



Dr hab. inż. Krzysztof Dutkowski, prof. uczelni

Katedra Energetyki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Politechnika Koszalińska
75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17
e-mail:krzysztof.dutkowski@tu.koszalin.pl

Koszalin, 20.03.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Beaty Pytlik pt.:

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

Opinia została opracowana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Pana dra hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni (pismo RDN08/19/2025 z dnia 24. 01. 2025 r.) na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka z dnia 22 stycznia 2025 r.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Piotr Szulc, prof. uczelni, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Daniel Smykowski.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 94 strony tekstu. Została podzielona na dziewięć ponumerowanych rozdziałów. Dodatkowo zawiera spis najczęściej używanych oznaczeń. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp.** Opisano w nim, po krótko, potrzebę ochrony klimatu, odejścia od destrukcyjnych dla środowiska sposobów pozyskiwania oraz przetwarzania energii. Wskazano potrzebę redukcji emisji gazów cieplarnianych, poszanowania wykorzystywanej energii oraz pogłębiania wiedzy i świadomości społecznej w zakresie odnawialnych źródeł energii. Zwrócono uwagę na sposoby szerzenia wiedzy w zakresie świadomego gospodarowania energią, w tym na możliwość wykorzystania narzędzi komputerowych do przewidywania parametrów pracy oraz wydajności urządzeń energetycznych. Podkreślono zaletę symulacji komputerowej, jako szybkiego i efektywnego narzędzia odwzorowania oraz analizowania pracy rzeczywistych urządzeń energetycznych.
2. **Stan wiedzy,** to rozdział w którym Doktorantka wprowadza czytelnika w aktualne tematycznie zagadnienia związane z zakresem recenzowanej rozprawy. W pierwszej kolejności opisano światowe trendy w wytwarzaniu energii cieplnej klasyfikując je w zależności od źródła jej pochodzenia. Zidentyfikowano obszary gospodarki o największym zapotrzebowaniu na ciepło. Zwrócono uwagę na potrzebę kogeneracji, czyli synergii sieci ciepłych i

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki

Opinia wydana dnia 28.03.2025 r.

elektroenergetycznych. Wskazano na wzrostowy trend wykorzystania, szeroko dostępnej w krajach nie posiadających własnych zasobów paliw kopalnych, energii odnawialnej oraz odpadowej. Podkreślono, że jednym ze sposobów zwiększenia, w światowym bilansie energetycznym, udziału energii ze źródeł odnawialnych oraz energii odpadowej jest jej magazynowanie.

W dalszej części przeglądu literatury przybliżono zagadnienia magazynowania energii. Opisano nowatorską technologię współdzielenia rozproszonych magazynów energii, które połączone ze sobą stanowią tzw. Cloud Energy Storage. Szczególną uwagę poświęcono możliwości magazynowania energii cieplnej w materiałach o dużej wartości ciepła właściwego, oraz bardziej efektywną metodę magazynowania energii cieplnej w materiałach zmieniających stanu skupienia (PCM). Dokonano ogólnego podziału materiałów zmienno-fazowych oraz przywołano publikacje, w których opisano wyniki badań eksperymentalnych wskazujących na zyski energetyczne wynikające z wykorzystania PCM w energetyce cieplnej.

W kolejnej części przeglądu literatury opisano korzyści wynikające z wykorzystania programów komputerowych do symulowania zagadnień związanych z jawnym (opartym na cieple właściwym materiału), oraz utajonym (opartym na energii przemiany fazowej materiału) sposobem magazynowania energii cieplnej. Przedstawiono powszechnie stosowane równania, które służą do obliczenia ciepła właściwego materiału akumulującego ciepło w przypadku, gdy jest on ciałem stałym, cieczą oraz ulega przemianie fazowej. Zwrócono uwagę na różne podejścia obliczania ciepła właściwego PCM w czasie, gdy zmienia ona swój stan skupienia.

W podrozdziale 4 przeglądu literatury opisano zagadnienia magazynowania energii cieplnej w magazynach termochemicznych. Dokonano ich podziału, opisano zasadę działania sorpcyjnych magazynów energii cieplnej oraz przedstawiono podstawowe materiały sorpcyjne. Przywołano kilka pozycji literaturowych, w których opisano wykorzystanie sorpcyjnych magazynów energii cieplnej wskazując na potrzebę precyzyjnego wyznaczenia własności fizycznych medium stosowanego jako materiał magazynujący energię cieplną.

Wykorzystanie adsorpcji jako zjawiska wykorzystywanego do budowy magazynów energii cieplej jest tematem kolejnego podrozdziału przeglądu literatury. Zdefiniowano w nim pojęcie desorpcji, dokonano jej podziału ze względu na wzajemne oddziaływanie adsorbentu i adsorbentu. Szczegółowo opisano budowę fizyczną, skład chemiczny, właściwości fizyczne, budowę krystalograficzną oraz zdolność adsorpcji wody trzech wybranych rodzajów zeolitu.

W ostatniej części przeglądu stanu wiedzy Doktorantka opisała wybrane metody modelowania matematycznego zeolitowego magazynu energii cieplnej. Przybliżyła kilka wybranych, które pozwalającej modelować pracę magazynu ciepła wykorzystującego zeolit zwracając uwagę na konieczność modelowania zarówno transportu masy w złożu, jak i wymianę ciepła między zeolitem, a czynnikiem roboczym.

3. **Cel, teza i zakres pracy** to krótki rozdział złożony z podrozdziałów, w których kolejno przybliżono cel pracy, postawioną tezę pracy oraz zakres wymaganych do zrealizowania zadań, które pozwolą na zweryfikowanie postawionej tezy badawczej.
4. **Autorska uproszczona metoda modelowania magazynu ciepła wypełnionego materiałem zmiennofazowym lub sorpcyjnym** to rozdział pracy doktorskiej, w którym Doktorantka, krok po kroku, opisuje założenia oraz sposób modelowania pracy magazynu ciepła wypełnionego zeolitem. Podstawowe założenie Doktorantki polega na tym, że traktuje ona złożę zeolitu jako monolityczną całość, a nie jako sumę pojedynczych ziaren zeolitu o indywidualnych własnościach oraz kształcie. W efekcie, w miejsce każdorazowego obliczania ciepła właściwego suchego zeolitu, ciepła właściwego adsorbentu, ciepła właściwe-

go powietrza w porach oraz molowego ciepła reakcji chemicznych proponuje obliczać interpolowaną efektywną pojemność cieplną złoża zwilżonego zeolitu traktowanego jako całość. Zaproponowane podejście wymaga wyznaczenia pojemności cieplnej złoża w funkcji jego temperatury, podobnie jak ma to miejsce w przypadku materiału zmiennofazowego. Doktorantka zakłada, że zastosowane równania do wyznaczenia pojemności cieplnej złoża zeolitu pozwolą na uzyskanie wyników porównywalnych do wyników badań eksperymentalnych. Punktem wyjścia do wyprowadzenia równań modelu matematycznego był bilans ciepła w magazynie energii cieplnej. Założono, że ciepło oddane przez płyn roboczy jest w całości magazynowane w złożu. W przypadku złoża z materiałem sorpcyjnym dodatkowo uwzględniono możliwość transportu płynu w strukturze porowatej. Przybliżono podstawowe równania proponowanego modelu obliczeniowego tłumacząc przyjęte założenia upraszczające oraz przybliżając sens fizyczny każdego ich składnika. Równania modelu matematycznego stanowiły podstawę obliczeń numerycznych, których rezultaty porównano, w dalszej części pracy, z wynikami badań zrealizowanych z wykorzystaniem stanowiska laboratoryjnego.

5. W rozdziale 5 pracy pt. **Badania laboratoryjne właściwości materiału magazynującego ciepło celem wyznaczenia interpolowanej pojemności cieplnej**, opisano sposób wyznaczenia własności fizycznych materiałów stanowiących wypełnienie magazynu energii cieplnej. Przyjęto, że substancją magazynującą ciepło będzie zeolit 13X oraz materiał zmiennofazowy (mieszanina azotanu potasu KNO_3 , azotynu sodu NaNO_2 i azotanu sodu NaNO_3 w proporcjach 53%-40%-7%). Z wykorzystaniem różnicowej kalorymetrii skaningowej uzyskano charakterystyki na podstawie których określono zakres temperatury przemiany fazowej, temperaturę najbardziej intensywnej przemiany fazowej (tzw. pik przemiany fazowej) oraz ciepło przemiany fazowej PCM, a także wyznaczono ciepło desorpcji i zakres temperatury najbardziej intensywnego przebiegu tego procesu w zeolicie. Za pomocą termogravimetrii sprawdzono stabilność termiczną materiałów (ubytek masy) oraz zdolność zachowania swoich własności w wysokiej temperaturze (do 350°C - PCM, do 800°C - zeolit). W efekcie przeprowadzonych badań możliwe było podanie równania do obliczania tzw. interpolowanej, efektywnej pojemności cieplnej materiałów. Znajomość pojemności cieplnej materiałów magazynujących ciepło stanowiła punkt wyjściowy w modelowaniu magazynów energii cieplnej metodą uproszczoną proponowaną przez Doktorantkę.
6. Rozdział 6 zatytułowany **Badania numeryczne procesu magazynowania ciepła** jest kolejnym, obszernym oraz wartościowym rozdziałem recenzowanej pracy. Przedstawiono w nim przyjęte wytyczne do symulowania procesu magazynowania energii cieplnej w magazynie wypełnionym materiałem zmiennofazowym oraz magazynie energii cieplnej wypełnionym materiałem sorpcyjnym. W przypadku badania złoża zeolitu opisano trzy podejścia różniące się wielkością obszaru kontrolnego. Oprócz magazynu ciepła ze złożem zeolitu, analizowano również wycinek złoża zeolitu oraz pojedyncze ziarno zeolitu. Przyjęto, że do walidacji wyników symulacji uzyskanych z wykorzystaniem własnego, uproszczonego modelu zostaną wykorzystane wyniki symulacji uzyskane na podstawie czasochłonnych obliczeń z wykorzystaniem modeli szczegółowych, a w przypadku braku takiej możliwości (model kompletnego magazynu energii cieplnej) z wynikami eksperymentalnych badań własnych. W każdym wariantcie symulacji szczegółowo opisano założenia upraszczające, domenę obliczeniową, przedstawiono przyjęte warunki brzegowe, siatkę powstałą w efekcie dyskretyzacji domeny obliczeniowej wraz z podaniem minimalnej jakości wygenerowanego elementu skończonego. Wszystkie symulacje zrealizowano z wykorzystaniem programu Comsol Multiphysics.
7. Rozdział 7 – **Badania laboratoryjne procesu magazynowania ciepła** to kolejny, rozdział pracy doktorskiej o dużej wartości naukowej. Opisano w nim budowę stanowiska do

badania procesu magazynowania ciepła w materiale zmiennofazowym oraz stanowiska do badania procesu magazynowania ciepła w złożu zeolitu. Przedstawiono schematy stanowisk wraz ze wskazaniem obiegu czynnika roboczego, lokalizacją czujników temperatury i ciśnienia, zastosowanej aparatury wspomagającej (np.: nagrzewnice). Opisano budowę sekcji badawczej, w szczególności wykorzystanych wymienników ciepła, z podaniem istotnych informacji konstrukcyjnych oraz wymiarowych. Zidentyfikowano wykorzystaną aparaturę kontrolną oraz pomiarową podając jej zakres pomiarowy oraz dokładność pomiaru. Treść rozdziału uzupełniono licznymi zdjęciami stanowisk wykonanych na potrzeby badań.

8. W rozdziale 8 pracy doktorskiej zatytułowanym **Wyniki badań i ich analiza** zebrano oraz syntetycznie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i wyniki symulacji komputerowych. Wyniki badań eksperymentalnych, tzn. zmiany temperatury złoża w trakcie 100 minutowego procesu dostarczania ciepła do PCM porównano z wynikami obliczeń modelem uproszczonym. Analogicznie porównano wyniki pomiaru zmiany temperatury złoża zeolitu w trakcie 20 min procesu oddawania ciepła do czynnika roboczego z wynikami obliczeń modelem uproszczonym. Ponadto zestawiono wyniki rozkładu temperatury w pojedynczym ziarnie, jak i fragmencie złoża zeolitu uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych z wykorzystaniem zaproponowanego, uproszczonego modelu z wynikami obliczeń z wykorzystaniem modelu szczegółowego. Porównania dokonano dla wybranych kroków czasowych. Zestawiono charakterystyki obrazujące zmiany temperatury powietrza opuszczającego domenę obliczeniową w czasie. W każdym analizowanym przypadku uzyskano zadawalającą zgodność wyników symulacji według własnej metody i wyników wzorcowych.
9. Kolejny rozdział pracy, to **Podsumowanie i wnioski**. W rozdziale tym syntetycznie opisano założenia autorskiej, uproszczonej metody modelowania numerycznego procesu wymiany ciepła w sorpcyjnych i zmiennofazowych magazynach ciepła, sposób rozwiązania zagadnienia oraz przeanalizowane wątki poznawcze. Na zakończenie wypunktowano wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz.

Dodatkowo w pracy zawarto wykaz użytych oznaczeń oraz bibliografię. Wśród 146 przywołanych pozycji literatury można również znaleźć publikacje, których współautorem jest Doktorantka.

2. Teza pracy

Tezę badawczą postawioną w pracy Doktorantka sformułowała jako: „*Możliwe jest wykorzystanie analogii pomiędzy właściwościami termofizycznymi materiału sorpcyjnego a właściwościami termofizycznymi materiału zmiennofazowego do modelowania pojemności cieplnej materiału magazynującego ciepło*”.

W wielu źródłach można znaleźć definicję, iż teza to założenie w formie twierdzącej (niezależnie od postawionych w nim uwarunkowań), które może dotyczyć istnienia nieznanego, lub nie w pełni rozpoznanego zjawiska i jest głównym przesłaniem pracy. Przebieg całej treści pracy badawczej powinien zmierzać do jej udowodnienia, tzn. pozytywnego zweryfikowania albo obalenia. Ponieważ nie trzeba udowadniać rzeczy oczywistych, to stwierdzenie oczywiste nie stanowi tezy. Zgodnie z przytoczoną definicją można stwierdzić, że tezę postawioną w treści pracy sformułowano prawidłowo, a opisany problem naukowy wymaga wnikliwych analiz. W celu weryfikacji postawionej tezy, zdaniem Doktorantki, należy opracować metodę modelowania numerycznego procesów termochemicznych towarzyszących pracy sorpcyjnych magazynów ciepła z uwzględnieniem przyjętego w tezie uproszczenia, a następnie dokonać pozytywnej walidacji proponowanego modelu. W tym celu należy:

1. opracować uproszczoną metodę modelowania numerycznego zmiennofazowych i sorpcyjnych magazynów ciepła,
2. przeprowadzić symulacje zjawisk zachodzących w złożu zeolitu w małej skali,
3. przeprowadzić symulacje pracy magazynu ciepła w dużej skali,
4. dokonać eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego modelu,
5. dokonać porównania i przeanalizowania wyników uzyskanych z obliczeń wg zaproponowanej uproszczonej metody z wynikami uzyskanymi innymi metodami.

3. Rozwinięcie tezy

Prezentowana rozprawa doktorska dotyczy możliwości komputerowego modelowania procesu wymiany ciepła w sorpcyjnych magazynach ciepła, z wykorzystaniem uproszczonej procedury, u podstaw której leży założenie, że modelowanie może być realizowane w sposób analogiczny do modelowania wymiany ciepła w materiałach zmiennofazowych. Zatem zamiast modelowania porowatego złoża wypełnionego pojedynczymi ziarnami istnieje możliwość potraktowania złoża, jako jednorodnej substancji o zastępczych własnościach. Wymagane byłoby wyznaczenie szybkości dyfuzji adsorbentu w zeolicie w miejsce kolejno wyznaczanych: powierzchni reaktywnej, ciepła adsorpcji, stężenia molowego wody adsorbowanej na powierzchni ziaren zeolitu oraz stężenia molowego niezaadsorbowanej wody wypełniającej pory zeolitu, by w kolejnym kroku wykorzystać interpolowaną efektywną pojemność cieplną zwilżonego zeolitu w miejsce wyznaczanych kolejno: ciepła właściwego zeolitu, ciepła właściwego pozostałej wody i ciepła adsorpcji. Doktorantka przyjęła, że interpolowana efektywna pojemność cieplna może zostać określona jako funkcja ciepła właściwego złoża zeolitu od temperatury. Do wyznaczenia tej wielkości należało posłużyć się wynikami badań eksperymentalnych uzyskanych za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). Wówczas ciepło właściwe, podobnie jak ma to miejsce w PCM, może być zdefiniowane w postaci funkcji warunkowej. W przypadku PCM jest to: ciepło właściwe PCM w stanie stałym, średnie ciepło właściwe PCM w trakcie przemiany fazowej oraz ciepło właściwe PCM w stanie ciekłym. Analogicznie zaproponowano, aby ciepło właściwe złoża zeolitu wyrazić jako jedną z czterech wartości liczbowych w funkcji temperatury złoża. Są to odpowiednio: ciepło właściwe zeolitu przed procesem desorpcji, ciepło właściwe zwilżonego zeolitu (przyjęto dwie różne wartości zależne od udziału masowego wody w złożu – temperatury złoża) oraz ciepło właściwe zeolitu po zakończeniu procesu desorpcji. Wykorzystując zaproponowane podejście przeprowadzono modelowanie komputerowe wymiany ciepła w magazynie energii cieplnej na bazie PCM oraz zeolitu, modelowanie wymiany ciepła w złożu zeolitu o objętości 1 cm^3 oraz modelowanie wymiany ciepła w objętości kontrolnej zeolitu (22 mm^3). Wyniki symulacji przedstawiono jako kontury pola temperatury w wybranych przekrojach domeny obliczeniowej w wybranych krokach czasowych. Ponadto przedstawiono charakterystyki zmiany w czasie temperatury czynnika roboczego i złoża w wybranych miejscach. Uzyskane wyniki symulacji komputerowej porównano z wynikami badań eksperymentalnych (w przypadku magazynu energii cieplnej), a w pozostałych przypadkach z wynikami symulacji komputerowej bazującej na klasycznych modelach obliczeniowych. Zauważono, że wyniki obliczeń numerycznych z wykorzystaniem zaproponowanej metody różnią się od wyników uzyskanych pozostałymi metodami w akceptowalnym zakresie. Na tej podstawie przyjęto, że postawiona teza pracy została pozytywnie zweryfikowana.

4. Oryginalność pracy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz kierunek badań jest zbieżny z obserwowanym trendem naukowym. Magazynowanie energii, zwłaszcza energii promieniowania słonecznego, jest jednym z wielu rozwijanych wątków naukowych zmierzających do odejścia

od wytwarzania energii w sposób szkodliwy dla środowiska. O ile zagadnienie magazynowania energii w postaci energii elektrycznej jest intensywnie badane i z pomyślnością rozwijane w wielu ośrodkach naukowych, o tyle możliwość magazynowania energii cieplnej wydaje się wątkiem traktowanym z mniejszą uwagą niż na to zasługuje. Jednym z powodów jest fakt, iż straty energii cieplnej magazynowanej w sposób jawny są duże i tym większe, im większa jest różnica temperatury pomiędzy medium magazynującym ciepło a otoczeniem. Wynika to z faktu braku istnienia doskonałej izolacji cieplnej. Odpowiedzią na ten problem może być magazynowanie energii cieplnej w tzw. sposób utajony, czyli poprzez wykorzystanie materiałów które mogą magazynować energię cieplną zmieniając swój stan skupienia. Materiały te, zwane potocznie materiałami zmiennofazowymi są w stanie magazynować energię cieplną praktycznie bez potrzeby podnoszenia ich temperatury powyżej temperatury przemiany fazowej. Obecnie rozpoznano wiele grup materiałów zmiennofazowych i istnieje możliwość zbudowania magazynu ciepła z PCM o praktycznie dowolnej temperaturze przemiany fazowej. Mogą to być magazyny „chłodu” – substancja zmiennofazowa ulega przemianie w temperaturze poniżej 0°C , niskotemperaturowe magazyny ciepła o wartości temperatury przemiany fazowej PCM poniżej 100°C oraz wysokotemperaturowe magazyny ciepła o temperaturze przemiany fazowej PCM powyżej 100°C . Dla przykładu PCM na bazie parafiny jest w stanie przyjąć podczas przemiany fazowej tyle energii, ile taka sama masa wody wymagałaby, aby podgrzać ją o 60°C . Zatem straty energii wynikające z niedoskonałości izolacji cieplnej są w przypadku magazynów zbudowanych w oparciu o PCM zdecydowanie mniejsze, niż w przypadku magazynów energii bez materiałów zmiennofazowych. Gęstość magazynowanej energii, tzn. ilość zmagazynowanego ciepła w jednostce objętości, w przypadku wykorzystania egzotermicznego procesu adsorpcji oraz odwrotnego procesu desorpcji jest jeszcze większa. Szacuje się, że jest ona nawet kilka razy większa, niż w przypadku zmiany stanu skupienia PCM. Ponadto proces przechowywania energii cieplnej odbywa się bez strat. Rozpoznanie zjawisk towarzyszących magazynowaniu energii cieplnej z wykorzystaniem różnych materiałów biorących udział w procesie adsorpcji jest zagadnieniem aktualnym, ważnym poznawczo i każdy dodatkowo rozpoznany wątek naukowy przybliża nas do konstruowania sprawnych magazynów energii cieplnej. Doktorantka ma w tym swój udział, gdyż zaproponowała nowatorską, uproszczoną, mniej czasochłonną, a przez to praktyczną metodę modelowania komputerowego wielkoskalowych magazynów energii cieplnej opartych o złoża zeolitu i procesy adsorpcji.

5. Wartości poznawcze pracy

Recenzowana rozprawa doktorska porusza wiele wątków, które zasługują na miano wartości poznawczych. Jednym z nich jest przyjęcie nieoczywistego założenia, że możliwe jest uproszczone modelowanie procesów magazynowania energii cieplnej w złożu porowatym. Kolejnym było wskazanie, na którym etapie modelowania możliwe jest wprowadzenie uproszczeń do dotychczas stosowanych procedur modelowania procesów zachodzących w magazynie energii cieplnej. Doktorantka zaproponowała własną koncepcję rozwiązań wykorzystując znane z literatury podejście do komputerowego symulowania magazynów energii cieplnej z PCM. W efekcie walidacji proponowanych procedur stwierdziła, że pozwalają one na przeprowadzenie obliczeń z porównywalną dokładnością, jak dotychczasowe procedury, ale w zdecydowanie krótszym czasie. Należy podkreślić, że wyniki symulacji uzyskane metodą uproszczoną są w stanie odzwierciedlić wyniki obliczeń uzyskiwanych dotychczas w zdecydowanie bardziej czasochłonnych procedurach.

Doktoranta przybliżyła koncepcję interpolowanej efektywnej pojemności cieplnej wskazując krok po kroku sposób jej wyznaczenia. Ponadto, określiła wartość interpolowanej efektywnej pojemności cieplnej zeolitu 13X wykorzystując wykresy uzyskane z badań DSC. W

ten sposób zaprezentowała praktyczny sposób wyznaczania wielkości wchodzących w skład równania definiującego ciepło właściwe badanego materiału w funkcji temperatury.

6. Wartość aplikacyjna pracy

Doktorantka już na wstępie wykazuje, że istnieje potrzeba opracowania sposobu komputerowego modelowania pełnoskalowych magazynów energii cieplnej wykorzystujących procesy adsorpcji w złożu porowatym. Metoda modelowania takich magazynów powinna spełniać, zdawać by się mogło, dwa wzajemnie sprzeczne kryteria. Pierwszym, w moim odczuciu najważniejszym, kryterium jest uzyskanie wiarygodnych wyników obliczeń numerycznych. Kolejnym jest przeprowadzenie procesu symulacji w akceptowalnie krótkim czasie. Wykazano, że dotychczasowe podejście do modelowania termochemicznych magazynów energii, do jakich zalicza się magazyny wykorzystujące proces adsorpcji w złożu porowatym, skutkuje dużymi rozbieżnościami między wynikami symulacji i pomiarów eksperymentalnych albo trwa nieakceptowalnie długo. Z tego powodu, recenzowana rozprawa, w której podjęto próbę stworzenia i zweryfikowania uproszczonej metody projektowania sorpcyjnych magazynów energii cieplnej charakteryzuje się istotnym ładunkiem aplikacyjnym.

7. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Przyjmując założenia do zaproponowanego modelu stwierdzono (str. 30, w₆₋₈), że gęstość PCM może być przyjmowana jako funkcja liniowa temperatury. W rzeczywistości gęstość PCM od temperatury, gdy jest on w stanie stałym oraz ciekłym, faktycznie może być aproksymowana równaniem liniowym. Jednak w trakcie zmiany stanu skupienia PCM następuje gwałtowna zmiana jego gęstości. Zatem zmiany gęstości PCM, w szerokim zakresie temperatury, nie powinno się odzwierciedlać za pomocą zależności liniowej.
2. Ciepło właściwe PCM zostało przedstawione w postaci wzoru, a tak naprawdę trzech wartości liczbowych (wzór 5.2), które zależą od aktualnej temperatury (stanu skupienia) PCM. Dlaczego przyjęto, że ciepło właściwe PCM w trakcie przemiany fazowej jest wartością stałą, gdy w publikacjach poświęconych symulacji procesów przemiany fazowej PCM przyjmuje się paraboliczny przebieg zmian tej wielkości?
3. Ciepło właściwe zeolitu 13X uzyskane z badań przedstawiono analogicznie jak dla PCM, lecz dokonano podziału na cztery zakresy temperatury. Z krzywej DSC dla zeolitu wynika, że gdy następował procesy sorpcji, wówczas transfer ciepła był najbardziej intensywny, co zostało zobrazowane jako pik. Czy zatem wartość ciepła właściwego zeolitu w temperaturze $T < 150^{\circ}\text{C}$ nie powinna być mniejsza od wartości uzyskiwanych w pik?
4. Opisy związane z ustawieniami symulacji są niepełne i wymagają wyjaśnienia.
 - a. W przypadku symulacji dotyczącej magazynu zawierającego PCM:
 - brak jest pełnej informacji o konstrukcji analizowanego magazynu (np. odległość ożebrowanego rurociągu od podstawy magazynu, a jak wynika z rysunku 6.2 nie jest on ustawiony w środku PCM);
 - brak jest informacji, jaki warunek brzegowy przyjęto na zewnętrznych powierzchniach magazynu;
 - w żaden sposób nie potwierdzono, że siatka numeryczna była zagęszczana;
 - jako optymalną granicę zagęszczenia siatki przyjęto ten wariant, dla którego różnica temperatury w „wybranych reprezentatywnych punktach” (str. 45, w⁶) wynosiła

$\Delta T = 0,005^{\circ}\text{C}$. Co to są punkty reprezentatywne oraz jakie jest ich położenie w analizowanej przestrzeni?

- b. W przypadku szczegółowego modelu zjawiska adsorpcji w objętości kontrolnej przyjęto, że ziarno zeolitu ma średnicę 3 mm (tabela 6.3), a powierzchnię reaktywną zobrazowano na rys. 6.5. Należy zatem rozumieć, że po wewnętrznej stronie powierzchni reaktywnej znajduje się ziarno zeolitu, zaś na zewnątrz wolna przestrzeń. Czemu zatem zagęszczenie siatki na granicy ziarno-powietrze zlokalizowano na zewnętrznej granicy obszaru obliczeniowego. Poza tym, nagminne stosowane uogólnienie typu: prędkość przepływu czynnika roboczego (tab. 6.3), kierunek przepływu adsorbentu (rys. 6.6) nie pozwalają zorientować się wprost jaką substancję Doktorantka ma na myśli.
 - c. W przypadku uproszczonego modelu zjawiska adsorpcji w objętości kontrolnej Doktorantka, w miejsce kilku domen obliczeniowych, wprowadza jedną o zastępczych własnościach fizycznych. Powstała pojedyncza domena w kształcie walca. Zarówno prostopadłościan (domena na rys. 6.16), jak i walec (domena na rys. 6.10), są najprostszymi do meshowania bryłami i umożliwiają generowanie siatki strukturalnej. Czemu doktorantka mimo prostych geometrii nadal używa siatki niestukturalnej?
 - d. W przypadku modelowania zjawiska adsorpcji w złożu zeolitu Doktorantka, nie zdefiniowała warunków brzegowych na granicy obszaru symulacji. Po raz kolejny zaznaczono wlot i wylot nie podając jakiej substancji dotyczy i w jaki sposób te warunki zdefiniowano zarówno jakościowo, jak i ilościowo (czy był to: masowy przepływ, objętościowy przepływ, prędkość przepływu, ciśnienie, o jakiej wartości?).
 - e. W przypadku modelowania procesów zachodzących w magazynie ciepła z zeolitem podejściem uproszczonym, oprócz gabarytów magazynu nie podano żadnych wymiarów umożliwiających odtworzenie przyjętej geometrii. Analogicznie jest w przypadku warunków brzegowych. Zaprezentowano jedynie prędkość i temperaturę powietrza na wejściu do węzownicy. Pozostałe warunki brzegowe nie zostały przedstawione.
5. W rozdziale poświęconym badaniom laboratoryjnym daje się wyraźnie zauważyć brak informacji odnośnie konstrukcji magazynów energii cieplnej. Nie są znane wymiary konstrukcyjne magazynu i położenie jego elementów składowych. Zwłaszcza odczuwa się brak informacji o dokładnym położeniu czujników pomiarowych (np.: czujników temperatury). W konsekwencji, brak jest informacji, jakie jest rzeczywiste położenie czujnika temperatury względem wymiennika ciepła, ścianek magazynu, od początku wlotu czynnika roboczego, itp. Wiadomym jest tylko, że określona zmierzona temperatura dotyczy np.: punktu 1, 3 i 5 leżącego w rzędzie A (rys. 8.2a) czy, że jest to termopara A, B, C, D (rys. 8.14). Stąd pytanie: czy rozmieszczenie czujników temperatury w odległości 350, 600, 850, 1100 mm (str. 64) dotyczy ich rozmieszczenia w obudowie sondy, czy są to np.: odległości od powierzchni czołowej konstrukcji magazynu ciepła?
6. W rozdziale poświęconym omówieniu wyników badań eksperymentalnych i symulacji komputerowych następujące kwestie wymagają wyjaśnienia:
- a. czemu badania eksperymentalne oraz symulacje komputerowe przerywano po założonym czasie (np.: 100 min. – rys. 8.2 lub 20 min. – rys. 8.14). Z przedstawionych wykresów wynika, że proces wymiany ciepła jeszcze się nie zakończył - układy jeszcze nie osiągnęły stanu ustalonego,
 - b. jak skomentować przebiegi czasowe zmian temperatury PCM (w punktach o nieznanej dokładnej lokalizacji – brak wymiarów), z których wynika, że w trakcie eksperymentu PCM ulegał przemianie fazowej, czego nie widać na przebiegach uzyskanych z obliczeń (rys. 8.2). Czy nie jest to konsekwencją, między innymi uwagi nr 1 i 2?
 - c. czy do walidacji testowanego modelu wystarczające jest wykonanie tylko jednego badania (oddzielnie dla każdego analizowanego wariantu geometrii)?

Uwagi edytorskie

Przedstawiony tekst został starannie przygotowany, lecz można napotkać w nim drobne niedociągnięcia. Najważniejsze z nich to:

- w spisie treści brakuje pozycji „Bibliografia”;
- wielkości wchodzące w skład wzoru należy wyjaśnić w tekście w miejscu ich pierwszego cytowania. Znaczenia niektórych wielkości nie podano wcale (np.: α - wzór 2.2 – brak opisu w tekście oraz w wykazie oznaczeń);
- według wskazówek wydawnictw naukowo-technicznych w Polsce, wzór jest traktowany jak wyraz w zdaniu. Oznacza to, że gdy wzór kończy zdanie, to właśnie po nim powinno się postawić kropkę (nie przed nim – wzór 2.1, 2.2, itd.). Słusznie wówczas kolejne zdanie rozpoczyna się z wielkiej litery. Gdy wzór znajduje się w środku zdania, stawia się po nim przecinek i dalszą część zdania kontynuuje z małej litery od początku linii;
- str. 15 – w tekście jest odwołanie do rys. 2.8, gdy faktycznie dotyczy rys. 2.4;
- str. 16 – w tekście jest odwołanie do rys. 2.10, gdy faktycznie dotyczy rys. 2.6;
- str. 17 – w tekście jest odwołanie do rys. 2.12, gdy faktycznie dotyczy rys. 2.7;
- str. 17, w_7 – dwukrotnie podano zeolit A4;
- brak kropki na końcu zdania (str. 18 – zdanie nad rys. 2.8; str. 23 w_5 ; ostatnie zdanie na str. 78);
- bardzo często Doktorantka nie precyzuje, temperaturę jakiej substancji ma na myśli, np.: str. 22 – „...temperaturę na wlocie i wylocie z magazynu ciepła...”, lub na tej samej stronie: „pojemność cieplna w średniej temperaturze”, „średnia temperatura”;
- wszystkie rzeczy opisane w rozprawie już miały miejsce, stąd w tekście powinno się używać czasu przeszłego i formy dokonanej. Nagminne używanie czasu teraźniejszego pojawiło się w opisach wyników badań (np.: tekst pod rys. 5.3 i w dalszej części pracy);
- str. 57 w_1 . - informacja o braku możliwości odnalezienia źródła - wynika z błędnej numeracji rysunku 20.

8. Uwagi końcowe

Warunkiem prawidłowo realizowanej pracy doktorskiej jest jej związek z problemem bezpośrednio lub pośrednio wpływającym na stan wiedzy. Związek ten powinien umożliwić „młodym naukowcom” dogłębne poznanie metodologii badań oraz stworzenie podstaw do dalszego rozwoju w kierunku osiągnięcia pełnej samodzielności naukowej. W przypadku recenzowanej rozprawy warunki te zostały spełnione. Rozprawa napisana jest poprawnie, gdyż występują w niej elementy, które w metodologii nauk ścisłych określa się jako etapy badania naukowego.

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam jako pracę wartościową, zawierającą interesujący poznawczo materiał badawczy. Podsumowując stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Beaty Pytlik:

- potwierdza jej wysoki poziom wiedzy w obszarze materiałoznawstwa, termodynamiki, wymiany ciepła oraz modelowania zagadnień cieplno-przepływowych w stanach ustalonych i nieustalonych,
- stanowi oryginalne osiągnięcie poprzez rozwiązanie wielu aktualnych tematycznie zagadnień naukowych,
- wykazuje umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Podane w recenzji uwagi krytyczne mają charakter informacyjny oraz stanowią wskazania możliwych do wykonania działań zmierzających do dalszego poszerzania stanu wiedzy w zakresie modelowania procesów cieplnych i przepływowych realizowanych w magazynach energii cieplnej opartych o procesy sorpcji w złożach porowatych. Uwagi zawarte w recenzji nie pomniejszają wartości naukowej opiniowanej pracy, którą pod kątem merytorycznym oceniam wysoko.

9. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętność wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu szeroko rozumianej energetyki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych, symulacji komputerowych oraz opracowaniu wyników badań. Praca stanowi oryginalny wkład do badań nad problemem modelowania termochemicznych pełnoskalowych magazynów energii cieplnej. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Beaty Pytlik jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.).