



Dr hab. inż. Anna Bogdan, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 20
00-653 Warszawa
t: +48 22 234 51 37
e: anna.bogdan@pw.edu.pl

Warszawa, dn. 05.05.2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Sinackiej

**pt. „Właściwości cieplne sufitów grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem
zmiennofazowym”**

1. Wstęp

Podstawą przygotowania recenzji jest pismo Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Poznańskiej (pismo znak WISIE.63.16.2021 z dnia 22.03.2021 r.) w związku z powołaniem mnie przez Radę Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyki Politechniki Poznańskiej (uchwała z dnia 19.03.2021 r.) na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Sinackiej nt. „Właściwości cieplne sufitów grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym”.

Rozprawa doktorska została przygotowana pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Edwarda Szczechowiaka. Rozprawa składa się z 130 stron, na których zamieszczono: streszczenie, wykaz oznaczeń, wstęp, 5 rozdziałów głównych, wnioski ze wskazaniem perspektyw dalszych prac oraz bibliografię. Bibliografia składa się z 137 pozycji, przy czym pozycji naukowych jest 96 (w tym 5 współautorstwa Doktorantki), pozostałe pozycje są to instrukcje, normy, poradniki oraz adresy stron internetowych.

Recenzję przygotowano zgodnie z wymaganiami ustawy o stopniach naukowych (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. DzU nr 65, poz. 595, z późn. zm.), wg których rozprawa doktorska „powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (...) oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej (...) oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej”. Z tej przyczyny w recenzji skupiono się na ocenie następujących aspektów rozprawy: znaczenia podjętej tematyki, oryginalności rozwiązania problemu naukowego, wartości naukowej oraz charakterystyki formalnej rozprawy.

Znaczenie podjętej tematyki rozprawy

Celem nadrzędnym badań opisanych w rozprawie było *stworzenie i walidacja eksperymentalna modelu numerycznego opisującego zachowanie wodnych paneli sufitowych grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym (PCM) oraz bez wypełnienia PCM w warunkach dynamicznych dla określonego przedziału czasu*. Założono, że opracowany model będzie można zastosować w algorytmach sterowania w celu minimalizacji zużycia energii przy zachowaniu warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach. Zdefiniowana została również teza pracy brzmiąca następująco: *Zastosowanie materiału zmiennofazowego zwiększa pojemność ciepną sufitów grzewczo-chłodzących i w ten sposób uzyskiwane są właściwości podobne do stropów aktywowanych termicznie. Wpływa to na lepszą współpracę z odnawialnymi nieskotemperaturowymi źródłami energii, a poprzez zastosowanie modelu adaptacyjnego komfortu cieplnego oraz dostosowanie algorytmów sterowania obniża moc szczytową i koszty eksploatacyjne*.

Doktorantka swoją pracą badawczą dołączyła do wielu zespołów naukowych, które dążą od lat do opracowania optymalnego wykorzystania potencjału redukcji zużycia energii na cele eksploatacji obiektów, jaki stwarzają związki zmiennofazowe. Związki zmiennofazowe są od kilkadziesiąt lat stosowane z powodzeniem w różnych gałęziach przemysłu, natomiast w budownictwie i inżynierii środowiska wewnętrznego pojawiły się przeszło 20 lat temu, jednakże ze względu na ich specyfikę cały czas rozwiązania nie są powszechnie i bezpośrednio dostępne w praktyce inżynierskiej a niejako dostosowywane do konkretnego przypadku. Wyniki prac przeprowadzonych przez Doktorantkę wpisują się zatem w aktualne trendy badawcze i poprzez chęć opracowania algorytmów sterowania układami grzewczo-chłodzącymi, przyczyniają się do zwiększenia wiedzy i wdrożenia rozwiązań z PCM. Z tej przyczyny wybór tematu badawczego uważam za bardzo wartościowy i z dużym potencjałem aplikacyjnym.

W przedstawionej rozprawie Doktorantka przeprowadziła cały cykl badawczy, na który składały się:

- studia literaturowe dotyczące warunków komfortu cieplnego, przy zastosowaniu modelu adaptacyjnego, płaszczyznowych systemów grzewczo-chłodzących z uwzględnieniem zastosowania materiałów zmiennofazowych oraz modelowania przepływu ciepła w pomieszczeniach;
- badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych służące sprawdzeniu charakterystyki działania zarówno samego sufitu grzewczo-chłodzącego, jak i w połączeniu z kapsułami zawierającymi PCM;
- opracowanie modelu numerycznego do oceny przepływu ciepła w pomieszczeniu przy zastosowaniu analizowanych rozwiązań, a także jego walidacja na bazie wyników badań laboratoryjnych;
- przeprowadzenie symulacji na opracowanym modelu, których celem de facto była ocena warunków cieplnych panujących w pomieszczeniu przy różnych wariantach godzin użytkowania pomieszczeń a także czasów regeneracji PCM;

- opracowanie wytycznych do tworze algorytmów sterowania panelami grzewczo-chłodzącymi wypełnionymi PCM;
- sformułowanie wniosków z przeprowadzonych prac.

Na podstawie przedstawionych informacji uznaję wybór tematu i celu rozprawy za właściwy i zgodny z obecnymi trendami i badaniami w tym zakresie. Praca nad owym rozwiązaniem dostarczyła wielu cennych wniosków i sugestii, które mogą być zastosowane przez innych badaczy, jak również w dalszej analizie różnych rozwiązań, które mogą być zastosowane przy klimatyzacji obiektów, w których głównym problemem jest zachowanie odpowiednich warunków środowiska cieplnego dla użytkowników.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego

Oryginalnym osiągnięciem przedstawionej rozprawy jest przede wszystkim opracowany i zwalidowany model numeryczny, który może być stosowany do prognozowania warunków cieplnych, jakie będą występować w pomieszczeniach, w których zastosowany będzie panel grzewczo-chłodzący wypełniony analizowanym związkami zmiennofazowym. Podczas prac nad modelem Doktorantka rozwiązała również pomniejszych badania, jak np. ocenę cieplną zastosowanych związków zmiennofazowych. W wyniku dalszych prac powstały również wytyczne, które mogą być zastosowane podczas tworzenia algorytmu sterowania tego rodzaju układami. Wyniki przeprowadzonych prac mają zatem wysoki potencjał aplikacyjny i są wkładem w dyskusję nad możliwościami optymalnego wykorzystania związków zmiennofazowych w systemach klimatyzacji.

Wartość naukowa rozprawy

Celem nadrzędnym wskazanym przez Doktorantkę było opracowanie modelu umożliwiającego prognozowanie warunków cieplnych w pomieszczeniach przy zastosowaniu panelu grzewczo-chłodzącego wypełnionego kapsułami ze związkami zmiennofazowymi. Ciąg logiczny działań jest poprowadzony prawidłowo, jednakże przedstawione opisy prac budzą pewien niedosyt. Poniżej przedstawiono kwestie wymagające szerszego rozważenia.

Rozdział 2:

- a. Nie jest do końca wyjaśnione, z jakiego powodu Doktorantka przyjęła model adaptacyjny jako podstawę do oceny komfortu cieplnego użytkowników. Model ten stosuje się w przypadkach kiedy nie ma możliwości regulacji warunków cieplnych w pomieszczeniu, tymczasem zastosowanie paneli grzewczo-chłodzących będzie prowadziło do regulacji parametrów środowiska cieplnego.
- b. Na efektywność zastosowania PCM wpływają, oprócz parametrów cieplnych samego związku, bardzo duży wpływ ma metoda ich konfekcjonowania, ilość materiału w zamknięciu, rodzaj zastosowanego związku chemicznego, metoda lokalizacji PCM w stosunku do warunków środowiska, na które ma oddziaływać. Wszystkie te elementy zostały bardzo skrótowo

- przedstawione przez Doktorantkę. Nie jest dokładnie wskazane, jakie były przyczyny wyboru danego związku chemicznego, poza stwierdzeniem, że temperatura przemiany fazowej powinna zawierać się w przedziale 17-25 (26) °C. Na jakiej podstawie Doktorantka doszła do tego wniosku?
- c. W przeglądzie literatury dotyczącej systemów płaszczyznowych zawierających PCM Doktorantka prawie nie wspomniała, przytaczając kolejne rezultaty badań pokazanych w publikacjach naukowych, jakie związki zmiennofazowe były stosowane w analizach i jak były one wprowadzone w dane rozwiązanie. Doktorantka wszystkie te cechy określała jako „zastosowanie PCM” a przecież kwestia jaki związek chemiczny był analizowany, jakie miał parametry (temperatura topnienia i krystalizacji), jak był wprowadzony, jakiej wielkości były kapsuły czy też inne zamknięcia, jaka ilość tego związku była zastosowana itp. są kluczowe do oceny czy dodanie PCM miało znaczenie dla uzyskania obniżenia zużycia energii. Dla przykładu, wskazywane badania prowadzone przez Pomianowskiego z in. nie doprowadziły do uzyskania efektywnego rozwiązania z powodu przyjęcia nieodpowiedniego związku chemicznego jako PCM. Brak kompletu informacji oraz krytycznej oceny przedstawionych wyników badań uważam za główną słabość rozdziału 2.
- d. Jakie były powody zastosowania do obliczeń numerycznych oprogramowania TRANSYS? Modelowanie PCM w warunkach nieustalonych jest bardzo dobrze rozwiązane w oprogramowaniu ANSYS.

Rozdział 3:

- e. Brakuje dokładnych informacji o zastosowanej aparaturze pomiarowej, łącznie z dokładnością sprzętu. Dokładne informacje podano wyłącznie o termoparach.
- f. Brakuje kryteriów wyboru, jakie stały za zastosowaniem PX21 jako PCM w danym układzie, jak również wskazania gdzie i w jakiej ilości został dokładnie ten proszek wprowadzony w panele. W proszku relatywnie dużą objętość zajmuje zamknięcie PCM, zatem jakie były przyczyny, że nie zastosowano większych kapsuł i większej ilości czystego związku?
- g. W pomieszczeniu pomiarowym mierzone były wartości ditlenku węgla i tlenu węgla – czy dane te były wykorzystywane do analiz?
- h. Na podstawie rys. 3.20 – 3.25 może wnioskować, że podczas okresu nocnego nie doszło do całkowitej krystalizacji PCM w panelach, gdyż średnia temperatura PCM wypełniającego panele nie stabilizowała się. Czy określono, jaki jest optymalny czas krystalizacji zastosowanych paneli z PCM?

Rozdział 4:

- i. Na wykresach nie zamieszczono RMSE od wartości średniej, które zawsze dobrze obrazują różnice między wynikami badań rzeczywistych i symulacji.

Rozdział 5:

- j. W wynikach symulacji podczas regeneracji temperatura PCM spada o 4 °C i więcej tymczasem w badaniach rzeczywistych (rozdział 3) podczas 8 godzin „regeneracji” temperatura PCM spadała maksymalnie o 1,5°C. Skąd taka różnica?
- k. Weryfikację modelu wykonano wyłącznie w trybie chłodzenia, tymczasem symulacje opracowano również dla trybu ogrzewania. Na jakiej podstawie określono zachowanie układu w trybie ogrzewania?

Rozdział 6:

- l. W wytyczanych brakuje informacji, że algorytm sterowania jest aplikowany tylko i wyłącznie dla danego urządzenia i rozwiązania PCM.

Jednocześnie pragnę podkreślić, że powyższe uwagi nie rzutują na moją ogólną pozytywną ocenę prac zrealizowanych przez Doktorantkę.

Ocena strony formalnej rozprawy

Trzon rozprawy stanowi 7 rozdziałów podzielonych na następujące części: wprowadzenie; wyniki studiów literaturowych, badania laboratoryjnego panelu grzewczo-chłodzącego z zastosowanym PCM oraz bez niego, opracowanie i walidacja modelu oraz obliczenia za pomocą modelu wybranych wariantów warunków użytkowania pomieszczeń oraz wnioski.

W pierwszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do tematu z uwzględnieniem szczegółowych informacji dotyczących sufitów i stropów chłodzących oraz podstawowych informacji dotyczących zastosowania PCM w sufitach grzewczo-chłodzących. W rozdziale tym przedstawiono również cel, tezę i zakres pracy.

Drugą część pracy stanowi przegląd literatury dotyczącej zarówno komfortu cieplnego, jak i połączenia stropów grzewczo-chłodzących z PCM oraz wybranych metod modelowania przepływu ciepła w pomieszczeniach z sufitami grzewczo-chłodzącymi z kapsułami wypełnionymi PCM. W rozdziale tym brakuje ściśle zdefiniowanego podsumowania przeprowadzonych studiów literaturowych.

Trzecia część pracy poświęcona jest omówieniu przeprowadzonych badań. Przedstawiono opis zastosowanego stanowiska badawczego, konstrukcję paneli grzewczo-chłodzących a także komory doświadczalnej i warunków prowadzenia badań. Zamieszczono również wyniki badań wykonany za pomocą kalorymetru skaningowego określające parametry cieplne zastosowanego związku zmiennofazowego. W rozdziale przedstawiono również wyniki badań współczynników przejmowania ciepła i przenikania ciepła dla paneli grzewczo-chłodzących zrealizowane w wariantach z i bez kapsuł zawierających PCM.

Rozdziały czwarty, piąty i szósty, poświęcone oprocenowaniu modelu oraz przy jego zastosowaniu – określeniu warunków tworzonych przez panel grzewczo-chłodzący wypełniony PCM są czytelne i nie budzą wątpliwości.

W rozdziale siódmym wątpliwość budzi wniosek nr 1, jak również wnioski nr 12-14, które jednak nie wynikają z przeprowadzonych badań. Takie dodatkowe komentarze warto było zawrzeć w podsumowaniu, którego również zabrakło w pracy.

W pracy pojawiają się drobne błędy gramatyczne i stylistyczne, jednakże nie rzutują one na ocenę pracy. Podsumowując formalną stronę rozprawy uważam, że praca została zrealizowana poprawnie, tj. przyjęta struktura pracy jest prawidłowa i zgodna z cyklem prowadzonych badań; rysunki i tabele są opisane i przytoczone prawidłowo.

Wnioski końcowe

Podsumowując przedstawione powyżej uwagi krytyczne lub dyskusyjne stwierdzam, że nie wpływają one na moją bardzo pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Sinackiej, przygotowanej pod opieką prof. dr hab. inż. Edwarda Szczechowiaka. W mojej opinii przedstawiona rozprawa doktorska jest wartościowym wkładem w dyskusję na temat wykorzystania związków zmiennofazowych w inżynierii środowiska. Uważam, że Doktorantka zrealizowała postawiony cel, wykazała się odpowiednim poziomem wiedzy teoretycznej, samodzielnością prowadzenia pracy naukowej i oryginalnością w rozwiązaniu problemu naukowego.

W związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Sinackiej nt. „Właściwości cieplne sufitów grzewczo-chłodzących z wypełnieniem materiałem zmiennofazowym” spełnia wymagania formalne określone w „Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595) wraz z późniejszymi zmianami. Przedstawiona rozprawa doktorska mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych (odpowiadającej dziedzinie nauk technicznych wg Rozporządzenia MNiSW z 2011 roku), w dyscyplinie „inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka” (odpowiadającej dyscyplinie „inżynieria środowiska” wg Rozporządzenia MNiSW z 2011 roku).

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Joanny Sinackiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie z uwagi na wysoki poziom zrealizowanych prac oraz zawarte w rozprawie innowacyjne rozwiązania, które mogą być wdrożone w praktyce inżynierskiej, stawiam wniosek o jej wyróżnienie przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Anne Bogdan