



Poznań 30.01.2026

dr hab. inż. Łukasz Warguła, prof. PP

Instytut Konstrukcji Maszyn

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Politechnika Poznańska

## RECENZJA

praca doktorska mgr inż. Daniela Darnikowskiego

pt.: „*Methodology for investigating the degradation processes of modern materials used in alternative energy sources exposed to fire and/or mechanical overloads*”

**Promotor:** dr hab. inż. Magdalena Mieloszyk, prof. IMP PAN

### 1. Podstawa prawna

Podstawą wykonania recenzji było pismo Pana dr hab. inż. Grzegorza Żywicy prof. IMP PAN Zastępcy Dyrektora do Spraw Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN informujące o powołaniu mnie na recenzenta w postępowaniu doktorskim Pana mgr inż. Daniela Darnikowskiego, na posiedzeniu w dniu 10.12.2025 r.

### 2. Ogólny charakter rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „*Methodology for investigating the degradation processes of modern materials used in alternative energy sources exposed to fire and/or mechanical overloads*” dotyczy metodologii badania procesów degradacji nowoczesnych materiałów stosowanych w alternatywnych źródłach energii, poddawanych oddziaływaniu ognia oraz przeciążeń mechanicznych. Doktorant podejmuje aktualny i istotny z punktu widzenia inżynierii mechanicznej problem badawczy, związany z poszukiwaniem i rozwojem metod umożliwiających poprawę procedur badawczych akumulatorów stosowanych w pojazdach, urządzeniach mobilnych oraz stacjonarnych systemach magazynowania energii. Badania zostały przeprowadzone w dwóch uzupełniających się środowiskach: eksperymentalnym oraz symulacyjnym. Rozprawa składa się z ośmiu głównych rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem oraz wykazem skrótów stosowanych w tekście. Po rozdziale ósmym (160 strona), zawierającym wnioski końcowe, zamieszczono załączniki, a następnie bibliografię obejmującą 513 pozycji literaturowych. Całość rozprawy liczy 235 stron.

**Rozdział pierwszy** wprowadza w problematykę bezpieczeństwa akumulatorów litowo-jonowych w kontekście dynamicznego rozwoju elektromobilności oraz systemów magazynowania energii. Autor przedstawia historyczny rozwój technologii akumulatorowych, rozpoczynając od odkrycia litu i pierwszych ogniw elektrochemicznych, a następnie opisuje ewolucję prowadzącą do współczesnych akumulatorów litowo-jonowych o wysokiej gęstości energii. Szczególny nacisk



położono na gwałtowny wzrost liczby pojazdów elektrycznych oraz stacjonarnych magazynów energii w ostatnich latach, co znacząco zwiększyło skalę potencjalnych zagrożeń pożarowych.

Centralnym zagadnieniem bezpieczeństwa omawianym w rozdziale jest zjawisko ucieczki termicznej, rozumiane jako samonapędzający się proces reakcji egzotermicznych prowadzących do gwałtownego wzrostu temperatury, pożaru lub eksplozji akumulatora. Autor analizuje zarówno techniczne aspekty tego zjawiska, jak i jego odbiór społeczny, wskazując na rozbieżność pomiędzy statystycznie niską częstością pożarów pojazdów elektrycznych a wysokim poziomem obaw społecznych wywołanych medialnymi doniesieniami o spektakularnych incydentach.

W dalszej części rozdziału omówiono charakterystyczne cechy pożarów akumulatorów litowo-jonowych, takie jak długotrwałość spalania, możliwość ponownego zapłonu oraz emisja toksycznych gazów. Wskazano, że te cechy istotnie odróżniają je od pożarów paliw konwencjonalnych i wymagają odmiennych metod badawczych oraz regulacyjnych. Rozdział kończy się wprowadzeniem zagadnienia normalizacji badań bezpieczeństwa oraz wskazaniem ograniczeń obecnie stosowanych procedur, co stanowi punkt wyjścia do dalszych analiz w rozprawie.

Zdaniem recenzenta rozdział wprowadzający charakteryzuje się bardzo szczegółowym i rozbudowanym historycznym omówieniem rozwoju technologii bateryjnych, które skutecznie porządkuje genezę i znaczenie akumulatorów litowo-jonowych, jednak miejscami wykracza poza funkcję klasycznego wprowadzenia. Podrozdział 1.1 poświęcony motywacji i tłu badań w istocie pełni standardową rolę elementu wprowadzającego i mógłby zostać włączony bezpośrednio do treści rozdziału pierwszego, gdyż w sposób rzeczowy konkretyzuje zakres pracy bez jego nadmiernego wydłużania. Z kolei podrozdział 1.2 zawierający zarys pracy ma charakter zbliżony do streszczenia rozprawy, co sugeruje, że jego treść mogłaby zostać przeniesiona do klasycznego abstraktu, ograniczając tym samym powtórzenia i rozcłunkowanie narracji. Recenzent zwraca również uwagę, że przegląd literaturowy w rozdziale pierwszym koncentruje się głównie na rozwoju technologii, jej zaletach, rosnącej popularności oraz wymaganiach homologacyjnych i testowych, natomiast w mniejszym stopniu odnosi się do innych istotnych wad akumulatorów litowo-jonowych, niezwiązanych bezpośrednio z pożarami, takich jak degradacja pojemności, trwałość cykliczna, kwestie środowiskowe czy problemy eksploatacyjne.

**Rozdział drugi** stanowi techniczne podstawy rozprawy i koncentruje się na budowie, zasadzie działania oraz mechanizmach degradacji akumulatorów litowo-jonowych. Autor szczegółowo opisuje funkcję podstawowych komponentów ogniwa, czyli anody, katody, elektrolitu, separatora oraz warstwy pasywacyjnej. Podkreślono, że stabilność warstwy pasywacyjnej odgrywa kluczową rolę zarówno w kontekście trwałości, jak i bezpieczeństwa ogniwa.

Istotnym elementem rozdziału jest analiza wielofizycznego charakteru pracy akumulatora. Procesy elektrochemiczne, transport jonów, generacja ciepła oraz odkształcenia mechaniczne są ze sobą ściśle sprzężone, a ich zaburzenie może prowadzić do inicjacji ucieczki termicznej. Autor przedstawia szczegółowy opis sekwencji zdarzeń prowadzących do ucieczki termicznej, poczynając od degradacji warstwy pasywacyjnej, poprzez rozkład elektrolitu i stopienie separatora, aż po gwałtowne reakcje katodowe z wydzielaniem tlenu.

W kolejnych podrozdziałach omówiono scenariusze oddziaływań mechanicznych, elektrycznych i cieplnych. Wskazano, że uszkodzenia mechaniczne mogą prowadzić do zwarć wewnętrznych, oddziaływania elektryczne do osadzania litu i destabilizacji elektrod, natomiast oddziaływania cieplne przyspieszają reakcje rozkładu materiałów aktywnych. Autor podkreśla, że w rzeczywistych zdarzeniach awaryjnych scenariusze te często nakładają się na siebie, co znacząco utrudnia ocenę



bezpieczeństwa. Rozdział kończy się wnioskiem o konieczności holistycznego podejścia do badań bezpieczeństwa akumulatorów.

Zdaniem recenzenta rozdział drugi stanowi szczegółowe i poprawne opracowanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego budowy, zasad działania oraz mechanizmów degradacji akumulatorów litowo-jonowych. Przegląd literaturowy jest spójny i merytorycznie rzetelny, jednak w przeważającej mierze ma charakter opisowy. Autor skupia się na prezentacji ustalonych w literaturze informacji, w ograniczonym stopniu akcentując własne obserwacje, interpretacje lub krytyczną ocenę omawianych zagadnień w kontekście dalszych badań realizowanych w rozprawie. W rezultacie rozdział pełni przede wszystkim funkcję syntetycznego kompendium wiedzy, podczas gdy silniejsze wyeksponowanie autorskiej perspektywy mogłoby wyraźniej podkreślić jego związek z oryginalnym wkładem pracy.

**Rozdział trzeci** przedstawia uporządkowany i krytycznie ukierunkowany przegląd rozwiązań inżynierskich stosowanych w celu zapobiegania niekontrolowanemu rozwojowi zjawisk termicznych oraz ograniczania ich konsekwencji. Autor przeprowadza systematyczną klasyfikację systemów bezpieczeństwa, rozróżniając rozwiązania pasywne i aktywne, a następnie poddaje je analizie na poziomie pojedynczego ogniwa, modułu oraz całego pakietu baterijnego.

W części dotyczącej systemów pasywnych opisano rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe, takie jak separatory o podwyższonej odporności cieplnej, zawory bezpieczeństwa, bariery propagacji oraz materiały zmiennofazowe. Zwrócono uwagę, że systemy te nie wymagają zasilania ani sygnałów sterujących, jednak ich skuteczność jest ograniczona do określonych scenariuszy awaryjnych.

Systemy aktywne obejmują zarządzanie temperaturą, systemy detekcji i gaszenia, a także funkcje realizowane przez systemy zarządzania baterią. Autor porównuje rozwiązania stosowane w pojazdach elektrycznych oraz w stacjonarnych magazynach energii, wskazując na różnice wynikające z odmiennych warunków eksploatacji i wymagań regulacyjnych. Rozdział pełni funkcję łącznika pomiędzy analizą mechanizmów awarii, a projektowaniem metod badawczych, podkreślając, że skuteczność systemów bezpieczeństwa może być wiarygodnie oceniona jedynie przy użyciu odpowiednich procedur testowych.

Zdaniem recenzenta rozdział trzeci przedstawia szczegółowy i dobrze uporządkowany przegląd rozwiązań inżynierskich, który został uzupełniony autorskim podsumowaniem omawianych koncepcji. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że autor nie ogranicza się do opisu stosowanych systemów bezpieczeństwa, lecz wskazuje ich główne zalety, takie jak prostota działania, niezależność od systemów sterowania, skuteczność w ograniczaniu propagacji zjawisk termicznych oraz możliwość integracji z istniejącymi konstrukcjami. Jednocześnie autor jasno identyfikuje ograniczenia poszczególnych rozwiązań, w tym ich ograniczoną adaptacyjność do dynamicznych scenariuszy awaryjnych, zależność skuteczności od warunków eksploatacyjnych oraz kompromisy pomiędzy poziomem bezpieczeństwa a masą, kosztami i złożonością konstrukcyjną. Takie ujęcie nadaje rozdziałowi charakter analityczny i wzmacnia jego wartość poznawczą w kontekście dalszych badań przedstawionych w rozprawie.

**Rozdział czwarty** precyzuje główny cel naukowy i aplikacyjny rozprawy. Celem tym jest opracowanie ilościowej, powtarzalnej metodologii badań odporności ogniowej systemów akumulatorowych litowo-jonowych, która eliminuje ograniczenia testów z otwartym płomieniem stosowanych obecnie w regulacjach.



# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Można przyjąć, że autor formułuje tezę, zgodnie z którą adaptacja metod badawczych stosowanych na stanowiskach badawczych inżynierii pożarowej umożliwia uzyskanie stabilnych i kontrolowanych warunków cieplnych, a tym samym prowadzi do poprawy jakości danych pomiarowych oraz zwiększenia bezpieczeństwa prowadzonych badań. Rozdział ten jednoznacznie określa zakres pracy i stanowi istotny punkt odniesienia dla dalszych analiz eksperymentalnych i numerycznych.

Zdaniem recenzenta cel rozprawy został określony w sposób jasny, spójny i świadomy, z wyraźnym uwzględnieniem wieloaspektowego charakteru analizowanego zagadnienia. Autor trafnie identyfikuje złożoność problemu bezpieczeństwa systemów akumulatorowych, łącząc perspektywę materiałową, cieplną, mechaniczną oraz regulacyjną. Tak sformułowany cel stanowi solidną podstawę dla dalszych analiz teoretycznych i eksperymentalnych oraz zapewnia logiczną spójność całej rozprawy.

**Rozdział piąty** przedstawia szczegółową analizę międzynarodowych norm i regulacji dotyczących badań bezpieczeństwa akumulatorów. Autor omawia strukturę systemu normalizacyjnego oraz porównuje wymagania w zakresie testów mechanicznych, elektrycznych i środowiskowych. Szczególna uwaga poświęcona jest testom odporności ogniowej, w tym procedurze UNECE R100.03. Wskazano na jej zasadnicze ograniczenia, takie jak brak kontroli strumienia ciepła, podatność na warunki środowiskowe oraz jakościowy charakter kryteriów oceny. Analiza porównawcza z innymi normami ujawnia brak spójności podejść testowych oraz ograniczoną możliwość porównywania wyników pomiędzy laboratoriami. Rozdział jednoznacznie identyfikuje potrzebę opracowania bardziej precyzyjnej metodologii badawczej.

Zdaniem recenzenta rozdział ten stanowi kolejny bardzo dobrze przygotowany rozdział przeglądowy, spójny merytorycznie i wartościowy poznawczo. Jednocześnie pojawia się pytanie dotyczące jego usytuowania w strukturze rozprawy. Z uwagi na przeglądowy charakter treści oraz ich bezpośredni związek z wcześniejszymi analizami literaturowymi, rozdział ten mógłby zostać umieszczony przed sformulowaniem celu pracy, tworząc wraz z poprzednimi rozdziałami przeglądowymi jednolity blok wprowadzający.

**Rozdział szósty** jest kluczowym elementem rozprawy, w którym autor przedstawia i waliduje nową metodologię badań.

W pierwszej części rozdziału autor omawia podstawy teoretyczne związane z rozwojem pożarów akumulatorów litowo jonowych, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki strumieni cieplnych oddziałujących na obudowy systemów bateryjnych. Przedstawiono różnice pomiędzy oddziaływaniem płomienia otwartego a kontrolowanym oddziaływaniem cieplnym, wskazując na znaczenie konwekcji i promieniowania w inicjacji degradacji termicznej. Analiza ta stanowi fundament do dalszego porównania metod badawczych.

W kolejnym punkcie zaprezentowano wyniki analiz numerycznych służących do oceny warunków cieplnych występujących podczas obowiązujących testów odporności ogniowej, w szczególności testu UNECE R100.03. Autor wykazuje istotne zróżnicowanie rozkładów temperatur oraz strumieni ciepła w zależności od geometrii układu, ustawienia źródła ognia oraz warunków środowiskowych. Analizy te wskazują na ograniczoną kontrolowalność i powtarzalność obecnie stosowanych procedur płomieniowych.

Następnie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem testów z otwartym płomieniem. Autor analizuje rzeczywiste przebiegi temperatur, czasy inicjacji niekontrolowanego rozwoju zjawisk termicznych oraz zachowanie obudów systemów



akumulatorowych. Uzyskane dane potwierdzają znaczną zmienność wyników pomiędzy kolejnymi próbami, nawet przy zachowaniu nominalnie identycznych warunków testowych.

Istotnym elementem rozdziału jest analiza statystyczna danych pomiarowych pochodzących z testów płomieniowych. Autor wykazuje istotne rozrzuty wartości temperatur oraz czasów inicjacji procesów termicznych, co jednoznacznie potwierdza niską powtarzalność tej metody. Wskazano, że taka zmienność ogranicza wartość diagnostyczną testów oraz utrudnia porównywanie wyników pomiędzy różnymi laboratoriami.

W odpowiedzi na zidentyfikowane ograniczenia autor proponuje adaptację norm, stosowanych w inżynierii pożarowej konstrukcji, do badań obudów akumulatorów litowo-jonowych realizowanych w warunkach hali badawczej. Zaproponowana metodologia umożliwia uzyskanie stabilnego i powtarzalnego scenariusza oddziaływania cieplnego, o ściśle kontrolowanym przebiegu temperatury w czasie, co znacząco zwiększa jakość i porównywalność danych pomiarowych.

Realizacja adaptacji norm do badań obudów akumulatorów litowo-jonowych została przeprowadzona poprzez przeniesienie zasad kontroli oddziaływania cieplnego, charakterystycznych dla inżynierii pożarowej konstrukcji, do warunków stanowiska badawczego przeznaczonego do testów systemów bateryjnych. Kluczowym założeniem adaptacji było zachowanie normatywnego przebiegu temperatury w funkcji czasu, przy jednoczesnym dostosowaniu skali, geometrii oraz sposobu oddziaływania źródła ciepła do specyfiki badanych obudów. W warunkach stanowiska zastosowano kontrolowane źródła energii cieplnej, których moc i rozmieszczenie umożliwiały odtworzenie zadanej krzywej nagrzewania w sposób powtarzalny i przestrzennie jednorodny. Oddziaływanie cieplne realizowano w sposób pośredni, bez bezpośredniego kontaktu płomienia z badanym obiektem, co pozwoliło na znaczące ograniczenie wpływu zmiennych losowych, takich jak niestabilność płomienia, lokalne zawirowania czy oddziaływanie wiatru. Istotnym elementem adaptacji było rozszerzenie i usystematyzowanie aparatury pomiarowej. W badaniach zastosowano wielopunktowy system pomiaru temperatury, obejmujący zarówno powierzchnię obudowy, jak i jej wnętrze, co umożliwiło szczegółową analizę gradientów temperaturowych oraz opóźnień czasowych w przenikaniu ciepła. Uzupełniając rejestrowano parametry środowiskowe oraz sygnały związane z integralnością strukturalną obudowy, co zwiększyło wartość diagnostyczną testów. Adaptacja obejmowała również modyfikację kryteriów oceny odporności ogniowej. Zamiast jakościowych kryteriów zaliczenia opartych na obserwacji płomienia lub dymu, wprowadzono ilościowe wskaźniki związane z przebiegiem temperatury, czasem osiągnięcia progowych wartości krytycznych oraz charakterem degradacji materiałowej. Takie podejście umożliwiło jednoznaczne porównywanie wyników pomiędzy kolejnymi badaniami oraz pomiędzy różnymi obiektami testowymi. Całość procedury została poddana walidacji poprzez serię powtarzalnych testów na rzeczywistych obudowach systemów akumulatorowych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że adaptacja metod badawczych do warunków hali badawczej pozwala na istotne ograniczenie rozrzutów pomiarowych, zwiększenie bezpieczeństwa personelu oraz uzyskanie danych o wysokiej jakości, użytecznych zarówno w analizach naukowych, jak i w kontekście potencjalnych zmian regulacyjnych.

Zdaniem recenzenta rozdział ten stanowi bardzo cenny element rozprawy ze względu na zakres poruszanych zagadnień oraz ich znaczenie dla całości pracy. Jednocześnie w trakcie lektury można momentami odnieść wrażenie, że granica pomiędzy wynikami badań własnych doktoranta a treściami o charakterze przeglądu literaturowego nie zawsze jest jednoznacznie zaznaczona, co może prowadzić do pewnego zagubienia czytelnika. Pomimo tego rozdział dostarcza



wartościowego podsumowania analizowanego problemu oraz zawiera dojrzałą i merytorycznie cenną dyskusję, która istotnie wzbogaca interpretację uzyskanych wyników i ich odniesienie do stanu wiedzy.

W wybranych podrozdziałach tego rozdziału część metodologiczna mogłaby zostać opisana w sposób bardziej szczegółowy. Jedną z podstawowych cech publikacji prezentujących badania eksperymentalne jest bowiem takie przedstawienie procedur badawczych, aparatury oraz warunków pomiarowych, aby umożliwić ich odtworzenie przez innych badaczy. Bardziej rozbudowany opis zastosowanej metodyki zwiększyłby przejrzystość rozdziału oraz wzmocnił jego wartość naukową i replikacyjną.

**Rozdział siódmy** poświęcony jest opracowaniu i walidacji systemu oczyszczania emisji powstających podczas niekontrolowanego rozwoju procesów termicznych. Autor analizuje skład gazów emitowanych w trakcie awarii akumulatorów oraz zagrożenia zdrowotne i środowiskowe z nimi związane. Przedstawiono projekt systemu oczyszczania emisji powstających podczas niekontrolowanego rozwoju procesów termicznych w akumulatorach (TREAS), wyniki symulacji przepływu oraz badania eksperymentalne potwierdzające jego skuteczność. System ten umożliwia prowadzenie badań w sposób zgodny z wymaganiami bezpieczeństwa i ochrony środowiska, stanowiąc istotne uzupełnienie zaproponowanej metodologii badań ogniowych.

Zdaniem recenzenta w niniejszym rozdziale metodyka badań powinna zostać ponownie opisana w sposób bardziej precyzyjny, w szczególności w odniesieniu do zastosowanego modelu symulacyjnego. W publikacjach dotyczących modeli CFD standardem jest szczegółowe przedstawienie kluczowych elementów modelowania, takich jak geometria obliczeniowa, charakterystyka i jakość siatki obliczeniowej, przeprowadzona analiza niezależności wyników od zagęszczenia siatki, zastosowane modele turbulencji, warunki brzegowe i początkowe, przyjęte założenia fizyczne, metody dyskretyzacji oraz kryteria zbieżności obliczeń. Uzupełnienie opisu o te informacje zwiększyłoby przejrzystość rozdziału oraz umożliwiło pełniejszą ocenę poprawności i replikowalności przeprowadzonych symulacji. Jednocześnie recenzent podkreśla, że istotną wartością rozdziału jest praktyczne wdrożenie prezentowanego rozwiązania oraz jego powiązanie z rzeczywistymi badaniami eksperymentalnymi, co znacząco podnosi aplikacyjny charakter pracy.

**Rozdział ósmy** syntetyzuje wyniki rozprawy i podkreśla jej wkład w rozwój metod badań bezpieczeństwa akumulatorów litowo-jonowych. Autor wykazuje, że zaproponowana metodologia piecowa zapewnia wyższą powtarzalność, lepszą jakość danych oraz większe bezpieczeństwo niż testy z otwartym płomieniem. Wskazano potencjalne kierunki dalszych badań, obejmujące rozwój procedur oceny propagacji niekontrolowanego rozwoju zjawisk termicznych oraz integrację metod badawczych z analizą emisji gazowych. Rozdział kończy się podkreśleniem znaczenia pracy dla rozwoju bezpiecznej elektromobilności i transformacji energetycznej.

Zdaniem recenzenta podsumowanie rozprawy powinno mieć bardziej zwięzły i konkretny charakter. W szczególności powinno ono koncentrować się na syntetycznym przekazaniu kluczowych informacji, takich jak ponowne sformułowanie postawionej tezy i celu badawczego, wskazanie najważniejszych wyników pracy, jednoznaczne określenie wkładu badań w rozwój istniejącej literatury przedmiotu, zasygnalizowanie ograniczeń przeprowadzonych analiz oraz wskazanie kierunków dalszych badań lub rekomendacji aplikacyjnych. Taki sposób konstruowania podsumowań jest powszechnie zalecany w czasopiśmie naukowych indeksowanych w bazach Web of Science oraz Scopus. Pozostałe, bardziej rozbudowane treści



---

# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

---

o charakterze opisowym lub interpretacyjnym mogłyby zostać przeniesione do odrębnego rozdziału umieszczonego wcześniej w strukturze pracy, co przyczyniłoby się do poprawy klarowności i spójności całej rozprawy.

Na stronach 160–195 zamieszczono pięć załączników oznaczonych literami A–E, które stanowią uzupełnienie treści przedstawionych w głównych rozdziałach rozprawy.

**Załącznik A** zawiera uporządkowany przegląd podstawowych grup materiałów wykorzystywanych w akumulatorach litowo-jonowych, obejmujący materiały katodowe, anodowe, elektrolity oraz separatory. Przedstawiono charakterystykę głównych chemii katodowych, ze wskazaniem ich właściwości elektrochemicznych, gęstości energii oraz implikacji dla bezpieczeństwa termicznego. Omówiono również materiały anodowe oraz rolę elektrolitu i separatora w kontekście stabilności pracy ogniwa. Całość stanowi materiałowe tło umożliwiające właściwą interpretację wyników badań odporności ogniowej i degradacji termicznej przedstawionych w głównych rozdziałach rozprawy.

**Załącznik B** poświęcony jest przeglądowi systemów i rozwiązań technicznych stosowanych w celu zapobiegania rozwojowi niebezpiecznych zjawisk termicznych w akumulatorach oraz ograniczania ich skutków. Omówiono rolę systemów zarządzania baterią, a także rozwiązania z zakresu zarządzania temperaturą, w tym systemy chłodzenia powietrzem, cieczą, materiały zmiennofazowe oraz układy hybrydowe. Przegląd ten uzupełnia treści rozdziału trzeciego, dostarczając szerszego kontekstu technologicznego i porównawczego.

**Załącznik C** zawiera rozszerzone zestawy danych oraz dodatkowe wyniki pomiarów uzyskanych w trakcie badań eksperymentalnych. Przedstawione dane obejmują wyniki testów odporności ogniowej oraz analizy statystyczne, które nie zostały w pełni zaprezentowane w głównej części rozprawy. Załącznik ten zwiększa transparentność badań oraz umożliwia pogłębioną analizę wyników, stanowiąc istotne wsparcie dla wniosków sformułowanych w rozdziale szóstym.

**Załącznik D** stanowi uzupełnienie rozdziału siódmego i koncentruje się na zagadnieniach związanych z emisjami powstającymi podczas niekontrolowanego rozwoju procesów termicznych w akumulatorach. Omówiono skład i właściwości emitowanych gazów oraz związane z nimi zagrożenia zdrowotne i środowiskowe. Przedstawiono również przegląd metod oczyszczania i neutralizacji emisji, które stanowiły podstawę do zaprojektowania i wdrożenia systemu TREAS. Załącznik ten dostarcza uzasadnienia doboru zastosowanych rozwiązań technicznych.

**Załącznik E** zawiera kompletny wykaz norm, standardów oraz aktów regulacyjnych, które zostały wykorzystane i poddane analizie w rozprawie. Obejmuje on dokumenty międzynarodowe, europejskie oraz krajowe, odnoszące się do bezpieczeństwa akumulatorów, badań odporności ogniowej oraz systemów magazynowania energii. Załącznik pełni funkcję referencyjną i porządkującą, ułatwiając identyfikację podstaw normatywnych omawianych w głównych rozdziałach pracy.

**Literatura** wykorzystana w rozprawie, obejmująca 513 pozycji, jest w pełni uzasadniona i aktualna oraz stanowi szeroki i reprezentatywny przegląd stanu wiedzy w zakresie podejmowanej problematyki. Dobór źródeł świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w krajowym i międzynarodowym dorobku naukowym dotyczącym akumulatorów, metod ich badań oraz zagadnień z nimi powiązanych. Doktorant powołuje się na dwie prac, których jest współautorem.



# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Fakt ten należy ocenić pozytywnie, gdyż potwierdza aktywność naukową Doktoranta w obszarze objętym rozprawą oraz wskazuje, że wybrane fragmenty pracy doktorskiej opierają się na wynikach badań, które zostały już wcześniej opublikowane i uzyskały pozytywną ocenę w recenzowanym obiegu wydawniczym. Powyższe publikacje potwierdzają dojrzałość naukową Doktoranta oraz fakt, że przedstawione w rozprawie wyniki wpisują się w spójny i konsekwentnie realizowany program badawczy, akceptowany przez środowisko naukowe.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Methodology for investigating the degradation processes of modern materials used in alternative energy sources exposed to fire and/or mechanical overloads” stanowi spójne i logicznie uporządkowane opracowanie naukowe, poświęcone metodologii badania procesów degradacji nowoczesnych materiałów stosowanych w alternatywnych źródłach energii, poddawanych oddziaływaniu ognia oraz przeciążeń mechanicznych. Praca wpisuje się w aktualny nurt badań nad alternatywnymi źródłami napędu i podejmuje problem istotny z punktu widzenia inżynierii mechanicznej oraz rozwoju niskoemisyjnych układów napędowych.

Doktorant jasno formułuje cel pracy, którym jest opracowanie ilościowej, powtarzalnej metodologii badań odporności ogniowej systemów akumulatorowych litowo-jonowych, która eliminuje ograniczenia testów z otwartym płomieniem stosowanych obecnie w regulacjach. Cel ten realizowany jest konsekwentnie poprzez połączenie badań eksperymentalnych z analizami numerycznymi.

Struktura rozprawy jest przejrzysta i logiczna. W rozdziale pierwszym przedstawiono tło naukowe i techniczne rozprawy, uzasadniając aktualność problematyki bezpieczeństwa akumulatorów litowo-jonowych oraz znaczenie zjawiska niekontrolowanego narastania temperatury w kontekście elektromobilności i systemów magazynowania energii. Rozdział drugi zawiera analizę bezpieczeństwa akumulatorów litowo-jonowych, obejmującą ich budowę, zasady działania oraz mechanizmy degradacji i awarii, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu obciążeń mechanicznych, elektrycznych i cieplnych. W rozdziale trzecim przedstawiono przegląd pasywnych i aktywnych systemów bezpieczeństwa termicznego stosowanych w akumulatorach litowo-jonowych na poziomie ogniwa, modułu i pakietu. Rozdział czwarty poświęcono sformułowaniu celu pracy oraz głównej tezy badawczej, wraz z doprecyzowaniem zakresu i założeń rozprawy. W rozdziale piątym omówiono zagadnienia normalizacji i standaryzacji badań systemów magazynowania energii, identyfikując ograniczenia obowiązujących procedur badawczych, w szczególności w zakresie testów odporności ogniowej. Rozdział szósty zawiera autorską metodykę badań odporności ogniowej akumulatorów litowo-jonowych, obejmującą analizę teoretyczną zjawisk pożarowych, modelowanie numeryczne, badania eksperymentalne oraz analizę statystyczną, a także propozycję alternatywnej procedury badawczej. W rozdziale siódmym przedstawiono opracowanie i walidację systemu oczyszczania emisji powstających podczas rozkładu termicznego i spalania akumulatorów litowo-jonowych. Rozdział ósmy stanowi podsumowanie uzyskanych wyników, wskazuje oryginalny wkład pracy do stanu wiedzy oraz formułuje wnioski końcowe i kierunki dalszych badań.

Na szczególne podkreślenie zasługują elementy pracy o charakterze autorskim, wśród których należy wymienić: analizę powtarzalności i ograniczeń testów odporności ogniowej, opracowanie i walidację alternatywnej metodyki badań odporności ogniowej akumulatorów litowo-jonowych, przeprowadzenie autorskich badań eksperymentalnych, numeryczną analizę warunków wymiany



ciepła w testach odporności ogniowej, sformułowanie rekomendacji dotyczących zmian regulacyjnych oraz rozwoju norm badawczych, a także projekt, wykonanie i walidację systemu oczyszczania spalin. Istotnym osiągnięciem jest również integracja zagadnień bezpieczeństwa ogniowego, standaryzacji oraz ochrony środowiska, dotychczas rzadko analizowanych łącznie w literaturze przedmiotu. Praca ma wyraźny charakter poznawczo-aplikacyjny, a uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w badania nad bezpieczeństwem akumulatorów litowo-jonowych oraz ich zastosowaniem w systemach magazynowania energii i napędach pojazdów wykorzystujących alternatywne źródła energii.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska potwierdza, że Doktorant posiada wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną oraz wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Zastosowana w pracy metodyka badawcza oraz sposób realizacji poszczególnych zadań badawczych świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta. Praca została opracowana starannie, a założenia badawcze, uzyskane wyniki oraz ich interpretacja zostały przedstawione w sposób przejrzysty i logiczny. Doktorant wykazuje świadomość przyjmowanych założeń upraszczających, potrafi trafnie identyfikować ograniczenia prezentowanych rozwiązań oraz proponować racjonalne sposoby ich eliminacji. W ocenie recenzenta rozprawa stanowi cenny wkład w rozwój Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

#### 4. Uwagi, komentarze oraz pytania

Podczas analizy treści rozprawy pojawiają się pewne pytania, uwagi oraz komentarze o charakterze doprecyzowującym. Poniżej przedstawiono wybrane uwagi szczegółowe (część uwag została zamieszczona w sekcji 2 „Ogólny charakter rozprawy” i została sformułowana w trakcie omawiania poszczególnych rozdziałów):

- Czy Doktorant mógłby doprecyzować opis zastosowanego modelu CFD poprzez bardziej szczegółowe przedstawienie elementów kluczowych z punktu widzenia poprawności i replikowalności symulacji, w szczególności takich jak geometria obliczeniowa analizowanego układu, charakterystyka oraz jakość zastosowanej siatki obliczeniowej, informacja o przeprowadzeniu lub braku analizy niezależności wyników od zagęszczenia siatki, dobór i uzasadnienie zastosowanych modeli turbulencji, warunki brzegowe i początkowe, przyjęte założenia fizyczne, zastosowane metody dyskretyzacji oraz kryteria zbieżności obliczeń. Uzupełnienie tych informacji pozwoliłoby na pełniejszą ocenę poprawności przyjętej metodyki obliczeniowej oraz umożliwiłoby innym badaczom odtworzenie przeprowadzonych symulacji.
- Budowa stanowisk badawczych stanowi istotny element pracy konstruktorskiej, a wysoka jakość rozwiązań konstrukcyjnych jest często potwierdzana poprzez uzyskanie ochrony patentowej, przyznawanej za rozwiązania nowe oraz nieoczywiste dla znawcy danej dziedziny. W związku z tym pojawia się pytanie, czy posiada Pan ochronę patentową na zaproponowaną konstrukcję stanowiska badawczego lub jej wybrane elementy oprzyrządowania, a jeżeli nie, czy podejmował Pan próby uzyskania takiej ochrony.
- Jakie jest Pana stanowisko wobec publikacji z 2024 dotyczącej analizy oraz badań eksperymentalnych potencjalnych nowych technik mocowania stosowanych w badaniach wibracyjnych pakietów akumulatorów pojazdów elektrycznych na wzbudnikach elektromagnetycznych (Ślaski, Grzegorz, Mikołaj Spadło, Jacek Marcinkiewicz, and Wojciech



Konieczny. 2024. "Analysis and Experimental Tests of Potential New Mounting Techniques for Use in Vibration Testing of Electric Vehicle Battery Packs on Electromagnetic Exciters: Advantages and Disadvantages" *Applied Sciences* 14, no. 7: 2920. <https://doi.org/10.3390/app14072920>). Proszę również o wyjaśnienie, z jakich powodów pozycja ta nie została uwzględniona w rozprawie ani w prowadzonych analizach.

- Czy Doktorant mógłby odnieść się do kwestii innych istotnych ograniczeń i wad systemów akumulatorowych, niezwiązanych bezpośrednio z zagrożeniem pożarowym.

- Czy Doktorant mógłby rozważyć propozycję bardziej syntetycznego podsumowania, skoncentrowanego na ponownym sformułowaniu tezy lub pytania badawczego, przedstawieniu kluczowych wyników pracy, jednoznacznym określeniu wkładu badań w rozwój literatury przedmiotu, wskazaniu ograniczeń przeprowadzonych analiz oraz zarysowaniu kierunków dalszych badań lub rekomendacji aplikacyjnych.

- Czy doktorant mógłby zaproponować zestaw zaleceń dotyczących postępowania w przypadku transportu akumulatorów przekazywanych w ramach reklamacji, w szczególności takich, które mogą być potencjalnie uszkodzone, w tym wskazać rekomendowane procedury postępowania oraz środki ostrożności, jakie należałoby zastosować w tego typu sytuacjach.

Jak wspomniano wcześniej, należy zwrócić uwagę na kilka kwestii formalnych i redakcyjnych. Część dotycząca motywacji i tła badań powinna stanowić element wprowadzenia, a nie osobny rozdział. Jest to standardowa funkcja tej części pracy, która ma na celu doprecyzowanie problematyki badawczej bez nadmiernego rozbudowywania tekstu.

Rozdział 1.2 „Zarys pracy” w obecnej formie pełni de facto rolę streszczenia treści rozprawy. Wydaje się, że zastosowanie klasycznej struktury streszczenia byłoby w tym miejscu bardziej uzasadnione. Takie rozwiązanie ograniczyłoby rozwlekanie narracji oraz powtórzenia treści pojawiających się w kolejnych rozdziałach.

Przegląd literatury koncentruje się głównie na rozwoju technologii, jej zaletach oraz wzroście popularności, a także na przepisach homologacyjnych i wymaganiach dotyczących testowania. Brakuje natomiast odniesienia do wad i ograniczeń omawianych rozwiązań, innych niż zagrożenie pożarowe.

Analizy przedstawione w rozdziale drugim, poza szczegółowym opisem znanych informacji na temat badanego obiektu, powinny również zawierać autorskie podsumowanie, obejmujące własne uwagi, interpretacje oraz krytyczne spostrzeżenia autora.

Rozdział 5 stanowi kolejny rozdział przeglądowy i jest opracowany na wysokim poziomie merytorycznym. Nasuwa się jednak pytanie, czy nie powinien on zostać umieszczony przed sformułowaniem celu pracy, razem z wcześniejszymi przeglądami literaturowymi.

W obecnej strukturze miejscami trudno jednoznacznie rozróżnić, które wyniki stanowią badania autorskie doktoranta, a które są przywołane z literatury. Problem ten jest szczególnie widoczny w sytuacjach, gdy przed prezentacją wyników nie przedstawiono szczegółowych informacji dotyczących metodyki badań oraz obiektu badań, zarówno w odniesieniu do eksperymentów, jak i symulacji numerycznych.

Opis badań z wykorzystaniem modeli CFD powinien zostać przedstawiony w sposób bardziej precyzyjny, zwłaszcza w odniesieniu do zastosowanego modelu symulacyjnego. W publikacjach naukowych dotyczących obliczeń CFD standardem jest szczegółowe omówienie kluczowych



---

# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

---

elementów modelowania, takich jak: geometria obliczeniowa, charakterystyka i jakość siatki obliczeniowej, analiza niezależności wyników od zagęszczenia siatki, zastosowane modele turbulencji, warunki brzegowe i początkowe, przyjęte założenia fizyczne, metody dyskretyzacji oraz kryteria zbieżności obliczeń.

## 5. Wnioski końcowe

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych badań oraz to, że Doktorant wykazał się umiejętnością rozwiązania oryginalnego problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Podsumowując, wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN o dopuszczenie mgra inż. Daniela Darnikowskiego do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

*Lukasz Wągrzyn*