Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Panas

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Andrzej.Panas@wat.edu.pl
tel. 261 839 543

Warszawa, 11 sierpnia 2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Fabrykiwicza p.t.

Wpływ własności nanokompozytów na wydajność płaszczowo-rurowego magazynu energii cieplnej

I. Przedmiot i charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa w kategoriach ogólnych dotyczy zagadnienia doskonalenia procesów przetwarzania energii skutkujących między innymi zwiększeniem efektywności wykorzystania źródeł energii odnawialnej. Typowym problemem związanym z wykorzystaniem źródeł odnawialnych jest duża zmienność czasowa ich wydajności i związana z tym konieczność magazynowania energii. Ze względu na parametry egzergijne układów małej i średniej skali jednym z wygodnych sposobów odwracalnego przetwarzania energii jest jej gromadzenie w entalpii przemian fazowych substancji wielkocząsteczkowych. Istotną przeszkodą zwiększenia wydajności takich magazynów energii jest małą przewodność cieplna tej rodziny materiałów zmiennofazowych (PCM – Phase Change Materials), natomiast jednym z rozważanych sposobów pokonania trudności jest pomysł zwiększenia przewodności cieplnej poprzez zastosowanie dodatków wysokoprzewodzących. Badaniu efektów wprowadzenia wypełnienia dyspersyjnego do osnowy trzech typów węglowodorów alifatycznych z przemianą fazową ciało stałe – ciecz w przedziale pomiędzy 40. i 60. °C poświęcono niniejszą rozprawę doktorską.

Zarówno przeprowadzone badania jak i dokumentujące je opracowanie charakteryzują się szerokim wachlarzem środków metodologicznych. Wprawdzie nacisk został położony na doświadczenie, ale istotną podbudowę całości stanowi analiza teoretyczna w postaci modelowania numerycznego. W obszarze badań doświadczalnych wydzielić można badania wstępne wybranych właściwości cieplnofizycznych materiałów PCM, pilotażowe badania wymiany ciepła i przemiany fazowej w dwóch alternatywnie rozpatrywanych zasobnikach energii oraz badania zasadnicze wpływu wypełnienia nanostrukturalnego w osnowie materiałów zmiennofazowych na zmiany parametrów eksploatacyjnych zasobnika. Zasobnikiem który wykorzystano do doświadczeń ostatniej fazy, w dużej mierze w rezultacie porównania wyników pomiarów przeprowadzonych w układzie zasobnika walcowego i płaskiego, był zasobnik walcowy. Doświadczenia drugiej i trzeciej fazy poprzedzone zostały pracami projektowymi i konstrukcyjnymi oraz działaniami z zakresu planowania eksperymentu. Natomiast wyniki doświadczeń fazy pierwszej wykorzystano do określenia danych wejściowych modelu numerycznego badawczego zasobnika walcowego. Model numeryczny został opracowany przy wykorzystaniu środowiska OpenFOAM. Posłużył on do analizy zjawisk złożonej kondukcyjno-konwekcyjnej wymiany ciepła przy konwekcyjnym

ruchu fazy ciekłej z uwzględnieniem entalpii przemiany fazowej w uproszczonej geometrii quasi trójwymiarowej (modelowano warstwę przekroju prostopadłym do osi symetrii zasobnika). Wyniki modelowania numerycznego wykorzystano do opracowania procedur pomiarowych oraz w pracach projektowo-konstrukcyjnych. Jak z powyższego opisu wynika realizowane w ramach projektu doktorskiego zadania są ze sobą powiązane, a uzyskiwane wyniki wzajemnie się uzupełniają i tworzą spójną całość. Celem jaki postawił sobie Doktorant było określenie wpływu dwóch rodzajów dodatków nanostrukturalnych na zmianę czasu ładowania i rozładowania zasobnika energii z materiałem zmiennofazowym.

Indywidualny i oryginalny wkład Doktoranta zaznacza się nie tylko w przeprowadzeniu eksperymentów i opracowaniu uzyskanych oryginalnych wyników oraz opracowaniu wniosków. Wkład tworzą również: przygotowanie doświadczenia, określenie potrzeb i zakresu wstępnych badań właściwości cieplnofizycznych materiałów PCM, opracowanie technologii wytwarzania struktur zawiesinowych nanododatku w wielkocząsteczkowych materiałach zmiennofazowych, zaprojektowanie zasobnika badawczego, opracowanie modelu numerycznego i skuteczne wykorzystanie obliczeń numerycznych, zarówno w fazie przygotowania doświadczeń jak i w fazie analizy otrzymanych rezultatów.

Zarówno ze względu na konkretny cel i przedmiot działań jak i w aspekcie metodologicznym, rozprawę można zakwalifikować do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych i dyscypliny inżynieria mechaniczna.

II. Ocena rozprawy i uwagi o charakterze merytorycznym

Genezę rozpatrywanego przez Doktoranta problemu badawczego wyjaśniono w podsumowaniu obszernego przeglądu literatury. Poświęcono go między innymi zagadnieniom idei gromadzenia energii przy wykorzystaniu przemian fazowych, problemów intensyfikacji wymiany ciepła przy zastosowaniu dodatków materiałów – dobrych przewodników ciepła oraz przedstawieniu wybranych rozwiązań konstrukcyjnych zasobników energii wraz z dotychczas uzyskiwanymi wynikami. Jak widać sam pomysł konkretnego sposobu zwiększenia wydajności magazynów energii PCM nie jest nowy, ale ze względu na brak znaczącego postępu w tej dziedzinie każdy oryginalny wynik badań ma duże znaczenie, zarówno w aspekcie praktyki jak i ze względów poznawczych.

Nie tylko z danych przedstawionych w rozprawie, ale i w ocenie ogólnej zasadność podjęcia badań wykonanych w ramach realizacji ocenianej pracy doktorskiej nie podlega dyskusji. Podstawę do tego dają przede wszystkim zagadnienia ogólne tkwiące u podstaw charakteryzowanych powyżej działań, które mają na względzie doskonalenie technologii oszczędnego przetwarzania energii. Ale i w zakresie rozpatrywanego problemu szczególnego - opracowania sposobu wykorzystania wyjątkowych właściwości nanomateriałów - tematyka jest jak najbardziej na czasie. Aktualności tematyki rozprawy towarzyszy nowoczesny, rozbudowany warsztat badawczy. Przedmiot rozprawy uważam zatem za uzasadniony i nie mam zastrzeżeń do środków metodologicznych.

Do głównych pracy zalet zaliczam przede wszystkim kompleksowość programu badań doświadczalnych, wysoki stopień zaawansowania metod i środków modelowania numerycznego, wiarygodność uzyskanych wyników zarówno eksperymentów jak i analizy teoretycznej oraz spójność wszystkich rezultatów. Pomimo braku spektakularnego sukcesu w postaci istotnej poprawy parametrów eksploatacyjnych zasobnika energii w wyniku zastosowania dodatków nanostrukturalnych za niezwykle cenne uważam przedstawione w opracowaniu oryginalne wyniki eksperymentów ładowania i rozładowywania magazynów PCM. Powtórzę, że ich znaczenia dla praktyki nie da się przecenić, a charakteryzują się one

również walorami poznawczymi. W tym kontekście znaczenia nabiera bardzo rzetelne udokumentowanie badań z uwzględnieniem opisu procedur przygotowania kompozytów węglowodory – nanododatek. Już opracowanie skutecznej technologii rozprowadzania wypełnienia dyspersyjnego też można uznać za osiągnięcie. Opis sposobu przygotowania eksperymentów, podanie w załącznikach danych dotyczących ich szczegółów czy przedstawienie wyników badań wstępnych, prowadzących do wyboru zasobnika o geometrii cylindrycznej, dodaje opracowaniu wartości. W podobnie pozytywnym świetle stawiają Doktoranta rezultaty obliczeń numerycznych, które same w sobie charakteryzują się dysertabilnością. Rozwiązanie zagadnienia cieplno-przepływowego z uwzględnieniem przemiany fazowej topnienia wymaga zastosowania rozbudowanych metod modelowania zjawisk cząstkowych i przyjęcia właściwych koniecznych uproszczeń. W moim odczuciu wszystko powyższe dowodzi tego, że Doktorant posiadł umiejętności i wykazał się kompetencjami właściwym projektom doktorskim.

Dopełniając ogólnej oceny merytorycznej podkreślę, że układ treści pracy jest logiczny i przejrzysty, dobór literatury przedmiotu w analizie stanu zagadnienia trafny i wyczerpujący dla przyjętego poziomu ogólności, natomiast omówienie metodyki i wyników badań zostało przedstawione we właściwych proporcjach.

Nie mając istotnych zastrzeżeń do badań i rozprawy jako całości muszę jednak skomentować jedną nieścisłość ogólną oraz odnieść się krytycznie do pewnych szczegółów zrealizowanego zadania doktorskiego. Sprawa ogólna dotyczy tytułu opracowania, który sugeruje badanie w ramach projektu wpływu właściwości dodatku nanostrukturalnego na parametry eksploatacyjne magazynu energii - domyślnie poprzez zmianę właściwości wyjściowych głównego czynnika roboczego, materiału PCM. Tymczasem badania zasadnicze polegały na określeniu wpływu dodatku określanego udziałem masowym na wydajność zasobnika energii cieplnej. Same materiały nanostrukturalne jako takie nie były badane, nie korzystano również w sposób bezpośredni z ewentualnych danych literaturowych. Orientując się nieco w kwestii określania właściwości cieplnofizycznych nanostrutur domyślam się genezy problemu, a kolizję tytułu z treścią opracowania lokuję w sprawach proceduralnych.

Jeżeli chodzi o uwagi szczegółowe to najważniejsze z nich, te związane ze sprawami merytorycznymi, przedstawię w punktach, w kolejności występowania stosownych zagadnień w pracy.

1. Przy prezentacji danych literaturowych w opisie doświadczenia Esapoura i in. Na stronie 16 brak jest informacji o tym, czy przy doborze geometrii zasobników w poszczególnych konfiguracjach zachowana została stała wartość sumarycznej powierzchni wymiany ciepła. Ma to znaczenie przy ocenie uzyskanych wyników, gdyż można wtedy łatwiej ująć problem w kategoriach wymiaru charakterystycznego.

2. Moje zastrzeżenie budzi określanie parametrów eksploatacyjnych zasobnika energii przez wyznaczenie czasu przekroczenia temperatury zakończenia przemiany fazowej (np. topnienia – str. 22; krzepnięcia – str. 23). Przy braku wyraźnego przystanku przemiany fazowej wynik porównania nie zawsze wydaje się być jednoznaczny. Co więcej, porównanie jest bardziej jakościowe niż ilościowe. Czy nie byłoby możliwe określenie wartości całkowitej entalpii czynnika roboczego i jej zmian w czasie?

3. Nie wiem, czy określenie „termiczny opór kontaktowy" zostało na stronie 25 użytego w popranym kontekście. Wydaje mi się, że termiczny opór kontaktowy jest wielkością właściwą i nie zależy od powierzchni, natomiast we wzmiankowanym fragmencie powinna być mowa o (całkowitej) oporności cieplnej kontaktu.

4. Na stronie 25 Autor słusznie zauważa, że dodatki materiałów stałej fazy do materiału PCM powodują zmniejszenie pojemności cieplnej właściwej przemiany powstałej struktury Pojemność wypadkowa (efektywna) jest średnią ważoną udziałami masowymi składników. Jednak w dalszej części pracy nie znalazłem informacji czy efekt ten był uwzględniany przy ocenie rezultatów badań. Wprawdzie udziały wypełnień nie przekraczały 5 % wag., ale stosowna informacja pozwala zobiektywizowanie rezultatów badań.
5. Na str. 37 Doktorant w opisie wyników badań mikrokalorymetrycznych wskazuje na różnicę entalpii topnienia i krzepnięcia uznając ją za cechę materiału BCM2. Z punktu widzenia odwracalności przemiany w materiale ustabilizowanym cieplnie nie jest to możliwe. Z mojego doświadczenia wynika, że różnica jest uwarunkowana niedokładnością pomiarów z uwzględnieniem również możliwych różnic opracowania termogramów. Analiza rys. 5.16.a daje podstawy do wskazania jako przyczyny błędów niepełnej kompatybilności termogramów grzania i chłodzenia spowodowanej brakiem przystawki chłodzącej do aparatu.
6. W podobny sposób wypada mi odnieść się do wykazanych w tab. 5.2 różnic wyników pomiaru ciepła właściwego uzyskiwanych dla danej fazy przy grzaniu i przy chłodzeniu. W obszarach poza przemianą fazową wartości te w zasadzie powinny być jednakowe. Wyjątki dotyczą np. przypadków zmian udziału fazy amorficznej w stosunku do krystalicznej i innych tego typu zjawisk. Nie powinno to jednak dotyczyć substancji lub struktur przeznaczonych do cyklicznego obciążania cieplnego.
7. Przy przedstawieniu wyników badań doświadczalnych Autor w przeważającej mierze ogranicza się do opisu i charakteryzowania różnic parametrycznych, natomiast rzadko podejmuje próbę powiązania różnic z konkretnymi zjawiskami fizycznymi. W przypadku analizy porównawczej wyników pomiaru lepkości dynamicznej (punkt 5.5) jest to trudne i zawężenie do spostrzeżeń natury fenomenologicznej uważam za uzasadnione. Niemniej brak regularności w zachowaniu się nanoPCM1 przy wypełnieniu grafitowym oraz inne niż w przypadku nanoPCM2 oraz nanoPCM3 zachowanie się układów z dodatkiem nanorurek warte jest poświęcenia dodatkowej uwagi.
8. Próba zobrazowania tendencji zmian przewodności cieplnej na podstawie trzech tylko wyników pomiarów o niedokładności ±10% (str. 47, trzeci wiersz od góry) jest moim zdaniem zbyt ryzykowna. W przypadku tworzyw wielkocząsteczkowych przewodność cieplna w podobnym zakresie temperatury na ogół nieznacznie rośnie ze wzrostem temperatury. Uzasadnienie tendencji spadkowych (rys. 5.25.a, przypadek BPCM3) wymagałoby potraktowania problemu w aspekcie zjawisk fizycznych kształtujących właściwości (jak wzmiankowałem w punkcie 7).
9. Zastanawiający jest brak regularności wpływu dodatku grafitowego na przewodność cieplną kompozytu nanoPCM1 (rys. 5.26.a) i żałuję, że Doktorant w omówieniu wyników się do tego nie odniósł.
10. Dość skąpy opis modelu numerycznego, a w szczególności brak odniesienia się do nieoczywistego zastosowania metody analizy przepływów wielofazowych w zagadnieniach tworzenia struktur dendrytycznych w układach eutektycznych znacznie utrudnia przyswojenie treści opracowania (Rozdział 6, punkt 6.1). W szczególności doprecyzowania wymaga określenie prędkości mieszaniny **u** oraz wyjaśnienie, czy faza stała w modelu się przemieszcza. Z postaci równania ciągłości - bilansu masy (1) wynikałoby, że tak. W takim razie jak można to odnieść do intuicyjnego obrazu jednospójnej powierzchni rozdziału faz?

11. W równaniu (16) wykazano jako wagi zależności homogenizacyjnej udziały masowe. W większości tego typu wzorów stosowany jest udział objętościowy, a w dodatku prawo sumowania przy wyznaczaniu wypadkowej przewodności cieplnej uwzględnia geometrię struktury (por. np. Pietrak K., Wiśniewski S. T., A review of models for effective thermal conductivity of composite materials, Journal of Power Technologies 95 (1), pp. 14-24, 2015). Poprawny, w moim odczuciu, wynik modelowania to rezultat podobieństwa wartości przewodności cieplnej poszczególnych faz.
12. We wzorze (21) zastosowano nieoczywistą przy przedstawianiu schematów wstecznych numerację kroków czasowych. Z reguły indeks $n+1$ odnosi się do kroku następnego. Czy jest to pomyłka redakcyjna, czy za tym sposobem przedstawienia kryje się coś innego?
13. Wspomniana na str. 56 metoda Gaussa-Seidla to metoda iterowania z uwzględnieniem bieżąco aktualizowanych wartości współczynników równań (wiers
14. zy – w typowym zapisie) poprzedzających dane równanie. W tym kontekście nie wiem o jakim wygładzaniu jest mowa i poproszę o stosowne wyjaśnienie.
15. We wzorze (22) pojawia się wektor δ, który wydaje się być niejednakowy dla wszystkich przypadków sąsiadujących objętości skończonych. W związku z tym wyjaśnienia wymaga problem jednoznaczności doboru kroku czasowego obliczeń.
16. Wyjaśnienia wymaga sprawa znacznego zróżnicowania wartości współczynnika przejmowania ciepła w obliczeniach wykonywanych dla BPCM1 oraz dwóch pozostałych materiałów zmiennofazowych (str. 57).
17. Podobnie jak w komentarzu z punktu 5 muszę poddać w wątpliwość zasadność przyjęcia w modelu różnych wartości entalpii przemiany topnienia i krzepnięcia.
18. Przebiegi zmian temperatury przedstawione na rys. 7.14 i 7.16 mogą sugerować blokowanie konwekcji przy ładowaniu magazynu w przypadku zastosowania dodatku nanorurek. Brak wpływu dodatku na przebiegi uzyskiwane przy rozładowaniu daje asumpt do pogłębionej analizy zjawisk cząstkowych, którego efektem są wykazane różnice.
19. Dysponując efektywnym, jak się wydaje, modelem numerycznym Autor mógłby się pokusić o powiązanie lokalnych zmian temperatury z aktualnym udziałem poszczególnych faz i entalpią całości układu. Uzyskane wyniki stanowiłyby uzasadnienie dla przyjętego kryterium oceny wydajności zasobnika (por. pkt. 2).

W podsumowaniu oceny merytorycznej powtórzę, że rozprawa jest pracą oryginalną, zawiera niezbędne elementy nowości i może stanowić podstawę procedowania przewodu doktorskiego. Dodam również, że duża liczba powyżej przedstawionych uwag dowodzi bardziej zainteresowania, jakie wzbudziła u mnie lektura opracowania, niż ma służyć bezpośredniej jego krytyce. Liczę na owocną dyskusję otwartych problemów z inspiracją do dalszych badań.

III. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Recenzowaną rozprawę zredagowano w klasycznym układzie treści. Pod względem edycji tekstu i szaty graficznej opracowanie przygotowano bardzo starannie. Oczywiście, nawet przy najbardziej starannej redakcji trudno spodziewać się tekstu w pełni bezbłędnego. Nieliczne, zauważone przeze mnie błędy zaznaczyłem w posiadanym przeze mnie egzemplarzu i jestem gotów przekazać je Doktorantowi w odrębnym trybie. Odwołania do tekstów źródłowych są

adekwatne. Nie znalazłem jedynie przywołania w tekście pozycji [33], [39] i [78]. Za zasadne uważam przedstawieni dużej części danych szczegółowych w załącznikach. Ułatwia to zapoznanie się głównymi tezami rozprawy.

Innych uwag bądź zastrzeżeń dotyczących strony redakcyjnej nie mam.

IV. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w recenzowanej pracy przedstawiono rozwiązanie problemu badawczego oryginalnego i dysertabilnego. Ważnymi atutami rozprawy są: aktualność problemu, szerokie potraktowanie tematu, wszechstronność warsztatu naukowego oraz oryginalność uzyskanych wyników. Stwierdzam zatem, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2021 r. poz. 478). Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Macieja Fabrykiewicza do publicznej obrony.