

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Beaty Pytlik

pt. *„Metoda modelowania zjawisk cieplno-przepływowych w magazynach ciepła wypełnionych materiałem zmiennofazowym lub sorpcyjnym”*

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia dr. hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni, Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka Politechniki Wrocławskiej (pismo RDND08/20/2025).

1. Wprowadzenie

Magazyny ciepła i/lub chłodu, wspólnie z magazynami energii elektrycznej, są obecnie integrowane z nowoczesnymi układami zarządzania energią w systemach energetycznych, celem efektywnego bilansowania obszarowego. Rola magazynów ciepła wzrasta, jeśli w systemie są eksploatowane odnawialne źródła energii, nacechowane okresowością podaży energii. Podobnie, rola magazynów ciepła staje się kluczowa w tzw. zewnętrznym sposobie zagospodarowania ciepła odpadowego, odzyskanego z procesów technologicznych lub energetycznych. Trudno byłoby bez nich synchronizować podaż poprocesowych nadwyżek energii cieplnej ze zmiennym w czasie zapotrzebowaniem odbiorców. Powyższe przesłanki ciągle stanowią impuls do rozwoju wiedzy w zakresie magazynowania ciepła, przy czym badania w mniejszym stopniu dotyczą obecnie klasycznych metod magazynowania ciepła jawnego. Obserwuje się większe zapotrzebowanie na prace dedykowane magazynom ciepła z materiałami zmiennofazowymi lub sorpcyjnymi. Takie magazyny są bardziej wydajne, lecz opis matematyczny zachodzących w nich procesów jest złożony, wymagający prowadzenia obliczeń programami CFD, angażującymi duże moce obliczeniowe. Podejmowane są zatem próby formułowania uproszczonych modeli obliczeniowych, a w ten nurt wpisuje się praca Doktorantki. Jej efektem jest oryginalna metoda modelowania numerycznego, istotna w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych.

2. Cel i zakres rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie i weryfikacja uproszczonej metody modelowania numerycznego sorpcyjnych magazynów ciepła, obowiązującej również dla magazynów wypełnionych materiałem zmiennofazowym. Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim i liczy 94 strony. Obejmuje ona streszczenia w języku polskim

i angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń, dziewięć numerowanych rozdziałów i bibliografię (146 pozycji).

Pierwszy rozdział rozprawy doktorskiej miał na celu zaakcentowanie roli magazynów energii (w tym magazynów ciepła) w systemach energetycznych. Wskazano w nim przesłanki do wykorzystania narzędzi cyfrowych już na etapie projektowania magazynów ciepła oraz ich późniejszej eksploatacji. Ostatni akapit wprost informuje, że prace Doktorantki zostały skoncentrowane na magazynach termochemicznych.

W drugim rozdziale najbardziej istotny jest skrótowy przegląd stanu wiedzy w zakresie matematycznego modelowania pracy zeolitowych magazynów ciepła, poprzedzony podrozdziałem z informacjami o procesie adsorpcji i wybranych zeolitach. Poza tym, w rozdziale drugim w sposób ogólny scharakteryzowano magazynowanie ciepła w magazynach termochemicznych i materiałach zmiennofazowych.

Tezę pracy w brzmieniu: *„Możliwe jest wykorzystanie analogii pomiędzy właściwościami termofizycznymi materiału sorpcyjnego a właściwościami termofizycznymi materiału zmiennofazowego do modelowania pojemności cieplnej materiału magazynującego ciepło”* zapisano w rozdziale trzecim. Zapisano w nim również cel pracy i jej zakres, obejmujący:

- opracowanie autorskiej metody modelowania numerycznego magazynów ciepła ze złożem sorpcyjnym i materiałem zmiennofazowym,
- wykonanie symulacji numerycznych zjawisk fizycznych w złożu zeolitu w małej skali,
- wykonanie, z użyciem autorskiej metody, symulacji numerycznych magazynu ciepła w dużej (laboratoryjnej) skali,
- eksperymentalną weryfikację autorskiej metody,
- analizę wyników modelowania fizycznego i numerycznego.

W rozdziale czwartym omówiono uproszczoną metodę modelowania magazynu ciepła z materiałem zmiennofazowym lub sorpcyjnym, opracowaną przez Doktorantkę. W przypadku materiału sorpcyjnego, zaproponowano potraktowanie złoża jako monolityczną całość, na podobieństwo materiału zmiennofazowego. Niweluje to podczas obliczeń potrzebę definiowania kształtu reaktywnej powierzchni złoża i modelowania reakcji chemicznych. Kluczowym parametrem w modelu staje się natomiast interpolowana efektywna pojemność cieplna materiału sorpcyjnego, określana na poczet raportowanych badań metodą eksperymentalną.

Procedurę oraz wyniki analiz właściwości materiałów wytypowanych do badań (określonego składu soli jako materiału zmiennofazowego i zeolitu 13X jako adsorbentu) przedstawiono w rozdziale piątym. W badaniach wykorzystano techniki termoanalityczne, tj. skaningową kalorymetrię różnicową (*differential scanning calorimetry*, DSC) oraz termogravimetrię (*thermogravimetric analysis*, TGA). Z ich pomocą wyznaczono funkcje warunkowe określające efektywną wartość ciepła właściwego w zdefiniowanych zakresach temperatur pracy złoża. Są to dane niezbędne do prowadzenia analiz numerycznych metodą opracowaną przez Doktorantkę.

W rozdziale szóstym omówiono numeryczne modele obliczeniowe przygotowane do prowadzenia symulacji w programie Comsol Multiphysics. Modele te utworzono w oparciu o metodę objętości skończonych. W przypadku zmiennofazowego magazynu ciepła, model opracowano na bazie laboratoryjnego magazynu ciepła. W przypadku sorpcyjnego magazynu ciepła, rozpatrzono trzy przypadki: 1) małą objętość kontrolną obejmującą pojedyncze ziarno zeolitu i jego otoczenie, 2) wycinek złoża z podziałem na 2 warianty zróżnicowane upakowaniem ziaren, 3) zeolitowy magazyn ciepła (określany w pracy magazynem w dużej skali) – model utworzono na bazie laboratoryjnej wersji magazynu ciepła. Dla przypadków 1) i 2) dodatkowo przygotowano szczegółowe modele obliczeniowe, by z ich udziałem uzyskać referencyjne wyniki do weryfikacji wyników uzyskanych za pomocą opracowanej metody uproszczonej. W ramach rozdziału zaprezentowano także sposób dyskretyzacji układów, parametry siatki obliczeniowej i warunki brzegowe zakładane w symulacjach.

Rozdział siódmy jest poświęcony badaniom eksperymentalnym. Scharakteryzowano w nim laboratoryjne wersje magazynów ciepła z materiałami zmiennofazowym i sorpcyjnym, wraz z zastosowanym oprzyrządowaniem pomiarowym. Pokróćce przedstawiono również metodykę prowadzenia badań.

Wyniki badań przedstawiono w rozdziale ósmym. W przypadku magazynu ciepła z materiałem zmiennofazowym, dokonano porównania wyników modelowania numerycznego z wynikami badań eksperymentalnych, wykreślając czasowe zmiany temperatury w określonych punktach pomiarowych. Jeśli chodzi o proces adsorpcji wody na złożu zeolitowym (wcześniej wspomniane przypadki 1) i 2)), wyniki modelowania, uzyskane za pomocą opracowanej metody, skonfrontowano z wynikami obliczeń z modeli szczegółowych. Na wykresach zaprezentowano rozkłady temperatury, prędkości przepływu czynnika roboczego oraz zmian stężenia w zwilżonym zeolicie. Dla przypadku 3), tj. zeolitowego magazynu ciepła w skali laboratoryjnej, wyniki z autorskiej metody modelowania odniesiono do wyników modelowania fizycznego. Zmiany temperatury w określonych punktach pomiarowych przedstawiono w funkcji czasu na stosownych wykresach. Prezentacji wyników każdorazowo towarzyszyła ich dyskusja.

Główną część rozprawy doktorskiej kończy podsumowanie (rozdział 9). Zamieszczono w nim wnioski oraz zaakcentowano udowodnienie tezy. Zasygnalizowano również kierunek dalszych prac nad opracowaną metodą.

3. Ocena rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest spójna tematycznie, ma wartość naukową i aplikacyjną. Dowodzi, że można uprościć modelowanie złożonych procesów transportu ciepła i masy w magazynach ciepła z materiałem sorpcyjnym, co jest szczególnie ważne w kontekście analiz pełnoskalowych magazynów ciepła tego rodzaju.

Do ważnych osiągnięć Doktorantki zaliczam:

- opracowanie uproszczonej metody modelowania numerycznego transportu ciepła i masy w magazynach ciepła z materiałem sorpcyjnym. Metoda nie wymaga

definiowania kształtu reaktywnej powierzchni złoża i modelowania reakcji chemicznych, co skraca czas obliczeń i skutkuje redukcją mocy obliczeniowej angażowanej do prowadzenia symulacji,

- przeprowadzenie badań eksperymentalnych, których wyniki posłużyły weryfikacji opracowanej metody. Warto podkreślić, że funkcjonalność opracowanej metody sprawdzono dla dwóch rodzajów magazynów ciepła – ze złożem sorpcyjnym i materiałem zmiennofazowym,
- potwierdzenie funkcjonalności autorskiej metody w konfrontacji z analizami przeprowadzonymi na drodze numerycznej, przy wykorzystaniu modeli dedykowanych procesom sorpcyjnym.

4. Uwagi do pracy

- 1) W r-niach (2.3) i (2.5) zastosowano błędne znaki nierówności przy definiowaniu przedziału temperatury korespondującego z przemianą fazową.
- 2) Doktorantka często operuje pojęciem pojemności cieplnej, prezentując jednocześnie wartości ciepła właściwego, o czym świadczy towarzysząca jednostka (te pojęcia nie są tożsame).
- 3) s.11: W opisie do r-nia (2.4) niewłaściwie podano, że „*powyżej temperatury końca przemiany fazowej występuje jedynie faza stała*” (występuje wtedy jedynie faza ciekła).
- 4) s.29: Zapis „*pomiędzy ciepłem na wlocie i wylocie czynnika roboczego*” jest niewłaściwy, ponieważ ciepło jest termodynamiczną funkcją przemiany, a nie funkcją stanu.
- 5) s.29/30: Niejasne jest, jaki mechanizm wymiany ciepła został uwzględniony w domenie 3 – na s.29 wskazano na przejmowanie ciepła, a na s.30 jest mowa o przenikaniu ciepła.
- 6) W r-niu (4.6) zastosowano błędne oznaczenie udziału płynu.
- 7) W rozdz. 6 określenie typu siatki jako „mieszany” jest niewystarczające. Wyjaśnienia wymagają też pojęcia „*średnia / minimalna jakość elementów*”.
- 8) s.60: Brakuje informacji o dokładności pomiarowej zastosowanego przepływomierza. Wartościowa byłaby informacja, w jakim zakresie zmian wydatku powietrza, jako nośnika ciepła/chłodu, zrealizowano badania eksperymentalne magazynów ciepła.
- 9) s.62: Zabrakło precyzji w przekazie informacji – magazyn jest podłączony do generatora pary, który jednak dostarcza do złoża wodę („*dysze do wody*” zaznaczono na rys. 7.4), a w tabeli 7.1 podano strumień pary (operując wydatkiem objętościowym).
- 10) s.66: W dyskusji wyników bez komentarza pozostawiono lokalne ekstrema w przebiegach wartości temperatury (zmierzonych na stanowisku eksperymentalnym).
- 11) Pomiędzy ziarnami złoża płynie nawilżone powietrze. Czy w jakiś sposób określano (kontrolowano) zakres udziału wilgoci w powietrzu?
- 12) W jaki sposób wyznaczono profile zmian stężenia w zwilżonym zeolicie, prezentowane na rys. 8.7? Czy podjęto próbę wyjaśnienia różnic w odmiennym charakterze tych profili dla modeli szczegółowego i uproszczonego? Wykres opatrzone komentarzem „(...)”

model uproszczony w dobrym stopniu oddaje przebieg reakcji opisany w modelu szczegółowym”, ale nie skwantyfikowano rozbieżności w prezentowanych profilach.

- 13) s.69: Brakuje informacji jaką metodą uśredniono prędkość czynnika roboczego na wylocie z badanej objętości kontrolnej.
- 14) Na rys. 8.12 należało moim zdaniem pokazać porównanie profili stężenia uzyskanych z modeli szczegółowego i uproszczonego (analogicznie do rys. 8.7).
- 15) W pracy nie przedstawiono informacji o algorytmach obliczeniowych modeli szczegółowych wykorzystanych podczas numerycznej weryfikacji opracowanej metody. Nie podano też literatury źródłowej z takimi algorytmami.

Podczas redakcji pracy, Doktorantka nie ustrzegła się szeregu potknięć językowych w zakresie stylu, tzw. literówek, niepełnych zdań (zapewne pozostałości po wprowadzaniu korekt). Dostrzega się również uchybienia edytorskie (ważniejsze wyszczególniłem poniżej). W mojej opinii, nie obniżają one merytorycznej wartości rozprawy doktorskiej, lecz utrudniają śledzenie jej treści.

- s.6: Zbyt duży skrót myślowy zastosowano w sformułowaniu „*jedna trzecia tego ciepła odpowiada poziomowi temperatury poniżej 200 °C*” – ciepło nie ma formy substancjalnej (ma ją jedynie nośnik ciepła).
- Rysunek 2.1 został zamieszczony wspólnie z fragmentem tekstu z materiału źródłowego.
- Opis wielkości stosowanych w równaniach (prezentowany pod równaniami) bywa niekompletny. Ogólny spis „*najczęściej używanych oznaczeń*”, nie zawsze jest użyteczny w takich przypadkach.
- Rysunki 2.2-2.4, 2.6, 2.7, 4.4 i 6.1 oraz tabela 6.10 mają błędne przywołania w tekstach poprzedzających te rysunki / tabelę. Rysunek 5.2 ma natomiast błędne odnośniki są umiejscowione pod tym rysunkiem.
- s.31: W akapicie nad r-niem (4.6) występuje błąd literowy istotny w aspekcie omawianych zjawisk fizycznych. W zdaniu „*Ponieważ zwilżony zeolit (...) zawiera zarówno wodę zaadsorbowaną, jak i niezaadsorbowaną...*” (powinno być „*niezaadsorbowaną*”).
- s.66: Podpis rys. 8.2 zawiera obce wtrącenie.
- s.76: W przedostatnim akapicie jest błędny odnośnik do rys. 4.4b (zamiast 4.2b).
- s.79: W podsumowaniu omyłkowo podano, że „*przebieg badań numerycznych (...) opisano w rozdziale 5*” – te badania są opisane w rozdziale 6.
- W spisie literatury brakuje szczegółów bibliograficznych przy pozycjach [20], [106], [110], [112] i [116]. W pozycji [128] podano tylko inicjały 2 ostatnich współautorów przywołanej publikacji.

5. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska pt.: „*Metoda modelowania zjawisk cieplno-przepływowych w magazynach ciepła wypełnionych materiałem zmiennofazowym lub sorpcyjnym*” zawiera oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego problemu badawczego. Efektem prac jest

uproszczona metoda modelowania w/w magazynów ciepła, zweryfikowana eksperymentalnie i numerycznie. Jest to wartościowy wkład Doktorantki w dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych. Rozprawa potwierdza odpowiedni poziom wiedzy Doktorantki i gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Beaty Pytlik spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. **Rekomenduję akceptację rozprawy i przejście do kolejnych etapów procedury w postępowaniu doktorskim.**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'mgr. inż. Beata Pytlik', is written over the text.