dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Środowiska
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Politechnika Łódzka

Łódź, dn. 09.09.2022

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Joanny Krasoń
pt. „Wpływ materiałów zmienno-fazowych na efektywność energetyczną modyfikowanych przegród kolektorowo-akumulacyjnych"
wykonanej na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechniki Rzeszowskiej
Promotor: prof. dr hab. inż. Lech Lichołai
Promotor pomocniczy: dr inż. Bernadeta Dębska, prof. PR.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechniki Rzeszowskiej z dnia 13 lipca 2022 r. oraz pisma Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny, prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego, z dnia 14 lipca 2022 r.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Jednym z podstawowych celów rozwoju współczesnego budownictwa jest poprawa efektywności energetycznej rozumianej m.in. jako obniżenie zużycia energii na etapie użytkowania. Zmieniająca się sytuacja geopolityczna i ekonomiczna na rynku surowców energetycznych a także rosnąca świadomość społeczna powoduje, iż wzrasta zainteresowanie rozwiązaniami innowacyjnymi, często niedocenianymi w epoce taniej i łatwo dostępnej energii konwencjonalnej. Jednym z takich rozwiązań są przegrody kolektorowo-akumulacyjne, których analiza w wersji zmodyfikowanej i udoskonalonej stała się tematem recenzowanej pracy doktorskiej. Uważam, że podjęta tematyka jest niezwykle aktualna, ważna z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia, a także istotna z uwagi na nowe

wymagania oszczędności energii, prognozowane trendy w architekturze oraz obserwowane zmiany klimatyczne.

Przegroda kolektorowo-akumulacyjna stanowiąca ścianę zewnętrzną budynku jest elementem mogącym istotnie poprawić bilans strat ciepła w sezonie grzewczym. Jednocześnie może ona stanowić źródło niepożądanych zysków ciepła w okresie lata. Należy także pamiętać, że zgodnie z przepisami prawa budowlanego powinna ona spełniać określone wymagania, na przykład w zakresie izolacyjności cieplnej. Konieczność spełnienia wielu odmiennych, często sprzecznych wymagań powoduje, że ostateczne rozwiązanie przegrody kolektorowo-akumulacyjnej jest często nieoczywiste. Trudno jest też oceniać taką przegrodę stosując jedynie proste, inżynierskie metody i narzędzia, bowiem zjawiska i procesy decydujące o jej efektywności energetycznej mają charakter dynamiczny, często nieliniowy i zdeterminowane są warunkami brzegowymi, takimi jak klimat lokalny i wymagania środowiska wewnętrznego. Współcześnie istnieją dwie metody analizy efektywności energetycznej tego typu rozwiązań. Metoda pierwsza bazująca na zaawansowanych modelach numerycznych, wcześniej zweryfikowanych i zwalidowanych oraz metoda badawcza z wykorzystaniem badań laboratoryjnych lub polowych. Do realizacji głównego celu rozprawy, czyli zbadania przegrody kolektorowo-akumulacyjnej zmodyfikowanej materiałem zmienno-fazowym autorka wybrała metodę badawczą, wykorzystując zarówno badania laboratoryjne (komora termiczna) jak i polowe (komora helioenergetyczna).

Zaproponowane metody badawcze, uzyskane wyniki i ich dogłębna analiza statystyczna sprawiają, że sformułowane wnioski są wiarygodne a część z nich ma znaczny potencjał aplikacyjny. Przyczyni się to z pewnością do dalszego rozwoju i udoskonalenia budowy ścian kolektorowo-akumulacyjnych z materiałem fazowo-zmiennym MFZ, a także rzeczywistej oceny cieplnej i optymalizacji rozwiązań w różnych warunkach ich przyszłej eksploatacji. Tym samym tematykę podjętą w ocenianej rozprawie doktorskiej uważam za oryginalną w kontekście badań prowadzonych w wiodących ośrodkach w kraju i na świecie, zaś jej wybór za trafny i całkowicie uzasadniony.

3. Krótka charakterystyka pracy i zakres rozprawy

Praca pt. „Wpływ materiałów zmienno-fazowych na efektywność energetyczną modyfikowanych przegród kolektorowo-akumulacyjnych" została przygotowana w formie maszynopisu i liczy łącznie 246 stron. Zawiera 127 rysunków i 63 tabele. Składa się z 7

rozdziałów o istotnie różnej długości. Rozdział 2, stanowiący przegląd literatury kończy podsumowanie. Układ pracy i podział na rozdziały jest poprawny, typowy dla rozpraw naukowych.

Rozdział 1 to krótkie, trzy stronicowe wprowadzenie w tematykę pracy, poprzedzający znacznie obszerniejszy rozdział 2, w którym przedstawiono przegląd aktualnego stanu wiedzy. Zawiera on zarówno informacje podstawowe, w obszarze promieniowania słonecznego i wymiany ciepła, jak i specjalistyczną z zakresu rozwiązań przegród kolektorowo-akumulacyjnych i materiałów fazowo zmiennych. Na końcu rozdziału znaleźć można także informacje na temat metod użytych w planowaniu i realizacji badań. Następnie w rozdziale 3 sformułowano tezę pracy oraz określono jej cel i zakres. Rozdział 4 stanowi opis stanowisk badawczych, wykorzystanego sprzętu pomiarowego, badanych komponentów i ich elementów składowych oraz przygotowania samych badań. Rozdział 5, dotyczący analizy badań wstępnych jest nieco ubogi porównaniu z kolejnym rozdziałem 6 i być może mógłby stanowić jego fragment. Rozdział 6 opisuje bowiem główne osiągnięcie wykazane w pracy czyli wyniki przeprowadzonych eksperymentów, badań polowych i laboratoryjnych, ich szczegółową analizę statystyczną i uzyskane równania regresji. Pracę kończy rozdział 7 zawierający podsumowanie i wnioski oraz kierunki dalszych prac badawczych. Praca zawiera ponadto streszczenie w języku polskim i angielskim, zestawienie użytych symboli i oznaczeń, spis literatury i wykaz rysunków i tabel. Nie posiada załącznika.

W pracy wykorzystano aż 247 pozycji literaturowych, w dominującej liczbie anglojęzycznych. Pozycja (Garbalińska i Siwińska, 2012) jest zdublowana w sp1S1e. W większości są to artykuły, które ukazały się po roku 2000, zaś w znacznej liczbie po roku 2010 (ponad 100 pozycji). Należą do nich prace własne Doktorantki. Dziwi natomiast brak w spisie bibliografii pozycji moim zdaniem dość istotnej: *J Kośny, PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Interna! Structures, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14286-9,* dostępnej obecnie w trybie open-access.

4. Ocena formalna

Przedstawiona praca ma charakter badawczo - teoretyczny z obszaru fizyki budowli. Celem pracy było „określenie ilościowego udziału oraz prawidłowego umiejscowienia PCM w przegrodzie" oraz „ocena wpływu PCM na funkcjonowanie przegrody kolektorowa-

akumulacyjnej z uwzględnieniem występujących warunków klimatycznych". Stwierdzam, że założony cel został zrealizowany przez Doktorantkę za pomocą poprawnie opracowanego planu badań, dobranych metod eksperymentalnych i analizy wyników.

Moim zdaniem, oryginalne i najbardziej cenne z naukowego punktu widzenia są następujące osiągnięcia:

- wyznaczenie współzależności pomiędzy parametrami klimatycznymi, a gęstością strumienia ciepła na powierzchni wewnętrznej,

a także

- określenie wielkości mających największy wpływ na wartość zysków ciepła od promieniowania słonecznego, co jest istotnym osiągnięciem w kontekście prowadzonych aktualnie na świecie badań oraz pomaga zrozumieć istotę procesów fizycznych zachodzących w tego typu przegrodzie.

Autorka sformułowała następującą tezę pracy „Istnieje możliwość poprawy efektywności energetycznej przegród kolektorowo-akumulacyjnych poprzez zastosowanie w akumulacyjnej strukturze przegród materiałów zmienno-fazowych", która została udowodniona na podstawie analizy uzyskanych wyników.

Praca ma klasyczny układ rozprawy doktorskiej. Część autorska, doświadczalna i analityczna pracy została poprzedzona rzetelnym i solidnym przeglądem aktualnego stanu wiedzy. Momentami być może nawet zbyt obszernym, w kontekście na przykład części 2.1 (promieniowanie słoneczne) i 2.2 (wymiana ciepła). Rozdziały ułożone są w racjonalnym porządku, aczkolwiek należałoby postawić pytanie, które badania powinny zostać przeprowadzone jako pierwsze. Z uwagi na charakter i potrzebny czas zasadnym byłoby być może zamienić kolejność „optymalizując" w badaniach laboratoryjnych końcowe rozwiązanie, dla którego przeprowadzone zostaną długoterminowe badania polowe. Niewątpliwie cenny w kontekście całej pracy jest natomiast sposób przygotowania planu doświadczeń (metoda Taguchi) oraz analiza uzyskanych wyników (metoda regresji wielorakiej).

W mojej opinii praca jest bardzo obszerna pod względem liczby wykonanych i opisanych badań i analizy uzyskanych wyników. Świadczy to o tym, że Doktorantka starała się dokonać jak najbardziej kompleksowej oceny analizowanych rozwiązań, wybierając i opisując

najważniejsze wyniki i spostrzeżenia. Sposób przeprowadzenia analiz, zakres badań i zawartość całej rozprawy nie budzą zastrzeżeń.

Praca napisana jest prawidłową polszczyzną z minimalną liczbą błędów edytorskich. Autorka nie stroni od szczegółowej i dogłębnej analizy uzyskanych wyników na każdym etapie pracy. Jest precyzyjna i rzetelna w formułowaniu własnych opinii. Na szczególną pochwałę zasługuje liczba przeprowadzonych eksperymentów. Ważne jest, że Doktorantka podchodzi z dystansem do uzyskanych wyników badań zdając sobie sprawę z dokładności urządzeń pomiarowych jak i niepewności pomiaru. Drobne błędy o charakterze ogólnym bądź redakcyjnym wykazane w dalszej części recenzji nie mają wpływu na całościową, bardzo pozytywną ocenę.

5. Ocena merytoryczna

Ze względu na trafnie sformułowany problem naukowy, szeroki zakres badań, prawidłową interpretację uzyskanych wyników oraz umiejętność sformułowania wniosków moja ocena merytoryczna prezentowanej pracy jest bardzo wysoka. Jednakże dokładna analiza tekstu rozprawy nakłada na mnie obowiązek sformułowania kilku uwag o charakterze dyskusyjnym, nie umniejszających jednak pierwotnej, wysokiej oceny.

5.1. Uwagi krytyczne wymagające odpowiedzi w czasie publicznej obrony

Pierwsza uwaga dotyczy zastosowanych w badaniach laboratoryjnych paneli grzewczych. Jaką liczbę paneli zastosowano dla pojedynczej przegrody. Jak przeliczano moc grzewczą w odniesieniu do 1 m^2. Jaka była charakterystyka procesu wymiany ciepła w porównaniu z sytuacją rzeczywistą, gdy przegroda poddawana jest promieniowaniu słonecznemu? Ile niezależnych sekcji grzejnych znajdowało się w pojedynczym panelu i jak sterowano ich mocą? Czy ustalając strumień ciepła zadany na matach grzejnych uwzględniano zmianę transmisyjności oszklenia wraz ze zmiennym kątem padania promieniowania słonecznego czy też przyjmowano wartość stałą zgodnie z tabelą 4.57

Uwaga druga związana jest z rozwiązaniem samej przegrody kolektorowo-akumulacyjnej. W pracy brak jest informacji na temat prób wstępnego określenia rekomendowanej budowy samej przegrody jak i użytego MFZ. Jakie jest uzasadnienie wypełnienia pozostałych szczelin pustaków mączką ceglaną (str. 81)? Czy pozostawienie wolnych przestrzeni lub wypełnienie ich innym materiałem (dobrym przewodnikiem lub

izolatorem) mogłoby istotnie wpłynąć na pracę całej ściany kolektorowo-akumulacyjnej? Czy optymalizowano wstępnie temperaturę przemiany MFZ i dlaczego zdecydowano się na wybór materiału RT25HC (str. 83)? Czy określono parametry przegrody, takie jak współczynnik przenikania ciepła w doniesieniu do aktualnych warunków technicznych i czy badane przegrody (Wr-Wrv)je spełniają, tak jak przegroda teoretyczna Wv.

Ostatnie trzecia wątpliwość dotyczy wyników pokazanych w rozdziale 6.1.5. Wątpliwości budzi liczba godzin nasłonecznienia przyjęta jako parametr brzegowy zamiast całkowitego natężenia promieniowania słonecznego lub ewentualnie dobowe sumy energii promieniowania słonecznego (np. rys. 6.31). Liczba godzin nasłonecznienia jest bowiem parametrem orientacyjnym i nie determinuje rzeczywistych zysków ciepła od promieniowania słonecznego mającego istotny wpływ na wartość zakumulowanej energii. Podobnie jak podanie jedynie średniej dobowej temperatury powietrza zewnętrznego dla całego okresu, na przykład 19 dni. Przebieg wartości strumienia ciepła (np. rys. 6.32) jest bowiem także zdeterminowany wartościami temperatury powietrza zewnętrznego, która powinna zostać uwzględniona w analizie.

5.2. Pozostałe uwagi merytoryczne

Na stronie 29 Autorka używa pojęcie „odporność cieplna". Proszę o podanie definicji tego pojęcia. Czy chodzi w tym przypadku o odporność na podwyższone temperatury (mięknienie).

Na stronie 37 określając stan skupienia poszczególnych parafin należy podać w jakich temperaturach występują one w stanie stałym a w jakich w płynnym. Na przykład parafiny w przedziale atomów węgla od Cs do Cis mogą występować także w stanie stałym.

Proszę o wyjaśnienie zasadności wniosku 3, na stronie 66, w którym rekomendowany jest materiał charakteryzujący się „dużą wartością ciepła utajonego". Moim zdaniem wartość ciepła utajonego jest uwarunkowana zarówno ilością energii możliwej do zmagazynowania ale również zdolnością przegrody do jej oddawania. Tym samym nie jest zalecane rozwiązanie, w którym ilość zmagazynowanej energii będzie narastać w czasie, zaś przegroda nie ulegnie całkowitemu „rozładowaniu" przed kolejnym okresem zysków ciepła.

Osiągnięcie celu pracy m 1 (str. 69) jest ograniczone założeniami i konstrukcją przegrody. Autorka rozpatruje bowiem jedynie dwa przypadki determinujące ilość MFZ, wypełnienie jednej lub obu komór, oraz dwa przypadki usytuowania warstwy MFZ, po

stronie zewnętrznej lub w środku przegrody. Ponadto jest to analiza w zależności od rodzaju przeszklenia a nie przegrody.

Pojęcie „poprawa efektywności energetycznej przegrody" użyte m.in. w tezie pracy (str. 69) nie zostało w niej doprecyzowane. O jaki rodzaj energii chodzi i dla jakiego okresu poszukiwane jest rozwiązanie najkorzystniejsze (zima, lato, cały rok)?

Podany na stronie 71 podział badań i komór badawczych nie jest jednoznaczny. Uporządkowania wymaga podział na dwie grupy badań oraz odpowiednie przypisanie do nich stanowisk badawczych.

Na jakiej podstawie wyznaczono długość okresu grzewczego (str. 96)? Jak powszechnie wiadomo w budynkach energooszczędnych i niemal zero energetycznych rzeczywisty okres grzewczy może być znacznie krótszy i obejmować miesiące typowo zimowe.

Nie jest jasne jakie wartości podano w tablicy 4.9, str. 107. Czy jest to energia [Wh] czy liczba dni? Jeżeli liczba dni to czas lepiej jest wyrazić w godzinach niż dobach, szczególnie że podane wartości nie dają pełnych godzin, np. 0,9 dnia. Błędną jest wtedy jednostka przy parametrach Q.

Czy wartości godzinowego napromieniowania słonecznego [Wh/m^2] podane w tabeli 4.11 (str. 109) są realistyczne w polskich warunkach klimatycznych w przypadku przegród pionowych. Dyskusyjne są wartości 2 i 3, które odpowiadają promieniowaniu słonecznemu na przykład 5650 W/m^2. Również wartości dla punktów planu 7 i 16 (tabela 6.29) oraz 18 (tabela 6.31). Zgodnie z informacją podaną na stronie 15, natężenie promieniowania słonecznego na granicy atmosfe1y ziemskiej wynosi 1367 W/m^2.

Na podstawie badań wstępnych sformułowano wniosek, iż „wykazano korzystny wpływ materiału zmienna fazowego na poprawę stabilizacji przepływu ciepła przez przegrodę", co jest niewątpliwie prawdą. Czy badano jednak bilans cieplny przegrody z MFZ i bez MFZ, porównując przebieg zmian strumienia, na przykład rys. 5.4.

Jaki rodzaj przeszklenia zastosowano w badaniach których wyniki zamieszczono na 1ysunkach 6.16? Dlaczego Doktorantka uważa, że warunki badań były stacjonarne (str. 131)?

Na stronie 143, rys. 6.28 pokazano procentowy udział energii promieniowania słonecznego Wprom, Względem jakiej wielkości wyliczono ten udział?

Na stronie 146 sformułowano wniosek, że „zakumulowaną energię cieplną można wykorzystać do zmniejszenia gradientu temperatury w pomieszczeniu". Proszę doprecyzować jakiej temperatury dotyczy wspomniany gradient?

Wartości podane na rysunku 6.35 nie korespondują z wartościami na rysunku 6.32. Podobnie jak 6.53 i 6.52. Błędnie zinterpretowano także część wyników zamieszczonych na rysunku 6.36 (str. 151), przedział (-12,0) - (-8,0).

Dla lepszej czytelności dobrze byłoby zamieścić wyznaczone równania regresji (str. 176) również w tekście rozprawy. Tym bardziej, że są one kluczowe w recenzowanej pracy.

Czy wniosek końcowy nr 2 jest obowiązujący dla każdego rodzaju zastosowanego przeszklenia czy jedynie dla przeszklenia o najniższym współczynniku przenikania ciepła U=0,6 W/m^{2}K? Pytanie dotyczy porównania z przegrodą referencyjną.

Czy zastosowanie jeszcze większej ilości MFZ poprzez wypełnienie kolejnych szczelin pustaka ceramicznego może doprowadzić do poprawy efektywności energetycznej przegrody? Pytanie proszę potraktować w nawiązaniu do wniosku końcowego nr 3.

6. Uwagi o charakterze edytorskim i ogólnym

Autorka przyjęła i używa w pracy skrót PCM pochodzący od nazwy angielskiej. W publikacjach polskojęzycznych bardziej popularnym jest skrót MFZ pochodzący od nazwy polskiej - materiał fazowo-zmienny, ewentualnie materiał zmienno-fazowy. Tym bardziej, że Autorka w całej rozprawie używa pełnej nazwy polskiej.

W niemal całej pracy Autorka używa pojęcia „energia cieplna", natomiast zwykle stosuje się określenie „ciepło".

Str. 9, jest „współczynnik transmisyjności", powinno być „współczynnik przepuszczalności energii promieniowania słonecznego";

Str. 11, jest „zasobów pierwotnych", powinno być „pierwotnych zasobów";

Str. 11, jest „klasyfikowało się", powinno być „zawierało się";

Str. 13, jest „hipotezę", powinno być „tezę";

Str. 16, jest „Słonce", powinno być „Słońce";

Str. 16, niezgodność symboli we równaniu 2-1 i jego opisie;

Str. 21,jest „śmieci", powinno być „odpadów";

Str. 27, jest „okresie nasłonecznionym", powinno być „okresie nasłonecznienia";

Str. 29, jest „kolektorowo-akumulacyjna", powinno być „kolektorowo-akumulacyjnej";

Str. 33, określenie „cyrkulacja zgodnie z ruchem wskazówek zegara" jest nieprecyzyjne, gdyż nie podano punktu odniesienia;

Str. 36, jest „przechowywana", powinno być „magazynowana";

Str. 36, jest „okresie czasowym", powinno być „czasie";

Str. 40, jest „stopnień", powinno być „stopień";

Str. 43, rys. 2.8, opis materiału z jakiego wykonano „woreczki". Odwrotna jest także kolejność oznaczeń.

Str. 48-49, ostatni akapit rozdziału 2.6 nie jest związany z jego tytułem;

Str. 86, jest „trzy zestawy szybowe", powinno być „cztery zestawy szybowe";

Str. 92, jakie jest źródło równania 4-1?;

Str. 93, jest „współczynnik odbicia promieniowania słonecznego", powinno być „współczynnik odbicia promieniowania słonecznego dla gruntu";

Str. 107,jest „cielnej", powinno być „cieplnej";

Str. 107, podany w tabeli 4.9 czas lepiej wyrazić w godzinach niż dobach, szczególnie że podane wartości nie dają pełnych godzin, np. 0,9 dnia.

Str. 108, jest „zasady procesu", powinno być „harmonogram procesu";

Str. 117, jest „energii ciepła", powinno być „ciepła";

Str. 121,jest „płaszczzna", powinno być „płaszczyzna";

Str. 128, jest „przepływu ciepła", powinno być „ciepła";

Str. 146, jest „przegroda W1v", powinno być „przegroda Wm";

Str. 153, jest,, ,0000", powinno być „0,000";

Str. 161,jest „0,5 W/m^2", powinno być „-0,5 W/m^2";

Str. 179, jest „rysunkach 6.6", powinno być „rysunkach 6.63";

Str. 207, temperatura powietrza nie może mieć wpływu na izolacyjność przeszklenia;

Str. 21O, jest „do analizy wyników badań", powinno być „do badań";

7. Wniosek końcowy

Uwagi jakie zawarłem w swojej opinii w dużym stopniu mają charakter dyskusyjny i nie podważają w istotny sposób wartości naukowej pracy, jak również nie obniżają bardzo pozytywnej oceny samej Doktorantki. Stwierdzam, że Autorka opracowania podejmując istotny problem naukowy rozwiązała go samodzielnie, poprawnymi metodami badawczymi przez co wykazała się umiejętnością wymaganą od osób ubiegających się o stopień doktora. Otrzymane wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy nt. efektywności energetycznej przegród kolektorowa akumulacyjnych jak i metod jej wyznaczania, które obok aspektu poznawczego posiadają również istotną wartość utylitarną.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Joanny Krasoń pt.:" Wpływ materiałów zmienno-fazowych na efektywność energetyczną modyfikowanych przegród kolektorowo-akumulacyjnych" spełnia wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami, dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechniki Rzeszowskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie Kandydatki do publicznej obrony.

Ponadto uważam, że z uwagi na:

- szeroki zakres przeprowadzonych badań i kompleksowe rozwiązanie problemu,

- dogłębną i zaawansowaną analizę uzyskanych wyników,

- utylitarny charakter sformułowanych wniosków,

zasługuje ona na wyróżnienie.

.....Dariusz Heim.....

Dr hab. inż. Dariusz Heim, prof. uczelni