Prof. dr hab. inż. Roman Domański Roman
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa

Warszawa 23.10.2022

RPW/24488/2022 P
Data:2022-10-26

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Fabrykiewicza:

„Wpływ własności nanokompozytów na wydajność płaszczowo – rurowego magazynu energii cieplnej".

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na podstawie zlecenia Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej Pana prof. dr. hab. inż. Michała Wasilczuka.

2. Przedmiot i zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy bardzo istotnych zagadnień magazynowania energii na sposób ciepła z wykorzystaniem materiałów ulegających przemianom fazowym (PCM) rozmieszczonych w złożonych strukturach o zwiększonej przewodności cieplnej.

Zagadnienia akumulacji energii mają ogromne znaczenie w procesach konwersji energii, bowiem pozwalają nie tylko na zwiększenie sprawności tych procesów, ale także na wykorzystanie różnego rodzaju ciepła odpadowego. Procesy ładowania i rozładowania magazynów z wykorzystaniem materiałów ulegających przemianom fazowym wymagają odpowiednio złożonych rozważań w czasie ich projektowania oraz wymagają poznania zjawisk zachodzących w tych złożonych procesach. Ogólnie procesy transportu energii na sposób ciepła w materiałach o złożonych strukturach wypełnionych materiałem PCM są zagadnieniami z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego bardzo trudnymi. Na świecie prowadzone są szeroko badania dotyczące tych zagadnień, tak więc należy uznać, że podjęta w pracy tematyka jest bardzo istotna i stanowi wkład w naszą wiedzą na temat tych `bardzo złożonych procesów.

We wprowadzeniu Autor w krótki sposób przedstawia zagadnienia dotyczące akumulacji energii na sposób ciepła (Thermal Energy Storage – TES) i pokazuje znaczenie różnych metod magazynowania energii. Rozdział 2 poświęcony jest opisowi zagadnień materiałowych. Autor przedstawia materiały zmiennofazowe (PCM) stosowane w procesach akumulacji energii i ich właściwości. Przedstawia sposoby intensyfikacji przenoszenia ciepła w układach z materiałami PCM w tym układach z nanokompozytami. Przedstawia na bazie literatury przykłady stosowanych nanoPCM. W osobnym podrozdziale sygnalizuje też jak wygląda proces wytwarzania nanokompozytów zmiennofazowych. W rozdziale 3 Autor w bardzo zwarty sposób przedstawia opis stanu wiedzy o magazynowaniu energii z zastosowaniem materiałów ulegających przemianom fazowym. W przeglądzie tym autor ogranicza się do geometrii magazynów zbliżonych do magazynów rozważanych w danej

rozprawie. Autor omawia krótko metody intensyfikacji procesów wymiany ciepła w magazynach o geometrii płaszczowo- rurowej. Autor przedstawia różne wybrane rodzaje magazynów, przedstawia różne konfiguracje geometryczne oraz uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych. Pokazane są w czytelny sposób krzywe ładowania i rozładowania dla różnych geometrii materiałów. W krótkim podsumowaniu tego rozdziału Autor przedstawia zalety i wady dodawania nanocząstek do materiałów PCM w układach do magazynowania energii na sposób ciepła.

Rozdział 4 określa w sposób jednoznaczny cel i zakres pracy. Obejmuje on zbadanie wpływu rodzaju nanoPCM na czasy ładowania i rozładowania magazynu energii cieplnej (MEC) dla geometrii płaszczowo-rurowej. Badaniom podlegały trzy materiały bazowe PCM z dwoma rodzajami nanocząstek Badania eksperymentalne prowadzono dla dwóch magazynów płaszczowo rurowych z płaszczem cylindrycznym i prostopadłościennym. Autor podaje, ze celem badań numerycznych jest określenie teoretycznych czasów ładowania badanych magazynów co wymagało określenia szeregu właściwości termofizycznych badanych materiałów.

Rozdział 5 jest szczegółowym opisem oryginalnego stanowiska badawczego i dwóch modułów magazynujących energię wykonanych przez Autora. Przedstawione są szczegółowo koncepcje stanowisk, ich elementy, schematy, wygląd oraz szczegóły dotyczące geometrii układów magazynujących. Autor omawia także oczywiście układy zasilania stanowisk w medium robocze – wodę. Przedstawia szczegółowo czujniki i układy pomiarowe stosowane dla 2 równych różnych geometrii modułów magazynujących. Autor przedstawia także procedury pomiarowe i użyty do rejestracji procesów komputerowy system akwizycji danych

Bardzo istotny z punktu widzenia poznawczego jest podrozdział 5.4 dotyczący wytwarzania nanokompozytów zmiennofazowych. Właściwe (powtarzalne) przygotowanie próbek decyduje o jakości pomiarów i możliwości ich weryfikacji w czasie dalszych badań lub przez innych badaczy. Badane materiały oparte są o 3 podstawowe materiały (BPCM), parafinę i dwa kwasy tłuszczowe o złożonym składzie chemicznym zbadanym przy użyciu chromatografu gazowego (Gc-MS-QP2010 Plus). Dla materiałów tych przeprowadzono analizę procesów topnienia i zestalania przy użyciu DSC 404 F1 Pegazus firmy Netzsch. Badania przeprowadzono w laboratorium Zakładu Termodynamiki ITC PW. Autor przedstawia szczegółowe wyniki badań zmian ciepła właściwego dla cykli topnienia i krzepnięcia dla trzech BPCM. W tym podrozdziale Autor przedstawia charakterystyki używanych nanocząstek (grafit płatkowy i cząstki MWCNT) oraz samą procedurę wytwarzania nanokompozytów. Do tego celu Autor zbudował kolejne oryginalne stanowisko. Przygotowywane próbki zawierały po 2kg BPCM i odpowiednie nanocząstek. Przygotowano 6 próbek nanokompozytów. Dla przygotowanych próbek Autor przeprowadził szereg badań właściwości materiałowych. Autor przedstawia wyniki badań współczynnika lepkości dynamicznej, przewodności cieplej wraz z opisem odpowiednich oryginalnych stanowisk badawczych. W rozdziale 5.6 Autor przedstawia oryginalne stanowisko do badań (wizualnych) nanokompozytów zmiennofazowych. Specjalny podrozdział poświęcono stabilności nanokompozytów zmiennofazowch. Stabilność materiałów określono z zastosowaniem metody wizualnej polegającej na obserwacji próbek

poddanych kilku cyklom topnienia i krzepnięcia w okresie kilku dni. Do celów tych zbudowano osobne stanowisko badawcze.

W rozdziale 6 przedstawiono rozważania dotyczące modelu numerycznego procesów rozważanych w pracy dla geometrii opisanej w podrozdziale 5.1 (cylindrycznego i płaszczowo-rurowego MEC). W rozdziale 6 przedstawiono podstawowe równania stanowiące podstawę do obliczeń numerycznych i wyeksponowano konieczność znajomości parametrów cieplno–przepływowych dla badanych materiałów. Przedstawiono także dyskretyzację czasową i przestrzenną równań. Zasadnicze znaczenie, oprócz właściwego sformułowania równań w rozwiazywaniu przy użyciu metod numerycznych ma poprawne sformułowanie warunków brzegowych. Zagadnienie to zostało szczegółowo omówione w podrozdziale 6.4. Autor przedstawia także właściwości termofizyczne materiałów wzięte do obliczeń oraz parametry siatki przyjętej do obliczeń. Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania OpenFOAM.

Rozdział 7 (str. 61-95) obejmuje bardzo szeroki opis wyników badań eksperymentalnych i teoretycznych. Na początku rozdziału Autor dokumentuje dobrą powtarzalność uzyskanych wyników pomiarów temperatury dla geometrii cylindrycznej (przeprowadzono 2 pomiary) dla ładowania i rozładowania magazynu z BPCM. Autor wykazuje istotne różnice w przebiegu procesów dla układu cylindrycznego i prostopadłościennego W kolejnym podrozdziałach przedstawia wpływ konfiguracji dla różnych podstawowych materiałów BPCM, wpływ podziału rurek, wpływ temperatury czynnika roboczego i jego wydatku (Autor pisze strumienia masy) na przebieg temperatur w procesie ładowania i rozładowania magazynu.

Wyniki obliczeń numerycznych dla BPCM przedstawiono w podrozdziale 7.5. Przedstawiono tam szereg wykresów porównujących wielkości zmierzone i obliczone dla rozkładów temperatur (rys. 7.11). Porównanie było wykonane dla 3 podstawowych bazowych materiałów PCM. Maksymalne różnice wyznaczonych eksperymentalnie i teoretycznie temperatur wynosiły 23% dla termometru oporowego T9 i czasu 3410 s. W podrozdziale tym przedstawiono również przykładowe rozkłady faz wyznaczone numerycznie dla BPCM3 w procesie ładowania i rozładowania magazynu o geometrii cylindrycznej.

W kolejnym podrozdziale 7.6 przedstawiono wykresy ładowania i rozładowania dla 2 różnych materiałów podstawowych i różnych nanocząstek. W rozdziale 7.7 przedstawiono wpływ koncentracji nanocząstek na czas ładowania i rozładowania magazynu. Rozważano koncentracje masowe od 0,1% do 5%. W podrozdziale 7.8 przedstawiono wpływ rodzaju bazowych materiałów zmiennofazowych na czas ładowania i rozładowania magazynu energii cieplnej. Stwierdzono, że niezależnie od koncentracji nanocząstek grafitowych. Najkorzystniejsze właściwości cieplne w procesie ładowania wykazał nanomateriał nanoPCM2, natomiast w procesie rozładowania nanomateriał nanoPCM1. W kolejnym podrozdziale 7.9 przedstawiono wpływ surfaktantu na czas ładowania i rozładowania magazynu. W podrozdziale 7.10 analizowano udział fazy ciekłej w układzie magazynującym. Wyznaczono przebiegi udziału fazy ciekłej w funkcji czasu na podstawie rozkładów temperatury oraz na drodze obliczeń numerycznych dla badanych materiałów podstawowych. Stwierdzono istotne różnice w procesach podziału faz. Podrozdział 7.11 przedstawia wyniki

badań dotyczących udziałów fazowych przy wykorzystaniu technik fotograficznych i kamery termowizyjnej. Przedstawiono szereg zdjęć i termogramów dla różnych materiałów bazowych w funkcji czasu dla procesów ładowania i rozładowania.

W rozdziale 8 Autor przedstawił krótkie podsumowanie i 9 istotnych wniosków.

Wykaz literatury zawiera 109 pozycji ściśle związanych z tematyką,

Praca zawiera dodatkowo 14 załączników (str. 109-139) które poszerzają i ułatwiają ocenę prowadzonych badań.

Zakres rozprawy, przyjęte założenia metodologiczne oraz stosowane przez Autora metody badań i analiz sprawiają, że mieści się ona w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna.

3. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy bardzo istotnych zagadnień akumulacji energii na sposób ciepła w złożonych materiałach – materiałach PCM z różnymi cząstkami lub strukturami nanokompozytów zmiennofazowych.

Cel i zakres prac sformułowano w sposób jasny i został on, w moim przekonaniu, zrealizowany.

Praca stanowi oryginalny dorobek Autora w szerokim zakresie zagadnień i poszerza naszą wiedzę o zachowaniu się magazynów TES z materiałami PCM w tym w szczególności z materiałami nanoPCM.

Podjęty przez Autora problem badawczy jest zagadnieniem bardzo trudnym z punktu widzenia opisu teoretycznego i eksperymentalnego. Na podstawie moich doświadczeń ogromne znaczenie mają w tym zakresie prace eksperymentalne, bowiem one realnie weryfikują warunki pracy magazynu, przegrzania, przechłodzenia oraz stabilność właściwości materiałowych w wielu cyklach grzania i chłodzenia.

Autor zaprojektował i zbudował szereg oryginalnych stanowisk badawczych i uzyskał bardzo interesujące wyniki dotyczące procesów ładowania i rozładowania MEC o geometrii płaszczowo – rurowej wypełnionych nanoPCM. Autor przedstawił w sposób jasny i czytelny bardzo szeroki wachlarz wyników badań eksperymentalnych dotyczących materiałów bazowych (BPCM), stosowanych nanocząstek, oraz materiałów nanoPCM. Przedstawił sposoby przygotowania próbek, ocenę ich stabilności oraz bardzo szerokie wyniki procesów zachodzących w magazynach o dwóch różnych geometriach. Stosowane metody badawcze są nowoczesne i stosownie dobrane do postawionego problemu. Czujniki, system akwizycji danych jest właściwy, użyto nowoczesnych metod numerycznych. Uzyskane wyniki są poprawne, wnoszą szereg nowych informacji o przebiegu procesów magazynowania i jak już zauważyłem poszerzają nasza wiedzę o tych bardzo złożonych procesach. Warto jednak zauważyć, że dla szeregu materiałów PCM ich pojemność cieplna może radykalnie zmaleć po kilkudziesięciu cyklach grzania i chłodzenia. Autor badał stabilność tylko dla kilku cykli.

W ocenie pracy warto zwrócić uwagę na fakt, że pojemność obu rozważanych magazynów energii cieplnej była dość niewielka i zbliżona dla magazynu z płaszczem cylindrycznym wynosiła ona 1,5 litra a dla magazynu z płaszczem prostopadłościennym 1,6

litra. Wyniki z takich magazynów nie mogą być bezpośrednio przenoszone na magazyny o większych pojemnościach.

W pracy Autor mało miejsca poświęcił zagadnieniom wpływu konwekcji swobodnej w obszarze stopionym na proces lądowania i rozładowania. To jest bardzo istotne zagadnienie w magazynach o większej objętości.

Autor nie podał informacji o używanej jednostce obliczeniowej, podane danych siatek czasy obliczeń nic nam nie mówią jeżeli nie znamy mocy obliczeniowej. Ilość elementów i węzłów na poziomie 130 000 jest zadziwiająco mała jak na wykonanie obliczeń w układzie o złożonej geometrii z ruchomą powierzchnią przemiany fazowej.

W wykazie oznaczeń i potem w pracy Autor wprowadza pojęcie strumienia masy i oznacza go przez kg/s, wielkość ta to wydatek masowy. Strumień masy to wielkość w kg/(m^2 s). Autor używa tego pojęcia także przy opisie wyników (podrozdział 7.4). W pracy Autor nie podał jak wyznaczona jest liczba Reynoldsa (rys. 7.9), czy oznaczono ją w przekroju wlotowym do wymiennika, czy przekroju samego wymiennika. Na stronie 55 w. 8 od dołu Autor stwierdził „Zakłada się, że wyrazy konwekcyjne związane z fazą ciekłą w równaniu (17) są pomijalne w porównaniu z wyrazami niestacjonarnymi". Stwierdzenie to nie jest dla mnie w pełni zrozumiałe i założenie to wymaga wyjaśnienia.

Autor w tak obszernej rozprawie zbyt mało uwagi poświęcił zagadnieniom powtarzalności wykonywania próbek z nanoPCM i zagadnieniom cyklowania, które dla tak złożonych materiałów mają fundamentalne znaczenie. W pracy brak jest także analizy błędów pomiarowych.

Autor w rozprawie przedstawił szereg oryginalnych stanowisk badawczych i wykazał, że ma wiedzę do prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Przedstawione na końcu pracy wnioski są uzasadnione, jakkolwiek niektóre z nich wymagają szerszej dyskusji.
Przedstawiony wykaz literatury potwierdza dobre przygotowanie Autora do rozwiązania problemu. Szkoda, że tak mało miejsca w przeglądzie literatury poświęcił Autor spiralnym magazynom TES. Warto też zauważyć, że zagadnienia TES są przedmiotem cyklicznych międzynarodowych konferencji. Autor odwołuje się do konferencji FUTURESTOCK 2003 (Warszawa) a można wspomnieć o kilkunastu konferencjach z tej tematyki (np. MEGASTOCK – Japonia, ECOSTOCK_-USA).
Przedstawione w rozprawie załączniki podwyższają wartość merytoryczną pracy i ułatwiają ocenę poprawności badań.

Praca jako całość jest bardzo staranna i poprawna z punktu edytorskiego. Ma kilka drobnych usterek:

- zbyt małe lub mało czytelne rysunki (przykładowo) 2.3, 2.5, 3.4, 6.3,
- w pracy autor używa kropki zamiast przecinka do oddzielenia miejsc dziesiętnych,
- autor nie podał w sposób jasny, że wyniki prezentowane w podrozdziałach 7.6-7.8 dotyczą cylindrycznego magazynu TES,
- na rysunku 7.11 nie podano, które krzywe określają przebieg procesów eksperymentalnych, a które procesów obliczeniowych.

Przedstawioną do oceny rozprawę uważam za bardzo wartościową i ambitną, otwierającą możliwości dalszych badań. Otrzymane wyniki prac eksperymentalnych są bardzo cenne i stanowią bardzo dobrą podstawę do dalszych publikacji.

4. Wnioski końcowe

4.1. Mgr inż. **Maciej Fabrykiewicz** przedstawił i rozwiązał kompleksowo problem wpływu właściwości materiałów nanoPCM i geometrii na warunki pracy (w tym wydajność) układu do magazynowania energii na sposób ciepła z wykorzystaniem materiałów nanoPCM.

4.2. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami w badaniach eksperymentalnych i teoretycznych w zakresie procesów magazynowania energii na sposób ciepła z wykorzystaniem materiałów o złożonych strukturach i podlegającym przemianom fazowym.

4.3. Doktorant wykazał się wiedzą w zakresie pomiarów właściwości cieplnych oraz w sięganiu po nowoczesne narzędzia numeryczne.

Przedstawiona do recenzji praca spełnia z nadmiarem wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich Ustawach i może być podstawą w dalszym postępowaniu w przewodzie doktorskim prowadzonym przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Roman Domański