

Prof. dr hab. inż. Andrzej J. Panas
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

Warszawa, 11 sierpnia 2025 r.

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

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Wasika p.t.

Rozwój i przykłady zastosowania nierównowagowego modelu wymiany ciepła, powietrza i wilgoci w porowatych materiałach budowlanych

I. Przedmiot i charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy badania wymiany ciepła i masy w ośrodku porowatym z uwzględnieniem przemian fazowych. Rozpatrywane jest zagadnienie transportu energii oraz przepływu masy w postaci powietrza wilgotnego mokrego, wilgotnego suchego oraz fazy ciekłej wody. Inspirację podjęcia badań stanowi problem osuszania murów budynków. Zamiarem Autora – celem pracy - było opracowanie zmodyfikowanego modelu fizycznego i matematycznego do analizy wyżej wymienionych złożonych procesów termodynamicznych z uwzględnieniem rozszerzonego zakresu sprzężeń zjawisk cząstkowych oraz jego wdrożenie numeryczne. Do przygotowania modelu numerycznego i rozwiązania układu równań różniczkowych cząstkowych zagadnienia niestacjonarnego wykorzystany został komercyjny pakiet obliczeń numerycznych z zestawem oryginalnych, własnych funkcji i procedur użytkownika. Sprawdzenia poprawności modelowania dokonano na podstawie porównania wyników obliczeń uzyskiwanych przy wykorzystaniu wdrożonego modelu z danymi literaturowymi oraz z rezultatami własnego doświadczenia testowego.

Jak z powyższego opisu wynika praca charakteryzuje się wprawdzie przewagą analizy teoretycznej, ale ma też wyraźnie zaznaczone składniki badań doświadczalnych. Treści obu obszarów są ze sobą ściśle powiązane i wzajemnie się dopełniają tworząc zwartą całość. Podobnie jak geneza podjęcia badań jest związana z problemem praktycznym osuszania murów, tak i uzyskane rezultaty analiz mają znaczenie praktyczne. Dotyczy to zarówno zagadnień metodologicznych, i tutaj należy wskazywać na istotne treści poznawcze pracy, jak i wartości użytkowych – technicznych.

Zgodnie z danymi rozprawy oraz deklaracjami współautorów opublikowanych powstałych w związku z jej realizacją publikacji indywidualny i oryginalny wkład Doktoranta zaznacza się przede wszystkim:

- we wdrożeniu modelu matematycznego do samodzielnie opracowywanych modeli numerycznych,
- przeprowadzeniu testów tychże modeli oraz wykonanie obliczeń zasadniczych,
- opracowaniu i wykonanie doświadczenia weryfikacyjnego,
- opracowaniu wyników i przeprowadzenie szeroko zakrojonej analizy rezultatów.

Ze względu na złożoność rozpatrywanego problemu wykonanie każdego z zadań cząstkowych wymagało wyjścia poza ramy działań standardowych. Przykładem może służyć wspomniane wcześniej szerokie wykorzystanie ogólnie pojętych funkcji i procedur użytkownika przy zastosowaniu komercyjnego środowiska obliczeń numerycznych. Fakt poradzenia sobie z omawianym zagadnieniem świadczy o dobrym przygotowaniu merytorycznym Doktoranta i, pośrednio, o Jego umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów.

W podsumowaniu charakterystyki ogólnej stwierdzam, że zarówno ze względu na konkretny cel i przedmiot działań, jak i charakter badań rozprawę można zakwalifikować do dziedziny nauk inżynierijsko-technicznych ze wskazaniem jako właściwej dyscypliny inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki.

II. Ocena rozprawy i uwagi o charakterze merytorycznym

Podjęty przez Doktoranta problem badawczy w swoim aspekcie praktycznym wpisuje się w główny nurt szeroko obecnie prowadzonych badań dotyczących zmniejszenia zużycia energii. Zarówno ekologicznego jak i ekonomicznego kontekstu zagadnienia nie trzeba dokładnie omawiać. Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta na tym polu należy zaliczyć opracowanie narzędzia do analizy porównawczej efektywności różnych strategii suszenia murów z uwzględnieniem uwarunkowań technicznych i klimatycznych. Nie bez znaczenia pozostaje również rezultat porównania strategii modelowych, dający podstawy do konkretnych działań praktycznych.

Za oryginalne uważam również wyniki w postaci opracowanych, i jak udowodniono skutecznych, modeli numerycznych do analizy zjawisk wymiany ciepła sprzężonych z efektami przepływu wilgoci ciekłej i powietrza wilgotnego z uwzględnieniem przemiany fazowej parowania lub kondensacji. W tej dziedzinie efektywna implementacja dostępnych literaturowo modeli stanowi duże wyzwanie. Wobec powyższego wprowadzenie modyfikacji w postaci uwzględnienia nierównowagowości procesu przemiany fazowej w końcowej fazie realizacji projektu doktorskiego bez wątpienia istotne nowatorskie osiągnięcie Autora rozprawy.

Oprócz oryginalności uzyskanych wyników badań i analiz ważną cechą ocenianego programu badawczego jest komplementarność jego składników teoretycznych i praktycznych. Między innymi dzięki temu porównanie rezultatów obliczeń numerycznych z rezultatami eksperymentów dostarczyło informacji, na podstawie których możliwe było zweryfikowanie zakresu poprawności danych teoretycznych oraz określenie uwarunkowań procedur obliczeniowych.

W mojej ocenie rozprawa charakteryzuje się dysertabilnością w wielu aspektach: metodologicznym, analitycznym numerycznym i praktycznym. Na podkreślenie zasługuje przy tym profesjonalizm wykonania poszczególnych zadań cząstkowych.

Pozytywnie oceniając treści merytoryczne rozprawy mam jednak pewne uwagi dotyczące jednego aspektu ogólnego, a także kilka zastrzeżeń do wybranych szczegółów rozprawy. Uwaga ogólna dotyczy enigmatyczności przedstawiania detali programistycznych dwóch głównych modeli numerycznych. Domyślam się, że jest to związane z formą samej rozprawy, którą przedstawiono do oceny jako zbiór artykułów poprzedzonych pewnego rodzaju przewodnikiem – autoreferatem. W związku z tym do zdawkowych wzmianek ograniczone zostały informacje o polach skalarnych definiowanych przez użytkownika, funkcjach

własnych (str. 23, drugi akapit), sposobie określenia współczynników termodynamicznych, w tym o problemie zależności od temperatury takich parametrów jak np. przewodność cieplna (w istocie przewodność efektywna lub pozorna), oraz innych szczegółach modelowania. Również dane o wrażliwości i uwarunkowaniu numerycznym modelu, w tym o problemach definiowania siatki obliczeniowej i określeniu kroku, są ograniczone do komentarzy tych zagadnień.

Jeżeli chodzi o wybrane szczegóły, to na pierwszy plan wysuwa się problem ograniczenia analizy porównawczej skuteczności dwóch podstawowych modeli: nierównowagowego i referencyjnego, do analizy zmienności jednego parametru: temperatury, w wybranym punkcie analizowanego obiektu (Rys. 24, str. 54). Model nierównowagowy nie wypada w tym kontekście najlepiej: zarówno w bardzo krótkim czasie trwania procesu jak i w fazie końcowej. W mojej opinii o stosowne byłoby w tym przypadku zastosowanie do porównania parametru globalnego – całkowego.

Podczas lektury opracowania miałem też problem z interpretacją poszczególnych wielkości charakteryzujących powietrze wilgotne suche, wilgotne mokre i wilgotny ośrodek porowaty. Omawiając roztwory i mieszaniny wilgotne trzeba zachować dość dużą skrupulatność w definiowaniu parametrów po to, by nie pogubić się w gąszczu takich określeń jak wilgotność bezwzględna, stopień wilgoci i wodność, które występują równolegle z bardziej czytelnymi parametrami mieszanin w postaci udziałów masowych i molowych. W tym kontekście podana przez Autora definicja wilkości w jest niejednoznaczna, gdyż nie określono, czy wartością odniesienia (w mianowniku) jest masa ciała stałego suchego, czy wilgotnego.

Pozostałe uwagi szczegółowe przedstawiam w kolejnych akapitach.

Na stronie 14. Doktorant wzmiankuje prawo Kelwina nie uściślając problemu i można odnieść wrażenie, że chodzi o zależność (2). Według mnie chodzi o inną zależność – zależność wiążącą krzywiznę powierzchni rozdziału faz z ciśnieniem nasycenia.

Wielkość W_{cap} występującą w zależności (41) Autor określa jako nasycenie wilgotnością, a jest to maksymalna objętościowa zawartość wilgoci. A propos, w pracy nie znalazłem definicji bezwymiarowego parametru nasycenie wilgotnością s .

W pierwszym zdaniu na stronie 35. należałoby uściślić, że chodzi o udział masowy pary wodnej w stosunku do wilgoci ciekłej. Niemniej przy tym założeniu pojawia się problem stanu ekstremalnie niskich zawartości wilgoci ciekłej, a z tym można mieć do czynienia w początkowej fazie nawilżania ośrodka suchego, lub w końcowej fazie suszenia. Trudno mi przeanalizować dość skomplikowane zależności modelu, ale w kontekście rozbieżności zobrazowanych na Rys. 21 pojawia się pytanie, czy ich przyczyną nie może być właśnie omawiane założenie.

Niezależnie od powyższych uwag uważam, że zawartość merytoryczna pracy dowodzi tego, że Doktorant posiadał umiejętności i wykazał się kompetencjami właściwym realizacji projektów doktorskich. W podsumowaniu oceny merytorycznej podkreślę, że rozprawa jest pracą oryginalną, zawiera niezbędne elementy nowości oraz, że wyniki mają znaczenie zarówno w obszarze rozważań teoretycznych, jak i, a może przede wszystkim, w dziedzinie działań związanych z oszczędzaniem energii. Uważam zatem iż przedstawione do recenzji opracowanie może stanowić podstawę procedowania przewodu doktorskiego.

III. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Recenzowaną rozprawę przedstawiono do zaopiniowania w postaci dość szczegółowego, jak dla tej formy prezentacji wyników projektu doktorskiego, omówienia zestawu czterech artykułów opublikowanych w prestiżowych periodykach naukowych. Artykuły ukazywały się w latach 2020 – 2025. Wszystkie prace są współautorskie, ale zgodnie z deklaracjami ich autorów dominującą rolę w przygotowaniu każdej publikacji odegrał mgr inż. Michał Wasik.

Rzeczony omówienie publikacji – rodzaj autoreferatu – oceniam pozytywnie. Jest ono nie tylko przewodnikiem, ale zawiera ono dane uzupełniające zawartość publikacji, w tym wprowadzenie do omawianego zagadnienia w treści Rozdziału 1. O ile samych artykułów nie wypada mi komentować, to muszę stwierdzić, że autoreferat jest zredagowany starannie. Ogólnie rzecz biorąc nie mam też innych zastrzeżeń do całości rozprawy. Mam jednak pewne uwagi szczegółowe, w tym uwagi dotyczące drobnych błędów edycji. Wywiązując się z obowiązków recenzenta w ich prezentacji ograniczę się jednak jedynie do przykładów.

Pierwszy komentarz dotyczy stosowania w opisie określeń żargonowych. Takim określeniem jest „geometria” (por. tekst na str. 20, 21) w odniesieniu do modelu geometrycznego analizowanego obiektu. Geometria jest w istocie działem matematyki, który zajmuje się właściwościami figur w historycznym swoim ujęciu, a w obecnej swej postaci szeroko pojętymi zagadnieniami stosunków przestrzennych.

Pomimo bardzo starannej redakcji w tekście pojawiają się błędy gramatyczne. Przykładem błędu gramatycznego redakcji może służyć ostatnie zdanie ze strony 13.

Za niefortunny skrót myślowy uważam stwierdzenie, że „Zwalidowano opracowany model na autorskim stanowisku eksperymentalnym.” O ile nie jest to model w postaci obiektu stricte fizycznego, do przy użyciu układu doświadczalnego nie da się go badać, a tym bardziej walidować.

Samo użycie terminów „walidacja” oraz „weryfikacja” również budzi moje zastrzeżenia. Walidacja odnosi się do metody i dotyczy jej trafności, natomiast weryfikacja to sprawdzanie poprawności uzyskiwanych wyników. Nie do końca trafnie terminy te są używane w polskojęzycznej części rozprawy.

Niejednoznacznie jest objaśnienie wielkości D_v . W treści opracowania nie pojawia się problem wymiany ciepła w parze wodnej lub problem dyfuzyjności cieplnej efektywnej powietrza wilgotnego. Występują natomiast równania transportu dyfuzyjnego pary wodnej. Wobec tego D_v jest współczynnikiem transportu dyfuzyjnego (masy) pary wodnej.

Do błędów edycji zaliczyć należy błędy znaków operacji w mianownikach zależności (34) i (37).

Zauważone przeze mnie, i wskazane tylko przykładowo, nieścisłości i błędy redakcji nie dają podstaw do podważenia treści merytorycznych opracowania. Nie wymagają również odpowiedzi bezpośredniej, jedynie może zwrócenia uwagi przez Doktoranta większej uwagi na dokumentowanie badań w dalszej Jego pracy. Innych uwag bądź zastrzeżeń dotyczących strony redakcyjnej nie mam.

IV. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w recenzowanej pracy przedstawiono rozwiązanie zagadnienia badawczego oryginalnego i dysertabilnego. Ważnymi atutami rozprawy jest aktualność problemu oraz użyteczność uzyskanych wyników. Na podkreślenie zasługuje kompleksowość i komplementarność przeprowadzonych badań, co wymaga wykazania się wszechstronnym przygotowaniem merytorycznym. Pomimo sformułowanych przeze mnie uwag uważam, że przedstawiony do oceny materiał daje podstawy do sformułowania wniosku o wyróżnienie rozprawy. Trudno jest jednak nabrać przekonania do takiego wniosku polegając tylko na ograniczonej do opisu osiągnięć Doktoranta formie kontaktu z Autorem rozprawy. Pozwolę sobie zatem na zwłokę w ostatecznym potwierdzeniu stosownego wniosku do czasu obrony

Niemniej w konkluzji swojej opinii stwierdzam jednoznacznie, 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. Michała Wasika do publicznej obrony.



