



dr hab. inż. Michał Pająk, prof. URad  
Katedra Mechaniki Stosowanej i Mechatroniki  
Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego  
ul. Stasieckiego 54  
26-600 Radom

Radom, 04.05.2026

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Małgorzaty Malinowskiej**  
pod tytułem

***Badanie i analiza wpływu wybranych dodatków roślinnych na parametry eksploatacyjne oleju smarnego stosowanego w silnikach okrętowych***

**1. Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania stanowi pismo prof. dr hab. inż. Andrzeja Bochata wyznaczonego przez JM Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich do prowadzenia prac Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria mechaniczna w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr inż. Małgorzacie Malinowskiej z dnia 2 kwietnia 2026 r., gdzie na podstawie Uchwały nr 07/03/2026 Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 31 marca 2026 r. powołano recenzentów rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Łukasz Muślewski, prof. PBŚ.

**2. Ocena podjętej tematyki i założonego celu rozprawy**

Rozprawa doktorska odnosi się do badań dodatków roślinnych do morskiego oleju silnikowego przeznaczonego do czterosuwowego, średnioobrotowego silnika okrętowego typu MAN L32/40. Specyfika układu eksploatacyjnego silników okrętowych wymusza szczególne wymagania w zakresie ekologiczności stosowanych środków smarnych. Wynika to z ich bezpośredniego kontaktu ze środowiskiem morskim oraz ryzyka przedostawania się olejów do wody w trakcie eksploatacji. Oleje roślinne dzięki ich biodegradowalności i niskiej toksyczności stanowią naturalną alternatywę dla olejów mineralnych. Jednakże zastosowanie danego oleju smarowego jest uwarunkowane charakterystyką pracy jednostki napędowej. Z tego też powodu stosowanie olejów roślinnych ma ograniczony zakres, ponieważ cechują się one niską odpornością na procesy starzeniowe, utleniania i hydrolizy, zmianami lepkości w czasie użytkowania i niestabilnością chemiczną. Rozwiązaniem może być stosowanie mieszanin olejów roślinnych i olejów mineralnych pozwalających na uzyskanie zmniejszonej toksyczności i zwiększonej biodegradowalności przy zachowaniu odpowiednich wartości cech użytkowych. Temat rozprawy doktorskiej wpisuje się bezpośrednio w nurt prac badawczych dotyczących tego zagadnienia. Jest on zbieżny z kluczowymi Celami

Zrównoważonego Rozwoju ONZ oraz wymaganiami UE takimi jak konwencje MARPOL czy regulacje REACH.

Tematyka pracy jest jak najbardziej zasadna, ponieważ zastosowanie mieszanin olejów roślinnych i mineralnych nie jest obecnie dostatecznie dokładnie zbadane w kontekście ich użycia w silnikach okrętowych. Co więcej z uwagi na podatność olejów roślinnych na zmiany wartości ich parametrów użytkowych w procesach starzenia konieczne są rozszerzone badania właściwości tych olejów po okresie eksploatacji w warunkach podwyższonych temperatur i obciążeń mechanicznych. Dodatkowym niedostatecznie analizowanym w badaniach naukowych zagadnieniem jest długookresowe oddziaływanie olejów roślinnych na materiały konstrukcyjne silników. Dopiero wyniki tak przeprowadzonych badań pozwalają na racjonalny wybór zarówno olejów roślinnych do domieszkowania oleju mineralnego jak i składu procentowego tak zaprojektowanej mieszaniny.

Wobec tych wyzwań powstała praca naukowa Doktorantki odnosząca się do metodyki badawczej celem wyselekcjonowania odpowiednich olejów roślinnych z możliwością ich wykorzystania do zaprojektowania mieszaniny olejów roślinnych i oleju mineralnego o wartościach parametrów użytkowych właściwych dla układu eksploatacyjnego silnika okrętowego typu MAN L32/40. Podstawą prowadzonych badań była założona hipoteza badawcza, że zastosowanie odpowiednio dobranych olejów roślinnych jako dodatków do mineralnego oleju silnikowego umożliwi otrzymanie mieszanin o właściwościach fizykochemicznych zbliżonych do konwencjonalnych morskich olejów silnikowych, spełniających określone wymagania eksploatacyjne. Zasadniczym celem, jaki przyjęła Doktorantka było opracowanie i walidacja modeli regresyjnych wpływu dodatków roślinnych na wybrane właściwości fizykochemiczne morskiego oleju silnikowego przeznaczonego do eksploatacji w czterosuwowym silniku okrętowym, z wykorzystaniem planowania eksperymentu dla mieszanin z ograniczeniami oraz identyfikacja składu najkorzystniejszego z punktu widzenia wymagań eksploatacyjnych.

Realizację określonego celu Doktorantka rozpoczęła od przeprowadzenia wielokryterialnej analizy porównawczej dziesięciu wybranych olejów roślinnych z uwzględnieniem kryteriów istotnych dla eksploatacji czterosuwowych silników okrętowych. W wyniku przeprowadzonej analizy wybrano trzy oleje roślinne o największym potencjale aplikacyjnym. Następnie poddano je badaniom laboratoryjnym mającym na celu określenie ich właściwości reologicznych w zakresie temperatur rzeczywistej pracy oleju w silniku okrętowym i właściwości fizykochemicznych istotnych z punktu widzenia eksploatacji silnika okrętowego oraz ocenę długookresowej kompatybilności materiałowej z materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w układzie smarowania silnika okrętowego. Przeprowadzona analiza wyników badań laboratoryjnych pozwoliła na zakwalifikowanie dwóch z badanych olejów roślinnych do etapu konstrukcji

do olejowej mieszanki oleju mineralnego i olejów roślinnych. W dalszej części pracy, zgodnie z opracowanym planem badań przy pomocy sympleksowo-centroidowego planowania doświadczeń z ograniczeniami Doktorantka wykonała badania laboratoryjne dwunastu mieszanin olejów mineralnego i roślinnych o różnym składzie procentowym poszczególnych czynników. Badania obejmowały trzy parametry mieszanki określone na podstawie wymagań eksploatacyjnych stawianych silnikom okrętowym oraz wyników analiz korelacyjnych. W rezultacie Doktorantka zbudowała oraz zweryfikowała adekwatność trzech modeli regresyjnych opisujących zależności pomiędzy udziałem poszczególnych olejów w mieszaniu, a ich wybranymi właściwościami: lepkością kinematyczną w temperaturze 100°C, wskaźnikiem lepkości oraz temperaturą zapłonu. Wykorzystując opracowane modele Doktorantka zaprojektowała skład mieszanki najkorzystniejszej pod względem wymagań eksploatacyjnych czterosuwowego silnika okrętowego.

Cel pracy został w tym przypadku wzorowo osiągnięty, ponieważ Doktorantka zaprezentowała w swojej rozprawie metodykę otrzymania mieszanki olejów mineralnego i roślinnych stanowiącą element nowości. Poradziła sobie doskonale z podejściem do poszukiwania najkorzystniejszego składu mieszanki z punktu widzenia jej przydatności dla określonego układu eksploatacyjnego. Zaproponowała metodę badawczą oceny przydatności eksploatacyjnej zarówno olejów roślinnych jak i ich mieszanki z olejem mineralnym. W wyniku realizacji głównego celu rozprawy założona hipoteza została potwierdzona.

Opiniowana rozprawa doktorska jest opracowaniem naukowym, odpowiadającym tematowi określonym w tytule oraz spełniającym wymagania art. 187.2 Ustawy. Uważam, że cel został sformułowany poprawnie i ma charakter twórczy. Dysertacja wpisuje się zakres dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna” i posiada duże walory poznawcze i aplikacyjne z ukierunkowaniem na badania eksploatacyjne charakterystyk reologicznych, fizykochemicznych i starzeniowych smarnych olejów roślinnych i ich mieszanin przeznaczonych do użytkowania w systemach eksploatacyjnych silników okrętowych.

### **3. Zakres rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Malinowskiej została napisana na 207 stronach, wliczając w to wstęp, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis bibliografii, w którym umieszczono 256 pozycji oraz 7 załączników. Redakcja została wykonana w języku polskim i ujęta w dziesięciu logicznych i przejrzystych rozdziałach.

W rozdziale pierwszym Doktorantka przedstawiła genezę problemu badawczego, wynikającego z uwarunkowań eksploatacyjnych silników okrętowych oraz zaostrzających się wymagań środowiskowych. Zostały tu opisane przesłanki prowadzące do stosowania olejów roślinnych w systemach eksploatacyjnych silników

okrętowych oraz ograniczenia wynikające z ich właściwości użytkowych. Ukazane zostały braki badawcze w dziedzinie wyboru właściwego oleju roślinnego, badań dotyczących procesów starzenia olejów roślinnych oraz zastosowania olejów roślinnych w morskich silnikach okrętowych. Treść rozdziału jednoznacznie umotywowwała zasadność prowadzonych w dalszej części rozprawy prac badawczych.

W rozdziale drugim Autorka rozprawy dokonała szczegółowej analizy aktualnego stanu wiedzy w rozpatrywanym obszarze badań na podstawie obszernego i wyczerpującego przeglądu literatury. Obejmował on publikacje z zakresu produktów pochodzenia biologicznego z przeznaczeniem do zastosowania w systemach technicznych w szczególności olejów smarnych. Rozważane były publikacje dotyczące badań parametrów reologicznych, fizykochemicznych i eksploatacyjnych olejów i ich systematyki. Badania literaturowe dotyczyły również publikacji z zakresu poszukiwania nowych źródeł surowców roślinnych, rozwoju metod syntezy i modyfikacji chemicznej, analizy dodatków uszlachetniających oraz badań nad tworzeniem mieszanin z innymi typami olejów. Przeprowadzona analiza literatury potwierdziła rosnące zainteresowanie świata nauki olejami roślinnymi a jednocześnie istotne ograniczenia użytkowe tych olejów rozważanych jako środki smarne. W wyniku wykonanej analizy literatury jasno wykazano, że zagadnienie wykorzystania olejów roślinnych w układach eksploatacyjnych silników okrętowych nie zostało dostatecznie przebadane. Szczególne braki zidentyfikowano w zakresie badań właściwości olejów po okresie użytkowania w warunkach rzeczywistej pracy silnika lub warunkach do nich zbliżonych. Jest to bardzo istotne zagadnienie w odniesieniu do olejów roślinnych, dla których obserwuje się znaczny wpływ starzenia na wartości ich parametrów eksploatacyjnych. Na podstawie analizy literatury wykazano potrzebę prowadzenia badań w dziedzinie użytkowania smarnych olejów roślinnych i ich mieszanin z naciskiem na długookresowe starzenie cieplne olejów roślinnych oraz analizę ich oddziaływania z materiałami konstrukcyjnymi silników okrętowych.

Rozdział trzeci dotyczy przyjętego celu rozprawy, założonej hipotezy oraz zakresu i planu badań. Doktorantka w swych rozważaniach naukowych za cel pracy przyjęła opracowanie i walidację modeli regresyjnych wpływu dodatków roślinnych na wybrane właściwości fizykochemiczne morskiego oleju silnikowego przeznaczonego do eksploatacji w czterosurowym silniku okrętowym, z wykorzystaniem planowania eksperymentu dla mieszanin z ograniczeniami oraz identyfikację składu najkorzystniejszego z punktu widzenia wymagań eksploatacyjnych. Cel ogólny został następnie zdekomponowany na siedem celów szczegółowych, których realizacja jest równoważna z osiągnięciem celu głównego. Sformułowana hipoteza rozprawy zakłada, że zastosowanie odpowiednio dobranych olejów roślinnych jako dodatków do mineralnego oleju silnikowego umożliwi otrzymanie mieszanin o właściwościach fizykochemicznych zbliżonych do konwencjonalnych morskich olejów silnikowych,

spełniających określone wymagania eksploatacyjne. Przyjęty cel rozprawy i założona hipoteza zdeterminowały zakres rozprawy zdefiniowany w dalszej części rozdziału. Obejmuje on w szczególności identyfikację i ocenę potencjału eksploatacyjnego dziesięciu wybranych olejów roślinnych, przeprowadzenie badań laboratoryjnych trzech wyznaczonych olejów roślinnych oraz porównawczego oleju mineralnego, obejmujące pomiary lepkości dynamicznej oraz ocenę ich właściwości smarnych, badania starzenia cieplnego w obecności i bez udziału materiałów metalicznych, identyfikację kluczowych parametrów oceny jakości mieszanin mineralno-roślinnych, opracowanie planu eksperymentu obejmującego badania laboratoryjne dla zestawu mieszanin i jego realizację, budowę i weryfikację modeli regresyjnych opisujących ilościowe zależności pomiędzy udziałem poszczególnych składników a analizowanymi właściwościami mieszanin i ostatecznie zaprojektowanie mieszaniny olejów zapewniającej najkorzystniejsze spełnienie wymagań eksploatacyjnych czterosuwowego silnika okrętowego.

W rozdziale czwartym zakres rozprawy został jednoznacznie odzwierciedlony w przyjętym programie badań. Plan ten obejmował trzy etapy prac; wybór olejów roślinnych, badanie olejów oraz budowę modeli. Wyróżniono w nich prócz przeprowadzonych czynności badania laboratoryjne, podejmowanie decyzji i analizy statystyczne.

W rozdziale piątym Doktorantka opisała przeprowadzoną analizę wielokryterialną mającą na celu wybór olejów roślinnych zakwalifikowanych do dalszych badań. Przeprowadzona analiza obejmowała dziesięć olejów roślinnych wybranych na podstawie danych literaturowych oraz właściwości fizykochemicznych. Jako kryteria wyboru posłużyły parametry fizykochemiczne istotne z punktu widzenia podstawowych funkcji jakie spełnia olej smarowy w czterosuwowym silniku okrętowym tj. smarowanie, chłodzenie i ochrona przed korozją. Rozpatrywane parametry to wskaźnik lepkości, gęstość, temperatura płynięcia, liczba jodowa, średnica śladu zużycia, temperatura zapłonu, liczba kwasowa, pojemność cieplna właściwa, przewodnictwo cieplne, zawartość wody, stabilność utleniania oraz działanie korodujące. Dla każdego z kryteriów przypisano jego wagę określającą istotność parametru dla jakości użytkowej ocenianego oleju. W celu ustalenia wag poszczególnych kryteriów Doktorantka przeprowadziła badania ankietowe, w których uczestniczyli przedstawiciele środowiska akademickiego wydziałów mechanicznych oraz praktycy – mechanicy okrętowi. Analizę wielokryterialną przeprowadzono przy pomocy dwóch niezależnych metod - metody hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych AHP oraz metody wielokryterialnej oceny jakości OPTIMUM. Na uwagę zasługuje staranność w stosowaniu metod, prowadzeniu analiz i interpretacji ich wyników. W wyniku przeprowadzonych analiz wielokryterialnych otrzymano dwa zestawienia klasyfikujące rozważane oleje roślinne. Na podstawie analizy zestawień

Doktorantka dokonała kwalifikacji oleju lnianego, rzepakowego i rycynowego do dalszych prac.

Rozdział szósty pracy opisuje stosowaną metodykę badań. Zaprezentowano w nim obiekt oraz przedmiot badań, materiały badawcze, zastosowaną aparaturę pomiarową oraz metody analizy danych wykorzystane do opracowania i interpretacji uzyskanych wyników. Obiektem prowadzonych przez Doktorantkę badań jest układ smarowania średnioobrotowego silnika okrętowego o zapłonie samoczynnym reprezentowany przez silnik okrętowy MAN L32/40. Opisano parametry techniczne i eksploatacyjne silnika istotne z punktu widzenia prowadzonych badań. Przedmiotem badań są właściwości fizykochemiczne, reologiczne i tribologiczne wybranych olejów roślinnych oraz ich mieszanin z olejem mineralnym rozpatrywane w kontekście wymagań stawianych olejom smarnym w klasie silników stanowiących obiekt badań. Przedstawione w rozdziale materiały badawcze obejmowały oleje roślinne wybrane na wcześniejszym etapie badań oraz olej mineralny Marinol RG 1240 jako materiał porównawczy oraz baza do przygotowania mieszanin z olejami roślinnymi. W opisie ujęto parametry fizykochemiczne materiałów badawczych kluczowe z punktu widzenia zastosowań smarnych. W celu określenia ram odniesienia dla oceny właściwości fizykochemicznych olejów roślinnych oraz mieszanin mineralno-roślinnych zestawiono wymagania dotyczące oleju smarnego wynikające z dokumentacji technicznej silnika MAN L32/40. Przeprowadzane w ramach pracy badania eksperymentalne były prowadzone przy pomocy różnorodnej aparatury zależnej od charakteru prowadzonych badań. Zestawienie tej aparatury wraz z dokładnym opisem parametrów oraz warunków w jakich wykonywano eksperymenty zostało zamieszczone w rozdziale. Zaprezentowano tu również metodykę prowadzonych badań oraz ich podstawy teoretyczne. Dla każdego badania określono jego istotność dla określenia użyteczności smarnej olejów. Należy podkreślić, iż w swojej pracy Doktorantka przeprowadziła bardzo szeroki i różnorodny zestaw badań obejmujący badania zależności lepkości od temperatury, badania zależności lepkości od szybkości ścinania, badania właściwości smarnościowych olejów, badania termicznego starzenia olejów oraz badania oddziaływania olejów roślinnych z wybranymi materiałami konstrukcyjnymi występującymi w układzie smarowania silnika MAN L32/40. Zwłaszcza badania dwóch ostatnich grup zasługują na szczególną uwagę. Badania termicznego starzenia olejów wymagają szczególnej uwagi, ponieważ jak wykazała Doktorantka badania takie przeprowadzane są z reguły dla olejów w stanie świeżym co jest szczególnie istotne z punktu widzenia olejów roślinnych, których parametry podlegają dużym zmianom na skutek procesów użytkowania. W pracy zastosowano kontrolowany proces starzenia polegający na utrzymywaniu próbek w temperaturze 100°C przez 168 h i 336 h przy zapewnionym dostępie powietrza oceniając stopień degradacji olejów na podstawie pomiarów lepkości kinematycznej w temperaturach 40°C i 100°C, temperatury zapłonu oraz zmiany lepkości dynamicznej

w aspekcie zmian szybkości ścinania. Dodatkowo przeprowadzono analizę zawartości pierwiastków śladowych w olejach. Badania starzenia termicznego, wzbogacono o analizę oddziaływania olejów roślinnych z wybranymi materiałami konstrukcyjnymi występującymi w układzie smarowania silnika MAN L32/40. Analiza ta jest szczególnie istotna, ponieważ w warunkach podwyższonej temperatury przy obecności produktów utleniania może dochodzić do zjawisk korozyjnych oraz migracji pierwiastków metalicznych do fazy olejowej. Badaniem objęto szeroki wachlarz materiałów konstrukcyjnych silnika ze szczególnym uwzględnieniem żeliwa, miedzi oraz stali ocynkowanej. Rozdział zamyka szczegółowy opis stosowanych w badaniach metod analizy danych obejmujący identyfikację wartości odstających, pomiar dokładności predykcji, współczynnik korelacji Pearsona, ocenę istotności statystycznej wyników poprzez zastosowanie analizy wariancji ANOVA i testu Kruskala-Wallisa, opis zmienności danych przy pomocy współczynnika względnej zmiany oraz numeryczną procedurę analizy wielokryterialnej opartą na metodzie funkcji użyteczności.

Siódmy, najobszerniejszy rozdział rozprawy stanowi jednocześnie jej najistotniejszą część. W początkowej części Doktorantka zaprezentowała wyniki przeprowadzonych badań wraz z ich szczegółowym omówieniem. Wyniki były poddane analizie z wykorzystaniem zaprezentowanych w poprzednim rozdziale metod analizy danych potwierdzając poprawność, wiarygodność i staranność przeprowadzonych przez Doktorantkę badań. W badaniach zależności lepkości dynamicznej od temperatury wykazano liniową zależność logarytmu naturalnego z lepkości dynamicznej od odwrotności temperatury dla wszystkich analizowanych olejów przy wartości współczynnika korelacji Pearsona powyżej 0.995 i poziomie istotności  $p$ -value mniejszej od 0.001 dla wszystkich analizowanych olejów. W badaniach zależności lepkości dynamicznej od szybkości ścinania wykazano, że lepkość dynamiczna wszystkich analizowanych olejów maleje wraz ze wzrostem szybkości ścinania w całym badanym zakresie. Dla badanych olejów na podstawie logarytmicznej postaci modelu potęgowego Ostwalda-de Waele'a wyznaczono współczynnik konsystencji oraz wskaźnik płynięcia. Dla wszystkich analizowanych olejów wartości wskaźnika płynięcia były mniejsze od jedności. Najniższą wartość współczynnika konsystencji uzyskano dla oleju lnianego ( $m = 0,0180$ ), natomiast najwyższą dla oleju rycynowego ( $m = 0,1427$ ). W badaniach uzyskano błąd średni absolutny procentowy na poziomie od 2,76% do 7,17%. W badaniach właściwości smarnościowych olejów na maszynie czterokulowej najwyższą wartość granicznego obciążenia zatarcia uzyskano dla oleju mineralnego natomiast spośród olejów roślinnych najwyższą wartość obciążenia zatarcia odnotowano dla oleju lnianego. Wartości obciążenia początku zatarcia mieściły się w zakresie od 1909 N do 2665 N, przy czym najwyższą wartość uzyskano dla oleju lnianego. Najmniejszą średnicę śladu zużycia odnotowano dla oleju mineralnego, natomiast największą dla oleju rzepakowego. Najwyższą wartość granicznego nacisku zatarcia uzyskano dla oleju

Marinol RG 1240 natomiast spośród olejów roślinnych najwyższą wartość uzyskano dla oleju lnianego. Badania termicznego starzenia olejów przeprowadzono poprzez badanie ośmiu parametrów, z których najważniejsze wydają się lepkość kinematyczna w temperaturach 40°C i 100°C, wskaźnik lepkości oraz temperatura zapłonu. W temperaturze 40°C wszystkie badane oleje roślinne wykazały wzrost lepkości kinematycznej wraz z wydłużeniem czasu starzenia do wartości 15% przy braku zmian dla oleju mineralnego. W temperaturze 100°C wszystkie badane oleje wykazały wzrost lepkości kinematycznej wraz z czasem starzenia. Po wyliczeniu wskaźnika lepkości uzyskano po 168 godzinach starzenia termicznego spadek wartości wskaźnika lepkości dla oleju lnianego i rzepakowego o 2 jednostki, dla oleju rycynowego o 4 jednostki, natomiast dla oleju mineralnego Marinol RG 1240 odnotowano wzrost o 9 jednostek. Temperatura zapłonu w procesie starzenia wykazywała spadek dla wszystkich olejów roślinnych, a wzrost dla oleju mineralnego. Badania wpływu olejów na wybrane metale przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie zastosowano jednoczesną ekspozycję zestawu składającego się z jedenastu różnych płytek metalowych (aluminium, mosiądz, miedź, brąz, nikiel, stal niskowęglowa, stal ocynkowana, stal nierdzewna, cynk, chrom, ołów). W drugim etapie analizowano oddzielnie wpływ trzech wybranych metali, tj. żeliwa, miedzi oraz stali ocynkowanej. W pierwszym etapie badań odnotowano dla oleju lnianego wzrost zawartości żelaza, ołowiu, cynku i miedzi, dla oleju rycynowego ołowiu i cynku, dla oleju rzepakowego miedzi i cynku przy wzroście zawartości miedzi i cynku dla oleju mineralnego. Zaobserwowane różnice potwierdziły istotny wpływ rodzaju oleju na przebieg oddziaływań metal-olej, w szczególności w kontekście skłonności do migracji pierwiastków metalicznych w warunkach podwyższonej temperatury. W drugim etapie uzyskano zmianę masy płytek metalowych jedynie dla oleju lnianego w przypadku stali ocynkowanej i oleju mineralnego w przypadku żeliwa i stali ocynkowanej. Wyniki przeprowadzonych badań starzeniowych zostały następnie podsumowane w ujęciu syntetycznym i przeanalizowane pod kątem stabilności eksploatacyjnej olejów, gdzie kluczowe znaczenie ma stabilność lepkości, odporność na degradację termiczną oraz ograniczona interakcja z materiałami konstrukcyjnymi. Uwzględniając uzyskane wyniki, zdecydowano o wykluczeniu oleju lnianego z dalszych badań. Następnie Doktorantka przystąpiła do badania mieszanin mineralno-roślinnych. Założono w nich graniczne udziały olejów roślinnych od 5 do 10% dla oleju rycynowego i od 5 do 20% dla oleju rzepakowego. Przy użyciu analizy korelacyjnej i informacji podanych przez producenta silnika okrętowego MAN L32/40 do określenia jakości mieszanin olejów mineralno-roślinnych wybrano trzy parametry: lepkość kinematyczną w temperaturze 100°C, wskaźnik lepkości (VI) oraz temperaturę zapłonu. Badaniom poddano 12 mieszanin o zróżnicowanym w założonych granicach składzie procentowym. Dziewięć z nich posłużyło do wyznaczenia modeli regresyjnych wybranych parametrów oceny, a trzy do weryfikacji otrzymanych modeli. W wyniku prac Doktorantka otrzymała model

liniowy wpływu składu mieszaniny na lepkość kinematyczną w 100°C i wpływu składu mieszaniny na wskaźnik lepkości. Dla wpływu składu mieszaniny olejowej na temperaturę zapłonu wyznaczono model kubiczny. Wszystkie modele osiągnęły istotność statystyczną określoną współczynnikiem p-value poniżej 0.05 natomiast współczynnik determinacji, wysoki dla modeli liniowych powyżej 0.92, dla modelu kubicznego osiągnął wartość 0.3701. Weryfikacja opracowanych modeli potwierdziła ich skuteczność wykazując maksymalne błędy względne o wartościach 4, 7 i 10%. Na tej podstawie uznano, że opracowane modele regresyjne mogą być wykorzystane do szacowania właściwości fizykochemicznych mieszanin mineralno-roślinnych w badanym obszarze składu. Ostatecznie, przy użyciu opracowanych modeli Doktorantka zaprojektowała skład mieszaniny olejów rycynowego, rzepakowego i mineralnego, który w możliwie największym stopniu spełnia przyjęte wymagania użytkowe. W tym celu zastosowano metodę funkcji użyteczności przyjmując za kryteria oceny utrzymanie lepkości kinematycznej w temperaturze 100°C, w zakresie wymaganym dla klasy lepkościowej SAE 40, dążenie do możliwie wysokich wartości wskaźnika lepkości zapewniających stabilność lepkościową w szerokim zakresie temperatur oraz dążenie do możliwie wysokiej temperatury zapłonu. Wskazany skład to: 5 % oleju rycynowego, 13,26 % oleju rzepakowego oraz 81,74 % oleju mineralnego Marinol RG 1240. Na podstawie wyników badań przedstawionych w tym rozdziale stwierdzam, iż założony cel rozprawy został osiągnięty.

W rozdziale ósmym Doktorantka przeprowadziła analizę i przedstawiła interpretację wyników uprzednio przeprowadzonych badań dotyczących właściwości fizykochemicznych badanych olejów oraz ich mieszanin, z uwzględnieniem wpływu starzenia termicznego i oddziaływań olej-metal. Łączna interpretacja właściwości fizykochemicznych oraz wyników badań reologicznych i tribologicznych olejów w stanie świeżym jednoznacznie wskazuje, że żaden z analizowanych olejów roślinnych nie spełnia samodzielnie podstawowych wymagań stawianych olejom silnikowym typu TPEO przeznaczonym do pracy w warunkach wysokotemperaturowych, charakterystycznych dla czterosurowego silnika średnioobrotowego typu MAN L32/40. Dodatkowo w analizowanych warunkach starzenia czyste oleje roślinne wykazują ograniczoną stabilność parametrów eksploatacyjnych w czasie, szczególnie w zakresie lepkości oraz temperatury zapłonu. Wyniki te wskazują, że ich bezpośrednie zastosowanie jako samodzielnych olejów silnikowych do pracy w warunkach eksploatacji silnika okrętowego jest ograniczone, natomiast racjonalne jest rozpatrywanie ich jako komponentów mieszanin z olejem mineralnym. W przypadku oddziaływań olejów z metalami w warunkach starzenia termicznego interpretacja wyników badań prowadzi do wniosków, że rodzaj oleju w istotny sposób determinuje intensywność oddziaływań z metalami w warunkach starzenia termicznego, co wskazuje na konieczność racjonalnego podejścia do wyznaczania składu mieszanin olejów smarnych. Interpretacja wyników badań dla mieszanin mineralno-roślinnych

wykazała, że czyste oleje roślinne, wykazujące ograniczoną stabilność w warunkach podwyższonej temperatury, mogą zostać efektywnie wykorzystane jako komponenty mieszanin z olejem mineralnym. Przedstawione rezultaty potwierdzają, że poprzez racjonalne projektowanie proporcji składników możliwe jest opracowanie mieszanin mineralno-roślinnych spełniających założone wymagania. Tym samym hipoteza rozprawy została potwierdzona.

Oceniana rozprawa doktorska została zakończona w rozdziale dziewiątym i dziesiątym, w których Doktorantka zidentyfikowała kierunki dalszych badań i sformułowała wnioski końcowe. Należy tu podkreślić, że identyfikacja licznych kierunków dalszych badań stanowi przesłankę potwierdzającą istotność oraz nierozwiązany charakter analizowanego problemu badawczego.

#### **4. Ocena merytoryczna i uwagi**

Strona metodyczna układu pracy została zredagowana prawidłowo. Badania przeprowadzone przez mgr inż. Małgorzatę Malinowską są bardzo obszerne i wymagały ogromnego nakładu pracy. Należy również podkreślić, iż wykonane eksperymenty szczególnie w zakresie badania starzenia olejów roślinnych są unikalne i znacząco rozwijają bazę naukowo-eksperymentalną. Opracowanie naukowe cechuje się bardzo dużym zakresem obejmującym swoim zasięgiem zarówno zagadnienia z dziedziny chemii, zagadnienia materiałowe jak i eksploatacyjne. W rozprawie Doktorantka zastosowała bardzo różnorodny aparat matematyczny pozwalający na wnikliwą i szczegółową analizę otrzymanych wyników eksperymentów, opracowanie dokładnych modeli matematycznych analizowanych zagadnień oraz przeprowadzenie skutecznej i wiarygodnej weryfikacji poprawności ich działania. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na rzetelność zaprezentowanych prac jest wykazany przez Doktorantkę stopień zrozumienia zarówno zagadnień technicznych rozważanych w rozprawie jak i zaawansowanego i zróżnicowanego aparatu matematycznego. W tym względzie Doktorantka wykazała wysokie kompetencje w zakresie opracowania i realizacji metodyki badań. W rozprawie Doktorantka słusznie założyła, że zastosowanie odpowiednio dobranych olejów roślinnych jako dodatków do mineralnego oleju silnikowego umożliwia otrzymanie mieszanin o właściwościach fizykochemicznych zbliżonych do konwencjonalnych morskich olejów silnikowych, spełniających określone wymagania eksploatacyjne. Założenie to zostało w wyniku prowadzonych prac w pełni potwierdzone. Na uwagę zasługują również opracowane w ramach pracy bardzo trafne systemy i kryteria oceny przydatności eksploatacyjnej olejów mineralnych i ich mieszanin. Mogą one stanowić wytyczne dla inżynierów eksploataatorów w dziedzinie doboru olejów smarnych silników okrętowych. Również opisany sposób opracowania odpowiedniego składu mieszaniny olejów roślinnych i oleju mineralnego i zaproponowana kompleksowa metodyka badawcza posiada potencjał aplikacyjny pozwalający przyszłym inżynierom na

zwiększenie udziału olejów roślinnych w przygotowaniu mieszanin smarnych silników morskich zwiększając tym samym ich ekologiczność i biodegradowalność.

Zaprezentowana metodyka badawcza pozwoliła Doktorantce na zrealizowanie celu głównego rozprawy i wszystkich celów szczegółowych oraz istotnych osiągnięć, do których należy zaliczyć:

1. Istotny dobór tematu i kierunku badań, których potrzeba została potwierdzona w wyniku przeprowadzonych badań literaturowych.
2. Opracowanie nowatorskiego i istotnego eksploatacyjnie systemu oceny jakości użytkowej olejów roślinnych.
3. Opracowanie autorskiej oryginalnej metodyki i przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań właściwości reologicznych i fizykochemicznych olejów roślinnych.
4. Zaprojektowanie, opracowanie metodyki i przeprowadzenie unikalnych badań wpływu starzenia termicznego na właściwości olejów roślinnych.
5. Zaprojektowanie, opracowanie metodyki i przeprowadzenie unikalnych badań wpływu olejów na wybrane metale w procesie termicznego starzenia.
6. Opracowanie planu eksperymentu w ramach badań użyteczności eksploatacyjnej mieszanin olejów roślinnych i oleju mineralnego.
7. Przedmiotową i merytoryczną identyfikację parametrów fizykochemicznych do oceny jakości użytkowej mieszanin mineralno-roślinnych jako środków smarnych przeznaczonych dla czterosuwowego silnika okrętowego.
8. Umiejętne i świadome wykorzystanie aparatu matematycznego prowadzące do opracowania i weryfikacji poprawności działania modeli opisujących zależności pomiędzy składem mieszanin mineralno-roślinnych a ich właściwościami fizykochemicznymi.
9. Zaprojektowanie składu mieszaniny olejów roślinnych i oleju mineralnego najkorzystniejszej pod względem wymagań eksploatacyjnych czterosuwowego silnika okrętowego.

Opisane w rozprawie doktorskiej oryginalne badania naukowe, wskazują na dogłębną znajomość problematyki związanej z zagadnieniami badania, analizy olejów roślinnych i projektowania roślinno-mineralnych mieszanin olejów smarnych. Obszerność opracowania naukowego świadczy o dużej dojrzałości naukowej Doktorantki, jej samodzielności w identyfikowaniu problemu i celu naukowego oraz rozwiązywaniu go w sposób logiczny i kompleksowy, aż do wyciągnięcia konstruktywnych wniosków.

Po zapoznaniu się z treścią dysertacji przedłożonej do recenzji sformułowano pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym, wymagające odniesienia się przez doktorantkę, które jednak nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę pracy:

1. Na s. 7 przedstawiono pięć podstawowych funkcji oleju w silniku spalinowym, jednakże na s. 28 Doktorantka podała, że ocenę zrealizowano na podstawie

trzech podstawowych funkcji bez komentarza w jaki sposób wybrano trzy funkcje spośród pięciu.

2. W metodzie OPTIMUM użytej do określenia jakości użytkowej olejów roślinnych przyjęto wskaźnik lepkości jako parametr referencyjny – wybór taki wymaga dodatkowego komentarza.
3. Zastosowane uśrednianie ocen ekspertów na poziomie macierzy porównań jest podejściem dopuszczalnym w metodzie AHP, jednak zasadne wydaje się rozważenie alternatywnej procedury polegającej na wyznaczeniu wektorów wag dla poszczególnych ekspertów, a następnie ich agregacji. Takie podejście mogłoby umożliwić lepsze odwzorowanie zróżnicowania opinii ekspertów.
4. Na s. 43 stwierdzono, że „Ostateczna klasyfikacja jest iloczynem znormalizowanych wartości oraz wag parametrów fizykochemicznych” – wydaje się, że ostateczna klasyfikacja jest sumą iloczynów znormalizowanych wartości oraz wag parametrów fizykochemicznych.
5. Na s. 48 w przedstawionym opisie obiektu badań nie uwzględniono prędkości obrotowych pracy silnika MAN L32/40, które stanowią istotny parametr jego charakterystyki eksploatacyjnej.
6. Badania wpływu olejów na wybrane metale w procesie termicznego starzenia przeprowadzono w temperaturze 100°C. Jak słusznie zauważyła Doktorantka, lokalnie temperatura w systemie eksploatacyjnym może przekraczać 110-120°C – czy uwzględniono, że wzmożona migracja pierwiastków do fazy olejowej może występować w zakresie występowania tych lokalnych ekstremalnych wartości temperatur?
7. Do drugiego etapu badań wpływu olejów na wybrane metale w procesie termicznego starzenia Doktorantka wybrała żeliwo, miedź i stal ocynkowana; wnioskując z tabeli 21 metalami konstrukcyjnymi najbardziej narażonymi na kontakt z olejem smarnym są żeliwo, miedź, chrom, brąz i stal niskowęglowa – wybór dokonany przez Doktorantkę wymaga dokładniejszego wyjaśnienia.
8. Na s. 71 Doktorantka podaje, że w większości badań zaprezentowanych w rozprawie wykonano od trzech do pięciu powtórzeń - liczba powtórzeń pomiarów na poziomie 3–5 wydaje się niewystarczająca do uzyskania wiarygodnych wyników statystycznych. Zasadne byłoby zwiększenie liczby powtórzeń (np. do co najmniej 7 lub więcej), co pozwoliłoby na ograniczenie niepewności estymacji oraz zawężenie przedziałów ufności, szczególnie w kontekście zastosowania rozkładu t-Studenta dla małych prób.
9. W opisie badań zależności lepkości dynamicznej od temperatury wskazano zakres temperatur, jednak brak jest informacji o przyjętym kroku temperaturowym, co utrudnia pełną ocenę rozdzielczości pomiarowej.
10. Przy opracowywaniu modeli właściwości fizykochemicznych mieszanin roślinno-mineralnych Doktorantka zaproponowała plan eksperymentu

obejmujący dwanaście różnych składów mieszaniny. Dziewięć z nich użyto do zbudowania modeli a 3 do ich weryfikacji; Każdy model odwzorowywał powierzchnię o nieznanym kształcie w przestrzeni 3D - w odniesieniu do modelowania powierzchni o nieznanym kształcie zasadne wydaje się zwiększenie liczby punktów pomiarowych, co umożliwiłoby dokładniejsze odwzorowanie jej charakterystyki oraz ograniczenie niepewności aproksymacji – analogiczna uwaga dotyczy ilości punktów weryfikacji modeli.

11. Przy opracowywaniu modeli właściwości fizykochemicznych mieszanin roślinno-mineralnych Doktorantka zaproponowała zastosowanie równania regresji maksymalnie trzeciego stopnia – zastosowanie regresji do trzeciego stopnia stanowi poprawne podejście, jednak rozważenie modeli wyższych rzędów mogłoby dodatkowo wzbogacić analizę i umożliwić ocenę potencjalnych nieliniowości badanego zjawiska.
12. W pracy nie uwzględniono wpływu specyficznych warunków środowiska morskiego, w tym podwyższonego zasolenia, które może znacząco oddziaływać na właściwości eksploatacyjne analizowanych układów.

## 5. Ocena redakcyjna

Układ pracy jest logiczny, przejrzysty i spójny. Przyjęta struktura odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim w zakresie zarówno kompozycji, jak i kolejności prezentowanych treści. Poszczególne rozdziały zostały właściwie powiązane, a tok wywodu jest konsekwentny i umożliwia czytelnikowi śledzenie kolejnych etapów rozważań – od części wprowadzającej, poprzez genezę, cel, hipotezę, zakres i plan pracy, następnie opis metodologii przeprowadzonych badań, analizę ich wyników, aż do wniosków końcowych. Język pracy w zdecydowanej większości spełnia standardy stylu naukowego, charakteryzuje się odpowiednią precyzją terminologiczną właściwą dla dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz poprawnością w zakresie formułowania myśli technicznych.

W tekście występują sporadyczne uchybienia o charakterze redakcyjnym i językowym. Uchybienia te mają charakter porządkowy i redakcyjny, nie wpływają na merytoryczną wartość pracy ani na poprawność przeprowadzonych analiz, jednak ich eliminacja przyczyniłaby się do podniesienia ogólnej jakości edytorskiej rozprawy.

Zauważone błędy zostały zestawione w poniżej liście:

1. s.14 l.18 – jest „Biosmary, szczególnie syntetyczne estry, wykazują znacznie niższe wskaźniki wpływu dotyczące eutrofizacja, zakwaszenia czy toksyczności, co stanowi kolejną przewagę z perspektywy środowiskowej” – powinno być „Biosmary, szczególnie syntetyczne estry, wykazują znacznie niższe wskaźniki wpływu dotyczące **eutrofizacji**, zakwaszenia czy toksyczności, co stanowi kolejną przewagę z perspektywy środowiskowej”

2. s. 42 l.27 – jest odwołanie do tabeli 12 – tabeli takiej nie ma w recenzowanej rozprawie
3. s. 141 l. 41 – jest „Ten wynik jest spójny z obserwowanymi zmianami masy oraz późniejszym pogorszeniem właściwości reologicznych” – powinno być „Ten wynik jest spójny z obserwowanymi zmianami masy oraz późniejszym pogorszeniem właściwości reologicznych.”
4. s. 152 l. 1 – w zdaniu „Ocena tej synergii powinna obejmować wpływ warunków pracy charakterystycznych dla takich układów, takich jak krótkie cykle cieplne, szybkie zmiany obciążeń czy obecność zaawansowanych systemów sterowania, na właściwości fizykochemiczne oleju, jego degradację oraz trwałość filmu smarnego.” - podwójnie użyto słowa „takich”

## 6. Ocena końcowa

Po analizie treści i wyników badań zamieszczonych w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Malinowskiej pt. „Badanie i analiza wpływu wybranych dodatków roślinnych na parametry eksploatacyjne oleju smarnego stosowanego w silnikach okrętowych” stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Prawidłowo sformułowany problem badawczy jest aktualny i ma znaczenie użytkowe. Przyjęte metody badań olejów roślinnych i ich mieszanin oraz sposób budowy modeli właściwości fizykochemicznych mieszanin roślinno-mineralnych pozwalają stwierdzić, że przyjęte podejście do realizacji celu pracy było słuszne. Rozwiązując problem badawczy, Doktorantka wykazała się wysokimi kompetencjami w zakresie zagadnień materiałowych środków smarnych, zagadnień eksploatacyjnych rozważanych w rozprawie jak i zaawansowanego i zróżnicowanego aparatu matematycznego, co pozwoliło jej ostatecznie rozwiązać zadania naukowe i osiągnąć cel pracy.

Autorka wykazała się znajomością problematyki układów eksploatacyjnych silników okrętowych w szczególności zagadnień dotyczących układów i środków smarnych oraz samodzielnością rozwiązywania oryginalnych problemów naukowych.

Pod względem metodologicznym praca jest prawidłowa. Oceniając całość pracy, stwierdzam, że Autorka wykazała przygotowanie w zakresie znajomości wymagań formalnych i metod badań naukowych, co wobec rozwiązania oryginalnego problemu badawczego, potwierdza przygotowanie Doktorantki do pracy naukowej.

Stwierdzam, że przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska mgr inż. Małgorzaty Malinowskiej pt. „Badanie i analiza wpływu wybranych dodatków roślinnych na parametry eksploatacyjne oleju smarnego stosowanego w silnikach okrętowych” spełnia określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późniejszymi zmianami). Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr inż. Małgorzaty Malinowskiej do publicznej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie biorąc pod uwagę istotność naukową i użyteczną rozważanego w dysertacji zagadnienia, rozległy zakres i innowacyjność przeprowadzonych badań oraz rzetelność i szczegółowość zrealizowanego procesu badawczego wnoszę o wyróżnienie ocenianej pracy doktorskiej.

Radom, 04.05.2026

dr hab. inż. Michał Pająk, prof. URad

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Michał Pająk', written in a cursive style.

