadek energii przebicia folii oraz wytrzymałości wewnętrznej. Reddy et al. [119] przeprowadzali badania w zakresie wpływu różnych materiałów opakowaniowych z folii polifoliowej na jakość gruszki. Autorzy dowodzą, że obróbka opakowań foliowych z HDPE, LDPE, PP skutecznie utrzymuje i poprawia parametry jakościowe, takie jak np. cukier całkowity w zapakowanej produkcie. Pauer et al. [97] zbadali wpływ na środowisko i możliwość recyklingu folii stosowanych w pakowaniu bekonu. Autorzy uwzględnili opakowania z folii termokurczliwej (PE/dichlorek winylidenu (PVdC) oraz PA/EVOH/PE). Z badań wynika, że wpływ na środowisko zależy w dużej mierze od wagi opakowania i zawartości PA. Autorzy wskazują, że jeśli nawet nadająca się do recyklingu folia PE/EVOH zostanie poddana recyklingowi, jej wpływ na zmianę klimatu jest znacznie wyższy niż w przypadku produktu termokurczliwego zawierającego PVdC. He et al. [48] w swojej pracy przedstawili wpływ biodegradowalnych folii z mieszanki adypinianu polibutylenu (PBAT)/poli(kwasu mlekowego) (PLA) na jakość grzybów shiitake. Według autorów, oprócz składu gazu w opakowaniu foliowym, ważne jest również kontrolowanie poziomu przepuszczalności pary wodnej, co wpływa na uniknięcie kondensacji i spowolnienie degradacji pakowanych grzybów. Z badań wynika, że dzięki odpowiedniej wilgotności względnej wewnątrz folii PBAT/PLA, możliwe jest wydłużenie przydatności grzybów do spożycia o około 4–6 dni w porównaniu z grzybami pakowanymi w folię LDPE.

Z analizy literatury jasno wynika, że w dalszym ciągu niedostateczna jest ilość wiedzy w zakresie szkodliwości procesów pakowania produktów spożywczych, w szczególności butelek w folię termokurczliwą. Dostępne

opracowania nie wyczerpują i nie dostarczają szczegółowej wiedzy, wytycznych dla poprawy parametrów procesów przemysłowych masowego pakowania butelek.

Osiągnięcia rozprawy dostarczają zatem nowej wiedzy o procesie, jego charakterystykach użytkowych, podprocesach składowych wykazujących istotny wpływ na szkodliwość w systemie technicznym. Uzyskane w ten sposób wyniki i zalecenia stanowią podstawę do racjonalnego sterowania procesem pakowania oraz jego eksploatacyjnymi charakterystykami użytkowymi w celu zmniejszenia negatywnych (szkodliwych) oddziaływań. Biorąc pod uwagę skalę procesów pakowania i ogromną ilość pakowanych zgrzewek w ciągu np. jednej godziny, zalecenia odnośnie do poprawy procesu wdrożone w zakładach masowego pakowania znacząco przyczynią się do obniżenia skumulowanych oddziaływań w czasie (np. roku) w skali światowej.

3. Charakterystyka obiektu badań

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej dało wiele nowych możliwości rozwoju przemysłu spożywczego, będącego od lat jednym z najważniejszych sektorów krajowej gospodarki, ale również wymusiło funkcjonowanie polskiej gospodarki według europejskich standardów. Wśród tych zasad znalazły się między innymi zalecenia kontrolowania emisji szkodliwych gazów występujących podczas procesów technologicznych [69].

Efekt cieplarniany jest konsekwencją emisji do atmosfery nadmiernej ilości różnych związków, m.in. pary wodnej, metanu, dwutlenku węgla czy ozonu. Gazy te powstają ze źródeł naturalnych, ale są również konsekwencją działalności człowieka – towarzyszą one procesom produkcyjnym. W pięćdziesięciu procentach za efekt cieplarniany odpowiedzialny jest dwutlenek węgla, którego największe ilości emisji pochodzą z energii niezbędnej do przeprowadzenia procesów technologicznych, w tym również procesu masowego pakowania butelek [57, 67].

Przyjętym w rozprawie obiektem badań jest rzeczywisty, przemysłowy proces masowego, zbiorczego pakowania butelek. W rozprawie porównano procesy pakowania przeprowadzane na dwóch pakowarkach różniących się sposobem zasilania tunelu grzewczego, w którym folia obkurczana jest wokół pogrupowanych butelek. Pierwsza z nich to pakowarka SP A-M firmy KHS, w której tunel grzewczy zasilany jest gazem ziemnym. Tunel grzewczy drugiej pakowarki VEGA HT100 firmy OCME zasilany jest energią elektryczną pochodzącą z europejskiego miksu energetycznego (rys. 3). Obie porównywane maszyny stosowane do pakowania butelek w zgrzewki (pakiety) z folii termokurczliwej stanowią przemysłowe obiekty w zakładzie produkcyjnym napojów w województwie kujawsko-pomorskim.



Rys. 3. Linie technologiczne masowego pakowania butelek poddane analizie, A – pakowarka SP A-M, B – pakowarka VEGA HT100 (materiały własne)

Istotnym etapem w cyklu życia maszyny pakującej jest jej użytkowanie, ponieważ to w tym okresie spełnia ona szereg zadań, do których została zaprojektowana i wytworzona. Podczas użytkowania pakowarka narażona jest na oddziaływanie czynników wymuszających, do których należą:

- czynniki robocze, które oddziałują na pakowarkę w wyniku procesu masowego pakowania,
- czynniki zewnętrzne, które oddziałują bez względu na funkcjonowanie danej maszyny, przykładem są czynniki atmosferyczne,
- czynniki antropotechniczne, które są wywołane świadomą lub nieświadomą działalnością człowieka.

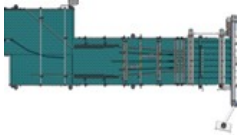


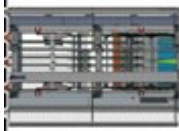
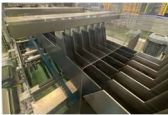

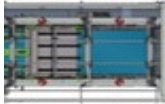


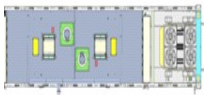


Pakowarki muszą być tak konstruowane i budowane, aby zapewniały bezpieczne miejsce pracy oraz spełniały szereg wytyczonych im zadań. Każdy z jej elementów musi zabezpieczać osoby obsługujące przed urazami, porażeniem prądem czy nadmiernym hałasem. W obu przedmiotowych pakowarkach występuje szereg elementów eksploatacyjnych, między innymi łańcuchy, drążki gwintowane, liniowe prowadnice przesuwu, koła zębate, łożyska, które podczas pracy maszyny mogą zostać z czasem uszkodzone, dlatego tak istotne jest ich sprawdzanie i reagowanie na ewentualne uszkodzenia [29]. Na powstanie ewentualnych uszkodzeń w pakowarkach mają wpływ warunki pracy poszczególnych jej elementów, które zależą od:

- rodzaju tarcia uwarunkowanego smarowaniem,
- prędkości rolek,
- temperatury otoczenia,
- błędów ludzkich.

Elementy konstrukcyjne pakowarki mogą pęknąć wskutek zmęczenia materiału. Często takie pęknięcia są niezauważalne, przez co zniszczenie danego elementu następuje niespodziewanie. Pęknięcia zmęczeniowe powstają najczęściej w miejscach gwałtownego wzrostu naprężeń, które powstają przez obecność karbów. W częściach eksploatacyjnych maszyn pęknięcia początkowo pojawiają się na powierzchni wierzchniej danego elementu, ale z czasem pęknięcie postępuje w głąb materiału. W przypadku braku szybkiego wykrycia przez użytkownika maszyn takiego stanu, dany przekrój zostaje dostatecznie osłabiony i w konsekwencji dochodzi do nagłego pęknięcia elementu [55, 56].

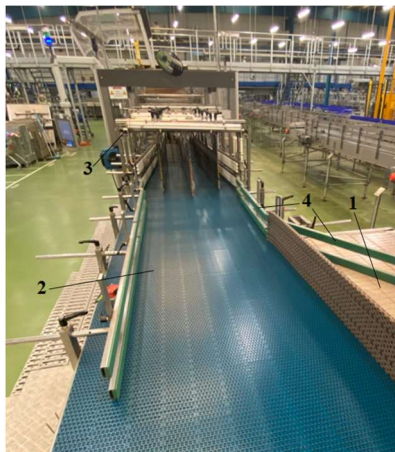
3.1. Pakowarka SP A-M z tunelem grzewczym zasilanym gazem ziemnym

Pakowarka SP A-M wyposażona jest w przenośniki podawania na wejściu oraz na wyjściu, które odpowiadają za przekazywanie towaru do owinięcia i automatycznego rozładowania produktu już opakowanego. W maszynie realizowany jest proces masowego pakowania butelek, który ma na celu zespolenie elementów jednostkowych (butelek z napojami) w zespolone zgrzewki poprzez owinięcie w folię, a następnie obkurczenie jej przy użyciu gorącego powietrza w piecu grzewczym [55]. Maszyna pakująca składa się z czterech modułów procesowych (rys. 4). Podczas pracy pakowarki butelki, a dalej zgrzewki, przechodzą przez moduły procesowe w następującej kolejności: moduł doprowadzający, moduł formatujący, moduł zawijający, moduł obkurczający.

Widok modułu z góry	Widok rzeczywisty modułu	Postać pakowanych produktów
moduł doprowadzający		
		
moduł formatujący		
		
moduł zawijający		
		
moduł obkurczający		
		

Rys. 4. Schemat pakowarki SP A-M z podziałem na moduły systemowe wraz z postacią pakowanych produktów na poszczególnych etapach pakowania (materiały własne)

Moduł procesowy doprowadzający produkt (rys. 5) przejmuje z linii rozlewającej napełnione butelki, rozdziela je na odpowiednio wybraną wcześniej liczbę rzędów, a następnie transportuje do modułu formatującego.



Rys. 5. Elementy modułu doprowadzającego: 1 – dozujący przenośnik taśmowy, 2 – doprowadzający przenośnik taśmowy, 3 – kontrola dźwigni, 4 – prowadnice szynowe (materiały własne)

W module doprowadzającym dozujący przenośnik taśmowy zamontowany jest równoległe do doprowadzającego przenośnika taśmowego. W zależności od stopnia wypełnienia modułu butelkami, w sposób automatyczny następuje ich transport do doprowadzającego przenośnika taśmowego, połączonego bezpośrednio z modułem formatującym. Aby zapobiec zakleszczaniu się butelek, zastosowano wibratory (rys. 6) umieszczone na prowadnicach szynowych. Drgania wywołane w tych elementach w efekcie ułatwiają przemieszczanie się grup butelek.



Rys. 6. Schemat modułu doprowadzającego z zaznaczonymi prowadnicami szynowymi – 1 oraz bazami wibratorów liniowych – 2 (materiały własne)

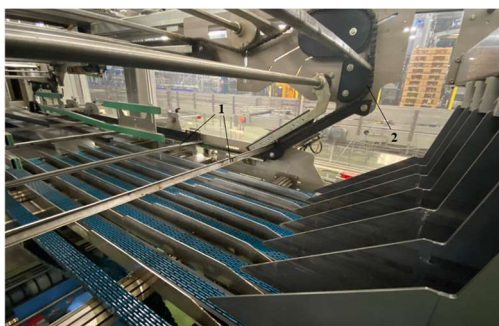
Podczas produkcji dźwignie wychylne zlokalizowane są na linii produkcyjnej, po której transportuje się butelki. W momencie przewrócenia się butelek, dźwignia wychylna przesuwa się w dół, w wyniku czego czujnik przekazuje do pulpitu sterowniczego sygnał o powstałym błędzie w procesie. W przypadku gdy dźwignie wychylne nie są potrzebne, możliwe jest ich unieruchomienie za pomocą taśmy gumowej lub dźwigni zaciskowej. Można również zmienić położenie dźwigni wychylnych za pomocą mechanizmu przestawiania wysokości dźwigni w sytuacji zmiany wysokości pakowanego produktu (rys. 7).



Rys. 7. Elementy modułu doprowadzającego: 1 – taśma gumowa, 2 – dźwignia wychylna, 3 – zespół przestawiania wysokości dźwigni (materiały własne)

W skład modułu formatującego wchodzi system rozdzielania, który odpowiada za podział dostarczanych produktów na grupy (zgodnie z określonym formatem zgrzewki) oraz górny łańcuch zabierakowy, transportujący ułożone butelki do kolejnego modułu.

System rozdzielania pakowanych produktów składa się z segmentów rozdzielających, które są zamocowane do łańcuchów rozdzielających (rys. 8). Podczas procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą segmenty rozdzielające zanurzają się od dołu w strumieniu butelek w celu podzielenia ich na grupy, co ułatwia połączenie pakowanych produktów w zgrzewki.



Rys. 8. System rozdzielania: 1 – segmenty rozdzielające, 2 – łańcuchy rozdzielające (materiały własne)

Następnie poprzez zatrzymanie i zwolnienie grup butelek segmenty rozdzielające dostarczają je do następnych etapów w formacji określonej przez rodzaj zgrzewki. W zależności od wybranego formatu zgrzewki, dla większych pojemności butelek, tj. powyżej 1,5 l, konieczne jest stosowanie bocznych podpór łańcuchów transportowych lub prowadnic szynowych, umieszczonych między łańcuchami transportowymi (rys. 9). W ten sposób poprawia się stabilność transportowanych butelek i zabezpiecza się je przed przesunięciem, mającym negatywny wpływ na końcową postać zapakowanych zgrzewek.



Rys. 9. Łańcuchy transportowe: 1 – przenośniki łańcuchowe, 2 – prowadnice szynowe między przenośnikami łańcuchowymi, 3 – boczne podpory przenośników łańcuchowych (materiały własne)

Sformatowane grupy produktów są transportowane za pomocą górnych zabieraków do następnego modułu procesowego. We wlocie łańcucha transportowego znajduje się dźwignia wychylna, która jest uruchamiana pneumatycznie i odpowiada za niezakleszczenie się produktów. W momencie gdy któryś z produktów przewróciłby się, dźwignia wychylna automatycznie odchylana jest do góry, po czym następuje aktywacja czujnika, który udostępnia na pulpicie sterowniczym komunikat o wystąpieniu błędu podczas procesu.

W kolejnym etapie grupy butelek trafiają do modułu zawijającego, gdzie następuje ich owinięcie w folię termokurczliwą przez drążki mechanizmu owijania. Płynne przejście pakowanych produktów przez moduł owijający umożliwia przenośnik taśmowy (rys. 10).



Rys. 10. Widok na moduł zawijający (materiały własne)

Jeśli w czasie procesu pakowania nastąpi koniec rolki folii, czujniki laserowe generują na pulpicie sterowniczym komunikat dający sygnał operatorowi maszyny o konieczności uzupełnienia materiału do pakowania. Nowa rolka zostaje połączona przez zgrzewanie z końcem zużytej na stanowisku ręcznego zgrzewania folii (rys. 11). Transportowane przez przenośnik taśmowy kawałki folii trafiają do mechanizmu owijania, gdzie układane są pod wprowadzonymi i ułożonymi grupami butelek. Następuje owinięcie butelek w folię termokurczliwą i przetransportowanie ich do modułu obkurczającego.



Rys. 11. Trzpienie do mocowania rolek folii: 1– czujniki laserowe do rozpoznawania końcówki folii (materiały własne)

W kolejnym etapie procesu owinięte w folię grupy produktów trafiają do modułu obkurczającego, gdzie transportowane są przenośnikiem taśmowym wykonanym z plecionki stalowej przez tunel obkurczania (rys. 12). Dedykowane wentylatory wdmuchują gorące powietrze (o temperaturze 190-215°C, w zależności od rodzaju folii termokurczliwej) do wnętrza tunelu i następuje obkurczenie folii wokół zgrupowanych butelek.



Rys. 12. Tunel obkurczania z przenośnikiem taśmowym z plecionki stalowej w jego wnętrzu (materiały własne)

W dalszej kolejności opakowane butelki przechodzą do układu chłodzenia (rys. 13) znajdującego się na wylocie tunelu i wyposażonego w wentylatory. Na tym etapie powstałe zgrzewki zostają schłodzone, a następnie obrócone i odprowadzone z maszyny za pomocą przenośnika taśmowego.

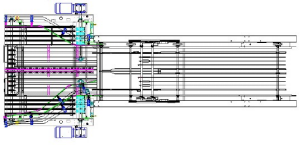


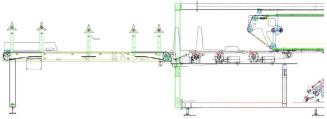
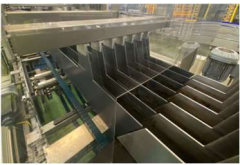

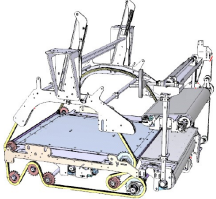


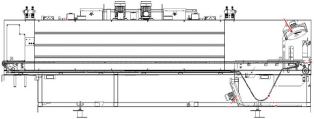




Rys. 13. Wentylatory na wyjściu z pieca grzewczego (materiały własne)

Po zakończonym procesie masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą, gotowe zgrzewki przenoszone są na palety, owijane folią typu stretch i transportowane do magazynu. Następnie trafiają do wyznaczonych wcześniej odbiorców.

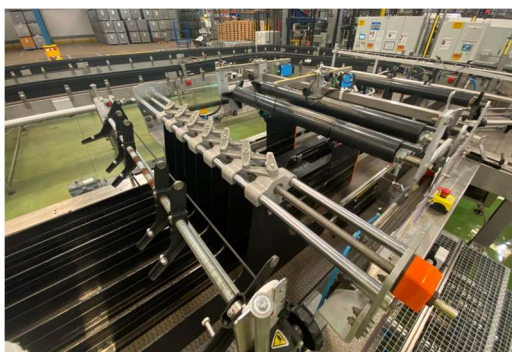
3.2. Pakowarka VEGA HT100 z tunelem grzewczym zasilanym energią elektryczną

Pakowarka VEGA HT100 jest maszyną przystosowaną do grupowania butelek w celu owinięcia ich folią termokurczliwą. Butelki są układane w kilku rzędach i przenoszone do strefy wybierania, gdzie następuje ich rozdzielanie na poszczególne formaty. W tym samym czasie folia w szpulach jest rozwijana i cięta na odcinki o wymiarach przystosowanych do danego formatu zgrzewki. Owinięte butelki wprowadzane są do pieca, gdzie pod wpływem gorącego powietrza następuje obkurczenie folii wokół produktów. Pakowarka (rys. 14) składa się z czterech głównych zespołów: modułu przenośnikowego i naprowadzającego butelki, modułu wybierania i oddzielania produktów, modułu owijania i modułu zgrzewania [56].

Schemat modułu	Widok rzeczywisty modułu	Postać pakowanych produktów
moduł przenośnikowy i naprowadzający butelki		
		
moduł wybierania i oddzielania produktów		
		
moduł owijania		
		
moduł zgrzewania		
		

Rys. 14. Schemat pakowarki VEGA HT100 z podziałem na moduły systemowe wraz z postacią pakowanych produktów na poszczególnych etapach pakowania (materiały własne)

W pierwszym etapie procesu masowego pakowania butelki odbierane są z linii produkcyjnej przez przenośnik boczny umiejscowiony na wejściu pakowarki (rys. 15). Produkty kolejno przesuwają się ze stałą prędkością do następnego etapu.

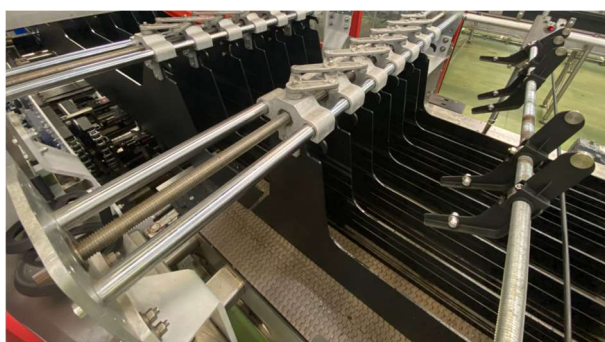


Rys. 15. Zespół przenośników do akumulacji i naprowadzania butelek (materiały własne)

W dalszej kolejności butelki na przenośniku formowania są dzielone na rzędy, zgodnie z formatem zgrzewki. Przenośniki podają butelki ze zmienną prędkością w zależności od trybu pracy:

- a) minimalna akumulacja – pakowarka rozpoczyna pracę z niską prędkością,
- b) kontrola przepływu – maszyna zaczyna pracować z wyższą prędkością, urządzenie to jest odpowiedzialne za regulację prędkości pakowarki opartą na przepływie butelek do zapakowania,
- c) maksymalna akumulacja – gdy maszyna jest zatrzymana, przenośnik na wejściu zatrzymuje się, w przypadku gdy maszyna jest w ruchu, przenośnik zmniejsza prędkość przepływu produktów.

W zespole wyboru i oddzielania produktów (rys. 16) butelki są selekcyjonowane zgodnie z wybranym formatem zgrzewki za pomocą dwóch zespołów kołków wyboru. Dalej za transport butelek odpowiedzialna jest taśma łańcuchowa, którą sprawdza się okresowo, tak aby grubość poszycia z tworzywa nie była niższa niż 10 mm, co mogłoby doprowadzić do jej uszkodzenia podczas pracy pakowarki. Zespół przeciwkołków na tym etapie procesu odpowiada za przenoszenie do popychacza butelek, dostosowując przy tym prędkość do zmiany skoku.



Rys. 16. Zespół wyboru i oddzielania produktów (materiały własne)

Kolejnym zespołem pakowarki jest popychacz środkowy (rys. 17), który składa się z linii łańcuchowej wraz ze zderzakami pozycjonującymi, będącymi w ciągłym ruchu. Zadaniem tego zespołu jest przetransportowanie butelek do strefy owijania. W zależności od ustawionego programu pracy oraz od przepływu produktu na wejściu do maszyny, prędkość obrotu popychacza jest odpowiednio regulowana.



Rys. 17. Zespół pakowarki odpowiedzialny za przetransportowanie butelek do strefy owijania (materiały własne)

W zespole podawania folii (rys. 18) występuje uchwyt do szpul składający się z dwóch sworzni podtrzymujących szpule z folią. Sworznie pełnią funkcje kontrolne nad ilością rozwijanej folii, tak aby zawsze była ona odpowiednio naprężona. Folia przechodzi przez eguter, który odpowiada za weryfikację poziomu hamowania sworznia podczas procesu. Do zespołu rozwijania folii należą:

- gumowe rolki odpowiedzialne za rozwijanie folii ze szpuli,
- ostrze i przeciwostrze obrotowe tnące folię na odcinki,
- zespół perforowanych taśm przenoszących odcinki folii do strefy nawijania,
- noże służące do oddzielenia folii w przypadku pakowania zgrzewki w dwóch lub trzech rzędach,
- rozwieracz stosowany do odsuwania folii w przypadku pakowania zgrzewki w dwóch lub trzech rzędach,
- zgrzewarka folii łącząca końcówkę zużytej rolki tworzywa z początkiem folii z nowej szpuli – cykl ten jest automatyczny, nie powoduje zatrzymania maszyny.



Rys. 18. Zespół podawania folii (materiały własne)

Istotnym elementem procesu eksploatacji analizowanej pakowarki jest właściwe napięcie pasa zespołu cięcia folii. W momencie gdy pas jest poluzowany, za pomocą ciągną możliwe jest jego ponowne napięcie w celu kontynuowania procesu pakowania.

W kolejnym kroku następuje owinięcie grupy butelek w folię termokurczliwą. Za ten etap odpowiada zespół zawijający (rys. 19), składający się z linii łańcuchowej ze zderzakami pozycjonującymi, przenośnika taśmowego, taśmy stabilizującej oraz przenośnika siatkowego.



Rys. 19. Moduł zawijający: 1 – linia łańcuchowa ze zderzakami pozycjonującymi, 2 – przenośnik taśmowy (materiały własne)

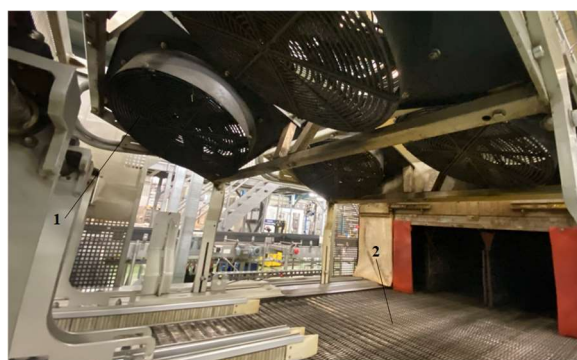
Linia łańcuchowa ze zderzakami pozycjonującymi owija folię wokół butelek, a taśma znajdująca się poniżej przenosi zapakowany produkt do pieca. Przenośnik siatkowy, który umieszczony jest na wejściu do pieca, charakteryzuje się taką samą prędkością liniową co przenośnik umieszczony wewnątrz pieca grzewczego. Aby uniknąć upadku butelek podczas przejścia do pieca, stosowana jest górna taśma stabilizująca, naprężana za pomocą jednakowych bocznych śrub regulujących.

Ostatnim elementem pakowarki, dokąd trafiają odpowiednio ułożone i owinięte w folię termokurczliwą butelki, jest piec (rys. 20), w którym następuje obkurczenie folii wokół produktów. Butelki przechodzą przez tunel na przenośniku siatkowym. Generatory ciepła w postaci grzałek elektrycznych ogrzewają powietrze przenoszone przez wentylatory w całej powierzchni tunelu, tak aby folia mogła zostać obkurczona równomiernie na pakowanych produktach.



Rys. 20. Widok wejścia do tunelu grzewczego: 1 – taśma siatkowa, 2 – tunel grzewczy (materiały własne)

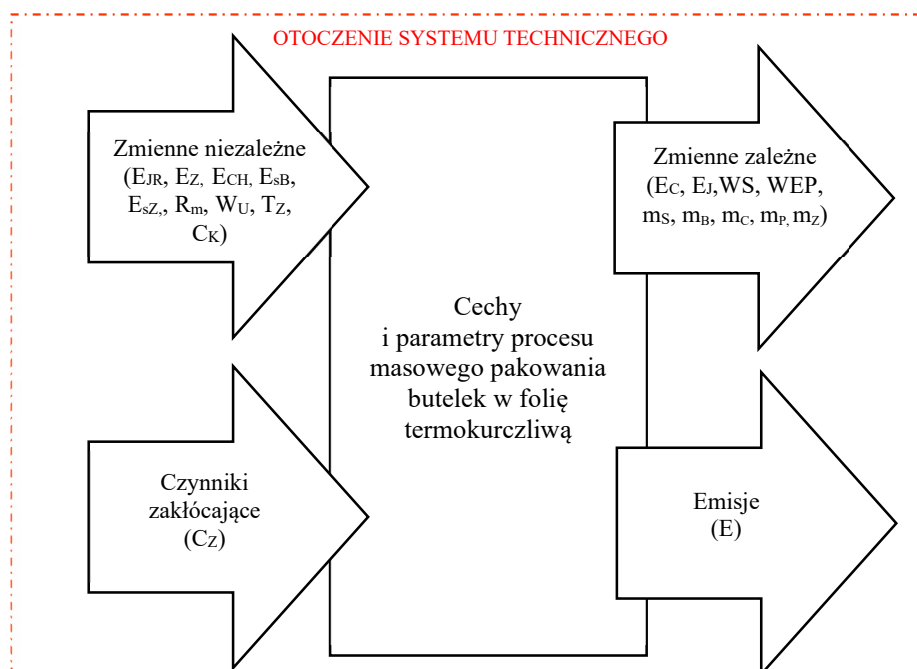
Powietrze po obkurczeniu folii powraca ponownie do generatorów ciepła, powtarzając ten sam cykl dla następnej grupy butelek. Na wyjściu z tunelu zamontowany jest system wentylacji (rys. 21), który odpowiada za schłodzenie i ostateczne dostosowanie folii do kształtu pakowanego produktu. Aby zaoszczędzić energię, istotne jest właściwe zarządzanie kurtynami umieszczonymi na wejściu i wyjściu z pieca. Całkowite zamknięcie kurtyn podczas postojów pakowarki lub częściowe zamknięcie w momencie przejścia produktów umożliwia ograniczenie strat na skutek migracji ciepła poza przestrzeń roboczą pakowarki.



Rys. 21. Widok wyjścia z tunelu grzewczego: 1 – wentylatory, 2 – przenośnik siatkowy na wyjściu pieca (materiały własne)

4. Metody badań

Na szkodliwość w systemie technicznym podczas procesu masowego pakowania termokurczliwego ma wpływ wiele czynników – istotne są cechy zmienne, tj. właściwości użytkowe folii termokurczliwej, odpowiedni dobór parametrów pracy oraz stan techniczny maszyn. Określenie stałych i zmiennych procesu wpływa na możliwość wyznaczenia modeli matematycznych opisujących zależności zmiennych, będących swego rodzaju wskaźnikami, kryteriami oraz funkcjami mającymi na celu regulację procesu pakowania butelek w folię termokurczliwą. Schemat relacji zmiennych zależnych i niezależnych przedmiotowego procesu przedstawia rysunek 22.



Rys. 22. Zmienne zależne i niezależne wraz z ich wzajemnymi relacjami w procesie masowego pakowania butelek: E_{JR} – energia brutto zużyta w ramach pracy jednostek roboczych na produkcji produktów użytecznych, E_Z – energia brutto zużyta na zgrzewanie produktów użytecznych, E_{CH} – energia brutto zużyta na chłodzenie powstałych produktów użytecznych, E_{sB} – energia brutto tracona na braki, E_{sZ} – energia brutto tracona na ujawniające się w procesie zanieczyszczenia, R_m – właściwości wytrzymałościowe folii, W_U – właściwości użytkowe folii, T_Z – temperatura zgrzewania folii, C_K – cechy konstrukcyjne pakowarek, m_Z – masa wyemitowanych zanieczyszczeń w postaci gazów podczas procesu, m_B – masa powstałych w procesie braków w postaci nienadających się do użycia zgrzewek, m_C – suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania, m_P – masa produktów użytecznych, m_S – masa powstałych szkodliwości, E_C – wskaźnik całkowitego zużycia energii, E_J – wskaźnik energii jednostkowej, WS – procentowy wskaźnik szkodliwości badanego procesu, WEP – procentowy wskaźnik efektywności procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)

W procesach pakowania butelek w folię termokurczliwą tworzenie modeli oraz kryteriów oceny energetyczno-środowiskowej i efektywnościowej ma sens, w przypadku gdy możliwe jest zidentyfikowanie jego zmiennych składowych. W przedstawionym modelu (

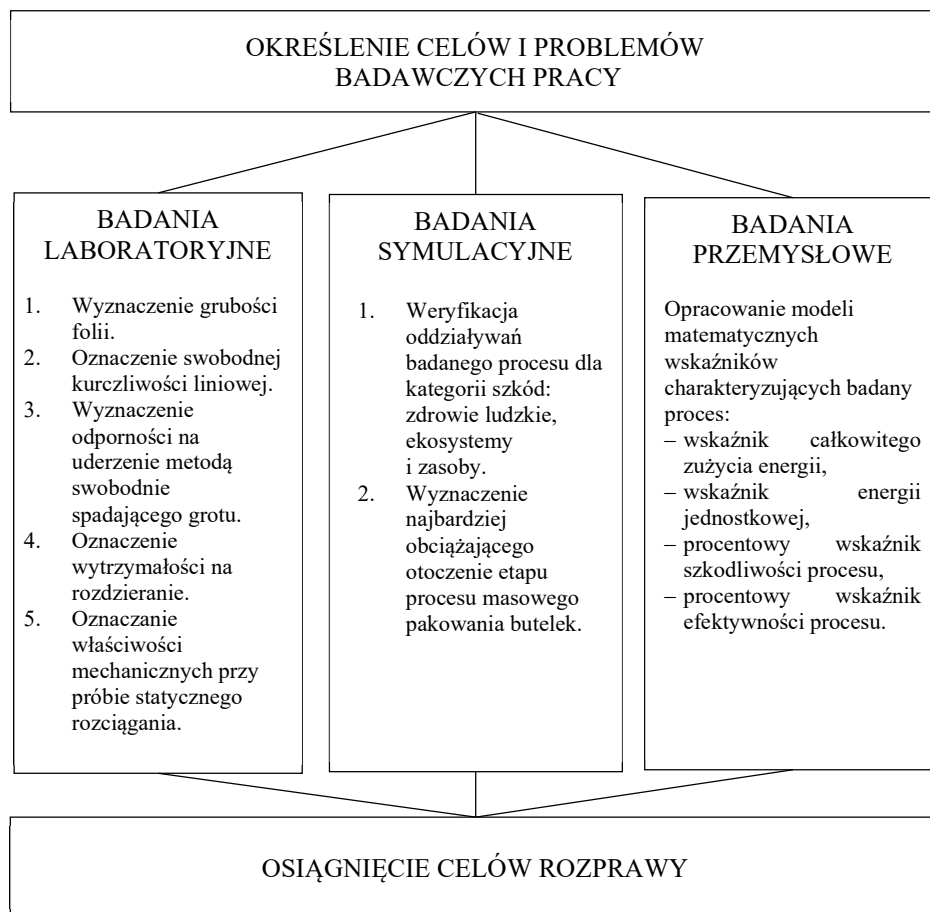
rys. 22) określono zmienne wejściowe (kontrolowane) np. ilość zużytej energii elektrycznej oraz zmienne wyjściowe stanowiące wskaźniki oceny procesu masowego pakowania butelek. W procesie masowego pakowania model energetyczno-środowiskowy można przedstawić jako funkcję zbioru charakterystyk powiązanych ze sobą:

$$M_{E\dot{S}} = f(T_Z, E_{JR}, E_Z, E_{CH}, E_{sB}, E_{sZ}, R_m, W_U, C_K, m_Z, m_B, m_P, m_S, m_C, E_C, E_J, WS, WEP)$$

gdzie:

- T_Z – temperatura zgrzewania folii,
- E_{JR} – energia brutto zużyta w ramach pracy jednostek roboczych podczas produkcji produktów użytecznych,
- E_Z – energia brutto zużyta na zgrzewanie produktów użytecznych,
- E_{CH} – energia brutto zużyta na chłodzenie powstałych produktów użytecznych,
- E_{sB} – energia brutto tracona na braki,
- E_{sZ} – energia brutto tracona na ujawniające się w procesie zanieczyszczenia,
- R_m – właściwości wytrzymałościowe folii termokurczliwych,
- W_U – właściwości użytkowe folii termokurczliwych np. kurczliwość, odporność na uderzenie,
- C_K – cechy konstrukcyjne pakowarek,
- m_Z – masa wyemitowanych zanieczyszczeń w postaci gazów podczas procesu,
- m_B – masa powstałych w procesie braków w postaci nienadających się do użycia zgrzewek,
- m_P – masa powstałych produktów użytecznych,
- m_S – masa powstałych szkodliwości,
- m_C – suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania,
- E_C – wskaźnik całkowitego zużycia energii,
- E_J – wskaźnik energii jednostkowej,
- WS – procentowy wskaźnik szkodliwości badanego procesu,
- WEP – procentowy wskaźnik efektywności procesu masowego pakowania butelek.

Mając na uwadze cele pracy oraz stwierdzenia ze stanu wiedzy i praktyki o szczególnym znaczeniu oddziaływań środowiskowych procesów przemysłowych, badania szkodliwości w niniejszej rozprawie obejmowały głównie szkodliwość w aspekcie generowania odpadów, zużycia energii, emisji szkodliwych substancji do otoczenia oraz długoterminowych i krótkoterminowych szkód procesu w cyklu życia w odniesieniu do zdrowia ludzkiego, jakości ekosystemów oraz zubożenia zasobów. Badania szkodliwości podzielono na trzy etapy: badania laboratoryjne, badania symulacyjne oraz badania przemysłowe (rys. 23).



Rys. 23. Schemat badań realizowanych w rozprawie (opracowanie własne)

Badania laboratoryjne obejmowały analizę właściwości użytkowych folii o różnym udziale tworzywa pochodzącego z recyklingu w kontekście ich przydatności w procesach pakowania. Właściwości użytkowe folii mają kluczowe znaczenie dla szkodliwości procesu w odniesieniu do zużycia energii, emisji szkodliwych substancji i odpadów. Te właściwości tworzyw w dużej mierze będą odpowiadać za właściwości użytkowe folii i ewentualne powstawanie braków podczas produkcji, a w konsekwencji generowania odpadów i zużycia energii do wytworzenia produktów nieużytecznych.

Badania symulacyjne obejmowały analizę cyklu życia procesu masowego pakowania butelek z podziałem na poszczególne etapy produkcyjne wytwarzania gotowych zgrzewek. Analizę przeprowadzono dla czterech wariantów procesu różniących się sposobem zasilania etapu zgrzewania folii oraz rodzajem folii termokurczliwej. W ramach pracy wyznaczono, jak zmiana źródła zasilania pieca grzewczego i folii na materiał z dodatkiem recyklatów wpływa na wielkości

oddziaływań przedmiotowego procesu pakowania oraz w jaki sposób przyczynia się to do zmian w emisji gazów cieplarnianych. Wskazano, który z etapów procesu masowego pakowania wywiera największy potencjalny wpływ na otoczenie systemu technicznego. Zgodnie z założeniami zrównoważonego rozwoju dla technologii konieczne jest zmniejszanie wpływów środowiskowych, dlatego oszacowano wpływ procesu na otoczenie w trzech obszarach: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemów oraz zużycie zasobów. Wyznaczono również emisję gazów cieplarnianych w postaci ekwiwalentu CO₂ (tzw. ślad węglowy). Ocena emisji CO₂ w odniesieniu do eksploatacji maszyn wchodzących w skład przemysłowej linii produkcyjnej jest istotna choćby z punktu widzenia ekorozwoju, ponieważ przedsiębiorstwa są zobowiązane do uiszczania opłat za emisję CO₂.

Badania przemysłowe obejmowały uporządkowanie danych o zużyciu materiałów, surowców, energii, emitowanych odpadach oraz powstałych zgrzewkach w procesie masowego pakowania butelek, opracowanie wskaźników oceny procesu w aspekcie jego szkodliwości, a także ocenę czterech wariantów procesu różniących się rodzajem stosowanych folii oraz sposobem zasilania pieca grzewczego. Szkodliwość oceniono po pierwsze, w aspekcie zużycia energii całkowitej i zużycia energii na jednostkę masy wyprodukowanych zgrzewek za pomocą wskaźników całkowitego zużycia energii i energii jednostkowej, ponieważ minimalizowanie zużycia energii jest jednym z kluczowych celów planowanej przez Unię Europejską nowej dyrektywy w sprawie efektywności energetycznej (COM/2021/558final), zakładającej zbiorowe zmniejszenie zużycia energii o co najmniej 11,7% do 2030 roku. Aby osiągnąć ten cel, każde państwo członkowskie powinno zacząć od 1,3% oszczędności zużycia energii rocznie do końca 2025 roku, dążąc do osiągnięcia poziomu 1,9% oszczędności w latach 2026–2030. Dyrektywa będzie wymagała od członków unijnych zatwierdzenia oraz ustalenia krajowych strategii i środków, które będą kontrolowane w zakresie zużycia energii końcowej i pierwotnej [149, 151]. Po drugie, szkodliwość oceniono w aspekcie efektywności wykorzystania zasobów i produkcji odpadów za pomocą opracowanych wskaźników, czyli:

- procentowego wskaźnika szkodliwości procesu, który pozwala na weryfikację najbardziej szkodliwego wariantu procesu masowego pakowania butelek,
- procentowego wskaźnika efektywności procesu, który wskazuje, w jaki sposób rodzaj zasilania oraz zawartość recyklatów w folii termokurczliwej wpływa na efektywność procesu pakowania butelek.

4.1. Metody badań laboratoryjnych

W celu wyznaczenia właściwości użytkowych badanych folii w ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono następujące badania:

- a) wyznaczenie grubości folii – 20 punktów pomiarowych na każdej z badanych rodzajów folii [105],

- b) oznaczenie swobodnej kurczliwości liniowej – 5 prób dla każdego rodzaju folii w kierunku poprzecznym i maszynowym [88],
- c) wyznaczenie odporności na uderzenie metodą swobodnie spadającego grotu – 20 prób dla każdego rodzaju folii [106],
- d) oznaczenie wytrzymałości na rozdzieranie – 10 prób dla każdego rodzaju folii w kierunku poprzecznym i maszynowym [107],
- e) oznaczanie właściwości mechanicznych przy próbie statycznego rozciągania – 10 prób dla każdego rodzaju folii w kierunku poprzecznym i maszynowym [99, 100].

Wszystkie próbki do przeprowadzenia wymienionych wyżej badań przygotowano i przechowywano zgodnie z warunkami opisanymi w normach. Kierunek maszynowy (KM) inaczej wzdłużny próbki, rozumie się jako kierunek folii zgodny z kierunkiem jej wytłaczania z rozdmuchem (główną osią anizotropii). Za kierunek poprzeczny (KP) przyjęto kierunek prostopadły do kierunku maszynowego osi anizotropii [17].

4.1.1. Wyznaczenie grubości folii

Grubość próbek folii zmierzono przy użyciu mikrometru elektronicznego Wilson Wolpert 200-01 DDL (rys. 24) według normy PN ISO 4593:1999 [105]. Umożliwiał on pomiar w zakresie 0÷25 mm z dokładnością 0,001 mm. Szerokość folii określono za pomocą liniału z dokładnością do 1 mm. Pomiary grubości folii wykonano zgodnie z normą w dwudziestu punktach. Przeprowadzono cztery pomiary na różnych wysokościach od zaznaczonego na folii punktu. Pomiary przeprowadzono analogicznie dla każdego z sześciu badanych rodzajów tworzywa [104].



Rys. 24. Punkty pomiaru grubości folii (materiały własne)

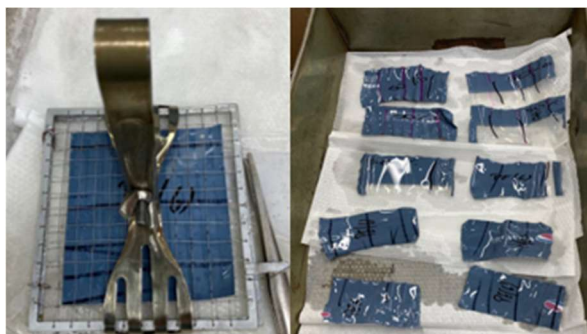
4.1.2. Badanie swobodnej kurczliwości liniowej

Badanie swobodnej kurczliwości liniowej polegało na oznaczeniu zmian, które zachodzą w materiale z tworzywa sztucznego pod wpływem działania temperatury. Metodę tę stosuje się do oceny przydatności danej folii termokurczliwej z różnych tworzyw sztucznych do powstania opakowań. Badania zostały przeprowadzone zgodnie z normą ASTM D2732, standardowej metody badania nieograniczonego, liniowego skurczu termicznego folii z tworzyw sztucznych za pomocą maszyny Memmert z misą wraz z olejem silikonowym (rys. 25).



Rys. 25. Maszyna Memmert z misą wraz z olejem silikonowym (materiały własne)

W celu przeprowadzenia badania przygotowano próbki o wymiarach 100x100 mm, zaznaczając na nich kierunek maszynowy. Umieszczone w specjalnym uchwycie próbki (rys. 26) zanurzano kolejno na 10 sekund w oleju silikonowym o temperaturze 140°C. Ważne było, aby nie trzymać próbek nad misą olejową przed zanurzeniem, z uwagi na możliwość wystąpienia przedwczesnego skurczu lub wyżarzenia folii. Po upływie 10 sekund próbki wyciągano i odkładano na tacy do ostygnięcia i odsączenia z nadmiaru oleju. Po przeprowadzonym badaniu zmierzono i zapisano wymiary liniowe próbek [88].



Rys. 26. Przykładowe próbki przed i po przeprowadzonym badaniu swobodnej kurczliwości (materiały własne)

4.1.3. Badanie odporności na uderzenie metodą swobodnie spadającego grotu

W celu wyznaczenia odporności folii na uderzenie metodą spadającego grotu przeprowadzony został test odporności na uderzenie zgodnie z normą PN-EN 14477:2005 [106]. Podczas badania próbki folii o wymiarach 200x210 mm umieszczano w głowicy obustronnie zaciskającej (rys. 27), następnie za pomocą dźwigni odblokowywano odważnik w postaci grotu, który z wysokości 660 mm spadał na badaną próbkę. W zależności od wyniku, w każdej kolejnej próbie masa grotu była odpowiednio zwiększana lub zmniejszana o 5 g. Wynikiem przeprowadzonego testu jest masa grotu, dla której 50% poddanych testowi próbek w serii ulega zniszczeniu [57, 66, 106].



Rys. 27. Przyrząd do przeprowadzenia badania odporności próbek folii na uderzenie za pomocą spadającego grotu (materiały własne)

Dla próbek folii 0rLPDE/100LDPE color, 50rLPDE/50LDPE color oraz 100rLDPE/0LDPE color niemożliwe było wycięcie próbek o wymaganych do badań wymiarach ze względu na wykonane przez producenta nacięcia w folii ułatwiające oderwanie pary butelek od całej zgrzewki (rys. 28).



Rys. 28. Przykład nacięć na folii wykonanych przez producenta uniemożliwiających wycięcie próbek do badań (materiały własne)

W celu scharakteryzowania odporności folii na uderzenie za pomocą metody spadającego grotu wyznaczono średnią masę powodującą uszkodzenie wyrażoną w gramach, odchylenie standardowe oraz siłę uderzenia w niutonach.

4.1.4. Oznaczenie wytrzymałości na rozdieranie metodą Elmendorfa

W celu wyznaczenia siły potrzebnej do rozdierania próbek z cienkiej folii na ustalonej długości od nacięcia w określonych warunkach obciążenia (1600 g) przeprowadzono badanie metodą Elmendorfa zgodnie z normą PN-EN ISO 6383-2:2005, używając do tego maszyny Pro Tear Tearing Tester, Twing-Albert Instrument Co [107]. Próbki do badań wycięto w kierunku maszynowym i poprzecznym zgodnie z szablonem o stałym promieniu z nacięciem o długości 20 mm (rys. 29).



Rys. 29. Przykładowa próbka przed i po wykonaniu oznaczenia wytrzymałości na rozdieranie (materiały własne)

Próbki folii poddano działaniom siły rozdierającej, która została wywołana energią zmagazynowaną w wahadle o masie 1600 g. Badanie przeprowadzono na maszynie Pro Tear Tearing Tester, Twing-Albert Instrument Co (rys. 30) w temperaturze pokojowej. Siłę potrzebną do rozdarcia poszczególnych rodzajów badanych folii odczytano w niutonach [58, 91, 107].



Rys. 30. Maszyna Pro Tear Tearing Tester, Twing-Albert Instrument Co podczas przeprowadzania badania wytrzymałości na rozdieranie (materiały własne)

4.1.5. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu

Podstawowym źródłem informacji o mechanicznych właściwościach tworzyw sztucznych jest statyczna próba rozciągania. Polega ona na osiowym rozciąganiu w uchwytach próbek materiału o ściśle określonych, znormalizowanych kształtach [17]. W przypadku łatwo odkształcalnych tworzyw moduł Younga ma znaczenie teoretyczne. Rzeczywiste naprężenia odpowiadające odkształceniom mogącym pojawić się podczas eksploatacji znacznie odbiegają od tych, których można by spodziewać się na podstawie modułu sprężystości. Charakteryzując właściwości użytkowe tworzyw polimerowych, często nie podaje się modułu sprężystości, natomiast w to miejsce wyznacza się naprężenia odpowiadające poszczególnym wartościom wydłużenia względnego. Dlatego w przeprowadzonych badaniach wyznaczono wydłużenie względne przy granicy plastyczności, maksymalnym naprężeniu i przy zerwaniu analizowanych folii [31, 123].

W celu wyznaczenia właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu przeprowadzono badania według normy PN-EN ISO 527-1:2020 [113] oraz PN-EN ISO 527-3:2019-01 [112]. W pierwszym kroku wycięto próbki folii o szerokości 15 mm w kierunku maszynowym i poprzecznym. Badania przeprowadzono na maszynie TIRA Test 27025 na kształtkach z każdego rodzaju folii (rys. 31), przyjmując prędkość posuwu 100 mm/min oraz długość odcinka pomiarowego $L_0 = 50$ mm [112, 113].



Rys. 31. Przykładowa próbka folii: A – przed, B – w trakcie, C – po próbie rozciągania (materiały własne)

Powstałe wyniki opisano za pomocą średnich arytmetycznych, odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności.

W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono również analizę statystyczną, wykorzystując do tego jedno- oraz dwuczynnikowy test analizy ANOVA (poziom istotności $p < 0,05$), który pozwala na sprawdzenie występowania istotnych statystycznie różnic w badanych właściwościach, uwzględniając skład procentowy recyklatów oraz grubość badanej folii. Jako test post-hoc wykorzystano test Tukeya.

4.2. Metody badań symulacyjnych

Celem badań symulacyjnych było identyfikacja szkodliwości oddziaływań procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą; identyfikacja etapów i parametrów procesu o największej szkodliwości na otoczenie systemu technicznego; zaproponowanie wytycznych dla poprawy wskaźników szkodliwości i rozwoju systemów masowego pakowania. Badania symulacyjne zrealizowano dla czterech wariantów procesu masowego pakowania:

- a. wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki SP A-M (P_1) w roku 2021, w którym wykorzystano folię 0rLDPE/100LDPE (F_{0r}) oraz folię 50rLDPE/50LDPE (F_{50r}), etap zgrzewania folii zasilany był gazem ziemnym (E_{GZ}), natomiast reszta etapów energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego (E_{Emix}),
- b. wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki VEGA HT100 (P_2) w roku 2021, w którym wykorzystano folię 0rLDPE/100LDPE (F_{0r}) oraz folię 50rLDPE/50LDPE (F_{50r}), etap zgrzewania folii, tak jak cały proces, był całkowicie zasilany energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego (E_{Emix}),
- c. wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki SP A-M (P_1) w roku 2022, w którym wykorzystano folię 50rLDPE/50LDPE (F_{50r}), etap zgrzewania folii zasilany był gazem, natomiast reszta etapów energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego (E_{Emix}),
- d. wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix}) – dane pochodzące z pracy pakowarki VEGA HT100 (P_2) w roku 2022, w którym wykorzystano folię 50rLDPE/50LDPE (F_{50r}), etap zgrzewania folii, tak jak cały proces, był całkowicie zasilany energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego (E_{Emix}).

W badaniach symulacyjnych zastosowano metodę analizy cyklu życia (LCA), którą wykorzystuje się do określenia wpływu na otoczenie systemowe procesów, np. w ustalonych granicach, tj. „od wejścia do wyjścia tej samej organizacji” [111]. W ramach badań posłużono się metodą ReCiPe 2016, w której istnieją dwa główne sposoby uzyskiwania charakterystyki, tj. na poziomie punktu środkowego i na poziomie punktu końcowego. Dla procesu masowego pakowania butelek w czterech wariantach wyznaczono (zgodnie z tabelą 1):

- 18 wskaźników punktu środkowego (kategorii wpływów),






- 3 wskaźniki punktu końcowego (kategorii szkód).

Przeprowadzono ponadto porównanie teoretyczne, jak zmieniłyby się wartości szkodliwych oddziaływań, gdyby energia zasilająca maszyny pochodziła z wiatru. Dodatkowo, za pomocą metody IPCC 2021 dla każdego z wariantów procesu pakowania wyznaczony został ślad węglowy wyrażony jako ekwiwalent CO₂ [49, 52, 109].

Analizę cyklu życia procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN ISO 14040:2009 oraz PN-EN ISO 14044:2009 [110, 113]. Wykonano podstawowe elementy analizy, do której należą: określenie celu i zakresu badań, analiza zbioru wejść i wyjść, ocena oddziaływań w cyklu życia oraz interpretacja wyników.

Cel i zakres badań

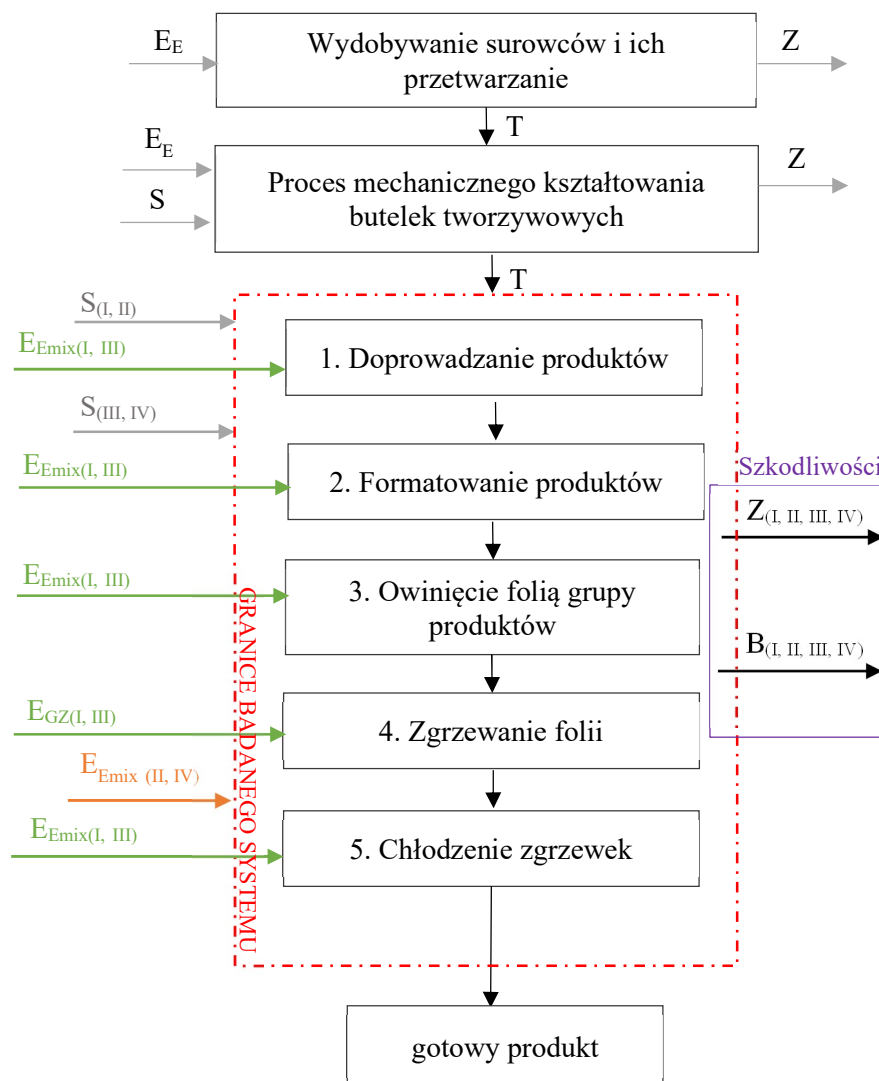
W pierwszym kroku LCA określany jest cel oraz zakres prowadzonej analizy. Należy ustalić zamierzone zastosowanie uzyskanych z badań wyników i uzasadnić ten wybór. Ważne, aby określić, czy prowadzona analiza ma charakter porównawczy. W takim przypadku systemy powinny być porównywane przy wykorzystaniu takiej samej jednostki funkcjonalnej, jednakowych właściwościach użytkowych, granicach systemu, jakości danych oraz przy tych samych regułach decyzyjnych dotyczących oceny wejść i wyjść [61, 82]. Mając na uwadze określony cel rozprawy oraz sformułowany cel badań symulacyjnych w analizie LCA, porównano oddziaływania przedmiotowego procesu masowego pakowania w czterech różnych wariantach, które różniły się rodzajem zastosowanej pakowarki i folii termokurczliwych oraz źródłem energii do zasilania pieca grzewczego na etapie zgrzewania folii. Z uwagi na fakt, że jest to badanie porównawcze, na początku zapewniono równowagę badanych procesów. Polegało to na przyjęciu do porównania takiej samej jednostki funkcjonalnej, granic systemu, jakości danych, reguł decyzyjnych dotyczących wejść i wyjść, dzięki czemu możliwe było zidentyfikowanie najbardziej obciążającego otoczenie czynnika procesu masowego pakowania oraz podanie wskazań do dalszego jego rozwoju. Na podstawie zebranych danych z realizowanych w przedsiębiorstwie procesów masowego pakowania, ustalono jednostkę funkcjonalną, za którą przyjęto 1000 zgrzewek wyprodukowanych przez daną pakowarkę. Granice przyjętego systemu obejmują etapy procesu, takie jak: doprowadzenie produktów, formatowanie produktów, owinięcie folią grupy butelek, zgrzewanie folii oraz chłodzenie zgrzewek (rys. 32). W badaniach wykluczono etapy pozyskiwania, magazynowania, transportu surowca oraz użytkowe zagospodarowanie zgrzewek.

ETAPY PROCESU PAKOWANIA BUTELEK W FOLIĘ TERMOKURCZLIWĄ	
1. Doprowadzenie produktów	
2. Formatowanie produktów	
3. Owiniecie folią grupy butelek	
4. Zgrzewanie folii	
5. Chłodzenie zgrzewek	

Rys. 32. Etapy wchodzące w skład granic rozpatrywanego procesu pakowania butelek (opracowanie własne)

Analiza zbioru wejść i wyjść (LCI)

Drugi etap LCA polegał na zgromadzeniu i analizie zbioru wejść (np. materiały, media) i wyjść (np. odpady). Dane zebrano dla każdego etapu jednostkowego wchodzącego w granice badanego systemu, zgodnie ze schematem modelowym granic systemu (rys. 33). Istotnym elementem na tym etapie analizy było przyporządkowanie odpowiednich strumieni wejść i wyjść procesu jednostkowego do badanego systemu [15, 40, 83].



Rys. 33. Schemat przedmiotowego procesu masowego pakowania butelek z uwzględnieniem danych wejściowych i wyjściowych: E_E – energia elektryczna, S – surowce, Z – zanieczyszczenia, T – transport, $S_{(I, II)}$ – surowce będące danymi wejściowymi w I i II wariancie procesu, $S_{(III, IV)}$ – surowce będące danymi wejściowymi w III i IV wariancie procesu, $E_{Emix(I, III)}$ – energia elektryczna w I i III wariancie procesu, $E_{Emix(II, IV)}$ – energia elektryczna w II i IV wariancie procesu, $E_{GZ(I, III)}$ – gaz zasilający etap zgrzewania folii w I i III wariancie procesu, $Z_{(I, II, III, IV)}$ – zanieczyszczenia w postaci emisji gazów cieplarnianych (CO_2 , SF_6 , CH_4 , N_2O), $B_{(I, II, III, IV)}$ – odpady w postaci nieużytecznych zgrzewek (opracowanie własne)

Do przeprowadzenia analizy przyjęto dane rzeczywiste o ilości surowców i energii wykorzystywanych w badanym procesie. Dane pochodzą z pomiarów wykonanych w latach 2021 i 2022 w zakładzie przemysłowym, który zajmuje się m.in. pakowaniem butelek w folię termokurczliwą na terenie województwa kujawsko-pomorskiego. Znając roczną produkcję zgrzewek, zużycie energii oraz surowców, przygotowano tabele inwentarzowe (tab. 3 i 3) dla przyjętej jednostki funkcjonalnej w postaci 1000 zgrzewek. Na podstawie informacji z pracy pakowarek w roku 2021 i 2022 ustalono, że w przedmiotowym procesie pakowania występujące w postaci nienadających się do transportu zgrzewek – braki – stanowią ok. 1% całej rocznej produkcji.

Z danych z roku 2021 (tab. 3) wynika, że pakowarka SP A-M, w której tunel grzewczy zasilany był gazem ziemnym, do produkcji 1000 zgrzewek zużyła o około 20 kWh więcej niż pakowarka VEGA HT100, której piec grzewczy zasilany był energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego. Obie pakowarki na produkcję 1000 zgrzewek zużyły 35,35 kg folii, w tym 89% stanowiła folia 0rLDPE/100LDPE, a 11% folia z dodatkiem recyklatów. W obu przypadkach najbardziej energochłonnym etapem procesu pakowania było zgrzewanie folii w piecu grzewczym. Pakowarka SP A-M pobrała na ten etap 58,93 kWh energii, natomiast pakowarka VEGA HT100 – 34,58 kWh energii.

Tab. 3. Dane inwentaryzacyjne zużycia energii i folii w roku 2021 dla jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne)

PARAMETR	PAKOWARKA SP A-M	PAKOWARKA VEGA HT100
Gaz (kWh)	58,93	0
Energia elektryczna (kWh)	6,33	46,10
Folia termokurczliwa (kg)	35,35	35,35
ZUŻYCIE ENERGII NA KAŻDYM Z ETAPÓW (kWh)		
Doprowadzanie produktów	0,63	5,07
Formatowanie produktów	3,99	4,52
Owinięcie folią grupy butelek	1,14	1,48
Zgrzewanie folii	58,93	34,58
Chłodzenie powstałych zgrzewek	0,57	0,46
ZUŻYCIE MATERIAŁU ROBOCZEGO (kg)		
Folia 0rLDPE/100LDPE	31,52	31,52
Folia 50rLDPE/50LDPE	3,83	3,83

W 2022 roku pakowarka SP A-M zużyła do wytworzenia 1000 zgrzewek o ok. 3,5 kWh mniej energii w procesie masowego pakowania niż w roku 2021, a pakowarka VEGA HT100 o ok. 22 kWh więcej energii porównując zużycie

z rokiem poprzedzającym (tab. 3). Podczas etapu zgrzewania folii maszyna SP A-M w roku 2022 pobrała 55,64 kWh energii, a pakowarka VEGA HT100 50,85 kWh. Oba obiekty techniczne zużyły 31,57 kg folii termokurczliwej 50rLDPE/50LDPE. W roku 2022 na żadnej z pakowarek nie używano folii bez dodatku recyklatów.

Tab. 4. Dane inwentaryzacyjne zużycia energii i folii w roku 2022 dla jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne)

PARAMETR	PAKOWARKA SP A-M	PAKOWARKA VEGA HT100
Gaz (kWh)	55,64	0
Energia elektryczna (kWh)	6,23	67,81
Folia (kg)	31,57	35,32
ZUŻYCIE ENERGII NA KAŻDYM Z ETAPÓW (kWh)		
Doprowadzanie produktów	0,63	7,46
Formatowanie produktów	3,92	6,64
Owinięcie folią grupy butelek	1,12	2,17
Zgrzewanie folii	55,64	50,85
Chłodzenie powstałych zgrzewek	0,56	0,68
ZUŻYCIE MATERIAŁU ROBOCZEGO (kg)		
Folia 0rLDPE/100LDPE	0	0
Folia 50rLDPE/50LDPE	31,57	31,57

Ocena wpływu cyklu życia badanego obiektu badań

W kolejnym etapie LCA następuje ocena wpływu, w której określa się powiązania środowiskowe wszystkich wejść i wyjść badanego procesu [114]. Obowiązkową fazą LCIA jest wybór kategorii wpływów, wskaźników i modeli charakteryzowania, czyli przypisanie otrzymanych wyników LCI do odpowiedniej kategorii szkód oraz obliczenie wskaźnika kategorii. Elementami opcjonalnymi w tej fazie są: normalizacja, grupowanie, ważenie i analiza jakości danych [52, 156]. W analizie LCIA procesu masowego pakowania uwzględniono wszystkie 18 kategorii wpływów oraz 3 kategorie szkód dostępne w metodzie ReCiPe 2016, a także obliczenie śladu węglowego zgodnie z metodą IPCC 2021.

W fazie LCI podczas analizy systemów, w których równolegle wytwarzają się kilka produktów lub wykorzystywane są produkty przejściowe, istotnym elementem jest alokacja danych [16]. Polega ona na rozdzieleniu wejść i wyjść między wyroby, bazując na występujących między nimi zależnościach fizycznych, do których należą np. masa, zawartość energii lub objętość. Mimo tego, że alokacja pełni istotną rolę w procedurach obliczeniowych, to – jak podaje dostępna literatura – wszędzie tam, gdzie możliwe, należy jej unikać. Aby móc

ją pominąć w obliczeniach, należy podzielić procesy jednostkowe na dwa lub większą liczbę podprocesów, które mogą zostać przypisane do konkretnego wyrobu. Alokacja może być również zastąpiona poprzez poszerzenie granic systemu do rozważań nad sąsiadującym systemem. Z uwagi na przyjęte granice badanego systemu i podział procesu masowego pakowania na poszczególne jego etapy pominięto alokację [34, 130, 132].

Interpretacja wyników

Ostatnim obligatoryjnym etapem oceny cyklu życia jest faza interpretacji wyników, która zgodnie z normą ISO 14043 składa się z: identyfikacji istotnych negatywnych oddziaływań środowiskowych bazujących na wynikach LCI i LCIA, oceny zawierającej sprawdzenie kompletności, wrażliwości i spójności wyników oraz wysunięcia wniosków, a także zaleceń w celu ulepszenia badanego obiektu [108, 109]. Ważne, aby wyniki zostały zinterpretowane zgodnie z celem i zakresem przeprowadzonych badań. W tym kroku formułowane są również wytyczne, które mają na celu zmniejszenie negatywnych skutków środowiskowych. Ponadto otrzymane wyniki stają się podstawą do podejmowania decyzji w zakresie konkretnych działań zmniejszających szkodliwość badanego procesu. Poprzez identyfikację procesów jednostkowych wejść i wyjść danego systemu technicznego otrzymywane są informacje, na podstawie których podejmuje się kroki zmniejszające zużycie energii oraz materiałów niezbędnych do przeprowadzenia procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą [89, 110].

4.3. Metody badań przemysłowych

Energia jest podstawowym czynnikiem umożliwiającym przeprowadzanie większości procesów technologicznych. Wydobyciu, przetwórstwie i przetwarzaniu paliw kopalnianych niezbędnych do jej wytworzenia towarzyszy emisja niebezpiecznych substancji do atmosfery. W procesie masowego pakowania butelek zużywa się surowce, które podczas wydobycia oraz transportu obciążone są zużyciem nośników energii. Wytworzenie ostatecznego produktu, czyli zgrzewki foliowej, jest możliwe dzięki wieloetapowym, złożonym procesom produkcyjnym, w których zużywa się poszczególne surowce oraz media. Przebieg masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą można scharakteryzować m.in. za pomocą zużycia energii na poszczególnych etapach procesu. Wejścia do systemu technicznego określa się jako elementy, bez których dany proces nie mógłby być przeprowadzony, natomiast wyjścia jako elementy obciążające środowisko.

Celem badań przemysłowych było wyznaczenie modeli matematycznych wskaźników, charakteryzujących proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą. Modelem matematycznym nazywa się przedstawiony za pomocą równań matematycznych związek między dwiema lub większą liczbą zmiennych. Jest określany jako odpowiedni zbiór symboli oraz relacji

matematycznych, a także ścisłych zasad odpowiedzialnych za operowanie nimi. Ważne, aby zawarte w modelu symbole i relacje miały swoje odniesienie w rzeczywistym obiekcie badań [157]. Jeśli dany problem będzie rozważany zgodnie z zasadami matematycznymi i logiki, otrzymane wnioski będą odpowiadać rzeczywistości w przypadku, gdy sformułowanie wyjściowe było określone zgodnie z celem założonym na początku wyznaczania modelu matematycznego. W momencie gdy posługujemy się modelem i zmiany wartości liczbowych wielkości wyjściowych są uzyskiwane po wcześniejszym wprowadzeniu odpowiednio zmiennych wartości na wejściu, to model taki określa się modelem deterministycznym. W przypadku gdy w powtórzeniach obliczeń za pomocą tego samego modelu bez zmiany danych wejściowych uzyskuje się różne wielkości wyjściowe, wtedy model nazywany jest stochastycznym. W procesie powstawania modeli matematycznych wyróżnia się następujące etapy [32]:

- sformułowanie celów i założeń modelowania,
- określenie kategorii modelu oraz jego budowy,
- identyfikacja badanego systemu technicznego,
- opisanie za pomocą algorytmu obliczeń,
- weryfikacja modelu.

Bazując na przyjętych założeniach, dostępnej literaturze oraz danych z przedsiębiorstwa, wyznaczono następujące modele.

A. Wskaźnik całkowitego zużycia energii w procesie masowego pakowania butelek

Model wskaźnika całkowitego zużycia energii (E_C) określono jako sumę energii zużytej do wyprodukowania użytecznych produktów (E_P) oraz szkodliwości (E_S) w postaci zgrzewek nienadających się do transportu oraz zanieczyszczeń w postaci gazów. Wartość energii, która została zużyta do produkcji użytecznych produktów (E_P), można zapisać zatem jako sumę energii brutto zużytej w ramach pracy jednostek roboczych na produkcje produktów użytecznych (E_{JR}), ich zgrzewania (E_Z) oraz chłodzenie (E_{CH}) zgodnie z zależnością (2). Energię brutto zużytej do produkcji szkodliwości opisuje zależność (3), według której energia ta jest sumą energii brutto traconej na braki (E_{sB}) oraz energii brutto traconej na ujawniające się zanieczyszczenia w procesie (E_{sZ}):

$$E_C = E_P + E_S \text{ (kWh)} \quad (1)$$

E_C	wskaźnik całkowitego zużycia energii w procesie masowego pakowania butelek
E_P	energia brutto zużyta na produkty użyteczne
E_S	energia brutto zużyta na powstanie szkodliwości podczas realizacji procesu, czyli braków w postaci zgrzewek nienadających się do użytkowania oraz emisji zanieczyszczeń w postaci gazów

$$E_P = E_{JR} + E_Z + E_{CH} (kWh) \quad (2)$$

E_{JR}	energia brutto zużyta w ramach pracy jednostek roboczych na produkcji produktów użytecznych
E_Z	energia brutto zużyta na zgrzewanie produktów użytecznych
E_{CH}	energia brutto zużyta na chłodzenie produktów użytecznych

$$E_S = E_{sB} + E_{sZ} (kWh) \quad (3)$$

E_{sB}	energia brutto tracona na braki w procesie
E_{sZ}	energia brutto tracona na ujawniające się w procesie zanieczyszczenia

B. Wskaźnik energii jednostkowej procesu masowego pakowania

Dla procesów przemysłowych oprócz znajomości całkowitego zużycia energii, niezwykle ważna jest informacja o ilości energii przypadającej na jednostkę masową wytwarzanego produktu, co pozwala na porównywanie energochłonności różnych maszyn i technologii. Dla charakteryzowania procesu masowego pakowania butelek wyznaczono więc wskaźnik energii jednostkowej procesu masowego pakowania (E_J). Jest to iloraz wskaźnika energii całkowitej procesu (E_C) i masy produktów użytecznych (m_P):

$$E_J = \frac{E_C}{m_P} \left(\frac{kWh}{g} \right) \quad (4)$$

E_J	wskaźnik energii jednostkowej procesu
E_C	wskaźnik energii całkowitej procesu pakowania
m_P	masa produktów użytecznych powstałych w procesie pakowania

We wskaźniku energii jednostkowej masę produktów użytecznych (m_P) wyraża się jako różnicę masy wszystkich produktów powstałych w ramach procesu (m_C) i masy szkodliwości (m_S). Energię całkowitą (E_C) wyraża się jako sumę energii

zużytej do powstania użytecznych produktów (E_p) oraz szkodliwości (E_s) (zgodnie z zależnością (1)):

$$E_J = \frac{E_p + E_s}{m_c - m_s} \left(\frac{kWh}{g} \right) \quad (5)$$

E_J	energia jednostkowa procesu dla produktów użytecznych
E_p	energia brutto zużyta na produkty użyteczne
E_s	energia brutto zużyta na powstanie szkodliwości podczas realizacji procesu, czyli braków w postaci nienadających się do użytkowania zgrzewek oraz emisji zanieczyszczeń w postaci gazów
m_s	masa szkodliwości powstałych w procesie pakowania
m_c	suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania

C. Procentowy wskaźnik szkodliwości procesu masowego pakowania butelek

W celu zmniejszenia negatywnych oddziaływań procesów technologicznych niezbędna jest wiedza w zakresie ich szkodliwości. W celu jej wyznaczenia określono wskaźnik szkodliwości procesu masowego pakowania butelek (6), który jest ilorazem masy szkodliwości powstałych podczas przedmiotowego procesu (m_s) i masy wszystkich produktów powstałych w ramach procesu (m_c):

$$WS = \left(\frac{m_s}{m_c} \right) \cdot 100\% = \frac{m_s}{m_p + m_s} \cdot 100\% (\%) \quad (6)$$

WS	wskaźnik szkodliwości procesu masowego pakowania
m_c	suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania
m_s	masa szkodliwości powstałych w procesie pakowania
m_p	masa produktów użytecznych powstałych w procesie pakowania

We wskaźniku szkodliwości masę szkodliwości powstałych w procesie pakowania rozumie się jako sumę masy braków w postaci zgrzewek nienadających się do transportu oraz masę związków chemicznych należących do gazów cieplarnianych tj. CO_2 , SF_6 , CH_4 , N_2O pochodzących z bezpośredniej i pośredniej szkodliwości badanego systemu technicznego:

$$m_S = m_B + m_{CO_2} + m_{SF_6} + m_{CH_4} + m_{N_2O} \text{ (g)} \quad (7)$$

m_S	masa szkodliwości powstałych w procesie pakowania
m_B	masa braków w postaci zgrzewek nienadających się do transportu
m_{CO_2}	masa emisji CO_2 towarzysząca procesowi masowego pakowania
m_{SF_6}	masa emisji SF_6 towarzysząca procesowi masowego pakowania
m_{CH_4}	masa emisji CH_4 towarzysząca procesowi masowego pakowania
m_{N_2O}	masa emisji N_2O towarzysząca procesowi masowego pakowania

D. Procentowy wskaźnik efektywności procesu

Efektywność rozpatrywana jest według różnych punktów odniesienia w zależności od potrzeb przeprowadzanych analiz. Realizując zamierzenia określone na wstępie rozprawy, opracowano autorski wskaźnik efektywności procesu, który stanowi iloraz masy produktów użytecznych (m_P) i masy wszystkich produktów powstałych w procesie masowego pakowania (m_C) wyrażony w procentach:

$$WEP = \left(\frac{m_P}{m_C} \right) \cdot 100\% = \frac{m_P}{m_P + m_S} \cdot 100\% \text{ (\%)} \quad (8)$$

WEP	wskaźnik efektywności procesu
m_C	suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania
m_P	masa produktów użytecznych powstałych w procesie pakowania
m_S	masa szkodliwości powstałych w procesie pakowania

5. Wyniki przeprowadzonych badań i ich analiza

Badania laboratoryjne, symulacyjne i przemysłowe zostały przeprowadzone na podstawie danych dostępnych z działającego na terenie Polski przedsiębiorstwa branży spożywczej, w którym realizowany jest przedmiotowy proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.

5.1. Wyniki i analiza badań laboratoryjnych

W celu zrealizowania wymienionych na wstępie założeń pracy przeprowadzono m.in. badania laboratoryjne cech użytkowych folii, w ramach których wyznaczono grubość, odporność na uderzenie, swobodną kurczliwość, odporność na rozdzieranie, wytrzymałość na rozciąganie badanych rodzajów folii, wykorzystywanych w przedmiotowym procesie masowego pakowania. Zadanie miało na celu udzielenie odpowiedzi na pytanie, jak dodatek recyklatów wpływa na właściwości użytkowe badanych folii.

5.1.1. Wyznaczenie grubości folii

Aby wyznaczyć grubość folii, przeprowadzono badania zgodnie z normą PN ISO 4593:1999 za pomocą grubościomierza Mahr Extrames 2000, nacisk stopki: 0,5 N. Wyniki pomiarów wraz z grubościami podanymi przez producentów folii zestawiono i opisano w tabeli 4.

Tab. 5. Grubość badanych folii (opracowanie własne)

Rodzaj badanej próbki	Grubość folii podawana przez producenta $\pm 0,005$ [mm]	Średnia zmierzona grubość folii [mm]	Odchylenie standardowe dla grubości zmierzonej [mm]
0rLDPE/100LDPE white	0,045	0,046	0,002
0rLDPE/100LDPE color	0,050	0,054	0,001
50rLDPE/50LDPE white	0,045	0,045	0,001
50rLDPE/50LDPE color	0,067	0,067	0,001
100rLDPE/0LDPE white	0,050	0,049	0,003
100rLDPE/0LDPE color	0,050	0,053	0,003

Powyższe dane są wynikiem badania bieżącej partii produkcji i określonego fragmentu folii uzyskanej z rolki od producenta. Folie dostarczane są do przedsiębiorstwa przez dwóch producentów, którzy produkują odpowiednio: producent A – folię białą i producent B – folię kolorową. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wynika, że wyznaczone wartości mieszczą się w przedziałach tolerancji podanych przez producenta folii na karcie katalogowej produktu.

5.1.2. Badanie swobodnej kurczliwości liniowej folii termokurczliwej

Badanie swobodnej kurczliwości liniowej w kierunku maszynowym przeprowadzono zgodnie z normą ASTM D2732. Wyniki badań z wyliczonym odchyleniem standardowym przedstawiono w tabeli 5. W kierunku maszynowym największą kurczliwością wśród wszystkich folii charakteryzuje się folia 100rLDPE/0LDPE color (83,2% KM), a w kierunku poprzecznym folia 50rLDPE/50LDPE white (25,4% KP).

Tab. 6. Wyniki badań swobodnej kurczliwości liniowej folii termokurczliwej (opracowanie własne)

Rodzaj badanej folii	Kierunek maszynowy		Kierunek poprzeczny	
	Średnia (%)	Odchylenie standardowe (%)	Średnia (%)	Odchylenie standardowe (%)
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	66,8	0,8	23,6	1,7
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	69,0	1,9	5,2	0,8
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	75,4	1,1	25,4	1,9
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	67,8	1,1	9,0	0,7
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	69,0	1,1	17,8	1,1
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	83,2	0,8	18,8	1,6

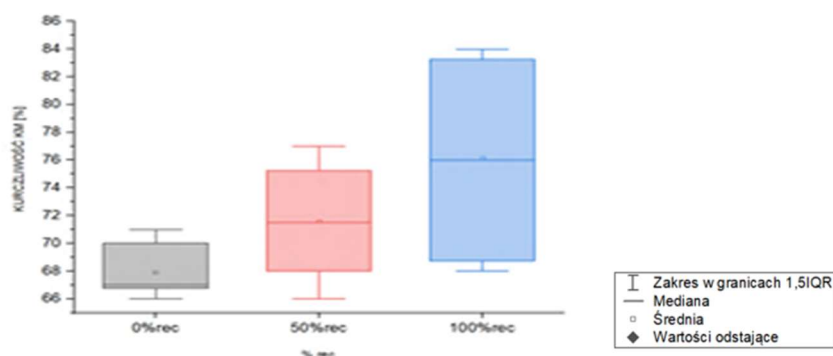
W ramach analizy sprawdzono normalność rozkładu wyników kurczliwości w kierunku maszynowym, która jest istotną właściwością użytkową folii dla jej producentów, za pomocą testu Shapiro-Wilka. Analiza wykazała normalność rozkładu danych. Potwierdzenie istnienia rozkładu normalnego dało możliwość porównania wyników badań swobodnej kurczliwości za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA), która obejmowała weryfikację

hipotezy zerowej zakładającej, że wszystkie średnie w porównywanych grupach są równe. Czynnikiem, wobec którego porównywano kurczliwość, był rodzaj badanej folii. Analiza wariancji pokazała istotność różnic między rozpatrywanymi średnimi (dla przyjętego poziomu istotności $p < 0,05$). W celu znalezienia odpowiedzi na pytanie, które z badanych grup folii różnią się między sobą, konieczne było przeprowadzenie jednego z testów post-hoc, nazywanych również testami wielokrotnych porównań. W przedmiotowej analizie wykorzystano test Tukeya, którego wyniki przedstawiono w tabeli 6. Analiza wykazała, że rodzaj folii istotnie wpływa na jej kurczliwość, o czym świadczą otrzymane istotne statystycznie różnice dla średniej kurczliwości folii. Zauważalne jest również, że folie z większą zawartością recyklatów w składzie charakteryzują się większą kurczliwością w kierunku maszynowym.

Tab. 7. Wyniki testu Tukeya dla kurczliwości w kierunku maszynowym (opracowanie własne)

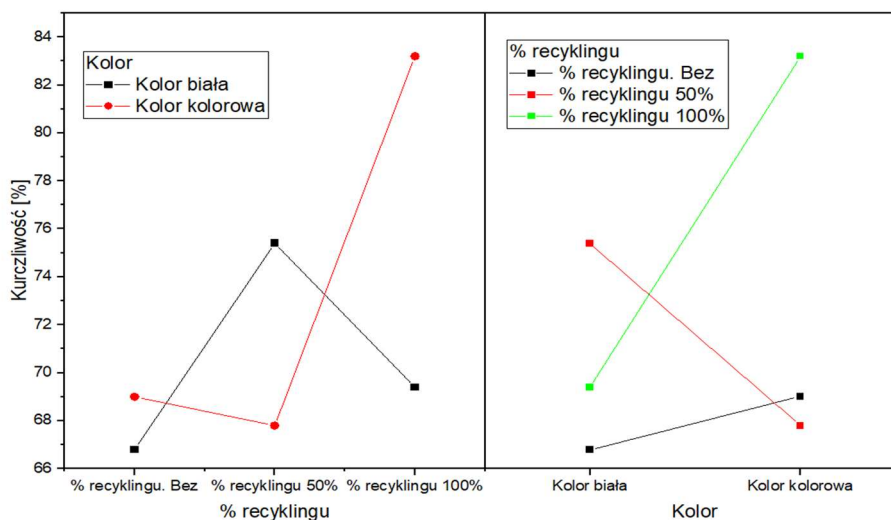
Rodzaj badanej próbki	Średnia (%)	Grupy				
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	83,2	A				
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	75,4		B			
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	69,4			C		
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	69,0			C	D	
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	67,8			C	D	
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	66,8				D	E

W dalszym kroku przeprowadzono analizę jednoczynnikową mającą na celu weryfikację, czy średnie wartości kurczliwości folii w kierunku maszynowym są znacząco różne w zależności od procentowej ilości recyklatów w ich składzie. Z przeprowadzonej analizy wynika, że średnie te są znacząco różne, a wartość kurczliwości w kierunku maszynowym wzrasta wraz z ilością procentowego dodatku tworzywa pochodzącego z recyklingu w składzie badanych folii (rys. 34).



Rys. 34. Wpływ dodatku recyklatu na kurczliwość folii w kierunku maszynowym (opracowanie własne)

W kolejnym kroku przeprowadzono dwuczynnikową analizę wariancji (ANOVA), w której wyznaczono interakcje kurczliwości od koloru folii oraz procentowego składu recyklatów. Z otrzymanego wykresu (rys. 35) wynika, że czynnik, jakim jest barwa, nie wpływa na kurczliwość badanych próbek folii.



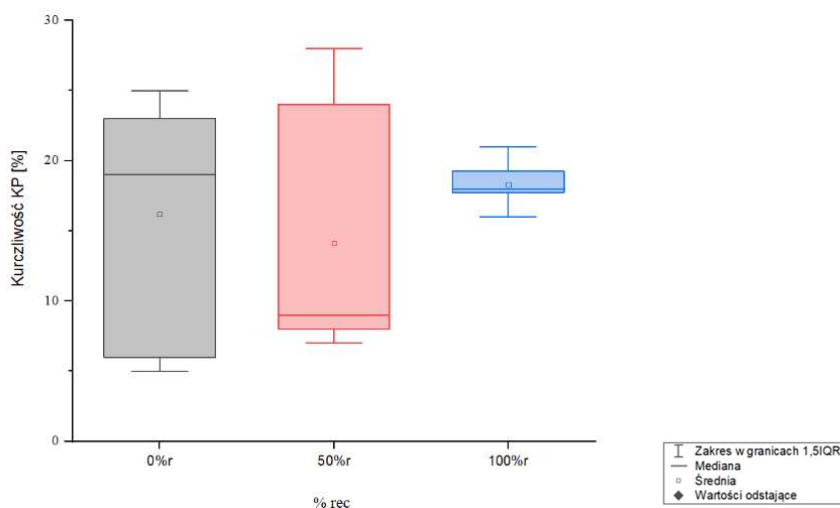
Rys. 35. Zależność kurczliwości w kierunku maszynowym od zawartości procentowej recyklatów oraz koloru folii (opracowanie własne)

Sprawdzono również normalność rozkładu wyników kurczliwości w kierunku poprzecznym, która wykazała normalność rozkładu danych. Następnie przeprowadzono analizę wariancji, która nie wykazała istotności różnic między badanymi średnimi kurczliwości w kierunku poprzecznym (tab. 8).

Tab. 8. Wyniki testu Tukeya dla kurczliwości w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)

Rodzaj badanej próbki	Średnia (%)	Grupa
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	23,6	A
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	5,2	A
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	25,4	A
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	9,0	A
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	17,8	A
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	18,8	A

W celu sprawdzenia, czy średnie wartości kurczliwości folii w kierunku poprzecznym są znacząco różne, przeprowadzono analizę jednoczynnikową. Wyniki przedstawiono w formie wykresu na rysunku 36. Przeprowadzona analiza wykazała, że ilość recyklatów w składzie folii nie wpływa na jej kurczliwość w kierunku poprzecznym (rys. 36).



Rys. 36. Wpływ dodatku recyklatu na kurczliwość folii w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)

5.1.3. Badanie odporności na uderzenie metodą swobodnie spadającego grotu

W celu scharakteryzowania odporności na uderzenie folii wyznaczono siłę uderzenia powodującą uszkodzenie próbki. Podczas przeprowadzania badania zauważono, że wszystkie próbki z danej serii charakteryzowały się podobnymi śladami uszkodzenia. Zaobserwowano, że folie z dodatkiem recyklatów charakteryzują się większą wartością siły uderzenia prowadzącej do uszkodzenia próbek niż folie bez jego dodatku (tab. 9).

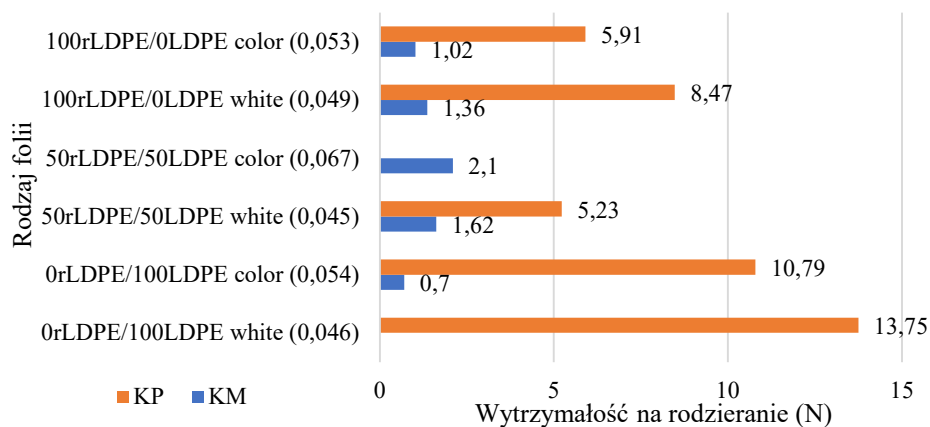
Tab. 9. Wyniki badań odporności na uderzenie (opracowanie własne)

Rodzaj badanej próbki	Średnia masa uszkodzenia (g)	Odchylenie standardowe średniej masy uszkodzenia (g)	Siła (N)	Odchylenie standardowe siły (N)
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	62,50	4,62	0,61	4,62
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	-	-	-	-
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	93,00	5,28	0,91	5,28
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	-	-	-	-
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	71,50	4,26	0,70	4,26
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	-	-	-	-

Z otrzymanych danych wynika, że w przypadku 50-procentowego dodatku regranulatu odporność na uderzenie jest wyraźnie wyższa niż dla pozostałych dwóch rodzajów badanych folii. Dla folii 50rLDPE/50LDPE white odnotowano niszczącą siłę uderzenia na poziomie 0,91 N, czyli o 0,21 N większą niż dla folii 100rLDPE/0LDPE white i o 0,30 N większą w porównaniu z folią 0rLDPE/100LDPE white. Na podstawie badań wnioskować można, że dodatek recyklatów wpływa na zwiększenie odporności folii na uderzenie, co w swoich badaniach m.in. potwierdzili Kloziński i Jakubowska [65].

5.1.4. Oznaczenie wytrzymałości na rozdzieranie (metoda Elmendorfa)

Oznaczając wytrzymałość na rozdzieranie, przeprowadzono badania zgodnie z normą PN-EN ISO 6383-2:2005 w temperaturze pokojowej [107]. Wyniki dla folii 0rLDPE/100LDPE white przedstawiono tylko w kierunku poprzecznym oraz 50rLDPE/50LDPE color w kierunku wzdłużnym z uwagi na przekroczony zakres wahadła użytego w badaniu dla nieuwzględnionych kierunków badań. Powstałe wyniki zaprezentowano na rysunku 37. W kierunku maszynowym największą wytrzymałością na rozdzieranie charakteryzuje się folia 50rLDPE/50LDPE color (2,1 N), a w kierunku poprzecznym folia 0rLDPE/100LDPE white (13,75 N).



Rys. 37. Wytrzymałość na rozdzieranie badanych rodzajów folii: KM – kierunek maszynowy, KP – kierunek poprzeczny (opracowanie własne)

5.1.5. Oznaczenie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu

5.1.5.1. Wyniki statycznego rozciągania badanych próbek folii

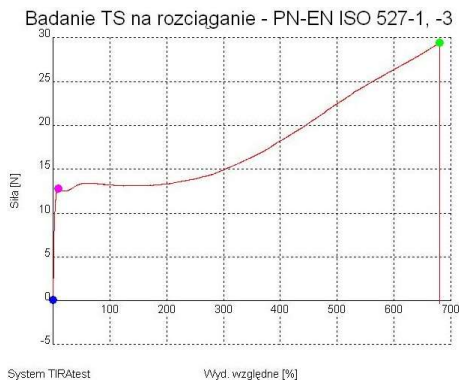
Badane folie poddano próbie statycznego rozciągania w warunkach normalnych. Przygotowane i kondycjonowane wcześniej próbki (10 próbek z każdego rodzaju badanych folii wyciętych w kierunku maszynowym i poprzecznym) rozciągano z prędkością 100 mm/min do momentu ich pęknięcia. Celem tych badań było określenie podstawowych cech wytrzymałościowych folii do termokurczliwego pakowania butelek. Wszystkie średnie wartości wyników odporności na rozciąganie, naprężenia niszczącego, naprężenia przy granicy plastyczności, wydłużenia przy odporności na rozciąganie, naprężenia niszczącego, naprężenia przy granicy plastyczności oraz grubości próbek odnotowane podczas badania wraz z odchyleniem standardowym i współczynnikiem zmienności zebrano i przedstawiono w tabeli 9.

Tab. 10. Wyniki próby statystycznego rozciągania dla badanych próbek folii termokurczliwej; 1 – wartość średnia, 2 – odchylenie standardowe, 3 – współczynnik zmienności, KM – kierunek maszynowy, KP – kierunek poprzeczny (opracowanie własne)

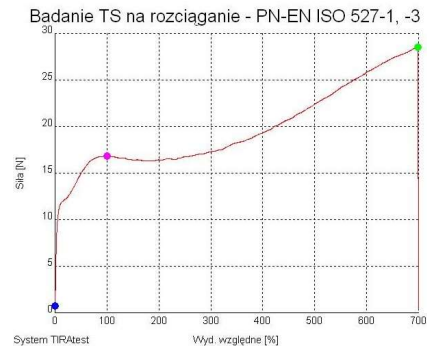
Właściwości folii	0rLDPE/100LDP E white		0rLDPE/100LDP E color		50rLDPE/50LDP E white		50rLDPE/50LDP E color		100rLDPE/0LDP E white		100rLDPE/0LDP E color		
	KM	KP	KM	KP	KM	KP	KM	KP	KM	KP	KM	KP	
Wyznaczalność na rozciąganie (MPa)	1	38,63	35,53	34,80	29,10	32,86	25,56	30,14	21,00	21,73	31,83	28,57	
	2	2,78	2,38	1,34	0,39	1,66	0,81	1,17	1,57	1,33	1,31	0,96	
	3	7,20	6,78	3,86	1,35	5,05	3,19	3,16	2,23	11,60	6,10	4,13	3,35
Napięcie przy zerwaniu (MPa)	1	37,62	35,10	34,66	29,09	32,49	25,47	30,13	18,48	21,50	31,37	28,54	
	2	3,78	3,23	1,44	0,39	1,91	0,99	1,17	1,96	1,45	1,55	0,96	
	3	10,04	9,19	4,17	1,35	5,87	3,90	3,16	2,23	10,59	6,76	4,94	3,35
Granica plastyczności (MPa)	1	-	22,70	-	16,74	-	13,39	-	15,26	-	11,96	-	15,03
	2	-	0,64	-	0,21	-	0,28	-	0,3	-	0,32	-	0,22
	3	-	2,83	-	1,23	-	2,12	-	1,97	-	2,70	-	1,45
Wydłużenie przy maksymalnym napięciu rozciągającym (%)	1	654,84	952,62	653,64	896,0	408,80	735,61	617,30	869,89	416,56	709,01	470,58	813,29
	2	43,09	28,67	29,36	24,27	28,36	26,89	11,58	15,58	34,42	40,81	21,57	21,19
	3	6,58	3,01	4,49	2,71	6,94	3,66	1,88	1,79	8,26	5,76	4,58	2,61
Wydłużenie przy zerwaniu (%)	1	655,06	953,3	654,8	896,4	411,5	736,5	563,3	869,9	418,3	711,3	473,9	813,6
	2	43,01	27,98	29,00	24,28	28,14	26,17	16,03	15,61	33,03	29,82	21,92	21,31
	3	6,57	2,93	4,43	2,71	6,84	3,55	29,38	1,79	7,90	5,60	4,63	2,62
Wydłużenie na granicy plastyczności (%)	1	9,51	7,77	98,08	9,90	-	9,88	-	9,94	114,86	11,34	133,24	9,70
	2	0,26	0,51	4,52	0,38	-	0,43	-	0,51	22,56	0,78	16,62	0,47
	3	2,70	6,53	4,61	3,85	-	4,38	-	5,10	19,64	6,88	12,47	4,84
Grubość próbki (mm)	1	0,046	0,043	0,053	0,053	0,044	0,043	0,070	0,069	0,049	0,049	0,053	0,054
	2	0,002	0,002	0,0006	0,0006	0,001	0,0001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
	3	4,64	3,83	1,19	1,13	3,37	1,62	1,24	1,13	3,40	2,70	2,09	1,81

W pierwszym kroku próbę statycznego rozciągania przeprowadzono dla folii 0rLDPE/100LDPE white, dla której przykładowy wykres siła – odkształcenie względne pokazano na rysunku 38. Po przekroczeniu maksymalnej wartości siły folia zaczęła rozciągać się przy jednocześnie małym przyroście siły i dużym wydłużeniu, aż do osiągnięcia wydłużenia blisko 700%, przy którym występowało zniszczenie próbki. W kolejnym kroku przeprowadzono próbę dla folii 0rLDPE/100LDPE color, dla której naprężenie przy zerwaniu wyniosło 34,66 MPa, a średnia wartość wydłużenia względnego niszczącego próbki – 654,8% (tab. 9). Zgodnie z rysunkiem 38., dla próbek folii 50rLDPE/50LDPE white obciążonych w kierunku maszynowym, wydłużenie próbek rośnie proporcjonalnie do wartości obciążenia dla próbek, aż do momentu osiągnięcia wartości siły odpowiadającej granicy plastyczności. Po przekroczeniu granicy plastyczności materiał zaczyna „płynąć”, czyli następuje wydłużenie próbek przy niewielkich zmianach wartości siły. Dla tego rodzaju folii średnia wartość wydłużenia przy zerwaniu w kierunku maszynowym wyniosła 411,5% (tab. 9). Próba statycznego rozciągania przeprowadzona dla folii 50rLDPE/50LDPE color wykazała, że średnia wartość wydłużenia niszczącego próbki wynosi 563,3% (tab. 10). Dla folii 100rLDPE/0LDPE white średnie wydłużenie względne, przy którym badana folia ulegała zniszczeniu, wyniosło 418,23% (tab. 10). Ostatnim rodzajem produktu poddanego badaniu była folia 100rLDPE/0LDPE color, której średnie wydłużenie względne, przy którym badana folia pękała, wyniosło 473,86%.

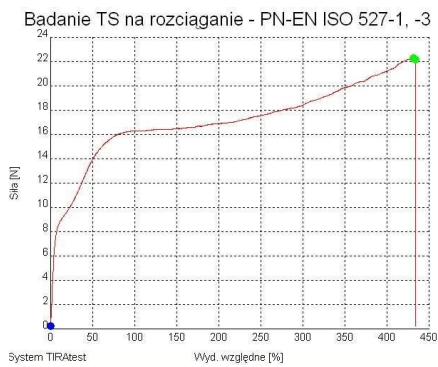
Wykresy powstałe podczas rejestru próby rozciągania w kierunku maszynowym (rys. 38) prezentują, że badane rodzaje tworzywa wykazują zależność wydłużenia od obciążenia. Otrzymane wyniki wytrzymałości na rozciąganie charakteryzowały się dużą powtarzalnością, co potwierdzają niskie wartości odchyłeń standardowych (tab. 10). Świadczy to o jednorodności właściwości wytrzymałościowych materiału poszczególnych rodzajów badanych folii.



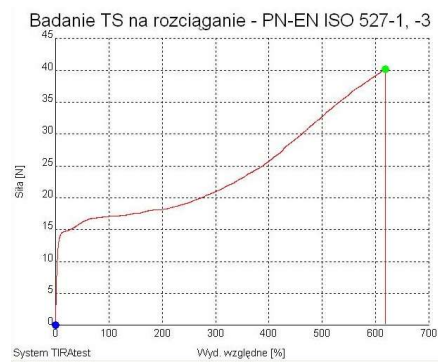
A



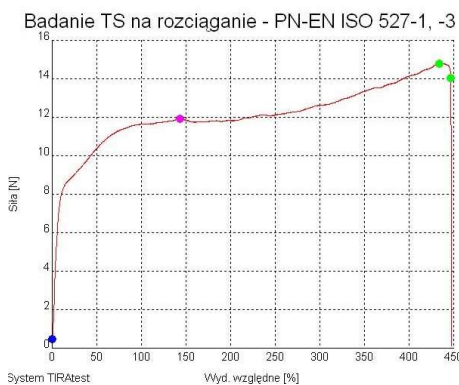
B



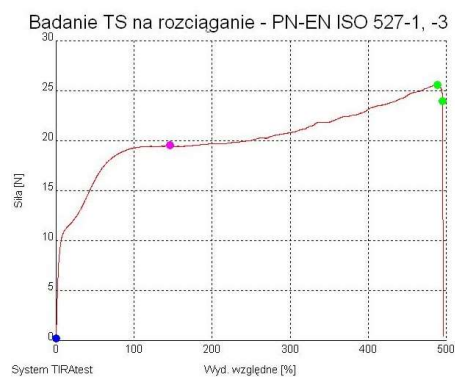
C



D



E



F

Rys. 38. Przykładowy wykres siła – wydłużenie względne podczas próby statycznego rozciągania w kierunku maszynowym: A – folia 0rLDPE/100LDPE white, B – folia 0rLDPE/100LDPE color, C – folia 50rLDPE/50LDPE white, D – folia 50rLDPE/50LDPE color, E – folia 100rLDPE/0LDPE white, F – folia 100rLDPE/0LDPE color (materiały własne)

Otrzymane wyniki wskazują, że folie 0rLDPE/100LDPE white, 0rLDPE/100LDPE color, 50rLDPE/50LDPE white, 50rLDPE/50LDPE color charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie w kierunku maszynowym na podobnym poziomie 32–38 MPa. Najniższą odporność wykazała folia 100rLDPE/0LDPE white, osiągając wartość 21 MPa. Wyznaczono również wytrzymałość na rozciąganie próbek w kierunku poprzecznym. Najmniejsze średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie odczytano dla folii 100rLDPE/0LDPE white (21,73 MPa) oraz 50rLDPE/50LDPE white (25,56 MPa). Z uzyskanych wyników widać, że w badanych rodzajach folii z dodatkiem recyklatów większy udział tworzywa pochodzącego z recyklingu w składzie wpływa na obniżenie wytrzymałości materiału na rozciąganie w kierunku poprzecznym.

Wydłużenie przy zerwaniu jest cechą materiału, która informuje o zniszczeniu tworzywa podczas jego eksploatacji oraz procesów związanych z przygotowaniem odpadów do ponownego przetwórstwa. Największe wartości wydłużenia niszczącego otrzymano dla folii 0rLDPE/100LDPE, dla której wartość tego parametru w kierunku maszynowym wyniosła 655,06% i 654,84% – odpowiednio dla folii białej i kolorowej. Próbki z dodatkiem recyklatów osiągnęły niższe wartości wydłużenia na poziomie 411–563%. Powstałe wyniki potwierdzają informacje zawarte w artykule Klozińskiego i Jakubowskiej [65], którzy wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości recyklatów w składzie folii, wzrasta liczba wtrąceń folii, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie jej wydłużenia w próbie statycznego rozciągania.

Wyniki wskazują, że badane folie charakteryzowały się wyższą wytrzymałością na rozciąganie w kierunku maszynowym niż w kierunku poprzecznym (z wyjątkiem próbki 100rLDPE/0LDPE white, dla której wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym i poprzecznym była zbliżona). Uzyskane wyniki przedstawione w tabeli 9. wskazują jednoznacznie, że wraz ze wzrostem zawartości regranulatu w składzie folii maleje jej wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym. Gorsze parametry wytrzymałościowe folii z dodatkiem recyklatów w porównaniu z folią 0rLDPE/100LDPE wynikają z faktu, że podczas procesu recyklingu przetwarzane tworzywo traci swoje właściwości wytrzymałościowe. Im lepsze parametry posiada polimer wejściowy, tym utrata właściwości wytrzymałościowych podczas przetwarzania będzie mniejsza dla powstającego regranulatu. Rojek i Szymiczek [123] podczas badań próbek folii, różniących się zawartością: regranulatu, polietylenu liniowego małej gęstości (LLDPE) oraz polietylenu małej gęstości (LDPE), wykazali, że dodanie w składzie folii większej ilości LLDPE powoduje wzrost własności wytrzymałościowych badanych próbek folii.

Otrzymane, zbliżone wyniki wytrzymałościowe folii wykonanych z 50-procentowym dodatkiem recyklatów oraz folii bez udziału materiałów pochodzących z recyklingu wskazują na zasadność stosowania folii z dodatkiem recyklatów w procesach masowego pakowania butelek. Przedsiębiorstwa

wykorzystując do pakowania folie termokurczliwe, zawierające w składzie recyklaty, przyczyniają się do zmniejszenia szkodliwości procesu pakowania, przy jednoczesnym zachowaniu jakości tworzonych zgrzewek.

5.1.5.2. Wpływ grubości oraz typu tworzywa na wytrzymałość na rozciąganie folii

Zebrane wyniki wytrzymałości na rozciąganie z próby statycznego rozciągania poddano analizie statystycznej. Na wstępie analizy sprawdzono normalność rozkładu za pomocą testu Shapiro-Wilka dla wyników badań w kierunku maszynowym. Badania normalności rozkładu dowiodły, że wyniki dla wszystkich analizowanych folii wykazują rozkład normalny (tab. 11). Następnie za pomocą analizy wariancji (ANOVA) sprawdzono wpływ takich czynników, jak grubość, typ tworzywa i barwa na wytrzymałość na rozciąganie folii.

Tab. 11. Wyniki testu Shapiro-Wilka sprawdzającego normalność rozkładu wyników wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym

Założenia	H ₀ – Rozkład badanej próby jest rozkładem normalnym	
	H ₁ – Rozkład badanej próby nie jest rozkładem normalnym	
Badana folia	p-value	Wynik
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	0,32055	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	0,18589	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	0,11687	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	0,60733	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	0,15872	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	0,24526	Nie ma podstaw do odrzucenia H ₀ – rozkład jest normalny

Wyniki analizy ANOVA wykazały, że wartości średnie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym dla badanych folii różnią się istotnie statystycznie dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Oznacza to, że rodzaj danej folii wpływa na zmienną zależną, którą jest wytrzymałość na rozciąganie.

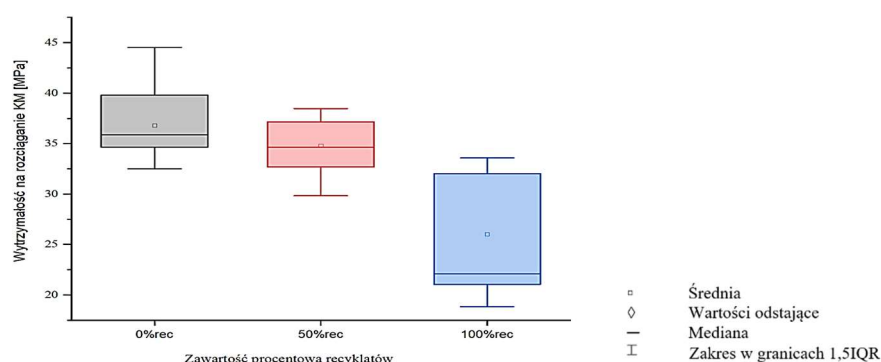
Przeprowadzony następnie test post-hoc Tukeya potwierdził i wskazał istotne statystycznie różnice pomiędzy średnią wytrzymałością folii w kierunku maszynowym (tab. 12). Średnie zestawione w tabeli 11., oznaczone różnymi literami, różnią się istotnie statystycznie. Różnice w wytrzymałościach badanych folii mogą być spowodowane różną jakością wykorzystanego do ich produkcji

polietylenu niskiej gęstości lub krotnością procesu przetwarzania polimerów w procesie recyklingu, bowiem z każdym ponownym recyklingiem tworzyw spadają wartości ich właściwości użytkowych [14].

Tab. 12. Wyniki testu Tukeya dla wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne)

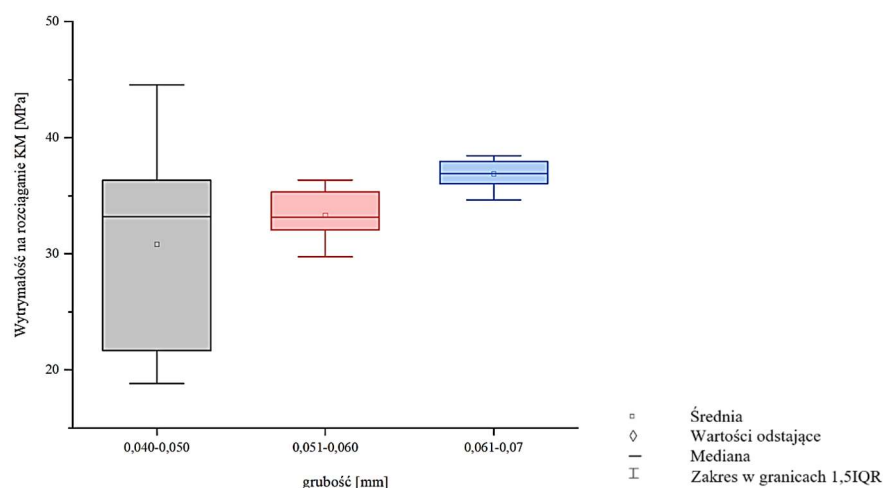
Rodzaj badanej folii	Średnia	Grupa			
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	38,632	A			
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	36,912	A	B		
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	34,797		B	C	
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	32,856			C	D
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	31,833				D
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	20,995				E

Za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) sprawdzono, czy udział procentowy recyklatu w składzie folii wpływa na wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym. Wyniki wykazały, że zawartość recyklatu w składzie folii wpływa na wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym – uzyskano istotne statystyczne różnice w średnich (rys. 39). Zauważa się, że wzrost zawartości recyklatów w składzie folii obniża jej właściwości wytrzymałościowe. Największe różnice wytrzymałości na rozciąganie występują pomiędzy foliami bez recyklatów i foliami wykonanymi w 100% z tworzyw pochodzących z recyklingu. Zakres wytrzymałości folii bez recyklatów i z 50-procentową domieszką rLDPE jest zbliżony. Różnice w wytrzymałościach folii z dodatkiem recyklatów mogą wynikać z rozbieżności w składzie w postaci np. barwnika lub krotności powtarzania recyklingu na wykorzystanych do produkcji folii regranulatach.



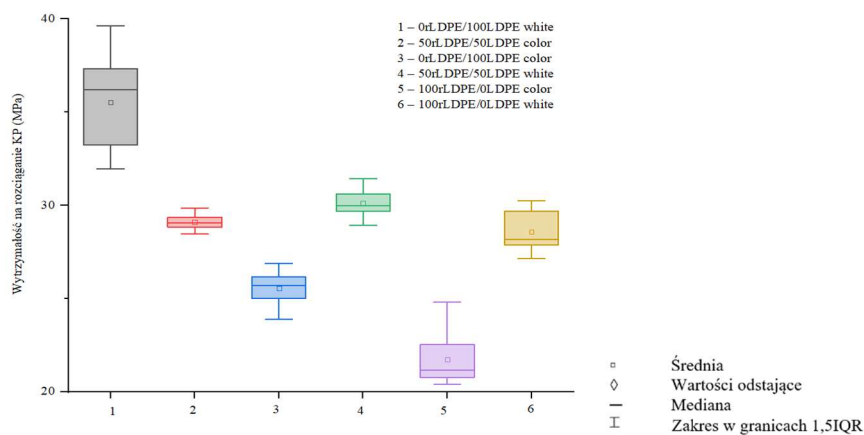
Rys. 39. Wpływ składu procentowego recyklatów w folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne)

Sprawdzono również, czy grubość badanych próbek folii ma istotny wpływ na wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym. Wyniki w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 40. Dla grubości, średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym nie są istotnie różne, na co wskazały wyniki analizy ANOVA. Zatem dla badanych folii ich grubość nie ma istotnego znaczenia dla wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym. Wyniki wskazują, że folie grubsze (0,061–0,07 mm) charakteryzowały się minimalnie wyższą wytrzymałością na rozciąganie. Jednakże różnica ta wynika z faktu, że do grupy w przedziale 0,061–0,07 mm należy tylko folia 50rLDPE/50LDPE color, a w pozostałych grupach o mniejszych grubościach znalazły się folie o różnej ilości dodatku recyklatów w składzie i dużych różnicach w średnich wytrzymałościach, co widać na rysunku 40.



Rys. 40. Wpływ grubości badanych folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne)

Analizie statystycznej ANOVA poddano również wyniki wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym. Na jej podstawie stwierdzono, że średnie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym różnią się istotnie między sobą (rys. 41). Różnice w średnich wytrzymałościach na rozciąganie w kierunku poprzecznym, podobnie jak wielkości w kierunku maszynowym mogą być powiązane z różnicą w składzie w postaci np. barwnika lub krotności powtarzania recyklingu na wykorzystanych do produkcji folii regranulatach.



Rys. 41. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym dla poszczególnych badanych folii (opracowanie własne)

Z testu Tukeya wynika, że średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym poszczególnych rodzajów folii, które oznaczono różnymi literami, są znacząco różne (

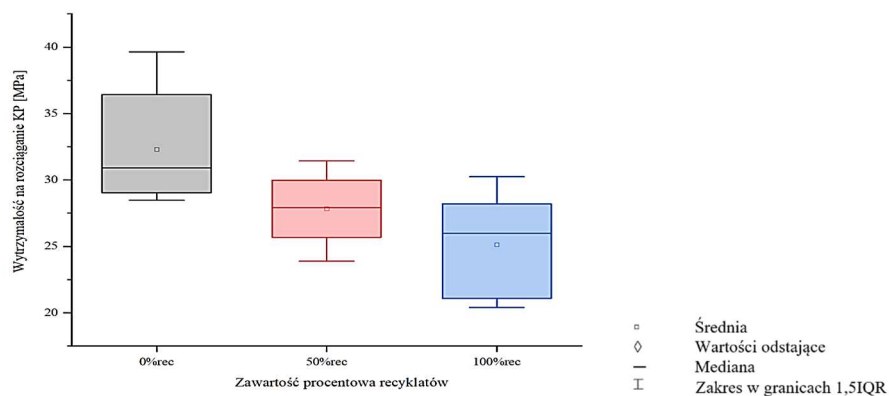
tab. 13). Wyniki wskazują, że największą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzują się folie bez dodatku recyklatów, najniższą zaś folie wykonane tylko z tworzyw pochodzących z recyklingu.

Tab. 13. Wyniki testu Tukeya dla wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)

Rodzaj badanej folii	Średnia	Grupa			
0rLDPE/100LDPE white (0,046 mm)	35,533	A			
50rLDPE/50LDPE color (0,067 mm)	30,135		B		
0rLDPE/100LDPE color (0,054 mm)	29,096		B		
50rLDPE/50LDPE white (0,045 mm)	28,568		B		
100rLDPE/0LDPE color (0,053 mm)	25,555			C	
100rLDPE/0LDPE white (0,049 mm)	21,727				D

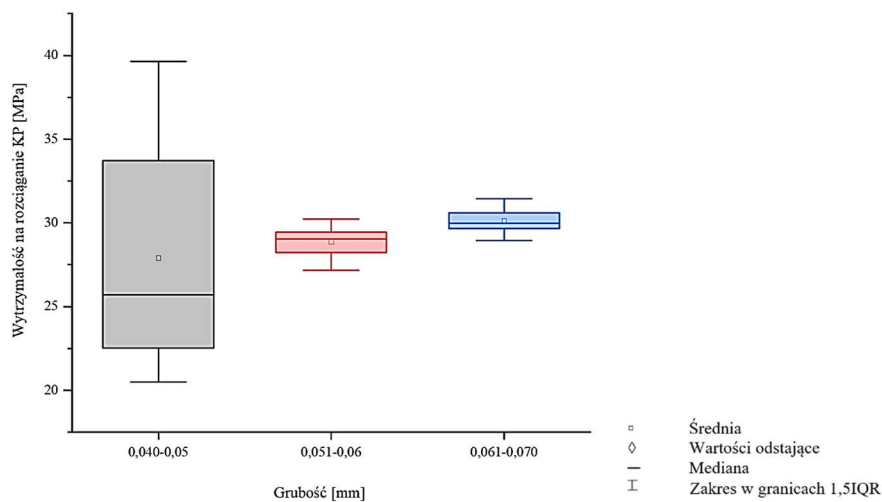
Analogicznie jak dla kierunku maszynowego, za pomocą jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA) sprawdzono, czy zawartość procentowa recyklatów w składzie folii wpływa na wytrzymałość na rozciąganie folii w kierunku

poprzecznym. Podobnie jak w kierunku maszynowym, badane folie wykazują spadek wartości wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem zawartości regranulatu (rys. 42).



Rys. 42. Wpływ składu procentowego recyklatów w folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)

Przeprowadzono również analizę wpływu grubości badanych folii na wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym. Wyniki w postaci graficznej zaprezentowano na rysunku 43. Dla folii o grubości 0,04–0,05 mm zauważalny jest największy rozrzut średnich, spowodowany największą liczebnością tej grupy. W kierunku poprzecznym grubość folii nie ma odzwierciedlenia we wpływie na wytrzymałość badanych próbek folii.



Rys. 43. Wpływ grubości badanych folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)

5.1.5.3. Podsumowanie badań laboratoryjnych

Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały, że wzrost zawartości recyklatów w folii, tym samym wzrost liczby wtrąceń występujących w strukturze folii, wpływa na zmniejszenie wartości wydłużenia niszczącego oraz wytrzymałość na rozciąganie, które zostało określone na podstawie próby statycznego rozciągania. Największą odporność na uderzenie odnotowano dla folii 50rLDPE/50LDPE white, dla której siła niszcząca próbkę wyniosła 0,91 N (tab. 13). Największą wartością swobodnej kurczliwości (83,2%) w kierunku maszynowym charakteryzowały się próbki kolorowej folii ze 100-procentowym składem materiału pochodzącego z recyklingu. Przeprowadzone badania wykazały, że wartość wytrzymałości na rozdzieranie wzrasta wraz z ilością recyklatów w składzie badanych próbek folii. Analizując wyniki z dostępną literaturą, potwierdza się zależność spadku wartości wytrzymałościowych folii wraz z dodatkiem recyklatu. Jednakże różnice te nadal umożliwiają produkowanie użytecznych zgrzewek nadających się do transportu butelek z napojami. Wprowadzenie do procesu masowego pakowania butelek folii z dodatkiem recyklatów wpływa na zmniejszenie temperatury pieca grzewczego, obkurczającego folię wokół butelek. Różnica w temperaturach kształtuje się od 215°C dla folii polietylenowych, 195°C dla folii z 50-procentowym udziałem recyklatów w składzie oraz 190°C dla folii zawierającej 100% regranulatu w procesie masowego pakowania realizowanym w przedmiotowym przedsiębiorstwie. Obniżenie temperatury pieca grzewczego ma swoje odzwierciedlenie w zużyciu energii, a w dalszej kolejności w ocenianym w rozprawie oddziaływaniem procesu masowego pakowania butelek na otoczenie.

Wyniki powstałe w ramach badań laboratoryjnych porównano z uzyskanymi od producenta folii wartościami cech użytkowych poszczególnych folii, które potwierdziły, że otrzymane w pracy wyniki zawierają się w przedziałach podanych przez producentów w kartach katalogowych produktów foliowych. Ponadto, uzyskane wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają słuszność zastąpienia przez zakład produkcyjny w procesie masowego pakowania butelek folii 0rLDPE/100LDPE foliami 50rLDPE/50LDPE bez utraty jakości powstałych w ramach procesów opakowań w postaci zgrzewek.

Tab. 14. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych; 1 – wartość średnia, 2 – odchylenie standardowe, 3 – współczynnik zmienności (opracowanie własne)

Właściwości folii	0rLDPE/100LDPE white		50rLDPE/50LDPE white		50rLDPE/50LDPE color		100rLDPE/0LDPE white		100rLDPE/0LDPE color				
	KM	KP	KM	KP	KM	KP	KM	KP	KM	KP			
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	1	38,63	35,53	29,10	32,86	25,56	36,91	30,14	21,00	21,73	31,83	28,57	
	2	2,78	2,38	0,39	1,66	0,81	1,17	0,67	1,57	1,33	1,31	0,96	
	3	7,20	6,78	3,86	1,35	5,05	3,19	3,16	11,60	6,10	4,13	3,35	
Granica plastyczności (MPa)	1	-	22,70	-	16,74	-	13,39	-	15,26	-	11,96	-	15,03
	2	-	0,64	-	0,21	-	0,28	-	0,3	-	0,32	-	0,22
	3	-	2,83	-	1,23	-	2,12	-	1,97	-	2,70	-	1,45
Wydłużenie niżej (%)	1	655,06	953,32	654,84	896,38	411,45	736,50	563,31	418,23	711,35	473,86	813,63	
	2	43,01	27,98	29,00	24,28	28,14	26,17	16,03	33,03	29,82	21,92	21,31	
	3	6,57	2,93	4,43	2,71	6,84	3,55	29,38	1,79	7,90	5,60	4,63	2,62
Grubość (mm)	1	0,046	0,043	0,053	0,044	0,043	0,070	0,069	0,049	0,049	0,053	0,054	
	2	0,002	0,002	0,0006	0,0006	0,001	0,0001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	
	3	4,64	3,83	1,19	1,13	3,37	1,62	1,24	3,40	2,70	2,09	1,81	
Wytrzymałość na rozdarcie (N)	1	-	13,75	0,7	10,79	1,62	5,23	2,1	1,36	8,47	1,02	5,91	
	2	-	0,76	0,05	0,26	0,5	0,17	0,49	0,11	0,37	0,28	0,3	
	3	-	5,56	6,82	2,45	30,79	3,30	23,16	8,03	4,32	27,32	5,00	
Odporność na uderzenie (N)	1	0,61	-	-	0,91	-	-	-	0,7	-	-	-	
	2	4,62	-	-	5,28	-	-	-	4,26	-	-	-	
	3	7,39	-	-	5,68	-	-	-	5,96	-	-	-	
Swobodna kurczliwość (%)	1	66,8	23,6	69,0	5,4	75,4	25,4	67,8	69,4	17,8	83,2	18,8	
	2	0,8	1,7	1,9	0,5	1,1	1,9	1,1	0,9	1,1	0,8	1,6	
	3	1,2	7,2	2,75	9,26	1,46	7,48	1,62	1,3	6,18	0,96	8,51	

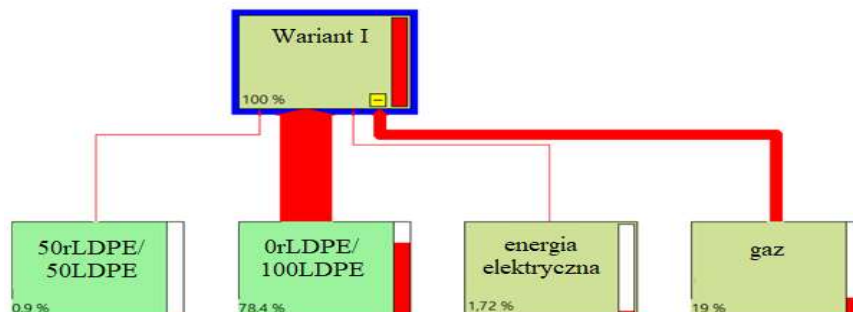
5.2. Wyniki badań symulacyjnych

W ramach badań symulacyjnych przeprowadzona została analiza cyklu życia procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą w określonych granicach systemu technicznego. Badania przeprowadzono w programie SimaPro w wersji 9.3, bazując na bazie danych Ecoinvent i wykorzystując dane z dwóch lat pracy pakowarek w danym przedsiębiorstwie. Analiza uwzględniała cztery warianty procesu pakowania różniące się pod względem zastosowanej pakowarki, typu folii oraz źródła zasilania etapu zgrzewania folii. Dla czterech wariantów procesu zbadano wpływ zużycia materiałów i surowców na jego szkodliwość w systemie technicznym, wpływ etapów procesu masowego pakowania na szkodliwość w systemie w odniesieniu do jakości ekosystemów, zdrowia ludzkiego i zubożenia zasobów naturalnych, a także emisji gazów cieplarnianych wyznaczonej za pomocą śladu węglowego. Dodatkowo oszacowano wpływ zmiany źródła zasilania z konwencjonalnego na odnawialne na szkodliwość procesu masowego pakowania butelek.

5.2.1. Wpływ zużycia materiałów i surowców na szkodliwość procesu masowego pakowania butelek

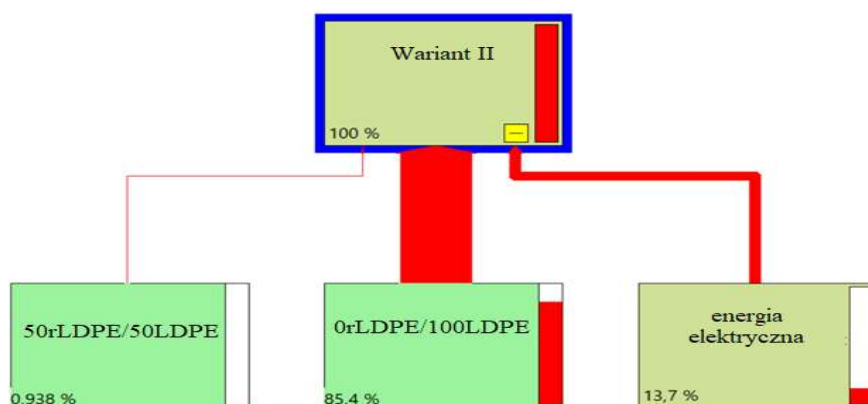
Na podstawie zebranych danych z rzeczywistej pracy pakowarek dla procesu pakowania opracowano drzewa procesów, które przedstawiają przepływ materiałów, energii w ramach granic przyjętego systemu technicznego oraz ich procentowy udział w potencjalnym oddziaływaniu na otoczenie. Na rysunkach 44. i 46. przedstawiono drzewo procesu dla pakowarki SP A-M odpowiednio dla roku 2021 (wariant I) oraz 2022 (wariant III), natomiast na rysunkach 45. i 47. – dla pakowarki VEGA HT100 w roku 2021 (wariant II) i 2022 (wariant IV). Wielkości poszczególnych wpływów na całkowite oddziaływanie badanego systemu technicznego przedstawiają grubości linii łączących poszczególne elementy wykresu.

W wariantcie I (rys. 44) procesu masowego pakowania butelek, w największym stopniu na otoczenie systemowe wpływa zużycie folii 0rLDPE/100LDPE (78,4%). Za obciążenia na poziomie 19% odpowiada wykorzystanie energii z gazu do zasilania pieca grzewczego. Najniższy udział (na poziomie 0,9%) w całkowitych oddziaływaniach procesu pakowania w wariantcie I odnotowano dla zużycia folii 50rLDPE/50LDPE. Energia z miksu energetycznego wykorzystana do zasilania maszyny stanowiła 1,72% całkowitego wpływu.



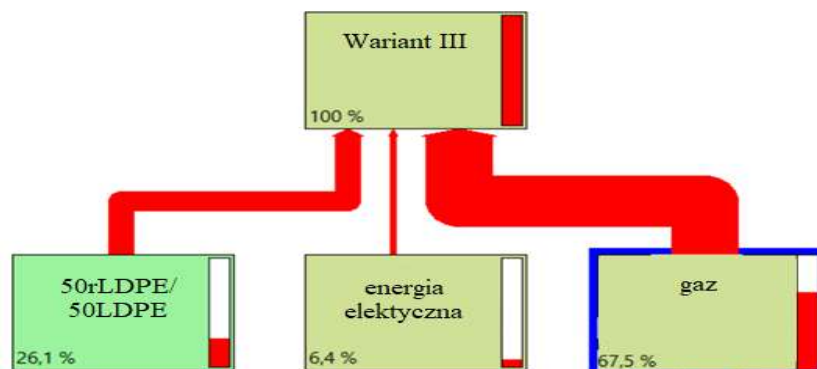
Rys. 44. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki SP A-M w roku 2021 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant I (P_1 , F_{0r} , F_{50r} , E_{GZ} , E_{Emix}) (opracowanie własne)

W wariantcie II (rys. 45) największy potencjalny udział w negatywnych oddziaływaniach na otoczenie (85,4%) wykazano dla zużycia folii 0rLDPE/100LDPE. Znikome wartości (0,938%) odnotowano w tym wariantcie dla tworzywa opakowaniowego 50rLDPE/50LDPE. Energia elektryczna z europejskiego mixu energetycznego w wariantcie II odpowiadała za 13,7% wszystkich negatywnych oddziaływań.



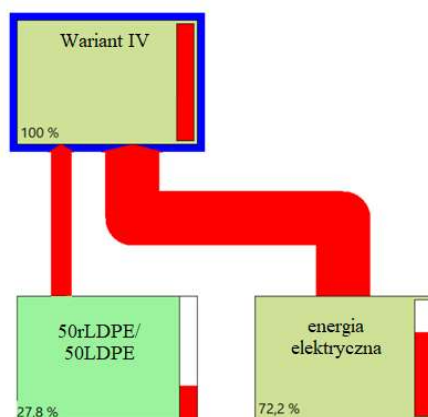
Rys. 45. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki VEGA HT100 w roku 2021 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant II (P_2 , F_{0r} , F_{50r} , E_{Emix}) (opracowanie własne)

W wariantcie III (rys. 46) badanego procesu największy potencjalny udział oddziaływania odnotowano dla gazu zasilającego piec grzewczy pakowarki (67,5%). Zużycie folii 50rLDPE/50LDPE odpowiadało za 26,1% całkowitych wpływów środowiskowych, a energia pochodząca z europejskiego mixu energetycznego – 6,4%.



Rys. 46. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki SP A-M w roku 2022 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant III (P_1 , F_{50r} , E_{GZ} , E_{Emix}) (opracowanie własne)

W wariantcie IV (rys. 47) dominujący udział w całkowitym wpływie na otoczenie miało zużycie energii elektrycznej z europejskiego mixu energetycznego (72,2%). Pozostałe 27,8% szkodliwych oddziaływań powoduje zużycie folii 50rLDPE/50LDPE.



Rys. 47. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki B VEGA HT100 w roku 2022 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant IV (P_2 , F_{50r} , E_{Emix}) (opracowanie własne)

Warto zauważyć, że w wariantach I i II wykorzystanie folii bez dodatku recyklatów odpowiadało za generowanie największej ilości szkodliwych oddziaływań. Zmiana stosowanej folii 0rLDPE/100LDPE na folię z udziałem recyklatów w wariantach III i IV przyczyniła się do zmniejszenia udziału folii w całkowitej liczbie oddziaływań badanych wariantów na otoczenie. W wariantach III i IV nastąpiła zmiana w materiałach i surowcach, które

odpowiadają za największą wartość wprowadzanych obciążeń do środowiska – w wariancie III był to gaz, a w wariancie IV energia elektryczna. Wyniki wskazują zatem, że dalszego obniżenia wpływów środowiskowych należy oczekiwać po kolejnych zmianach typu folii na tą ze zwiększoną zawartością tworzywa z recyklingu. Obniżenie negatywnych oddziaływań środowiskowych może być także realizowane poprzez obniżenie zużycia energii w procesie pakowania. Może to być osiągnięte poprzez zwiększenie efektywności maszyn wchodzących w skład linii produkcyjnych wskutek ulepszeń technologiczno-konstrukcyjnych.

5.2.2. Wpływ procesu masowego pakowania butelek na szkodliwość w systemie technicznym

5.2.2.1. Wpływ parametrów i etapów procesu masowego pakowania butelek z podziałem na kategorie szkód

W kolejnym kroku za pomocą programu SimaPro wyznaczono ilość gazów cieplarnianych (CO₂, SF₆, CH₄, N₂O), które wpływają na powstawanie efektu cieplarnianego i zostały uwzględnione w Protokole z Kioto przyjętego podczas Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (COP3) w 1997 roku. W tabeli 14. przedstawiono ilości gazów dostających się do atmosfery w procesie masowego pakowania butelek w czterech rozpatrywanych wariantach.

Tab. 15. Emisja wybranych gazów cieplarnianych w czterech wariantach procesu masowego pakowania butelek z napojami (opracowanie własne)

Rodzaj emitowanego gazu (g)	Wariant I (P ₁ , F _{0r} , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	Wariant II (P ₂ , F _{0r} , F _{50r} , E _{Emix})	Wariant III (P ₁ , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})
Dwutlenek węgla (CO ₂)	80460,5	82076,4	23216,78	24663,31
Heksafluorek siarki (SF ₆)	0,00498	0,00899	0,000713	0,000711
Metan (CH ₄)	0,000020	0,000028	0,000147	0,000192
Podtlenek azotu (N ₂ O)	195	179	58,4	47,1

Z otrzymanych danych wynika, że II wariant procesu charakteryzuje się największą ilością powstającego podczas pakowania 1000 zgrzewek dwutlenku węgla (82076,4 g). Heksafluorek siarki jest emitowany w najwyższym stopniu w II wariacie, gdzie pakowarka zasilana jest wyłącznie energią z europejskiego miksu energetycznego oraz do pakowania użyto dwóch rodzaju folii (tab. 15). Najwyższą emisją metanu (0,000192 g) wyróżnia się wariant IV procesu. Podtlenek azotu osiąga najwyższe wartości emisji dla wariantu I procesu masowego pakowania butelek. Zmiana w ilościach emisji gazów wskazuje, że użycie w procesie pakowania folii z dodatkiem recyklatów wpływa na zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, heksafluorku siarki oraz podtlenku azotu. Dla wariantu IV emisja metanu osiąga najwyższą wartość, co związane jest z najwyższym zużyciem energii elektrycznej przez ten wariant procesu.

W kolejnej części badań symulacyjnych dokonano porównania wyników charakteryzowania dla czterech badanych wariantów procesu masowego pakowania. Z etapu charakteryzowania (tab. 16) wynika, że w wariacie II procesu potencjalnie największe negatywne oddziaływania występują w kategorii zmian klimatu (0,000127 DALY), zubożenia warstwy ozonowej ($5,21E-09$ DALY), a także toksyczności ($1,58E-05$ DALY). Dla wariantu I wartości te wynoszą odpowiednio 0,000126, $3,52E-09$ i $9,90E-06$ DALY, wariantu III $3,29E-05$, $1,53E-09$ i $2,58E-06$ DALY, a w wariacie IV – $3,67E-05$, $3,02E-09$ oraz $1,23E-05$ DALY. W pozostałych kategoriach, takich jak powstawanie fotochemicznych utleniaczy, tworzenie cząstek stałych najwyższe wartości oddziaływań posiada wariant I (odpowiednio $1,79E-08$ i $8,43E-05$ DALY). W przypadku promieniowania jonizującego najwyższy wpływ przypisuje się wariantowi IV ($2,53E-07$ DALY). Dla kategorii ekosystemów dominującym wskaźnikiem oddziaływań jest zmiana klimatu, dla której największą wartość otrzymano dla wariantu drugiego ($7,21E-07$ species.yr). Na wskaźnik zakwaszenia gleb oddziałuje na najwyższym poziomie wariant I, osiągając wartość wpływu $7,54E-09$ species.yr. Dla eutrofizacji wód słodkich, zajęcia terenów miejskich oraz przekształcenia terenu wariant II uzyskał najwyższą wartość wpływu (tab. 16). Dla wariantu IV najwyższe wyniki odczytano dla kategorii ekotoksyczność wód słodkich, ekotoksyczność wód morskich oraz zajęcie gruntów rolnych. Wariant III wpływa w największym stopniu na ekotoksyczność gleb ($4,63E-10$ species.yr). W przypadku kategorii wyczerpanie metali zaobserwowano najwyższy poziom oddziaływań wariantu III ($5,26E-02$ \$), natomiast dla wyczerpania paliw kopalnych wariantu I ($9,87$ \$).

Tab. 16. Wyniki charakteryzowania badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)

Kategoria szkód	Kategoria wpływu	Jednostka	Wariant I (P ₁ , F _{0r} , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	Wariant II (P ₂ , F _{0r} , F _{50r} , E _{Emix})	Wariant III (P ₁ , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})
Zdrowie ludzkie	zmiany klimatu, zdrowie ludzkie	DALY	0,000126	0,000127	3,29E-05	3,67E-05
	zubożenie warstwy ozonowej	DALY	3,52E-09	5,21E-09	1,53E-09	3,02E-09
	toksyczność	DALY	9,90E-06	1,58E-05	2,58E-06	1,23E-05
	powstawanie fotochemicznych utleniaczy	DALY	1,79E-08	1,42E-08	5,59E-09	2,30E-09
	tworzenie cząstek stałych	DALY	8,43E-05	3,39E-05	5,58E-05	1,04E-05
	promieniowanie jonizujące	DALY	8,01E-08	2,28E-07	2,81E-08	2,53E-07
Ekosystemy	zmiana klimatu, ekosystemy	species.yr	7,16E-07	7,21E-07	1,86E-07	2,08E-07
	zakwaszenie gleb	species.yr	7,54E-09	1,77E-09	5,90E-09	6,34E-10
	eutrofizacja wód słodkich	species.yr	7,71E-10	1,46E-09	1,31E-10	1,19E-09
	ekotoksyczność gleb	species.yr	4,02E-10	4,38E-10	4,63E-10	1,02E-10
	ekotoksyczność wód słodkich	species.yr	3,25E-10	5,28E-10	2,08E-10	6,11E-10
	ekotoksyczność wód morskich	species.yr	6,17E-11	1,02E-10	4,01E-11	1,16E-10
	zajęcie gruntów rolnych	species.yr	7,61E-09	1,98E-08	2,28E-09	2,22E-08
	zajęcie terenów miejskich	species.yr	4,11E-09	5,15E-09	3,59E-10	2,96E-09
	naturalne przekształcenie terenu	species.yr	3,24E-09	3,76E-09	2,40E-11	3,40E-09
Zasoby	wyczerpanie metali	\$	1,31E-02	1,60E-02	5,26E-02	3,78E-02
	wyczerpanie paliw kopalnych	\$	9,87	9,76	1,23	1,20

W tabeli 16. zestawiono udział procentowy poszczególnych kategorii wpływów w oddziaływaniach w obrębie trzech kategorii szkód: zdrowie ludzkie, jakość ekosystemów i zubożenie zasobów. Dla I wariantu 57,19% wpływu w zakresie zdrowia ludzkiego pochodzi ze zmian klimatu, 38,27% stanowi tworzenie cząstek stałych, mniej niż 5% to toksyczność, reszta kategorii wpływów stanowi mniej niż 1%. W II wariantcie 71,77% wpływu na szkody w zakresie zdrowia ludzkiego stanowi pogorszenie zdrowia ludzkiego będącego konsekwencją zmian klimatycznych, 19,16% – tworzenie cząstek stałych, 8,93% toksyczność, natomiast reszta wymienionych kategorii wpływu stanowi mniej niż 1%. Dla wariantu III największy wpływ na szkody w zakresie zdrowia ludzkiego wywołuje tworzenie cząstek stałych, co stanowi 61,11% wszystkich szkód. Pogorszenie stanu zdrowia związane z zmianami klimatu stanowi 36,03%, toksyczność 2,83%, pozostałe czynniki stanowią mniej niż 1%. Dla wariantu IV, podobnie jak I i II, zmiany klimatu stanowią najwyższy procent wszystkich szkód w zakresie zdrowia ludzkiego (61,52%). Toksyczność wywiera wpływ na poziomie 20%, tworzenie cząstek stałych 17,43%, pozostałe mniej niż 1%. Na szkody związane z pogorszeniem jakości ekosystemów największe wartości wpływu zauważono w obrębie zmian klimatu. Wszystkie cztery warianty charakteryzują się większym niż 90-procentowym wpływem wyczerpania paliw kopalnych na szkody w kategorii zasobów.

Z wyników przedstawionych w tabelach 15. i 16. można wnioskować, że zmiana rodzaju folii i zasilania procesu masowego pakowania butelek wpływa na zmianę w oddziaływaniach w poszczególnych kategoriach szkód. Zauważalne jest, że po zmianie rodzaju folii wartości wpływów na szkody w zakresie zdrowia ludzkiego maleją dla kategorii wpływu zmiany klimatu, które są dominującym czynnikiem oddziałującym w obrębie szkód na zdrowie ludzkie. W kategorii szkód ekosystemy użycie folii z dodatkiem recyklatów powoduje zmniejszenie oddziaływania w dominującej kategorii wpływu – zmiana klimatu. W kategorii szkód zasoby, zamiana polietylenowej folii na folię z dodatkiem recyklatów powoduje zmniejszenie wartości wpływów w obrębie wyczerpania paliw kopalnych. Z kolei zmiana zasilania procesu z elektrycznego na gazowe powoduje zmniejszenie wartości oddziaływań na zmiany klimatu w kategorii szkód zdrowie ludzkie. W zmianach klimatu zachodzących w kategorii szkód ekosystemy zauważalne jest zmniejszenie negatywnego wpływu w przypadku zasilania pieca grzewczego energią z europejskiego miksu energetycznego. W kategorii wpływu wyczerpanie paliw kopalnych wpływających na szkody w obrębie zasobów nie stwierdzono wpływu zmiany zasilania pieca grzewczego na wartości oddziaływań – otrzymane wyniki charakteryzują się zbliżonymi wartościami.

Tab. 17. Udział procentowy kategorii wpływów w oddziaływaniach w obrębie kategorii szkód dla procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)

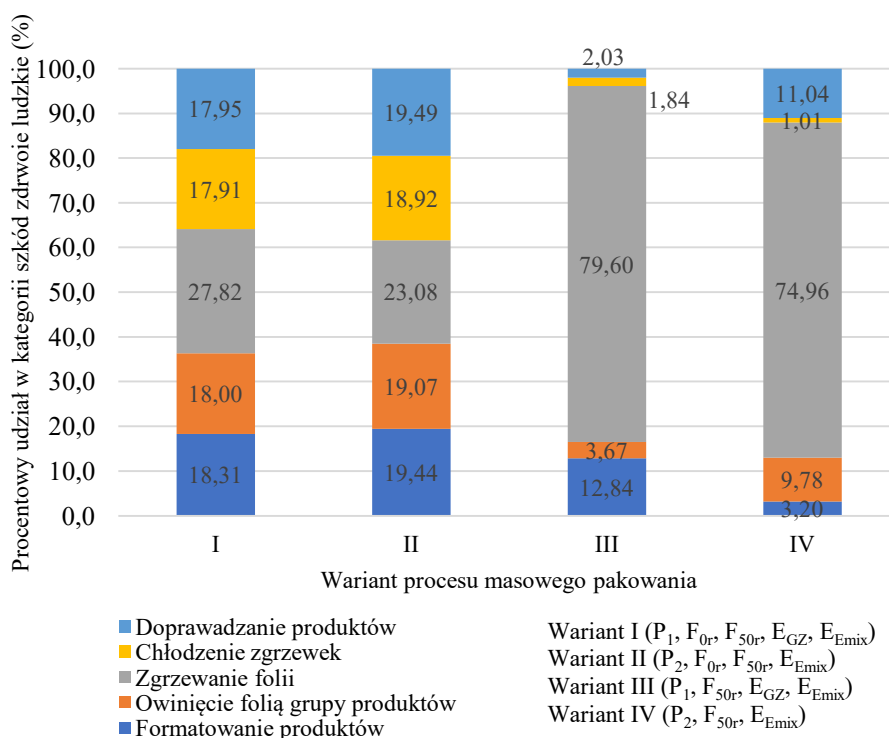
Kategoria szkód	Kategoria wpływu	Wariant I (P ₁ , F _{0r} , F _{50r} , EGZ, E _{Emix})	Wariant II (P ₂ , F _{0r} , F _{50r} , E _{Emix})	Wariant III (P ₁ , F _{50r} , EGZ, E _{Emix})	Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})
Zdrowie ludzkie	zmiany klimatu, zdrowie ludzkie	57,19	71,77	36,03	61,52
	zubożenie warstwy ozonowej	0,002	0,003	0,002	0,005
	toksyczność	4,49	8,93	2,83	20,62
	powstawanie fotochemicznych utleniaczy	0,01	0,01	0,01	0,004
	tworzenie cząstek stałych	38,27	19,16	61,11	17,43
	promieniowanie jonizujące	0,04	0,13	0,03	0,42
Ekosystemy	zmiana klimatu, ekosystemy	96,75	95,62	95,19	86,95
	zakwaszenie gleb	1,02	0,23	3,02	0,27
	eutrofizacja wód słodkich	0,10	0,19	0,07	0,50
	ekotoksyczność gleb	0,05	0,06	0,24	0,04
	ekotoksyczność wód słodkich	0,04	0,07	0,11	0,26
	ekotoksyczność wód morskich	0,01	0,01	0,02	0,05
	zajęcie gruntów rolnych	1,03	2,63	1,17	9,28
	zajęcie terenów miejskich	0,56	0,68	0,18	1,24
	naturalne przekształcenie terenu	0,44	0,50	0,01	1,42
Zasoby	wyczerpanie metali	0,13	0,16	4,10	3,05
	wyczerpanie paliw kopalnych	99,87	99,84	95,90	96,95

Kolejnym efektem przeprowadzonej analizy było pokazanie wartości całkowitego oddziaływania poszczególnych wariantów procesu na szkody w zakresie zdrowia ludzkiego, ekosystemów oraz zużycia zasobów. Porównanie systemów między sobą było możliwe poprzez użycie tej samej jednostki funkcjonalnej, granic systemu, jakości danych, reguły decyzyjności w zakresie danych wejściowych i wyjściowych oraz ocenie wpływu. Porównując potencjalne obciążenie otoczenia wywołane przez dane warianty procesu masowego pakowania butelek dla produkcji 1000 zgrzewek, w kategorii szkód: zdrowie ludzkie oraz zasoby, wariant I charakteryzuje się najwyższymi wartościami oddziaływań (tab. 18). W kategorii szkód wywoływanych na ekosystemach największe oddziaływanie na poziomie $7,54E-07$ species.yr wyznaczono dla wariantu II. We wszystkich trzech kategoriach szkód zmiana folii używanych w procesie masowego pakowania na tworzywo z dodatkiem recyklatu wpływa na zmniejszenie wartości oddziaływań. Z uzyskanych wyników widać, że zasilanie pieca grzewczego gazem wpływa na zwiększenie wartości oddziaływania w obrębie zdrowia ludzkiego i zasobów. Natomiast w kategorii szkód ekosystemy wartości oddziaływań są mniejsze dla wariantów procesów zasilanych gazowo.

Tab. 18. Wartości oddziaływań każdego z wariantów badanego procesu w trzech kategoriach szkód dla przyjętej jednostki funkcjonalnej (opracowanie własne)

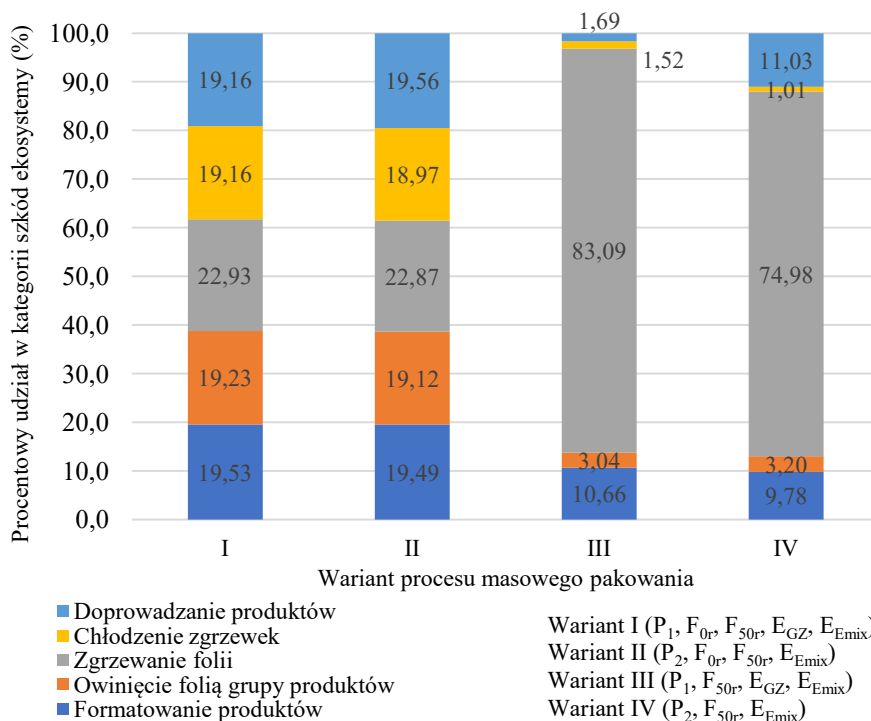
Kategoria szkód	Jednostka	Wariant badanego procesu	Wartość
Zdrowie ludzkie	DALY	Wariant I (P₁, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix})	2,20E-04
		Wariant II (P ₂ , F _{0r} , F _{50r} , E _{Emix})	1,77E-04
		Wariant III (P ₁ , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	9,13E-05
		Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})	5,97E-05
Ekosystemy	species.yr	Wariant I (P ₁ , F _{0r} , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	7,40E-07
		Wariant II (P₂, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix})	7,54E-07
		Wariant III (P ₁ , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	1,95E-07
		Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})	2,39E-07
Zasoby	\$	Wariant I (P₁, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix})	9,89
		Wariant II (P ₂ , F _{0r} , F _{50r} , E _{Emix})	9,77
		Wariant III (P ₁ , F _{50r} , E _{GZ} , E _{Emix})	1,28
		Wariant IV (P ₂ , F _{50r} , E _{Emix})	1,24

Analiza identyfikacji szkodliwości procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą obejmowała badanie wpływów jego pięciu etapów na każdą z kategorii szkód. W kategorii oddziaływania na zdrowie ludzkie najwyższy udział w negatywnych oddziaływaniach ma etap zgrzewania folii (23,08–79,6%) we wszystkich badanych wariantach procesu masowego pakowania butelek. Dla pozostałych etapów udział ten wynosił 3,20–19,44% dla formatowania produktów, 2,03–19,49% dla doprowadzania produktów, 3,67–19,07% dla owinięcia folią i 1,01–18,92% dla chłodzenia zgrzewek (rys. 48).



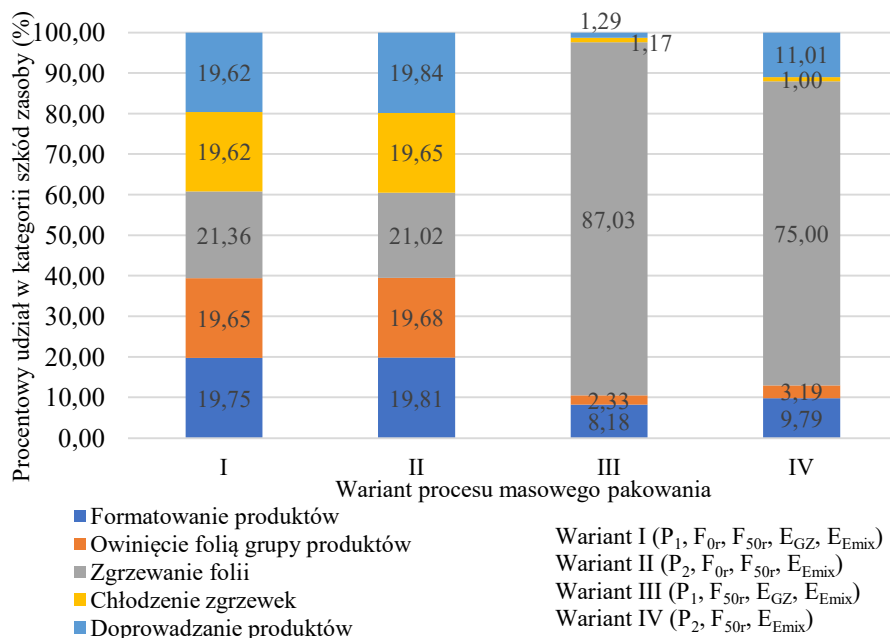
Rys. 48. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód zdrowie ludzkie w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne)

W kategorii szkód ekosystemy zauważalne są podobne zależności, jak we wcześniej omówionej kategorii szkód (rys. 49). Dla wszystkich wariantów etap zgrzewania folii charakteryzował się największym wpływem na wartości oddziaływań w tej kategorii (22,87–83,09%). Dla wariantów III i IV przedmiotowego procesu szkody wpływające na ekosystem na etapie zgrzewania folii są niemal czterokrotnie wyższe w odniesieniu do reszty etapów, natomiast dla wariantu I i II wartości oddziaływania na etapie zgrzewania są porównywalne z poziomami szkód reszty etapów w tych wariantach.



Rys. 49. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód ekosystemy w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne)

We wszystkich wariantach procesu masowego pakowania butelek największym oddziaływaniem w kategorii zubożenie zasobów charakteryzuje się etap zgrzewania folii, który generuje od 21,02 do 87,03% negatywnych oddziaływań w tej kategorii w zależności od wariantu (rys. 50). Niższe wartości udziału w następstwach środowiskowych w obrębie zubożenia zasobów odnotowano dla reszty etapów procesu masowego pakowania butelek, tj. doprowadzanie produktów (1,29–19,84%), formatowanie produktów (8,18–19,81%), owinięcie folią grupy butelek (2,33–19,68%), chłodzenie zgrzewek (1,0–19,65%).



Rys. 50. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód zubożenie zasobów w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne)

W rozpatrywanych trzech kategoriach szkód etap zgrzewania folii wywiera największy wpływ na otoczenie systemowe (tab. 19). W wariacie I etap ten wywiera wpływ na poziomie 6,23 Pt na kategorię szkód zdrowie ludzkie, 0,31 Pt dla ekosystemów oraz 7,96 Pt na zasoby. W II wariacie proces masowego pakowania butelek podczas etapu zgrzewania folii oddziałuje na zdrowie ludzkie i ekosystemy odpowiednio na poziomie 4,89 Pt oraz 7,82 Pt. Wartości tych oddziaływań są mniejsze niż dla wcześniejszego badanego wariantu procesu. W kategorii wpływu na ekosystemy wariant II oddziałuje na poziomie 0,31 Pt. Wariant III wyróżnia się najmniejszym obciążeniem we wszystkich trzech badanych kategoriach szkód. Relatywnie zbliżone, ale nieco wyższe wartości oddziaływań od wariantu trzeciego przypisano dla czwartej konfiguracji badanego procesu, w którym oddziaływanie na szkody w obrębie zdrowia ludzkiego wyznaczono na poziomie 1,31 Pt, w obrębie ekosystemu 0,08 Pt oraz 0,76 Pt dla kategorii zubożenie zasobów. Z otrzymanych wyników widać, że pakowanie butelek w folie z dodatkiem recyklatów wpływa na zmniejszenie wartości szkód we wszystkich trzech badanych kategoriach podczas etapu zgrzewania folii w procesie masowego pakowania butelek. Największe zmiany zauważalne są w kategorii szkód zasoby, gdzie podczas etapu zgrzewania folii następuje spadek szkód o ok. 7,1 Pt. W wariantach procesu, gdzie użyta została folia bez dodatków recyklatów, zmiana sposobu zasilania pieca grzewczego na gazowe spowodowało wzrost wartości wpływu na szkody w obrębie zdrowia

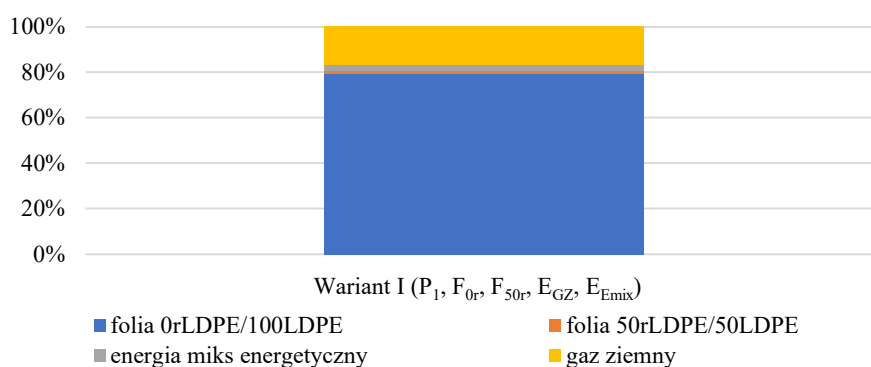
ludzkiego oraz zasobów. W przypadku ekosystemów wartości oddziaływań są na zbliżonym poziomie. Warianty procesu, w których butelki były pakowane w folie z dodatkiem recyklatów oraz etap zgrzewania zasilano gazem, charakteryzują się mniejszymi wartościami szkód na wszystkie trzy kategorie: zdrowie ludzkie, ekosystemy i zasoby.

Tab. 19. Wartości oddziaływań w trzech kategoriach szkód: zdrowie ludzkie, ekosystemy, zasoby poszczególnych etapów przyjętych czterech wariantów procesu masowego pakowania; etap I – doprowadzanie produktów, etap II – formatowanie produktów, etap III – owinięcie folią, etap IV – zgrzewanie folii, etap V – chłodzenie zgrzewek (opracowanie własne)

Kategoria szkód	Jednostka	Wariant procesu	Etap I	Etap II	Etap III	Etap IV	Etap V
Zdrowie ludzkie	Pt	Wariant I (P ₁ , F ₀ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	4,02	4,10	4,03	<u>6,23</u>	4,01
		Wariant II (P ₂ , F ₀ , F ₅₀ , E _{Emix})	4,13	4,12	4,04	4,89	4,01
		Wariant III (P ₁ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	0,016	0,10	0,03	0,63	0,15
		Wariant IV (P ₂ , F ₅₀ , E _{Emix})	0,193	0,6	0,17	1,31	0,02
Ekosystemy	Pt	Wariant I (P ₁ , F ₀ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	0,259	0,26	0,26	0,31	0,26
		Wariant II (P ₂ , F ₀ , F ₅₀ , E _{Emix})	0,266	0,27	0,26	<u>0,32</u>	0,26
		Wariant III (P ₁ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	0,000954	0,006	0,002	0,047	0,000862
		Wariant IV (P ₂ , F ₅₀ , E _{Emix})	0,0115	0,01	0,003	0,08	0,0105
Zasoby	Pt	Wariant I (P ₁ , F ₀ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	7,31	7,36	7,32	<u>7,96</u>	7,31
		Wariant II (P ₂ , F ₀ , F ₅₀ , E _{Emix})	7,38	7,37	7,32	7,82	7,31
		Wariant III (P ₁ , F ₅₀ , E _{GZ} , E _{Emix})	0,00921	0,012	0,02	0,62	0,00832
		Wariant IV (P ₂ , F ₅₀ , E _{Emix})	0,111	0,10	0,03	0,76	0,0101

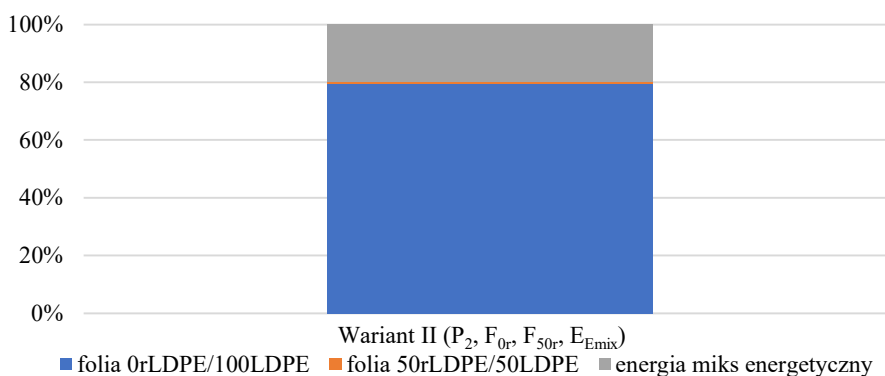
5.2.2.2. Wpływ parametrów procesu masowego pakowania butelek na emisję gazów cieplarnianych (śląd węglowy)

Następnym etapem badań symulacyjnych było wyznaczenie śladu węglowego dla badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek za pomocą metody IPCC 2021. Dla wariantu I (rys. 51) największy procentowy udział w powstawaniu śladu węglowego stanowi użycie do pakowania folii 0rLDPE/100LDPE (79,9%), 16,4% udziału to zużycie gazu w celu zasilenia pieca grzewczego, 2,7% energia z europejskiego mixsu energetycznego oraz 1% użycie folii 50rLDPE/50LDPE.



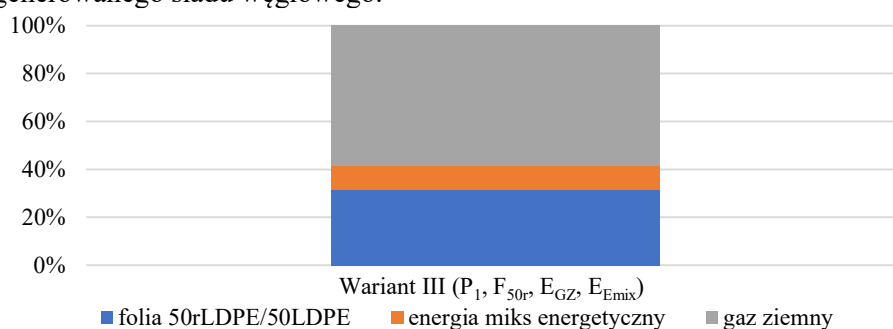
Rys. 51. Udział poszczególnych surowców w powstawaniu śladu węglowego dla wariantu I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne)

Analizując wyniki dla wariantu II (rys. 52), 79,6% wartości śladu węglowego pochodzi z użycia w procesie folii 0rLDPE/100LDPE. Zużycie w procesie energii elektrycznej pochodzącej z europejskiego mixsu energetycznego stanowi 19,3%, a zaledwie 1% przypisywany jest wykorzystaniu w pakowaniu folii 50rLDPE/50LDPE.



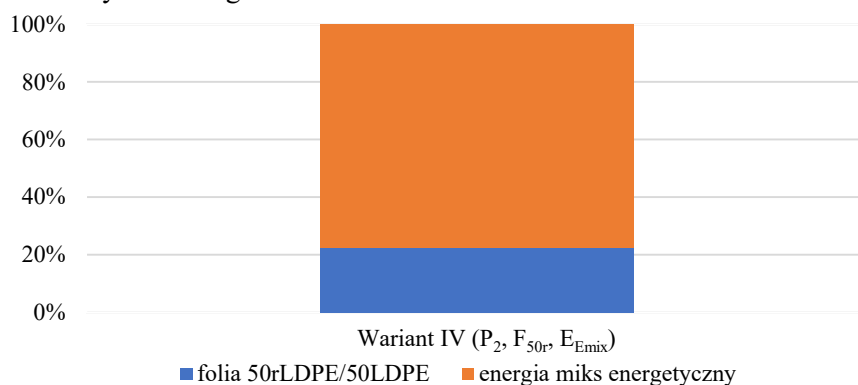
Rys. 52. Udział poszczególnych surowców w powstawaniu śladu węglowego dla wariantu II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą

W III wariacie badanego procesu masowego pakowania butelek (rys. 53) największy wpływ na wartość śladu węglowego miało zużycie gazu do zasilania pieca grzewczego (58,19%). Zużycie folii 50rLDPE/50LDPE odpowiada za 32,07%, a energii elektrycznej pochodzącej z miksu energetycznego – 9,87% generowanego śladu węglowego.



Rys. 53. Udział poszczególnych surowców w ilości śladu węglowego dla wariantu III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne)

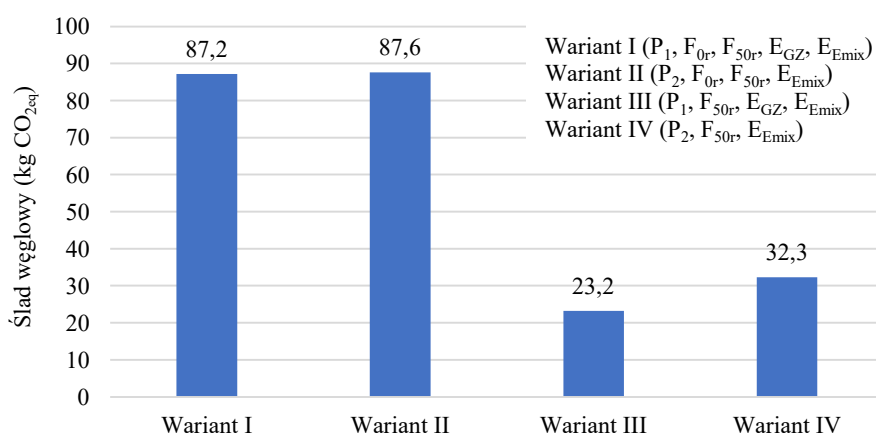
W IV wariacie procesu 77,09% wartości śladu węglowego pochodziło z użycia energii do zasilania maszyn (rys. 54). W tym przypadku użyta do owinięcia butelek folia 50rLDPE/50LDPE odpowiada za 23,03% całkowitej wartości wyznaczonego wskaźnika.



Rys. 54. Udział poszczególnych surowców w ilości śladu węglowego dla wariantu IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix}) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne)

Porównując uzyskane wyniki dla wszystkich czterech wariantów (rys. 55), znacznie mniejsze wartości śladu węglowego wyznaczono dla wariantów III i IV procesu masowego pakowania butelek, w których użyto folii 50rLDPE/50LDPE. Porównując wariant I i III, gdzie do zasilania pieca grzewczego użyto gazu, zauważalna jest różnica wartości śladu węglowego na poziomie ok. 60 kg emisji gazów cieplarnianych dla przyjętej jednostki

funkcjonalnej. Wariantem z najwyższą wartością śladu węglowego wśród analizowanych przypadków był wariant II, gdzie butelki były pakowane głównie w folię 0rLDPE/100LDPE i wszystkie maszyny zasilano energią elektryczną pochodzącą z europejskiego miksu energetycznego.



Rys. 55. Wyniki oceny śladu węglowego metodą IPCC 2021 badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek dla przyjętej jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne)

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiana wykorzystania w procesie masowego pakowania butelek folii 0rLDPE/100LDPE na folię 50rLDPE/50LDPE, a także zasilanie pieca grzewczego gazem, przyczynia się do zmniejszenia śladu węglowego wyrażonego jako ekwiwalent CO₂ w ustalonych granicach dla przyjętej w ramach analizy jednostki funkcjonalnej. W badanych czterech wariantach procesu najmniejszą wartością śladu węglowego na poziomie 23,2 kg CO_{2eq} charakteryzuje się III wariant przedmiotowego procesu, w którym zasilano piec grzewczy gazem i do pakowania butelek użyto tylko folii z dodatkiem recyklatów. Zmiana folii (na folię z dodatkiem recyklatów) powoduje zmniejszenie wartości śladu węglowego o ok. 50 kg przez obie pakowarki dla przyjętej jednostki funkcjonalnej, tj. 1000 zgrzewek.

5.2.3. Wpływ zmiany źródła pozyskiwania energii do zasilania procesu masowego pakowania butelek na jego szkodliwość

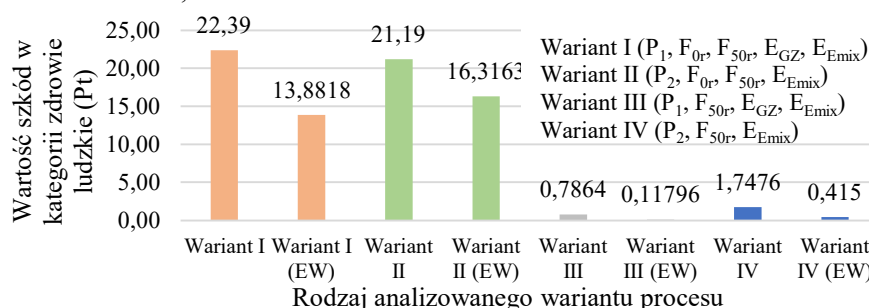
Chcąc wyznaczyć, jak zmienia się szkodliwość procesu w przypadku zmiany źródła energii do jego zasilania, zestawiono wartości poszczególnych wpływów omawianych wariantów procesu masowego pakowania z wariantem zasilania danego wariantu procesu za pomocą energii elektrycznej pochodzącej z pracy turbin wiatrowych. Do analizy przyjęto te same dane dotyczące ilości zużytego surowca i energii w procesie w ciągu rocznej produkcji, zmieniono tylko energię elektryczną z europejskiego miksu energetycznego,

wykorzystującego głównie paliwa kopalne, na energię pochodzącą ze źródła odnawialnego. Symulacje przeprowadzono dla założonej na wstępie jednostki funkcjonalnej – 1000 zgrzewek. Wyniki zebrano i przedstawiono w tabeli 19. Powstałe wyniki udowadniają, że zmiana źródła energii na niekonwencjonalne wpływa na zmniejszenie wszystkich wartości potencjalnych oddziaływań we wszystkich trzech badanych kategoriach szkód. W kategorii zdrowie ludzkie największy spadek wartości negatywnych oddziaływań, na który ma wpływ zmiana źródła energii zauważalny jest w wariantach IV przedmiotowego procesu podobnie jak w kategorii szkód w obrębie ekosystemów. Dla kategorii szkód zasoby we wszystkich badanych wariantach zauważalny jest spadek wartości oddziaływań nas poziomie 1\$ towarzyszący zasilaniu procesu energią odnawialną (tab. 20).

Tab. 20. Wyniki analizy porównawczej badanych wariantów procesu przy zmianie źródła energii elektrycznej (opracowanie własne)

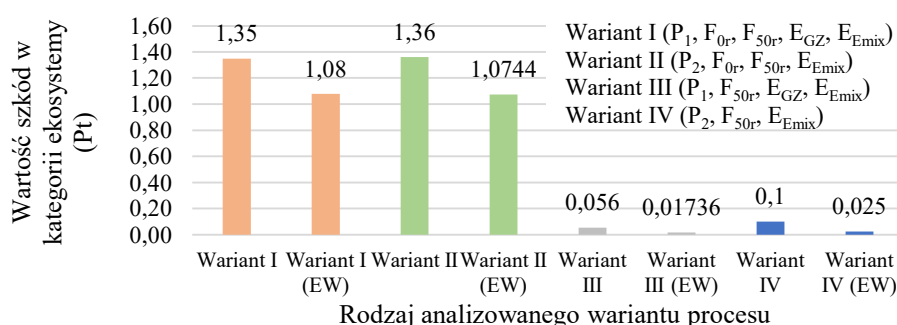
Kategoria szkód	Wariant procesu	Wartość
Zdrowie ludzkie (DALY)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	2,20E-04
	Wariant I (EW)	1,36E-04
	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	1,77E-04
	Wariant II (EW)	1,36E-04
	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	9,13E-05
	Wariant III (EW)	1,37E-05
	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})	5,97E-05
	Wariant IV (EW)	8,96E-06
Ekosystemy (species.yr)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	7,40E-07
	Wariant I (EW)	5,92E-07
	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	7,54E-07
	Wariant II (EW)	5,96E-07
	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	1,95E-07
	Wariant III (EW)	6,05E-08
	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})	2,39E-07
	Wariant IV (EW)	5,98E-08
Zasoby (\$)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	9,89
	Wariant I (EW)	8,90
	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	9,77
	Wariant II (EW)	8,89
	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	1,28
	Wariant III (EW)	0,24
	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})	1,24
	Wariant IV (EW)	0,22

We wszystkich badanych przypadkach zmiana źródła energii wpłynęła na zmniejszenie szkodliwości badanego procesu. W kategorii szkód na zdrowie ludzkie zmiana źródła energii elektrycznej powoduje zmniejszenie wartości wpływów dla każdego z czterech badanych wariantów procesu masowego pakowania (rys. 56). Największa różnica wartości szkód w kategorii zdrowie ludzkie zauważalna jest dla wariantu I, gdzie pierwotnie wynosiła 22,39 Pt, natomiast po zmianie źródła zasilania z tradycyjnego na energię pochodzącą z farmy wiatrowej wyniosła 13,88 Pt. W wariantach II zauważalny jest spadek oddziaływań w rozpatrywanej kategorii o 4,87 Pt, w wariantach III o 0,0668 Pt i w wariantach IV o 1,33 Pt.



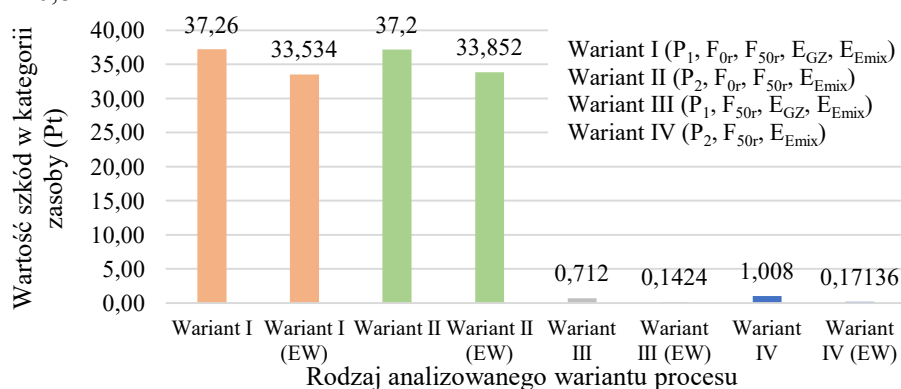
Rys. 56. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód zdrowie ludzkie (Pt) (opracowanie własne)

W kategorii szkód w obrębie ekosystemów również zauważalne jest zmniejszenie wartości następstw środowiskowych w przypadku zmiany źródła energii na farmy wiatrowe w każdym badanym wariantcie procesu masowego pakowania. Dla wariantu I odnotowano spadek o 0,27 Pt, dla II – o 0,29 Pt, III – o 0,04 Pt i IV – o 0,07 Pt (rys. 57). Podobnie jak w kategorii szkód zdrowie ludzkie, oddziaływanie w zakresie ekosystemów jest znacząco mniejsze dla wariantów, podczas których do pakowania butelek używana jest wyłącznie folia z dodatkiem recyklatów.



Rys. 57. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód ekosystemy (Pt) (opracowanie własne)

Porównując wyniki oddziaływania na zasoby (rys. 58), zmiana źródła energii na odnawialne wpływa na zmniejszenie oddziaływań każdego z badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek. Największą zmianę widać w przypadku wariantu I, gdzie oddziaływanie zmniejszyło się z 37,26 Pt do 33,53 Pt. W wariantcie II nastąpił spadek o 3,35 Pt, co stanowi spadek o ok. 10%. W wariantach III i IV odnotowano spadek w oddziaływaniu odpowiednio o 0,57 Pt i 0,84 Pt.



Rys. 58. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód zasoby (Pt) (opracowanie własne)

Uzyskane w ramach badań symulacyjnych wyniki oceny środowiskowej związane są w dużym stopniu z zużyciem energii elektrycznej z europejskiego mixu energetycznego, który np. w Polsce w ok. 40% stanowi energia z węgla kamiennego i ok. 20% z węgla brunatnego. Reszta składowych to energia produkowana z gazu ziemnego, gazu przemysłowego oraz elektrowni odnawialnych źródeł energii. Przeprowadzona w pracy analiza zmiany źródła zasilania maszyn na energię pochodzącą wyłącznie z elektrowni wiatrowych wykazała zmniejszenie negatywnego wpływu badanych wariantów procesu masowego pakowania we wszystkich kategoriach szkód. W trzech kategoriach szkód najniższymi wskaźnikami wartości potencjalnego oddziaływania charakteryzuje się wariant III procesu masowego pakowania butelek. Wyniki wskazują zatem, że dla obniżenia szkodliwości procesu masowego pakowania zasadne jest zwiększenie udziału energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii. Z korzyścią w obrębie oddziaływania na środowisko byłaby zatem inwestycja przez przedsiębiorstwo we własne źródło zasilania. Oczywiście należałoby tutaj uwzględnić aspekty opłacalności ekonomicznej takiego działania, tzn. sprawdzić, czy oszczędności w zakresie obniżenia rachunków za energię elektryczną i emisje CO₂ przewyższyłyby koszty inwestycyjne w stosunkowo krótkim czasie.

5.3. Wyniki badań przemysłowych

W badaniach przemysłowych analizowano i oceniono proces masowego pakowania butelek na podstawie opracowanych wskaźników opisanych w rozdziale 4.3. Ocenie poddano proces pakowania w czterech wariantach:

- a. wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki SP A-M w roku 2021, w którym wykorzystano folię 0rLDPE/100LDPE oraz folię 50rLDPE/50LDPE, etap zgrzewania folii zasilany był gazem, natomiast reszta etapów energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego;
- b. wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki VEGA HT100 w roku 2021, w którym wykorzystano folię 0rLDPE/100LDPE oraz folię 50rLDPE/50LDPE, etap zgrzewania folii, tak jak cały proces, był całkowicie zasilany energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego;
- c. wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) – dane pochodzące z pracy pakowarki SP A-M w roku 2022, w którym wykorzystano folię 50rLDPE/50LDPE, etap zgrzewania folii zasilany był gazem, natomiast reszta etapów energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego;
- d. wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix}) – dane pochodzące z pracy pakowarki VEGA HT100 w roku 2022, w którym wykorzystano folię 50rLDPE/50LDPE, etap zgrzewania folii, tak jak cały proces, był całkowicie zasilany energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego.

W wyznaczeniu wartości modeli matematycznych wskaźników oceny szkodliwości wykorzystano dane z tabel 2., 3., 14. oraz informacje uzyskane z przedsiębiorstwa, w którym realizowany jest przedmiotowy proces masowego pakowania butelek. Określono, że procentowy udział braków w postaci nieużytecznych zgrzewek (nienadających się do transportu), stanowi ok. 1% całkowitej ilości wyprodukowanych zgrzewek. Dla przejrzystości analizy wartości wskaźników zostały określone dla przyjętej jednostki funkcjonalnej w analizie LCA, czyli 1000 wyprodukowanych zgrzewek. Głównymi danymi wejściowymi do obliczenia wskaźnika całkowitego zużycia energii oraz wskaźnika energii jednostkowej były dane inwentarzowe zestawione w tabeli 2. i 3. Do wyznaczenia wskaźnika szkodliwości i efektywności procesu masowego pakowania wykorzystano dane o masie produktów użytecznych i braków. Wartości emisji CO_2 , SF_6 , CH_4 , N_2O wyznaczono na podstawie analizy LCA, co zostało omówione w rozdziale 5.2 (tab. 14). W tabeli 20. przedstawiono zestawienie danych wejściowych do wyznaczenia wymienionych wskaźników.

Tab. 21. Dane wejściowe do wyznaczenia wskaźników oceny szkodliwości procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne)

Dane wejściowe	Jednostka	Wartość			
		Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})
E_C	kWh	65,26	46,10	61,87	67,81
E_P	kWh	64,61	45,64	61,25	67,13
E_{JNR}	kWh	5,70	10,96	5,61	16,11
E_Z	kWh	58,34	34,23	55,08	50,34
E_{CH}	kWh	0,56	0,46	0,55	0,67
E_S	kWh	0,65	0,46	0,62	0,68
m_C	g	116359,01	117958,91	55160,88	56596,12
m_P	g	34996,5	34996,5	31254,3	31254,3
m_S	g	82199,01	82809,91	24575,88	25110,52
m_B	g	353,50	353,50	315,70	315,70
m_{CO_2}	g	80460,5	82076,4	23216,78	24663,31
m_{SF_6}	g	0,00498	0,00899	0,000713	0,00711
m_{CH_4}	g	0,00002	0,000028	0,000147	0,000192
m_{N_2O}	g	195	179	58,4	47,1

Na podstawie zebranych danych wyznaczono wartości wskaźników opisujących badany proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (tab. 22) umożliwiające porównanie czterech badanych wariantów procesu pakowania.

Tab. 22. Wartości wskaźników przedmiotowego procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)

Wskaźnik całkowitego zużycia energii (1)				
E_C (kWh)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})
		65,26	46,10	61,87
Wskaźnik energii jednostkowej procesu masowego pakowania dla produktów użytecznych (4)				
E_J (kWh/g)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})
		0,00186	0,00132	0,00198
Procentowy wskaźnik szkodliwości procesu (6)				
WS (%)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})
		69,62	70,03	42,77
Procentowy wskaźnik efektywności procesu (8)				
WEP (%)	Wariant I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$)	Wariant III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$)	Wariant IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix})
		30,08	29,67	56,66

Analizując powyższe wyniki dla 1000 powstałych w ramach procesu zgrzewek, najwyższym wskaźnikiem całkowitego zużycia energii oraz wskaźnikiem energii jednostkowej charakteryzuje się wariant IV. Najwyższym procentowym wskaźnikiem szkodliwości o wartości 70,03% charakteryzuje się wariant II przedmiotowego procesu, w którym do pakowania butelek użyto głównie folii 0rLDPE/100LDPE oraz cały proces był zasilany energią elektryczną z europejskiego miksu energetycznego. Najwyższym procentowym wskaźnikiem efektywności procesu charakteryzuje się wariant III (56,66%) procesu masowego pakowania butelek, w którym zastosowano tylko folię z dodatkiem recyklatów i gaz do zasilania pieca grzewczego. Analizując

uzyskane wyniki (tab. 22) wnioskować można, że użycie w procesie masowego pakowania butelek folii z dodatkiem recyklatów wpływa na zwiększenie wskaźnika efektywności. W wariantach procesu zasilanych wyłącznie energią z europejskiego miksu energetycznego (wariant II i IV) wskaźnik szkodliwości osiąga większe wartości, w odniesieniu do wariantów z gazowym zasilaniem pieca grzewczego. Analizując wskaźniki energii całkowitej oraz energii jednostkowej zauważalny jest fakt, że mniejsza wartość tych wskaźników nie wpływa na poprawę efektywności oraz zmniejszenie szkodliwości w obrębie analizowanego procesu pakowania, co zauważalne jest w wynikach otrzymanych dla wariantu II, w którym wskaźnik energii całkowitej i wskaźnik energii jednostkowej charakteryzują się najmniejszą wartością.

Otrzymane wyniki (tab. 22) udowadniają, że zasilanie pieca grzewczego gazem oraz pakowanie butelek w folie zawierające recyklaty przyczynia się do zwiększenia wskaźnika efektywności procesu masowego pakowania oraz do zmniejszenia wskaźnika szkodliwości, mimo zwiększenia wartości wskaźników energetycznych, tj. wskaźnika całkowitego zużycia energii oraz wskaźnika energii jednostkowej. Analizując poszczególne warianty można przyjąć, że wariantem charakteryzującym się najlepszą wartością oceny energetyczno-środowiskowej jest wariant III, dla którego wyznaczono największą wartość wskaźnika efektywności i najmniejszą wskaźnika szkodliwości. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że opracowane wskaźniki mają charakter użyteczny, aplikacyjny i mogą z powodzeniem służyć do oceny i porównania procesów przemysłowego, masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą. Opracowane modele dostarczają cennych informacji niezbędnych dla poprawy efektywności i zmniejszenia szkodliwości systemów pakujących.

6. Podsumowanie i wnioski

W ramach realizacji pracy doktorskiej zbadano wpływ cech i parametrów procesu pakowania butelek na szkodliwość w systemie technicznym. Powodem podjęcia tematu rozprawy był niedostateczny poziom wiedzy w zakresie analizy pakowania produktów w folię termokurczliwą, która opierałaby się nie tylko na analizie cyklu życia gotowego produktu, ale głównie koncentrowała się na ocenie oddziaływania cech i parametrów procesu podzielonego na etapy, na właściwościach mechanicznych użytego surowca w procesie oraz wyodrębnieniu procesowych modeli matematycznych wskaźników opisujących przedmiotowy proces z wykorzystaniem rzeczywistych danych z przemysłu. Osiągnięcie głównych założeń pracy było możliwe dzięki realizacji sześciu zadań badawczych polegających na:

- a) *przeprowadzeniu szczegółowej analizy stanu wiedzy i techniki, zebraniu i uporządkowaniu danych wejściowych wybranych faz cyklu życia masowego procesu pakowania butelek z napojami za pomocą folii termokurczliwej.*

Zadanie pierwsze zostało zrealizowane dzięki przeprowadzeniu szczegółowej analizy wiedzy z zakresu ocen szkodliwości procesów technologicznych oraz współczesnych opakowań, a także polityki zakładającej m.in. gospodarkę o obiegu zamkniętym;

- b) *opracowaniu modeli matematycznych wskaźników charakteryzujących badany proces masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.*

Drugie zadanie zostało zrealizowane poprzez opracowanie, na podstawie przeprowadzonych badań, wskaźników matematycznych opisujących przedmiotowy proces, do których należą:

- model wskaźnika całkowitego zużycia energii (1),
- model wskaźnika energii jednostkowej (4),
- model procentowego wskaźnika szkodliwości procesu (6),
- model procentowego wskaźnika efektywności procesu (8);

- c) *wyznaczeniu cech użytkowych oraz określeniu wpływu na końcowe parametry procesu pakowania stosowanych w przemyśle folii termokurczliwych, w tym folii zawierających dodatek w postaci recyklatów.*

Trzecie zadanie, które polegało na wyznaczeniu właściwości użytkowych folii oraz określeniu wpływu na końcowe parametry procesu pakowania stosowanych w przemyśle folii termokurczliwych, w tym folii zawierających recyklaty, zostało zrealizowane poprzez przeprowadzenie badań laboratoryjnych. Badania wykazały, że dostępne na rynku folie z dodatkiem recyklatów mogą i stają się coraz częściej zamiennikiem tradycyjnych folii termokurczliwych bez utraty właściwości niezbędnych do poprawnego użytkowania gotowych zgrzewek. Badania potwierdziły wpływ dodatku recyklatów w składzie folii na jej poszczególne właściwości użytkowe, potwierdzając informacje zawarte do tej pory w literaturze i dotyczące m.in. zmniejszenia wartości wytrzymałości na rozciąganie

w kierunku maszynowym przy wzroście ilości recyklatów w składzie folii oraz wzroście wartości kurczliwości, odporności na uderzenie, rozdieranie wraz ze zwiększeniem dodatku recyklatów;

- d) *identyfikacji dominujących szkodliwych oddziaływań poszczególnych etapów procesu masowego pakowania butelek z napojami oraz wyznaczeniu poziomów szkodliwości procesu masowego pakowania butelek na otoczenie systemu technicznego.*

Zadanie czwarte i piąte polegające na identyfikacji dominujących szkodliwych oddziaływań poszczególnych etapów procesu masowego pakowania butelek z napojami i wyznaczeniu poziomów szkodliwości zostało zrealizowane dzięki badaniom symulacyjnym wykonanym za pomocą programu SimaPro. Z badań wynika, że wariant I procesu, w którym etap zgrzewania folii zasilany był gazem oraz użyto głównie folii 0rLDPE/100LDPE, charakteryzował się najwyższym wpływem w zakresie szkód na zdrowie ludzkie oraz zasoby. Natomiast II wariant procesu, gdzie do zasilania użyto wyłącznie energii z europejskiego miksu energetycznego oraz głównie folię 0rLDPE/100LDPE, wykazał najwyższe potencjalne oddziaływanie w kategorii szkód na ekosystemy. Wykazano, że w każdym z czterech badanych wariantów procesu najbardziej energochłonnym i zarazem mającym największy wpływ na szkody w trzech badanych kategoriach ma etap zgrzewania folii. Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że zmiana folii, używanych w procesie masowego pakowania, na tworzywo z dodatkiem recyklatu wpływa na zmniejszenie wartości oddziaływań we wszystkich trzech kategoriach szkód. Zasilanie pieca grzewczego gazem wpływa na zwiększenie wartości oddziaływania w obrębie zdrowia ludzkiego i zasobów. Natomiast w kategorii szkód ekosystemy wartości oddziaływań są mniejsze dla wariantów procesów, gdzie użyto gazu do zasilania etapu zgrzewania folii. Badania polegające na wyznaczeniu śladu węglowego czterech wariantów procesu masowego pakowania wykazały, że zmiana źródła zasilania pieca grzewczego na gazowe oraz użycie folii z dodatkiem recyklatów wpływa na zmniejszenie wartości śladu węglowego. Wariantem o najniższej wartości tego wskaźnika był wariant III procesu masowego pakowania butelek, w którym etap zgrzewania folii zasilano gazem ziemnym, a butelki były owijane w folie zawierające w swoim składzie dodatek recyklatów;

- e) *opracowaniu nowych wskazań dla projektowania, zasilania, sterowania, monitorowania, a w konsekwencji i rozwoju systemów technicznych zawierających maszyny do masowego pakowania butelek.*

Ostatnie zadanie polegało na opracowaniu nowych wskazań dla projektowania, zasilania, sterowania, monitorowania, a w konsekwencji i rozwoju systemów technicznych zawierających maszyny do masowego pakowania butelek. Analiza wpływu poszczególnych cech oraz parametrów procesu masowego pakowania na szkodliwość w systemie technicznym

pozwołała zaproponować następujące postulaty dotyczące procesu masowego pakowania:

- całkowite zastąpienie w procesie masowego pakowania folii 0rLDPE/100LDPE foliami 50rLDPE/50LDPE, które przyczynią się do zmniejszenia negatywnego oddziaływania całego procesu na otoczenie systemowe, a zarazem realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym;
- modyfikację folii 100rLDPE/0LDPE w celu poprawienia jej właściwości mechanicznych. Na chwilę obecną powstałe w badaniach laboratoryjnych wyniki oraz obserwacje w ramach badań przemysłowych potwierdzają słusność braku możliwości przemysłowego stosowania ich w procesach masowego pakowania butelek;
- dążenie do minimalizacji zużycia energii, poprzez użycie energooszczędnych silników, w których zastosowano by materiał o wyższej przewodności elektrycznej np. zamiast aluminium użyto by miedzi, która posiada wyższą wytrzymałość termiczną, co w konsekwencji wpłynęłoby na dłuższą pracę silnika przy wyższych obciążeniach lub poprzez wykorzystanie serwonapędów, które stosowane są w celach regulacji prędkości oraz ustalenia kąta ustawienia wału serwosilnika w liniach produkcyjnych;
- popularyzowanie badań w zakresie oceny oddziaływania procesów technologicznych;
- zwiększenie udziału energii odnawialnej do zasilania zakładów przemysłowych. Jak udowodniono w badaniach symulacyjnych, zamiana konwencjonalnego źródła energii na niekonwencjonalne przyczynia się do zmniejszenia szkodliwości procesu w zakresie oddziaływania na trzy kategorie szkód, tj. zdrowie ludzkie, ekosystemy i zasoby.

Wnioski poznawcze

W ramach przeprowadzonego postępowania badawczego zrealizowano cel pracy, za który przyjęto badanie i analizę wpływu cech i parametrów procesu termokurczliwego masowego pakowania butelek z napojami na szkodliwość w systemie technicznym oraz opracowanie modeli matematycznych podstawowych wskaźników charakteryzujących przedmiotowy proces. Przeprowadzone w rozprawie badania stały się podstawą do udzielenia odpowiedzi na trzy wymienione na wstępie problemy inżynierii mechanicznej w postaci pytań, tj.:

1. ***Jakie są cechy konstrukcyjne termokurczliwych opakowań foliowych i jaki jest wpływ tych cech konstrukcyjnych na obciążenie środowiska technologicznego (naturalnego), w tym systemu technicznego maszyn i urządzeń procesów ich wytwarzania i eksploatacji?***

Do cech konstrukcyjnych termokurczliwych opakowań foliowych należy zawartość recyklatów w składzie badanych folii oraz grubość folii. Przeprowadzona analiza wykazała wpływ dodatku recyklatu w składzie folii termokurczliwej na jej cechy użytkowe. Badania laboratoryjne potwierdziły zmniejszenie m.in. wartości wytrzymałości folii na rozciąganie w kierunku maszynowym wraz ze wzrostem ilości recyklatów w składzie badanych w rozprawie folii (rozdział 5.1). Ponadto badania dowiodły, że zmiana w procesie masowego pakowania butelek folii na folię z dodatkiem recyklatów wpływa na obniżenie temperatury potrzebnej do jej obkurczenia podczas etapu zgrzewania oraz na oddziaływanie badanego procesu na trzy kategorie szkód, tj. zdrowie ludzkie, ekosystemy oraz zubożenie. Zmiana folii wpływa również na zmniejszenie śladu węglowego. Warianty procesu, w których butelki pakowano w folię z dodatkiem recyklatów wykazały mniejsze wartości śladu węglowego niż procesy, gdzie użyto głównie folię 0rLDPE/100LDPE (rozdział 5.2).

2. *Jakie są parametry procesów wytwarzania i eksploatacji termokurczliwych opakowań foliowych i jaki jest wpływ tych parametrów na obciążenie środowiska naturalnego maszyn i urządzeń procesów ich wytwarzania i eksploatacji?*

Do parametrów procesów wytwarzania i eksploatacji termokurczliwych opakowań foliowych należą: sposób zasilania procesu, rodzaj folii termokurczliwej, typ pakowarki, wysokość temperatury w piecu grzewczym podczas etapu obkurczania folii. Na podstawie przeprowadzonej analizy zauważalne jest, że użycie do pakowania butelek folii z dodatkiem recyklatów wpływa na obniżenie temperatury w piecu grzewczym niezbędnej do obkurczenia jej wokół pakowanych produktów. Zmiana ta wpływa na zmniejszenie negatywnych oddziaływań na otoczenie w trzech badanych kategoriach szkód, tj. zdrowie ludzkie, ekosystemy, zubożenie zasobów (tab. 18) oraz zmniejszenie wartości śladu węglowego (rys. 55). Analizując kolejny parametr, jakim jest sposób zasilania procesu, zauważalny jest fakt zwiększenia oddziaływań na otoczenie w obrębie zdrowia ludzkiego oraz zasobów w wariantach procesu, w których piec grzewczy zasilany był gazem (tab. 18). W realizowanych badaniach rodzaj pakowarki wykazał również istotny wpływ na wartości szkodliwości. Dla pakowarki SP A-M wykazano większe wartości oddziaływań procesu na szkody w obrębie zdrowia ludzkiego oraz zasobów. Natomiast dla oddziaływań na ekosystemy pakowarka Vega HT100 osiąga większe wartości negatywnych oddziaływań. Podobnie wyniki prezentują się dla wyznaczonego śladu węglowego (rys. 55). Warianty procesów z wykorzystaniem pakowarki SP A-M wyróżniają się mniejszymi wartościami śladu węglowego w porównaniu z wariantami z pakowarką Vega HT100. Przeprowadzone działania badawcze pozwoliły wykazać,

że typ folii użytej w procesie pakowania butelek oddziałuje na wartości szkodliwości badanego procesu. Zmiana typu folii na folię z dodatkiem recyklatów wpływa na zmniejszenie wartości śladu węglowego, oddziaływania w obrębie wszystkich trzech badanych szkód, zmniejszenie temperatury potrzebnej do obkurczenia folii wokół butelek oraz na zwiększenie wartości autorskiego wskaźnika efektywności procesu, co potwierdzają wyniki zaprezentowane w rozdziale 5. niniejszej rozprawy.

3. Czy zastosowanie nowego tworzywa konstrukcyjnego do produkcji opakowań foliowych wpłynie na zwiększenie efektywności w procesie masowego pakowania butelek do napojów oraz przyczyni się do zmniejszenia negatywnych skutków przedmiotowego procesu?

W badanym procesie masowego pakowania butelek wariantem o najwyższej wartości szkodliwości w kategorii zdrowie ludzkie oraz zasoby jest wariant I procesu. W odniesieniu do szkodliwości w obrębie ekosystemu był wariant II. W obu tych wariantach do pakowania butelek użyto głównie folii bez dodatków recyklatu, co wskazuje, że zastosowanie nowego tworzywa konstrukcyjnego (folii z dodatkiem recyklatów) wpływa na zmniejszenie negatywnych oddziaływań procesu na otoczenie. Ponadto, jak dowiodły badania zaprezentowane w rozdziale 5.3, zmiana tworzywa do pakowania na folię z dodatkiem recyklatów powoduje zwiększenie wskaźnika efektywności oraz zmniejszenie wskaźnika szkodliwości badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek.

Zrealizowanie założeń rozprawy doktorskiej pozwoliło na wykazanie, że na podstawie identyfikacji głównych źródeł negatywnych oddziaływań badanego procesu na otoczenie, możliwe staje się zaproponowanie i wdrożenie zmian w celu ich minimalizacji.

Wnioski aplikacyjne

Zaproponowane w pracy modele matematyczne wskaźników opisujących przedmiotowy proces mogą zostać wykorzystane na etapie eksploatacji maszyn pakujących, niezbędnych w procesie masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.

Przeprowadzona analiza szkodliwości procesu masowego pakowania wykazała, że jego najbardziej energochłonnym etapem jest moment zgrzewania folii. W celu zmniejszenia ilości energii potrzebnej na tym etapie procesu, szczególnie ważna jest odpowiednio zaplanowana produkcja bez przerw, które powodują straty ciepła poprzez spadek temperatury w komorze, a także odpowiednia izolacja komór grzewczych. Wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjno-procesowej polegającej na wymianie silników na energooszczędne, przyczyni się nie tylko do zaoszczędzenia energii, ale również znajdzie swoje odzwierciedlenie w poprawie efektywności badanego procesu.

Dodatkowo, aby zmniejszyć szkodliwość tego etapu, a zarazem całego procesu, warto zamienić energię pochodzącą ze źródeł tradycyjnych na energię pozyskaną np. z wiatru czy innego odnawialnego źródła. W celu obniżenia energochłonności procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą powinno dążyć się do zwiększenia sprawności poszczególnych elementów pakowarek m.in. układów mechanicznych. Wpłyne to na poprawę efektywności wykorzystania pobieranej z sieci energii elektrycznej zasilającej maszyny.

W konsekwencji przeprowadzonych działań badawczych i analizy wyników zaleca się również szersze zastosowanie folii 50rLDPE/50LDPE w procesach masowego pakowania, zastępując przy tym nadal stosowane folie 0rLDPE/100LDPE. Przyczyni się to równocześnie do mniejszego szkodliwego oddziaływania procesu na otoczenie oraz prawidłowego zagospodarowania odpadów foliowych. Taka modyfikacja idealnie wpasowuje się w idee gospodarki o obiegu zamkniętym, której główne zamierzenia koncentrują się na racjonalnym wykorzystaniu zasobów oraz ograniczeniu negatywnego wpływu na otoczenie wytwarzanych produktów, które powinny, tak samo jak materiały i surowce, być używane w gospodarce najdłużej, jak to jest możliwe.

Wnioski rozwojowe

Ważną kwestią jest kontynuowanie rozważań nad szkodliwością procesów technologicznych z wykorzystaniem folii termokurczliwych. Dalsze badania w zakresie procesów oraz eksploatacji maszyn pakujących butelki w folię termokurczliwą powinny być kontynuowane w zakresie modyfikacji używanych w procesie folii, w tym również możliwym użyciu produktów biodegradowalnych. Zaleca się również kontynuowanie badań mających na celu zmniejszenie szkodliwości oraz zwiększenie efektywności przedmiotowego procesu przy równoczesnym obniżeniu zużycia energii i surowców niezbędnych do jego przeprowadzenia. Ponadto powinno się pogłębić rozważania w zakresie poprawy właściwości folii 100rLDPE/0LDPE, aby w przyszłości mogły stać się alternatywą dla tradycyjnych folii stosowanych w procesach masowego pakowania butelek.

LITERATURA

- [1] Abbate E., Rovelli D., Andreotti M., Brondi C., Ballarino A., 2022. Plastic packaging substitution in industry: variability of LCA due to manufacturing countries, *Procedia CIRP*, 105, 392-397.
- [2] Alaerts, L., Augustinus, M., Van Acker K., 2018. Impact of Bio-Based Plastics on Current Recycling of Plastics. *Sustainability*, 10, 1487.
- [3] Alverta M., Helmers E., Pehlken A., 2020. Impacts of life cycle inventory databases on life cycle assessments: A review by means of a drivetrain case study. *J. Clean. Prod.*, 269, 121329.
- [4] Ankiel M., Grzybowska-Brzezińska M., 2020. Wartość informacyjna opakowań jako determinanta zakupu żywności. *Marketing Instytucji Naukowych i Badawczych*, 36, 31-44.
- [5] Ankiel M., Wojciechowska P., Wiszumirska K., 2021. Innowacje opakowaniowe na rynku produktów konsumpcyjnych. *Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu*, 51-64.
- [6] Bajdur W., Idzikowski A., Salamon S., 2010. Możliwości zastosowania ekologicznej oceny cyklu życia procesów wytwórczych w projektowaniu systemów zarządzania ochroną środowiska. *Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją*, tom IX.
- [7] Bałdowska-Witos, P.; Piotrowska, K.; Kruszelnicka, W.; Błaszczak, M.; Tomporowski, A.; Opielak, M.; Kasner, R.; Flizikowski, J., 2020. Managing the Uncertainty and Accuracy of Life Cycle Assessment Results for the Process of Beverage Bottle Moulding. *Polymers*, 12, 1320.
- [8] Barahmand Z., Eikeland M.S., 2022. Life Cycle Assessment under Uncertainty: A Scoping Review. *World*, 3, 692-717.
- [9] Baran B., 2019. The Circular Economy in EU Policy as a Response to Contemporary Ecological Challenges. *Gospodarka Narodowa* 4(300), 31-51.
- [10] Bernardo C.A., Simões C.L., Costa Pinto L.M., 2016, Environmental and Economic Life Cycle Analysis of Plastic Waste Management Options. A Review. *AIP Conference Proceedings* 1779, 140001.
- [11] Białasz S., Garbacz Ł., 2020. Charakterystyki wytwarzania folii polimerowych w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem, *Mechanik*. 04/2019, 230-233.
- [12] Bieniek A., 2019. Rola opakowań transportowych w łańcuchu logistycznym. *Journal of TransLogistics* 5, 1, 155-163.
- [13] Biuro Analiz, Dokumentacji i Korespondencji, 2020. Emisja gazów cieplarnianych. Wybrane zagadnienia dotyczące emisji CO₂ w Polsce, Warszawa.
- [14] Błędzki A., 1997 *Recykling materiałów polimerowych*, Warszawa, 75.
- [15] Bohlmann G., 2004. Biodegradable packaging life-cycle assessment. *Environmental Progress*, 23, 342- 346.
- [16] Brankatschk G., Finkbeiner M., 2014. Application of the Cereal Unit in a new allocation procedure for agricultural life cycle assessments, *Journal of Cleaner Production*, 73, 72-79.
- [17] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., 2000. Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych, *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*, Warszawa, 189-252

- [18] Bulle C., Margni M., Patouillard L. et al., 2019. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *Int J Life Cycle Assess* 24, 1653-1674.
- [19] Cao V., Margni M., Favis D., Deschênes L., 2015. Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services. *Journal of Cleaner Production*, 94, 56-66.
- [20] Choi B., Yoo S., Park S., 2018. Carbon Footprint of Packaging Films Made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT Blends in South Korea. *Sustainability*, 10, 2369.
- [21] Costamagna M., Massaccesi B., Mazzucco D., Baricco M., Rizzi P., 2023. Environmental assessment of the recycling process for polyamides – Polyethylene multilayer packaging films, *Sustainable Materials and Technologies*, 35.
- [22] Czarnecka-Komorowska D., Wiszumirska K., 2019. Zrównoważone projektowanie opakowań z tworzyw sztucznych w gospodarce cyrkularnej. *Polimery*, Warszawa, 65.
- [23] Czerniawski B., 2007. Analysis of plastics packaging domestic market. *Polimery*, 52 (11-12), 811-819.
- [24] Czernik M., Hynowski B., Michałowski, M. Piasecki, J. Tomaszewska, J. Michalak, 2021. Analiza wpływu na środowisko produkcji gipsu budowlanego z wykorzystaniem naturalnego gipsu i gipsu z odsiarczania spalin w polskich warunkach, *Cement Wapno Beton*, 26(2), 134-145.
- [25] Ćwiąkała-Małys A., Nowak W., 2009. Wybrane metody pomiaru efektywności podmiotu gospodarczego, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- [26] Deborah N., Huntzinger T., 2009. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies, *Journal of Cleaner Production*, 17, 7, 668-675.
- [27] Degórska A., Gendolla T., Iwanek J., Karska L., Kobus D., Liana E., Mitosek G., Śnieżek T., Toczko B., 2011. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce w 2009 roku na tle wielolecia. *Inspekcja Ochrony Środowiska*, Warszawa.
- [28] Delnavaz M., Sahraei A., Delnavaz A., Farokhzad R., Amiri S., Bozorgmehrnia, S., 2022. Production of concrete using reclaimed water from a ready-mix concrete batching plant: Life cycle assessment (LCA), mechanical and durability properties, *Journal of Building Engineering*, 45, 2022, 103560.
- [29] Diakun J., 2019. Normalizacja w obszarze bezpieczeństwa maszynowego, *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego* 4(28), 32- 36.
- [30] Dormer A., Finn D., Ward P., Cullen J., Carbon footprint analysis in plastics manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 51, 133-140.
- [31] Drabczyk M., Kruczek B., 2016. Wpływ dodatku materiału nieprzetwarzalnego na wytrzymałość na rozciąganie folii LDPE, *Problemy Nauk Stosowanych*, 4, 73-78.
- [32] Drozd R., Piwnik J., 2019. Modele matematyczne jakości procesów na przykładzie branży piekarniczej, *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, 24, 4, 232-241.
- [33] Drzewiecka B., Janczewska D., 2019. Wybrane problemy logistyki produkcji w przedsiębiorstwach MŚP, *Zarządzanie innowacyjne w gospodarce i biznesie* nr 1(28)/2019.

- [34] Earles J.M., Halog A., 2011. Consequential life cycle assessment: a review, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(5), 445-453.
- [35] Emblem A., Emblem H., 2014. *Technika opakowań: podstawy, materiały, procesy wytwarzania*, Wydawnictwo Nauk. PWN.
- [36] Fantke P., Jolliet O., 2016. Life cycle human health impacts of 875 pesticides. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21,722-733.
- [37] Figueiredo K., Pierott R., Hammad A., Haddad A., 2021. Sustainable Material Choice for Construction Projects: A Life Cycle Sustainability Assessment Framework Based on BIM and Fuzzy-AHP. *Build. Environ*, 196, 107805.
- [38] Foschi E., Zanni S., Bonoli A., 2020. Combining Eco-Design and LCA as Decision-Making Process to Prevent Plastics in Packaging Application. *Sustainability*, 12, 9738.
- [39] Garcia, B., Rosique, C., Aguado-Giménez, F., García J., 2019. Life Cycle Assessment of Seabass (*Dicentrarchus labrax*) Produced in Offshore Fish Farms: Variability and Multiple Regression Analysis. *Sustainability* 2019, 11, 3523.
- [40] Ghosh T., Bakshi B., 2020. Designing Hybrid Life Cycle Assessment Models Based on Uncertainty and Complexity. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 25, 2290–2308.
- [41] Gibas E., 2014 *Przetwórstwo Tworzyw 3*, 224-232
- [42] Gierlotka S., 2020. Wpływ dwutlenku węgla wytwarzanego z kopalni energetycznych na efekt cieplarniany – prawda i mity. *Napędy i sterowania*, 6, 78-89.
- [43] Górka K., 2007. Wdrażanie koncepcji rozwoju zrównoważonego i trwałego. *Ekonomia i Środowisko* 2 (32).
- [44] Górzyński J., 2007. *Podstawy analizy środowiskowej wyrobów i obiektu*. Wydawnictwo WNT, 62.
- [45] Grzesik K., 2006. Wprowadzenie do oceny cyklu życia (LCA) – nowej techniki w ochronie środowiska. *Inżynieria Środowiska*, 11, 1, 101-113.
- [46] Gutierrez M.M., Meleddu M., Piga A., 2017. Food losses, shelf-life extension and environmental impact of a packaged cheesecake: A life cycle assessment. *Food Res. Int.*, 91, 124-132.
- [47] Hahladakis J.N., Iacovidou, E., 2018. Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Sci. Total Environ.*, 630, 1394-1400.
- [48] He X., Wang X., Liu Y., Fang H., Zheng S., Liu H., Guan W., Yan R., 2022. Biodegradable PBAT/PLA packaging maintained the quality of postharvest shiitake mushroom by modified humidity and atmosphere, *Food Packaging and Shelf Life*, 34.
- [49] Henclik A., Bajdur M., 2011. Zastosowanie wybranych metod oceny wpływu cyklu życia procesu produkcji flokulantu syntezowanego z odpadów żywicy fenolowoformaldehydowej na jakość środowiska, *Środkowo-pomorskie towarzystwo naukowe ochrony środowiska, Rocznik Ochrona Środowiska*, 13, 1809-1822.
- [50] Höglund-Isaksson, L., 2012. Global anthropogenic methane emissions 2005-2030: technical mitigation potentials and costs. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 9079-9096.
- [51] Huijbregts M. et al., 2017. Department of Environmental Science, Radboud University Nijmegen.

- [52] Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F. et al., 2017. ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level *Int J Life Cycle Assess* 22, 138-147.
- [53] Idzikowski A., Cierlicki T., Bałdowska Witos P., Piasecka I., 2021. Impact World+ a new method for life cycle assessment, *Scienco, QPI* 2021, 3, 77-83.
- [54] Idzikowski, A., Walichnowska, P., 2022. The Management of the Technological Process of a Product on the Example a Shrink Film in the Aspect Life Cycle Assessment. *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*, 4(1), 1-9.
- [55] Instrukcja obsługi pakowarki SP A-M.
- [56] Instrukcja obsługi pakowarki Vega.
- [57] Jackson R. B., Le Quere C., Andrew R. M., Canadell J. G., Peters G. P., Roy J., Wu L., 2017. Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions. *Environmental Research Letters*, 12, 11, 110202.
- [58] Janicka J., Koźmińska R., 2009. Tekstylnia w materiałach kompozytowych. *Techniczne Wyroby Włókiennicze*, 20-28.
- [59] Jarosz Z., Faber A., Syp A., 2013. Ocena zmian wielkości emisji gazów cieplarnianych po zmianie profilu gospodarstwa z konwencjonalnego na ekologiczny, *Woda-środowisko-obszary wiejskie 2013 (X–XII)*. 13, 4 (44).
- [60] Kalverkamp M., Helmers E., Pehlken A., 2020 Impacts of life cycle inventory databases on life cycle assessments: A review by means of a drivetrain case study. *J. Clean. Prod.*, 269, 121329.
- [61] Kamińska E., Merkiś J., Kamiński T., 2013. Wykorzystanie metody LCA do szacowania poziomu obciążeń środowiska związanych z odzyskiem ołowiu z surowców wtórnych, *Chemicz* 2013, 67, 10, 963-970.
- [62] Kamińska E., Skarbek-Żabkin A., 2015. Analizy ekobilansowe w szacowaniu obciążeń środowiska/Eco-balance analysis in estimating environmental burdens, 1, 49-66.
- [63] Kawecka A., Cholewa-Wójcik A., 2017. Jakość opakowania jako determinanta bezpieczeństwa żywności w kontekście wymagań społecznych konsumentów. *Żywność Nauka Technologia Jakości*, 112, 138-148.
- [64] Kijewska A., Bluszcz A., 2017. Analiza poziomów śladu węglowego dla świata i krajów UE. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 6, 2, 169-177.
- [65] Kłodziński A., Jakubowska P., 2010. Folie wytwarzane z dodatkiem recyklatów – przetwórstwo, właściwości, *Inż. Ap. Chem.* 2010, 49, 5, 61-62.
- [66] Kłodziński A., Jakubowska P., 2012. Właściwości mechaniczne folii poużytkowych stosowanych w rolnictwie, *Inż. Ap. Chem.* 2012, 51, 5, 231-232.
- [67] Kłodziński A., Jakubowska P., 2013. Ocena zgrzewalności polipropylenowych folii orientowanych. *Przetwórstwo Tworzy*, tom r. 19, 3 (153), 195-200.
- [68] Kłós Z., Kasprzak J., Karczewski P., 2010. Ocena oddziaływań środowiskowych wybranych maszyn, urządzeń i systemów wykorzystywanych w przetwórstwie żywności, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 55, 3, 179-182.
- [69] Kociszewski M., Szwacka-Mokrzycka J., 2011. Uwarunkowania rozwoju przemysłu spożywczego po przystąpieniu Polski do UE. *Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie. Problemy Rolnictwa Światowego*, tom 11(26), 67-77.
- [70] Koinig G., Grath E., Barretta C., Friedrich K., Vollprecht D., Oreski G., 2022. Lifecycle Assessment for Recycling Processes of Monolayer and Multilayer Films: A Comparison. *Polymers*, 14, 3620.

- [71] Kojnoková T., Markovičová L., Nový F., 2020. The changes of LD-PE films after exposure in different media. *Production Engineering Archives*, 26(4), 185-189.
- [72] Koliński A., 2011. Przegląd metod i technik oceny efektywności procesu produkcyjnego, Wydawnictwo Szkoły Logistyki w Poznaniu, Poznań.
- [73] Korhonen J., Nuur C., Feldmann A., Birkie S, 2018. Circular economy as an essentially contested concept, *Journal of Cleaner Production*, Volume 175, 544-552.
- [74] Kulczycka J., 2011. Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- [75] Kulczycka J., Henclik A., 2006. LCA uniwersalną techniką zarządzania środowiskowego. *Przegląd Górniczy*, 4, 43-47.
- [76] Kurzydło M., 2014. Możliwość zastosowania techniki LCA do oceny wpływu na środowisko odpadów przemysłowych i energetycznych, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 17(4), 597-617.
- [77] Kuzia A., 1978. System pakowania w folie kurczliwe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [78] Lenzen M., Munksgaard J., 2002. Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines - review and applications, *Renewable Energy*, 26, 3, 339-362.
- [79] Lisińska- Kuśnierz M., 1992. Wybrane zagadnienia z przechowalnictwa towarów, Wydawnictwo akademicko-ekonomiczne w Krakowie, Kraków.
- [80] Lisińska-Kuśnierz M., Kawecka A., 2012. Zapewnienie bezpieczeństwa opakowań produktów żywnościowych w łańcuchu dostaw. *Handel Wewnętrzny*, 1, 60-68.
- [81] Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Alvarez J., Bilbao J., Olazar M., 2018. Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 576-596.
- [82] Lucchetti M., Paolotti L., Rechi L., Boggia A., 2019. The Role of Environmental Evaluation within Circular Economy: An Application of Life Cycle Assessment (LCA) Method in the Detergents Sector. *Environmental and Climate Technologies*, 23, 2, 238-257.
- [83] Mahmud R., Moniruzzaman Moni S., High K., Carbajales-Dale M., 2021. Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design – A review, *Journal of Cleaner Production*, 317, 128247.
- [84] Majewski J., Sobolewska A., 2018. Comparative lifecycle assessment of apple packaging. *Proceedings of the International Scientific Conference "Economic Sciences for Agribusiness and Rural Economy"*, 2, 340–346.
- [85] Majid I., Nayik G.A., Dar S.M., Nanda V., 2018. Novel food packaging technologies: Innovations and future prospectives. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17, 454-462.
- [86] Malaczewski M., 2017. Warunki przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii, *Gospodarka Narodowa*, 1(287), 33-51.
- [87] Marcinkowski A., Kowalski A. M., 2012. The problem of preparation the food packaging waste for recycling in Poland, *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 10–16.

- [88] Międzynarodowe Amerykańskie Towarzystwo Badania Materiałów, 2014. Standard Test Method for Unrestrained Linear Thermal Shrinkage of Plastic Film and Sheeting. ASTM D2732.
- [89] Nabavi-Pelesaraci A., Rafiee S., Mohtasebi S., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Chau K., 2019. Comprehensive Model of Energy, Environmental Impacts and Economic in Rice Milling Factories by Coupling Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Life Cycle Assessment. *J. Clean. Prod.*, 217, 742-756.
- [90] Nair P., 2005. Shrink packaging, In Winter School manual on 'Current trends in packaging of fish and fishery products', organized by Cochin, 148-151.
- [91] Nowak W., Podsiadło H., 2018. Wpływ promieniowania słonecznego na wybrane właściwości optyczne folii celulozowych bez i z nadrukiem, *Nauka niejedno ma imię*, 6, 39-51.
- [92] Nowotyńska I., Grabowska G., Zdeb M., 2018. Analiza porównawcza wybranych opakowań z tworzyw sztucznych. *Autobusy* 12, 936-940.
- [93] Panev P., 2019. Analysis of Film Types for Packaging Processes, *Bulgarian Academy of Sciences, Problems of engineering cybernetics and robotics*, 71, 57-64.
- [94] Parlament Europejski, 1994. Dyrektywa 94/62/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 20 grudnia 1994 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych.
- [95] Parmenter D., 2010. Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI). Gliwice: Helion.
- [96] Patel R., Karjala T., Savargaonkar N., Salibi P., Liu L., 2019. Fundamentals of structure–property relationships in blown films of linear low-density polyethylene/low density polyethylene blends. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 35(4), 401-421.
- [97] Pauer E., Tacker M., Gabriel V., Krauter V., 2020. Sustainability of flexible multilayer packaging: Environmental impacts and recyclability of packaging for bacon in block, *Cleaner Environmental Systems*, 1.
- [98] Pauer E., Wohner B., Heinrich V., Tacker M., 2019. Assessing the Environmental Sustainability of Food Packaging: An Extended Life Cycle Assessment including Packaging-Related Food Losses and Waste and Circularity Assessment. *Sustainability*, 11, 925.
- [99] Pawłowska Z., Pietrzak L., 2000. Ogólne zasady oceny szkodliwości procesów technologicznych, *Bezpieczeństwo pracy*, 7-8.
- [100] Pawłowski A., Pawłowski L., 2016. Wpływ sposobów pozyskiwania energii na realizację paradygmatów zrównoważonego rozwoju, *Annual Set The Environment Protection Rocznik Ochrona Środowiska*, 18.
- [101] Pieragostini C., Mussati M. C., Pío Aguirre P., 2012. On process optimization considering LCA methodology, *Journal of Environmental Management*, 96, 1.
- [102] Pietrosanto A., Apicella A., Scarfato P., Incarnato L., Di Maio L., 2022. Development of Novel Blown Shrink Films from Poly(Lactide)/Poly(Butylene-Adipate-co-Terephthalate) Blends for Sustainable Food Packaging Applications. *Polymers*, 14, 2759.
- [103] Pilz H., Brandt B., Fehring R., 2010. Wpływ tworzyw sztucznych na zużycie energii oraz na emisję gazów cieplarnianych w Europie z uwzględnieniem całego cyklu życia wyrobów, *Raport podsumowujący*.
- [104] PN ISO 4591:1999.

- [105] Polski Komitet Normalizacyjny, 1999. Tworzywa sztuczne – Folie i płyty – Oznaczanie grubości metodą skaningu mechanicznego. PN ISO 4593:1999.
- [106] Polski Komitet Normalizacyjny, 2005. Opakowania – Materiały opakowaniowe giętkie – Określanie wytrzymałości na dziurawienie – Metody badań. PN-EN 14477:2005.
- [107] Polski Komitet Normalizacyjny, 2005. Tworzywa sztuczne. Folie i płyty. Oznaczanie wytrzymałości na rozdzieranie. Część 2: Metoda Elmendorfa. PN-EN ISO 6383-2:2005.
- [108] Polski Komitet Normalizacyjny, 2006. Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – Przykłady stosowania ISO 14042. PKN-ISO/TR 14047:2006
- [109] Polski Komitet Normalizacyjny, 2006. Zarządzanie środowiskowe – Ocena wpływu cyklu życia – przykłady stosowania ISO 14042. PKN-ISO/TR 14047:2006.
- 110 Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Wymagania i wytyczne. PN-EN ISO 14044:2009.
- [111] Polski Komitet Normalizacyjny, 2009. Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura. PN-EN ISO 14040:2009
- [112] Polski Komitet Normalizacyjny, 2019. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu – Część 3: Warunki badań folii i płyt. PN-EN ISO 527-3:2019-01.
- [113] Polski Komitet Normalizacyjny, 2020. Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu – Część 1: Zasady ogólne. PN-EN ISO 527-1:2020-01.
- [114] Qi R., Jones D., Li Z., Liu Q., Yan Ch., 2020. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review, *Science of The Total Environment*, 703.
- [115] Qin Y., Cucurachi S., Suh S., 2020. Perceived Uncertainties of Characterization in LCA: A Survey. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 25, 1846-1858.
- [116] Ram A., P. Sharma, 2017. A study on Life Cycle Assessment. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 6, 197-201.
- [117] Raport Fundacji PlasticsEurope Polska, 2022. Branża tworzyw sztucznych.
- [118] Raport roczny Plastics Europe, 2021/2022. Fundacja PlasticsEurope Polska, Warszawa.
- [119] Reddy Ch., Sahare H., Singh G., Sharma R., 2019, Impact of various packaging poly film materials on quality of pear (*Pyrus Communis*), 22, 12, 443-449.
- [120] Regattieri A., Santarelli G., 2013. The Important Role of Packaging in Operations Management.
- [121] Ritima B., Ray S., 2022. Sustainability and Life Cycle Assessment of Thermoplastic Polymers for Packaging: A Review on Fundamental Principles and Applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 307.
- [122] Rodrigues J., Brunelli K., Grigoli de Luca Sarantopoulos C., 2018. Properties of barrier shrink bags made with EVOH and polyamide for fresh beef meat preservation, *Polimeros*, 28(2), 125-130.
- [123] Rojek M., Szymiczek M., 2014. Ocena wpływu dodatku regranulatu na własności opakowaniowej folii pęcherzykowej, *Przetwórstwo Tworzyw*, 20,1(157), 82-87.

- [124] Romanowski M., Nadolny K., Bałasz B., 2018. Metody analityczne w ocenie efektywności procesów produkcyjnych. *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*.
- [125] Saleh Y., 2016. Comparative Life Cycle Assessment of Beverages Packages in Palestine. *Journal of Cleaner Production*, 131, 28-42.
- [126] Satora M., Szkoła M., 2019. Zapewnienie jakości i bezpieczeństwa produktów żywnościowych w transporcie drogowym. *Autobusy*, 6, 86-92.
- [127] Sazdovski A., Bala A., Fullana-i-Palmer P., 2021. Linking LCA literature with circular economy value creation: A review on beverage packaging. *Science of The Total Environment*, 771, 145322.
- [128] SimaPro database manual Methods library, 2020 PRÉ Sustainability.
- [129] Słownik języka polskiego, Wydawnictwo naukowe PWN, 2007.
- [130] Sun S., Ertz M., 2020. Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles, *MethodsX*, 7, 101046.
- [131] Szymańska I., 2021. Ocena Cyklu Życia (LCA) opakowań w koncepcji zrównoważonego rozwoju. *Wydawnictwo SIGMA-NOT*, 75, 9, 35-42.
- [132] Śliwińska A., 2017. Stan wiedzy na temat alokacji w LCA oraz propozycje zmian w normie ISO 14044. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 20, 1, 97-119.
- [133] Toniolo S., Mazzi A., Niero M., Zuliani F., Scipioni A., 2013. Comparative LCA to evaluate how much recycling is environmentally favourable for food packaging, *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 61-68.
- [134] Ucherek M., 2003. *Współczesne opakowania*. Wydawnictwo Naukowe Polskiego Towarzystwa Technologów Żywności.
- [135] Ulewicz M., Maciejewski P., 2011. Ekologiczne korzyści ze spalania paliw alternatywnych. *Zeszyty Naukowe WSOWL*, 160, 384-402.
- [136] Ulewicz M., Siwka J., 2010. *Procesy odzysku i recyklingu wybranych materiałów*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- [137] Ustawa z dnia 13 czerwca 2013 r. o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi.
- [138] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska.
- [139] Walichnowska P., Idzikowski A., 2023. Assessment and Analysis of the Environmental Impact of the Thermo-Shrinkable Packaging Process on the Way the Packaging Machine is Powered Based on LCA, *Management Systems in Production Engineering*, 31, 355-360.
- [140] Walker Ch., Beretta C., Sanjuan N., Hellweg S., 2018. Calculating the Energy and Water Use in Food Processing and Assessing the Resulting Impacts. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 824-839.
- [141] Wiedmann T., Minx J., 2008. A definition of carbon footprint, *Research and consulting*, United Kingdom.
- [142] Wikström F., Williams H., Vergheseb K., Clunec S., 2014. The influence of packaging attributes on consumer behaviour in food-packaging life cycle assessment studies - a neglected topic, *Journal of Cleaner Production*, 73, 100-108.
- [143] Wilczarska J., 2012. Efektywność i bezpieczeństwo użytkowania maszyn. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2, 41-43.

- [144] Williams H., Wikström F., 2011. Environmental impact of packaging and food losses in a life cycle perspective: a comparative analysis of five food items. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1, 43-48.
- [145] Wiśniewski L., 2020. Emisje gazów cieplarnianych z transportu. Miejska polityka transportowa i przestrzenna w obliczu zmian klimatu, *Acta Sci. Pol. Architectura* 19 (4), 73-88.
- [146] Wojciechowska N., 2021. Odnawialne źródła energii jako katalizator wprowadzenia modelu gospodarki obiegu zamkniętego. *Zeszyty Studenckie Wydziału Ekonomicznego Uniwersytetu Gdańskiego "Nasze studia"*, 11, 104-117.
- [147] www.berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2020/
- [148] www.cire.pl/artykuly/opinie/produkcja-energii-elektrycznej-z-oze-podsumowanie-roku-2021
- [149] www.consilium.europa.eu/pl/press/press-releases/2023/07/25/council-adopts-energy-efficiency-directive/
- [150] www.interakcja.com.pl/aktualnosc/60,miks-energetyczny-polski-unii-europejskiej-i-swiata-2022
- [151] www.studio.pwc.pl/aktualnosci/legislacja/nowa-dyrektywa-o-efektywnosci-energetycznej-ponownie-w-pe
- [152] Yildirim S., Röcker B., Pettersen M.K., Nilsen-Nygaard J., Ayhan Z., Rutkaite R., Radusin T., Suminska P., Marcos B., Coma V., 2018. Active packaging application for food. *Comprehensive Reviews for Food Science and Food Safety*, 18, 165-199.
- [153] Yoroa K., Daramola M., 2020. CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. *Advances in Carbon Capture*, Woodhead Publishing, 3-28.
- [154] Zampori L., Dotelli G., 2014. Design of a sustainable packaging in the food sector by applying LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 206-217.
- [155] Zheng J., Suh S., 2019. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics, *Nature Climate Change*, United Kingdom. *Nat. Clim. Chang.*, 9, 374-378.
- [156] Ziyadi M., Al-Qadi I., 2019. Model Uncertainty Analysis Using Data Analytics for Life-Cycle Assessment (LCA) Applications. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 24, 945-959.
- [157] Żyłuk A., Żurek J., 2013. Modelowanie systemów, *Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych* 32, 219-236.

STRESZCZENIE

Wpływ cech i parametrów pakowania butelek w folię termokurczliwą na szkodliwość w systemie technicznym

mgr inż. Patrycja Walichnowska

Słowa kluczowe: szkodliwość, cechy konstrukcyjne, parametry procesowe, analiza energetyczno-środowiskowa, system techniczny

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczy energetycznej i środowiskowej analizy procesu masowego pakowania. Za główny cel pracy przyjęto badanie oraz analizę wpływu cech i parametrów procesu pakowania butelek w folię termokurczliwą na szkodliwość w systemie technicznym oraz opracowanie modeli matematycznych charakteryzujących przedmiotowy proces. W ramach realizacji doktoratu przeprowadzone zostały badania laboratoryjne, na podstawie których wyznaczono właściwości użytkowe folii używanych w procesie termokurczliwego pakowania, w tym folii z różnym procentowym dodatkiem recyklatów. Przeprowadzono badania symulacyjne, gdzie wyznaczono za pomocą LCA wpływ czterech wariantów procesu na trzy kategorie szkód, tj. zdrowie ludzkie, ekosystemy i zużycie zasobów. Przeprowadzona analiza pozwoliła wskazać, który z etapów procesu masowego pakowania butelek oddziałuje najbardziej na otoczenie pakowarki oraz jak zmieniają się wskaźniki oddziaływań w poszczególnych wariantach procesu. Wyznaczono ślad węglowy dla każdego z badanych wariantów procesu. Dodatkowo obliczono, jak zmieniłyby się poszczególne oddziaływania, jeśli w procesie maszyny pakujące byłyby zasilane energią pochodzącą ze źródła niekonwencjonalnego. Ponadto zrealizowano badania przemysłowe, które polegały na uporządkowaniu danych o zużyciu materiałów, surowców, energii, emitowanych odpadach powstałych zgrzewek w procesie masowego pakowania butelek oraz opracowaniu wskaźników, za których pomocą możliwe było porównanie badanych wariantów procesu pakowania butelek. Przeprowadzone w ramach rozprawy działania naukowe umożliwiły wyznaczenie wpływu cech i parametrów przedmiotowego procesu na szkodliwość w systemie technicznym. Dzięki przeprowadzonym badaniom i analizie wyników realnie stało się sformułowanie zaleceń oraz wytycznych do poprawy przedmiotowego masowego procesu pakowania butelek w folię termokurczliwą.

ABSTRACT

The impact of the features and parameters of packaging bottles in heat-shrinkable film on the harmfulness of the technical system

M.Sc. Patrycja Walichnowska

Key words: harmfulness, design features, process parameters, energy and environmental analysis, technical system

This doctoral dissertation concerns the energy and environmental analysis of the mass packaging process. The main aim of the work was to study and analyze the impact of the features and parameters of the process of packaging bottles in shrink film on the harmfulness of the technical system and to develop mathematical models characterizing the process in question. As part of the PhD thesis, laboratory tests were carried out, based on which the functional properties of films used in the heat-shrink packaging process were determined, including films with various percentages of recyclates added. Simulation studies were carried out in which the impact of four process variants on three categories of damage, i.e. human health, ecosystems and resource depletion, was determined using LCA. The analysis made it possible to indicate which stage of the mass bottle packaging process has the greatest impact on the surroundings of the packaging machine and how the impact indicators change in individual process variants. The carbon footprint was determined for each of the tested process variants. Additionally, it was calculated how individual impacts would change if in the process, packaging machines would be powered by energy from an unconventional source. In addition, industrial research was carried out, which consisted in organizing data on the consumption of materials, raw materials, energy, emitted waste resulting from packs in the process of mass bottle packaging and developing indicators that made it possible to compare the tested variants of the bottle packaging process. The scientific activities carried out as part of the dissertation made it possible to determine the impact of the features and parameters of the process in question on the harmfulness of the technical system. Thanks to the research carried out and analysis of the results, it became possible to formulate recommendations and guidelines to improve the mass process of packaging bottles in shrink film.

Spis rysunków

Rys. 1. Emisja CO ₂ z produkcji opakowań w porównaniu z zaoszczędzoną emisją wynikającą z ograniczenia strat żywności [118]	23
Rys. 2. Klasyfikacja funkcji opakowań [134]	25
Rys. 3. Linie technologiczne masowego pakowania butelek, A – pakowarka SP A-M, B – pakowarka VEGA HT100 (opracowanie własne).....	30
Rys. 4. Schemat pakowarki SP A-M z podziałem na moduły systemowe wraz z postacią pakowanych produktów na poszczególnych etapach pakowania (materiały własne)	32
Rys. 5. Elementy modułu doprowadzającego: 1 – dozujący przenośnik taśmowy, 2 – doprowadzający przenośnik taśmowy, 3 – kontrola dźwigni, 4 – prowadnice szynowe (materiały własne)	33
Rys. 6. Schemat modułu doprowadzającego z zaznaczonymi prowadnicami szynowymi – 1 oraz bazami wibratorów liniowych – 2 (materiały własne).....	33
Rys. 7. Elementy modułu doprowadzającego: 1 – taśma gumowa, 2 – dźwignia wychyłna, 3 – zespół przestawiania wysokości dźwigni (materiały własne)....	34
Rys. 8. System rozdzielania: 1 – segmenty rozdzielające, 2 – łańcuchy rozdzielające (materiały własne)	34
Rys. 9. Łańcuchy transportowe: 1 – przenośniki łańcuchowe, 2 – prowadnice szynowe między przenośnikami łańcuchowymi, 3 – boczne podpory przenośników łańcuchowych (materiały własne).....	35
Rys. 10. Widok na moduł zawijający (materiały własne).....	35
Rys. 11. Trzpienie do mocowania rolek folii: 1– czujniki laserowe do rozpoznawania końcówki folii (materiały własne).....	36
Rys. 12. Tunel obkurczania z przenośnikiem taśmowym z plecionki stalowej w jego wnętrzu (materiały własne).....	36
Rys. 13. Wentylatory na wyjściu z pieca grzewczego (materiały własne)	37
Rys. 14. Schemat pakowarki VEGA HT100 z podziałem na moduły systemowe wraz z postacią pakowanych produktów na poszczególnych etapach pakowania (materiały własne)	38
Rys. 15. Zespół przenośników do akumulacji i naprowadzania butelek (materiały własne)	39
Rys. 16. Zespół wyboru i oddzielania produktów (materiały własne).....	39
Rys. 17. Zespół pakowarki odpowiedzialny za przetransportowanie butelek do strefy owijania (materiały własne)	40
Rys. 18. Zespół podawania folii (materiały własne).....	41
Rys.19. Moduł zawijający: 1 – linia łańcuchowa ze zderzakami pozycjonującymi, 2 – przenośnik taśmowy (materiały własne).....	41
Rys. 20. Widok wejścia do tunelu grzewczego: 1 – taśma siatkowa, 2 – tunel grzewczy (materiały własne).....	42
Rys. 21. Widok wyjścia z tunelu grzewczego: 1 – wentylatory, 2 – przenośnik siatkowy na wyjściu pieca (materiały własne)	42

Rys. 22. Zmienne zależne i niezależne wraz z ich wzajemnymi relacjami w procesie masowego pakowania butelek: E_{JR} – energia zużyta w ramach pracy jednostek roboczych na produkcję produktów użytecznych, E_Z – energia zużyta na zgrzewanie produktów użytecznych, E_{CH} – energia zużyta na chłodzenie powstałych produktów użytecznych, E_{sB} – energia tracona na braki, E_{sZ} – energia tracona na ujawniające się w procesie zanieczyszczenia, R_m – właściwości wytrzymałościowe folii, W_U – właściwości użytkowe folii, T_Z – temperatura zgrzewania folii, C_K – cechy konstrukcyjne pakowarek, m_z – masa wyemitowanych zanieczyszczeń w postaci gazów podczas procesu, m_B – masa powstałych w procesie braków w postaci nienadających się do użycia zgrzewek, m_C – suma masy wszystkich produktów powstałych w procesie pakowania, m_P – masa produktów użytecznych, m_S – masa powstałych szkodliwości, E_C – wskaźnik całkowitego zużycia energii, E_J – wskaźnik energii jednostkowej, WS – procentowy wskaźnik szkodliwości badanego procesu, WEP – procentowy wskaźnik efektywności procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)	43
Rys. 23. Schemat badań realizowanych w rozprawie (materiały własne)	45
Rys. 24. Punkty pomiaru grubości folii (materiały własne).....	47
Rys. 25. Maszyna Memmert z misą wraz z olejem silikonowym (materiały własne)	48
Rys. 26. Przykładowe próbki przed i po przeprowadzonym badaniu swobodnej kurczliwości (materiały własne).....	48
Rys. 27. Przyrząd do przeprowadzenia badania odporności próbek folii na uderzenie za pomocą spadającego grotu (materiały własne).....	49
Rys. 28. Przykład nacięć na folii wykonanych przez producenta uniemożliwiających wycięcie próbek do badań (materiały własne)	49
Rys. 29. Przykładowa próbka przed i po wykonaniu oznaczenia wytrzymałości na rozdzieranie (materiały własne).....	50
Rys. 30. Maszyna Pro Tear Tearing Tester, Twing-Albert Instrument Co podczas przeprowadzania badania wytrzymałości na rozdzieranie (materiały własne)..	50
Rys. 31. Przykładowa próbka folii: A – przed, B – w trakcie, C – po próbie rozciągania (materiały własne).....	51
Rys. 32. Etapy wchodzące w skład granic rozpatrywanego procesu pakowania butelek (opracowanie własne).....	54
Rys. 33. Schemat przedmiotowego procesu masowego pakowania butelek z uwzględnieniem danych wejściowych i wyjściowych: E_E – energia elektryczna, S – surowce, Z – zanieczyszczenia, T – transport, $S_{(I, II)}$ – surowce będące danymi wejściowymi w I i II wariantcie procesu, $S_{(III, IV)}$ – surowce będące danymi wejściowymi w III i IV wariantcie procesu, $E_{Emix(I, III)}$ – energia elektryczna w I i III wariantcie procesu, $E_{Emix(II, IV)}$ – energia elektryczna w II i IV wariantcie procesu, $E_{GZ(I, III)}$ – gaz zasilający etap zgrzewania folii w I i III wariantcie procesu, $Z_{(I, II, III, IV)}$ – zanieczyszczenia w postaci emisji gazów cieplarnianych (CO_2 , SF_6 , CH_4 , N_2O), $B_{(I, II, III, IV)}$ – odpady w postaci nieużytecznych zgrzewek (opracowanie własne).....	55

Rys. 34. Wpływ dodatku recyklatu na kurczliwość folii w kierunku maszynowym (opracowanie własne).....	66
Rys. 35. Zależność kurczliwości w kierunku maszynowym od zawartości procentowej recyklatów oraz koloru folii (opracowanie własne).....	66
Rys. 36. Wpływ dodatku recyklatu na kurczliwość folii w kierunku poprzecznym (opracowanie własne).....	67
Rys. 37. Wytrzymałość na rozdzieranie badanych rodzajów folii: KM – kierunek maszynowy, KP – kierunek poprzeczny (opracowanie własne)	69
Rys. 38. Przykładowy wykres siła – wydłużenie względne podczas próby statycznego rozciągania w kierunku maszynowym: A – folia 0rLDPE/100LDPE white, B – folia 0rLDPE/100LDPE color, C – folia 50rLDPE/50LDPE white, D – folia 50rLDPE/50LDPE color, E – folia 100rLDPE/0LDPE white, F – folia 100rLDPE/0LDPE color (materiały własne).....	72
Rys. 39. Wpływ składu procentowego recyklatów w folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne)	75
Rys. 40. Wpływ grubości badanych folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne).....	76
Rys. 41. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym dla poszczególnych badanych folii (opracowanie własne)	77
Rys. 42. Wpływ składu procentowego recyklatów w folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne).....	78
Rys. 43. Wpływ grubości badanych folii na ich wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)	78
Rys. 44. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki SP A-M w roku 2021 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant I (P_1 , F_{0r} , F_{50r} , E_{GZ} , E_{Emix}) (opracowanie własne).....	82
Rys. 45. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki VEGA HT100 w roku 2021 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant II (P_2 , F_{0r} , F_{50r} , E_{Emix}) (opracowanie własne).....	82
Rys. 46. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki SP A-M w roku 2022 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant III (P_1 , F_{50r} , E_{GZ} , E_{Emix}) (opracowanie własne).....	83
Rys. 47. Drzewo surowców i mediów dla procesu masowego pakowania za pomocą pakowarki B VEGA HT100 w roku 2022 wraz z ich procentowym udziałem całkowitego oddziaływania na otoczenie – wariant IV (P_2 , F_{50r} , E_{Emix}) (opracowanie własne).....	83
Rys. 48. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód zdrowie ludzkie w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne)	90

Rys. 49. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód ekosystemy w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne)	91
Rys. 50. Wpływ poszczególnych etapów procesu masowego pakowania na kategorię szkód zubożenie zasobów w zależności od wariantu procesu (opracowanie własne).....	92
Rys. 51. Udział poszczególnych surowców w powstawaniu śladu węglowego dla wariantu I ($P_1, F_{0r}, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne).....	94
Rys. 52. Udział poszczególnych surowców w powstawaniu śladu węglowego dla wariantu II ($P_2, F_{0r}, F_{50r}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą.....	94
Rys. 53. Udział poszczególnych surowców w ilości śladu węglowego dla wariantu III ($P_1, F_{50r}, E_{GZ}, E_{Emix}$) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne).....	95
Rys. 54. Udział poszczególnych surowców w ilości śladu węglowego dla wariantu IV (P_2, F_{50r}, E_{Emix}) procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne).....	95
Rys. 55. Wyniki oceny śladu węglowego metodą IPCC 2021 badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek dla przyjętej jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne).....	96
Rys. 56. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód zdrowie ludzkie (Pt) (opracowanie własne).....	98
Rys. 57. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód ekosystemy (Pt) (opracowanie własne).....	98
Rys. 58. Wpływ procesu masowego pakowania butelek w IV wariantach w zależności od źródła energii elektrycznej w kategorii szkód zasoby (Pt) (opracowanie własne).....	99

Spis tabel

Tab. 1. Zależności między szkodami a wskaźnikami punktu środkowego oraz punktu końcowego w metodzie ReCiPe 2016 [51]	16
Tab. 2. Dane inwentaryzacyjne zużycia energii i folii w roku 2021 dla jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne).....	56
Tab. 3. Dane inwentaryzacyjne zużycia energii i folii w roku 2022 dla jednostki funkcjonalnej 1000 zgrzewek (opracowanie własne).....	57
Tab. 4. Grubość badanych folii (opracowanie własne).....	63
Tab. 5. Wyniki badań swobodnej kurczliwości liniowej folii termokurczliwej (opracowanie własne).....	64
Tab. 6. Wyniki testu Tukeya dla kurczliwości w kierunku maszynowym (opracowanie własne).....	65
Tab. 7. Wyniki testu Tukeya dla kurczliwości w kierunku poprzecznym (opracowanie własne).....	67
Tab. 8. Wyniki badań odporności na uderzenie (opracowanie własne)	68
Tab. 9. Wyniki próby statystycznego rozciągania dla badanych próbek folii termokurczliwej; 1 – wartość średnia, 2 – odchylenie standardowe, 3 – współczynnik zmienności, KM – kierunek maszynowy, KP – kierunek poprzeczny (opracowanie własne)	70
Tab. 10. Wyniki testu Shapiro-Wilka sprawdzającego normalność rozkładu wyników wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym	74
Tab. 11. Wyniki testu Tukeya dla wytrzymałości na rozciąganie w kierunku maszynowym (opracowanie własne).....	75
Tab. 12. Wyniki testu Tukeya dla wytrzymałości na rozciąganie w kierunku poprzecznym (opracowanie własne)	77
Tab. 13. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych; 1 – wartość średnia, 2 – odchylenie standardowe, 3 – współczynnik zmienności (opracowanie własne)	80
Tab. 14. Emisja wybranych gazów cieplarnianych w czterech wariantach procesu masowego pakowania butelek z napojami (opracowanie własne)	84
Tab. 15. Wyniki charakteryzowania badanych wariantów procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne).....	86
Tab. 16. Udział procentowy kategorii wpływów w oddziaływaniach w obrębie kategorii szkód dla procesu masowego pakowania butelek (opracowanie własne)	88
Tab. 17. Wartości oddziaływań każdego z wariantów badanego procesu w trzech kategoriach szkód dla przyjętej jednostki funkcjonalnej (opracowanie własne).....	89
Tab. 18. Wartości oddziaływań w trzech kategoriach szkód: zdrowie ludzkie, ekosystemy, zasoby poszczególnych etapów przyjętych czterech wariantów procesu masowego pakowania; etap I – doprowadzanie produktów, etap II – formatowanie produktów, etap III – owinięcie folią, etap IV – zgrzewanie folii, etap V – chłodzenie zgrzewek (opracowanie własne)	93

Tab. 19. Wyniki analizy porównawczej badanych wariantów procesu przy zmianie źródła energii elektrycznej (opracowanie własne).....	97
Tab. 20. Dane wejściowe do wyznaczenia wskaźników oceny szkodliwości procesu masowego pakowania butelek w folię termokurczliwą (opracowanie własne)	101
Tab. 21. Wartości wskaźników przedmiotowego procesu masowego pakowania (opracowanie własne).....	102