



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych
i Urzędzeń Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

Kraków, 15.07.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Pauliny Rolki
zatytułowanej **"Akumulacja energii w magazynach wykorzystujących
materiały zmiennofazowe z domieszkami"** wykonanej w Instytucie Maszyn
Przepływowych PAN im. Roberta Szwalskiego w Gdańsku pod opieką promotora
rozprawy dr hab. inż. Marcina Lackowskiego, prof. IMP PAN oraz promotora
pomocniczego dr inż. Romana Kwidzińskiego.

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Z-cy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn
Przepływowych PAN im. Roberta Szwalskiego w Gdańsku, Pana dr hab. inż. Grzegorza
Żywicy, prof. IMP PAN – zgodnie z pismem nr RN-520.2.2026.

2. Zasadność podjęcia tematu

Podjęcie tematu rozprawy wynika z rosnącego znaczenia efektywnego magazynowania
energii cieplnej oraz potrzeby zwiększenia sprawności systemów wykorzystujących
materiały zmiennofazowe (PCM). Materiały te umożliwiają akumulację znacznych ilości
energii podczas przemiany fazowej, jednak ich praktyczne zastosowanie ogranicza przede
wszystkim niska przewodność cieplna materiałów, wydłużająca proces ładowania
i rozładowania magazynów energii. Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków
poprawy ich właściwości jest zastosowanie odpowiednio dobranych nanodomieszek.

Jednocześnie brak jednoznacznych zależności pomiędzy rodzajem i stężeniem nanodomieszek a uzyskiwanymi właściwościami termofizycznymi różnych grup PCM uzasadnia konieczność prowadzenia systematycznych badań eksperymentalnych.

Uzyskane wyniki oraz sformułowane na ich podstawie wnioski pozwalają stwierdzić, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Rolki wnosi istotny wkład do rozwoju wiedzy w zakresie materiałów zmiennofazowych modyfikowanych nanodomieszkami oraz ich zastosowania w magazynowaniu energii cieplnej.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Pauliny Rolki posiada 164 strony, 9 numerowanych rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz skrótów i akronimów, bibliografię złożoną ze 117 pozycji literaturowych, zestawienie publikacji autorki rozprawy oraz dotychczasowej działalności naukowej, 4 załączniki. Rozprawa została napisana w języku polskim.

Zakres rozprawy obejmuje kompleksowe badania eksperymentalne niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych oraz materiałów modyfikowanych nanocząstkami grafenu i tlenku tytanu (IV). Autorka przeprowadziła analizę wpływu rodzaju i udziału wagowego nanodomieszek na przewodność cieplną, pojemność cieplną, temperaturę przemiany fazowej oraz zdolność do akumulacji energii cieplnej. Istotnym elementem pracy była również ocena stabilności nano-domieszkowanych materiałów zmiennofazowych, opracowanie metody ograniczania zjawiska sedymentacji nanocząstek z wykorzystaniem procesu barbotażu, przedstawienie wytycznych projektowych oraz koncepcji magazynu energii wykorzystującego opracowane materiały.

Rozdział 1 (5 stron) przedstawia kontekst badań, w którym Autorka uzasadnia potrzebę rozwoju technologii magazynowania energii w kontekście transformacji energetycznej i rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii. Przedstawiono podstawowe metody magazynowania energii cieplnej, ze szczególnym uwzględnieniem systemów wykorzystujących materiały zmiennofazowe. Rozdział stanowi czytelne wprowadzenie do problematyki podejmowanej w rozprawie.

Rozdział 2 (32 strony, 9 rysunków, 2 tabele) zawiera przegląd literatury dotyczącej materiałów zmiennofazowych oraz ich zastosowań w magazynowaniu energii. Omówiono właściwości różnych grup PCM, rozwiązania konstrukcyjne magazynów ciepła oraz metody

poprawy efektywności wymiany ciepła. Na podstawie analizy dostępnych badań Autorka identyfikuje luki badawcze, które uzasadniają podjęcie własnych badań eksperymentalnych.

W Rozdziale 3 (2 strony) Autorka sformułowała cel naukowy rozprawy i przedstawiła tezę badawczą oraz określiła zakres realizowanych prac.

Celem pracy doktorskiej jest poprawa przewodnictwa cieplnego niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych. Poprawa przewodnictwa cieplnego organicznych PCM zostanie osiągnięta w wyniku dodawania do nich nanocząstek grafenu lub tlenku tytanu (IV).

Teza rozprawy doktorskiej brzmi: **Dodanie wybranych domieszek do niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych spowoduje zwiększenie przewodnictwa cieplnego powstałej w ten sposób mieszaniny.**

Autorka jasno wskazuje, jakie problemy badawcze zamierza rozwiązać oraz jakie hipotezy będą podlegały weryfikacji. Zakres pracy został logicznie powiązany z przedstawionym wcześniej stanem wiedzy.

Rozdział 4 (20 stron, 20 rysunków, 3 tabele) poświęcono metodyce badań. Szczegółowo opisano zastosowane stanowiska laboratoryjne, wykorzystaną aparaturę pomiarową oraz procedury wyznaczania właściwości termofizycznych badanych materiałów. Przyjęta metodyka została dobrze uzasadniona i umożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników eksperymentalnych.

Rozdział 5 (18 stron, 23 rysunki, 7 tabel) przedstawia wyniki badań materiałów bazowych przed wprowadzeniem nanodomieszek. Autorka dokonała porównania parametrów termofizycznych uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi oraz skonfrontowała je z danymi producenta. Uzyskane wyniki stanowią punkt odniesienia dla dalszej oceny skuteczności modyfikacji materiałów zmiennofazowych.

Rozdział 6 (26 stron, 40 rysunków, 4 tabele) stanowi zasadniczą część rozprawy i zawiera wyniki badań materiałów zmiennofazowych modyfikowanych nanocząstkami grafenu oraz tlenku tytanu. Przeanalizowano wpływ rodzaju i zawartości domieszek na przewodność cieplną, pojemność cieplną oraz zdolność magazynowania energii. Wyniki przedstawiono w sposób umożliwiający ocenę efektywności zastosowanych modyfikacji oraz określenie optymalnych udziałów wagowych dodatków.

Rozdział 7 (8 stron, 5 rysunków) poświęcono zagadnieniu stabilności nano-domieszkowanych materiałów zmiennofazowych. Przeprowadzone badania wykazały występowanie zjawiska sedimentacji nanocząstek, które może ograniczać praktyczne

zastosowanie opracowanych materiałów. Rozdział zwraca uwagę na ważny problem eksploatacyjny, stosunkowo rzadko analizowany w literaturze.

W Rozdziale 8 (7 stron, 6 rysunków) Autorka proponuje autorskie rozwiązanie ograniczające skutki sedymentacji poprzez zastosowanie procesu barbotażu. Oceniono skuteczność tej metody oraz przedstawiono praktyczne zalecenia dotyczące projektowania magazynów energii wykorzystujących nano-domieszkowane materiały zmiennofazowe. Rozdział kończy prezentacja koncepcji nowego rozwiązania konstrukcyjnego magazynu energii.

Ostatni rozdział 9 (3 strony) zawiera syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników oraz najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Autorka wskazuje najistotniejsze osiągnięcia naukowe rozprawy, określa własny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej materiałów zmiennofazowych oraz przedstawia propozycje dalszych kierunków badań w tym obszarze.

Struktura rozprawy została opracowana w sposób logiczny i konsekwentny, a kolejność poszczególnych rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Przegląd literatury jest szeroki i dobrze udokumentowany, co świadczy o rzetelnym przygotowaniu Autorki do realizacji podjętej tematyki badawczej. Cel pracy oraz zakres badań zostały sformułowane jednoznacznie i odpowiadają tytułowi rozprawy. Za szczególnie wartościowe należy uznać połączenie badań podstawowych z analizą możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników, co zwiększa wartość aplikacyjną rozprawy.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Na wstępie informuję, że przedstawiona do oceny praca, jest to praca przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym i trudno znaleźć poważne błędy. Poniżej przedstawiam uwagi o charakterze krytycznym/dyskusyjnym:

1. Ograniczony zakres badanych materiałów. Badania wykonano dla dwóch parafin handlowych (RT22 HC i RT28 HC) oraz dwóch rodzajów nanodomieszek. Jest to wystarczające do realizacji celu pracy, utrudnia formułowanie bardziej ogólnych wniosków dotyczących całej grupy materiałów PCM.
2. Autorka przedstawia sposób przygotowania badanych materiałów oraz częściowo uzasadnia dobór nanodomieszek. W mojej opinii warto byłoby jednak szerzej omówić kryteria wyboru materiałów RT22 HC i RT28 HC oraz grafenu i TiO_2 na tle innych materiałów dostępnych w literaturze, co lepiej uzasadniłoby reprezentatywność

przeprowadzonych badań. Czy decydujące były względy aplikacyjne, analiza literatury, właściwości termofizyczne, dostępność materiałów czy też inne kryteria?

3. Brak porównania wyników analiz cieplnych z modelami predykcyjnymi. Wyniki eksperymentalne mogłyby zostać skonfrontowane z istniejącymi modelami przewidywania przewodności cieplnej kompozytów (np. Maxwell, Hamilton-Crosser), co pozwoliłoby lepiej wyjaśnić obserwowane zależności.

Uwagi redakcyjne:

1. W kilku miejscach stosowane są formy językowe typu „PCMów” lub „NEPCMów”. Z punktu widzenia poprawności języka technicznego bardziej naturalne wydaje się stosowanie określeń „materiały PCM”, „materiały NEPCM” lub odpowiednich polskich odpowiedników.
2. W pracy pojawiają się nieliczne błędy edytorskie i literowe, które nie wpływają na jej wartość merytoryczną. Np. literówka „Stroage” zamiast „Storage” w wykazie skrótów.

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Przedstawiony przez Doktorantkę temat rozprawy został sformułowany zgodnie z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim. Doktorantka wykazała się dogłębną znajomością literatury związanej z tematyką materiałów zmiennofazowych oraz metod zwiększania ich właściwości termofizycznych z wykorzystaniem nanodomieszek. Praca ma charakter eksperymentalny i obejmuje szeroki zakres badań laboratoryjnych wykonanych z zastosowaniem kilku komplementarnych metod pomiarowych, umożliwiających wyznaczenie właściwości termofizycznych badanych materiałów. Na szczególne podkreślenie zasługuje starannie opracowana metodyka badań, porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami pomiarowymi oraz kompleksowa analiza wpływu nanodomieszek zarówno na przewodność cieplną, jak i zdolność akumulacji energii oraz stabilność materiałów. Cennym elementem rozprawy jest również odniesienie uzyskanych wyników do praktycznych aspektów projektowania magazynów energii cieplnej.

Zastosowane przez Doktorantkę metody badawcze umożliwiły osiągnięcie założonego celu pracy. Struktura rozprawy tworzy spójną i logiczną całość, a jej poziom językowy

i edytorski nie budzi istotnych zastrzeżeń. Jako główne osiągnięcia Doktorantki w przedstawionej do recenzji rozprawie należy wskazać:

- Kompleksową ocenę wpływu nanocząstek grafenu i tlenku tytanu (IV) na właściwości termofizyczne niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych.
- Przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem komplementarnych metod pomiarowych.
- Wykazanie możliwości poprawy przewodności cieplnej materiałów PCM przy zachowaniu ich właściwości użytkowych.
- Ocenę stabilności otrzymanych nanokompozytów oraz wskazanie sposobu ograniczenia sedymentacji nanocząstek.
- Wskazanie potencjału aplikacyjnego opracowanych materiałów w systemach magazynowania energii cieplnej.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawione w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i nie podważają wysokiej wartości naukowej rozprawy. Doktorantka zrealizowała postawiony cel oraz przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu **poprawy przewodnictwa cieplnego niskotemperaturowych organicznych materiałów zmiennofazowych w wyniku dodawania nanocząstek grafenu lub tlenku tytanu (IV).**

Mgr inż. Paulina Rolka wykazała się szeroką wiedzą teoretyczną w zakresie magazynowania energii cieplnej, materiałów zmiennofazowych oraz metod badania ich właściwości termofizycznych. Udowodniła również umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, krytycznej analizy uzyskanych wyników oraz oceny potencjału aplikacyjnego opracowanych materiałów.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Rolki pt. *„Akumulacja energii w magazynach wykorzystujących materiały zmiennofazowe z domieszkami”* będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną kandydatki w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku o dopuszczenie mgr inż. Pauliny Rolki do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

