Białystok 2018. 09.25

Dr hab. inż. Sławomir Poskrobko
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
Białystok, ul Wiejska 45A

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Stokowiec pt.:

„Badania symulacyjne pracy instalacji solarnej z akumulatorem energii"

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Katarzyny Stokowiec pt.: **„Badania symulacyjne pracy instalacji solarnej z akumulatorem energii"**, zrealizowana pod kierunkiem Promotora prof. nzw. dr hab. inż. Tadeusza Orzechowskiego. W/w praca doktorska stanowiła załącznik do pisma Pani Dziekan prof. nzw. dr. hab.. inż. Lidii Dąbek Wydziału Inżynierii Środowiska Geomatyki i Energetyki Politechniki Świętokrzyskiej będącego zleceniem na wykonanie recenzji.

Tematyka podjęta w dysertacji wpisuje się w trend racjonalnej gospodarki energetycznej w zakresie efektywnych technologii energetycznych opartych o zaawansowane zintegrowane systemy OZE. Praca w istocie rzeczy ma charakter eksperymentalny z zastosowaniem oryginalnych algorytmów obliczeniowych (modeli matematycznych) z zakresu energetyki solarnej zintegrowanej z zasobnikiem (akumulatorem) ciepła ze złożem parafinowym, gdzie do podwyższania efektywności akumulatora wykorzystuje się niskotemperaturowe procesy przemian fazowych złoża. Istotnym fragmentem pracy jest opracowanie algorytmu obliczeniowego z zakresu zaawansowanych technologii wytwarzania ciepła użytecznego to jest skojarzenia magazynu ciepła (zasobnika), kolektora słonecznego i pompy ciepła .

Autorka rozprawy skoncentrowała się na badaniach eksperymentalnych procesów wymiany ciepła zachodzących w złożu parafiny stanowiącej wypełnienie zasobnika ciepła zintegrowanego z kolektorem słonecznym. W procesach tych istotną rolę przypisuje się wymianie ciepła w złożu parafinowym z przemianą fazową. Na podstawie otrzymanych w eksperymencie wyników, z wykorzystaniem własnego algorytmu, przeprowadziła analizę obliczeniową (numeryczną) skojarzenia instalacji solarnej z zasobnikiem wypełnionym parafiną, a następnie dokonała analizy układu grzejnego tj. kolektora słonecznego, zasobnika z parafiną, pompy ciepła. Celem analizy układu grzejnego jest szacunek efektywności energetycznej skojarzonych (zintegrowanych) ze sobą elementów systemu technologicznego, wpisujący się w zakres zaawansowanych technologii energetycznych, wykorzystujących w 100% źródła odnawialne (OZE).

Przedstawiona do recenzji praca jest prawidłowo skonstruowana. Zawiera obszerny przegląd literatury tematycznej. Podjętą problematykę badawczą, analityczną oraz wnioski opisano zrozumiale. Na uwagę zasługuje wyważona estetyka graficzna rozprawy, która wskazuje na jej ścisły naukowy i techniczny charakter.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów zawartych na 104 stronach. W rozdziałach 4 i 5, które stanowią istotę rozprawy, Autorka udowadnia tezę postawioną w rozdziale 3. Należy podkreślić, że przedstawiona w rozprawie idea technologiczna stanowi oryginalną nowatorską koncepcję efektywnego wytwarzania ciepła użytecznego w oparciu o technologie OZE.

W rozdziale 1 „Wstęp”, posiłkując się doniesieniami literaturowymi, Doktorantka przedstawiła krótką charakterystykę wybranych nowych technologii OZE wskazując na ich wysokosprawny i niskoemisyjny charakter. Dla obszaru Polski scharakteryzowała potencjał istotnego źródła energii jakim jest promieniowanie słoneczne. Wskazuje przy tym na trudności głównie technologiczne, które w znacznym stopniu ograniczają możliwości efektywnego zagospodarowania tego źródła na potrzeby wytwarzania energii użytecznej. Biorąc pod uwagę komentarz Doktorantki pragnę zaznaczyć, że podjęta przez nią tematyka wpisuje się w aktualny globalny trend rozwoju technologicznego dla wdrażania coraz bardziej efektywnych tj. wysokosprawnych i niskoemisyjnych technologii energetycznych w całości opartych na źródłach odnawialnych. Praktyczne doświadczenia wdrożeń OZE w Polsce oparte na technologiach solarnych, pomimo znacznie ograniczonych zasobów, znajdują liczną rzeszę zwolenników. Wychodząc na przeciw potrzebom, Doktorantka proponuje zawansowany technologicznie system grzewczy o podwyższonej efektywności energetycznej, przeznaczony dla energetyki rozproszonej. Na podstawie przeglądu literatury, Doktorantka omawia możliwości technologiczne usprawniania wytwarzania ciepła użytecznego, wyraźnie wskazując technologie magazynowania ciepła w zasobnikach wypełnionych materiałami zmiennofazowymi (PMC). Przedstawia charakterystykę tych materiałów jednak nie podkreśla ich wad na tle ich wielu zalet. Rozdział wstępny kończy uzasadnieniem celowości stosowania zaawansowanych technologii wytwarzania energii na małą skalę (układy rozproszone) z możliwością zastosowania pomp ciepła zintegrowanych z zasobnikiem wypełnionym materiałem zmiennofazowym zasilanym z kolektora słonecznego. Pomimo wyczerpującej charakterystyki zasobników odczuwa się brak przykładów literaturowych omawiających ich ocenę biorąc pod uwagę kryteria wynikające z II zasady termodynamiki.

W rozdziale 2 „Cele pracy” Doktorantka formułuje cele jakie chciała osiągnąć, realizując zaplanowane badania. Jednak cele nie zostały w sposób jasny wyartykułowane na wstępie rozdziału. Dopiero ujawniają się w połowie

rozdziału – cel eksperymentalny i w końcu rozdziału – cel analityczny. Celem badań eksperymentalnych było określenie współczynnika przejmowania ciepła w procesie wymiany ciepła między źródłem ciepła, którym jest użebrowany wymiennik zatopiony w parafinie, a złożem parafinowym (nazywanym zmiennofazowym). Celem analitycznym były symulacje numeryczne, mająca za zadanie rozpoznanie pracy układów: najpierw kolektor słoneczny - zasobnik ze złożem parafinowym, a następnie układ grzewczy z kolektorem słonecznym i zasobnikiem z dobudowaną pompą ciepła

Tezę pracy przedstawiono w rozdziale 3. Doktorantka formułuje ją na tle komentarzy dotyczących właściwości termodynamicznych materiałów „zmiennofazowych", które mogą być zastosowane do wypełnienia zasobników ciepła. Wskazuje przy tym, jakie właściwości termodynamiczne charakteryzują te materiały i tak np. Autorka rozprawy pisze.: *„możliwie duża pojemność cieplna, entalpia zmiany faz oraz wysoka wartość współczynnika przewodzenia ciepła"*. W komentarzach Doktorantka nie podaje przykładowych wartości pojemności cieplnej, entalpii zmiany faz, rozszerzalności cieplnej itd. W odniesieniu do współczynnika przewodzenia ciepła, materiały tzw. „zmiennofazowe" np. parafiny, charakteryzują się małymi wartościami tego współczynnika w fazie ciekłej i wielokrotnie większymi w fazie stałej. Wartości te należało przedstawiać liczbowo, a w komentarzach dokonać ich oceny według jasnych i jednoznacznych kryteriów tj. wartości liczbowych. Pomimo braku konsekwencji inżynierskiej w komentarzach tj. braku operowania wartościami liczbowymi, teza pracy została sformułowana poprawnie, gdyż faktycznie materiały „zmiennofazowe" wymagają indywidualnego rozważenia możliwości ich zastosowania do magazynowania energii. Doktorantka sformułowała więc tezę: „....istnieje potrzeba indywidualnego pomiaru współczynnika przejmowania ciepła. Pomimo skomplikowanego charakteru zjawisk fizycznych towarzyszących zmianie fazy tego czynnika, tj. przejścia od stanu kruchego poprzez plastyczny do ciekłego, możliwe będzie opisanie tego procesu współczynnikiem przejmowania ciepła, który powinien być tutaj indywidualnie zmierzony." Doktorantka pomija dyskusję na temat współczynnika przewodzenia ciepła, co wymaga wyjaśnienia. Doktorantka czyni założenia, że wartość zastępczego współczynnika przejmowania ciepła nie będzie stała – w tym miejscu należało zdefiniować pojęcie zastępczego współczynnika przejmowania ciepła i uzasadnić z jakiego powodu jego wartość będzie ulegała zmianom.

Rozdział 4 „Badania procesu wymiany ciepła w zasobniku materiału zmiennofazowego" stanowi istotną część rozprawy, w którym Doktorantka udowadniała postawioną tezę. Rozdział zawiera wyniki wykonanych badawczych prac eksperymentalnych. Celem badań było wyznaczenie (poprzez

pomiar) współczynników przejmowania ciepła α dla materiału zmiennofazowego jakim jest parafina wypełniająca zasobnik. Badania przeprowadzała na oryginalnym (co zasługuje na szczególne podkreślenie) stanowisku badawczym, zaprojektowanym według własnej koncepcji. Schemat stanowiska przedstawiła na Rys. 4.1, na stronie 33. Doktorantka szczegółowo opisała stanowisko oraz dokonała merytorycznego uzasadnienia doboru poszczególnych elementów istotnych dla interpretacji zjawisk wymiany ciepła, z jakimi zmierzyła się dążąc do rozwiązania problemu. Stanowisko badawcze stanowiące oryginalny wkład pracy własnej Doktorantki, ze względu na swoją przemyślaną konstrukcję, metodykę pomiaru, wykorzystane materiały, aparaturę pomiarową, osprzęt itp. zapewniało dobrą jakość pomiarów i wiarygodność uzyskanych wyników – dla przykładu metodyka pomiaru rozkładu temperatur w zasobniku metodą termowizji, w sposób szczegółowy została przez Doktorantkę zrelacjonowana przy równoczesnym uwzględnieniu eliminacji błędów pomiarowych. Do opisu elementów składowych stanowiska należało również załączyć szczegółowy rysunek techniczny zasobnika z parafiną i zanurzonym w nim wymiennikiem ciepła i podać liczbową wartość współczynnika przewodzenia ciepła obudowy zasobnika wykonanej z tworzywa sztucznego pleksiglas.

Niejasność wkrada się w rozdziale 4.2 „:Wyniki pomiarów", gdzie na stronach 41, 42, 43 Doktorantka na wstępie informuje o wykonaniu pomiarów na zewnętrznej powierzchni wymiennika (chodzi tu o zewnętrzną powierzchnię poprzecznych żeber), na powierzchni parafiny oraz przewodów doprowadzających czynnik grzewczy. Natomiast wyniki pomiarów dotyczą rozkładu temperatur na żebrze Rys. 4.5 str. 43, które wykonywano w różnych odstępach czasu. Kwestia ta wymaga szczegółowego wyjaśnienia.

Rozkład temperatur w żebrze przedstawiono dla różnych odstępów czasowych (co 50 sekund). Dlaczego przyjęto taki, a nie inny odstęp czasowy i jaki był cel pomiaru w odstępach czasowych? Tego zabrakło w komentarzach.

Analizując problem wymiany ciepła w materiale z przemianą fazową, w tym przypadku jest to parafina, znajomość rozkładu temperatur jest bardzo ważna dla w pełnej wymagającej zrozumienia analizy zjawiska (w niektórych przypadkach rozwiązań analitycznych rozkład temperatur może być zakładany).

Interpretację analityczną zjawiska (wymiany ciepła w złożu parafiny), gdzie punktem wyjścia jest znajomość rozkładu temperatur w żebrze wymiennika zasilającego złoże, Doktorantka oparła o równanie bilansu energii przyjmując stan ustalony (stacjonarny) czyniąc przy tym szereg założeń upraszczających. Na rys. 4.7 str. 46 pokazała przykładowo rozkład temperatur podczas przemiany topnienia parafiny. Serie próbne rejestrowała z częstotliwością 0,1 Hz. Doktorantka nie uzasadniła wyboru wartości częstotliwości dla rejestracji

S. Rech

badań. W komentarzach odnoszących się do metodyki badań eksperymentalnych oraz do wyników badań, Doktorantka niewiele uwagi poświęciła omówieniu roli współczynnika przewodzenia ciepła w procesach wymiany ciepła zachodzących w złożu z przemianą fazową.

W dalszej części rozdziału Doktorantka prezentuje wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła dla różnych rozkładów temperatur żebra. Przy przyjętych realiach konstrukcyjnych wymiennika i przyjętych założeniach procesowych upraszczających mechanizm wymiany ciepła uzyskane wyniki mogą być zastosowane do przeprowadzenia przybliżonych obliczeń inżynierskich. Należy podkreślić, że przy założeniach ustalonego procesu wymiany ciepła uzyskane wyniki mają charakter przybliżony. W omówieniu wyników brakuje komentarza Doktorantki odnoszącego się do stosowanych przez innych badaczy metod obliczeniowych.

Szczegółowa interpretacja eksperymentu została pokazana na rysunkach 4.11 – 4.18. Doktorantka wprowadziła pojęcie zastępczego współczynnika przejmowania ciepła, którego niestety nie zdefiniowała. Na rysunkach 4.11-4.14 przestawiła jego zmiany w zależności od czasu trwania procesu topnienia parafiny oraz w zależności od temperatury podstawy żebra.

Zaobserwowane na wykresach zmiany Doktorantka skomentowała w sposób wyczerpujący, potwierdzając w ten sposób osiągnięcie postawionego celu badawczego.

Na uwagę zasługują wyniki eksperymentu o dużym znaczeniu praktycznym przedstawione między innymi na Rys.4.18. Są to czasowe zmiany gęstości strumienia ciepła przekazywanego od czynnika grzewczego do złoża parafiny akumulującego ciepło. Jest to istotna wielkość bilansowa złoża.

W rozdziale 5 pt.: „Analiza pracy instalacji solarnej z zasobnikiem materiału zmiennofazowego", na podstawie uzyskanych wyników badań omówionych w rozdziale 4, Doktorantka dokonała analizy obliczeniowej (numerycznej) pracy instalacji solarnej z dobudowanym zasobnikiem ciepła wypełnionym parafiną oraz grzejnej instalacji solarnej z zasobnikiem ciepła wypełnionym parafiną współpracującym z pompą ciepła, gdzie dolnym źródłem ciepła jest wymiennik gruntowy. Analizę numeryczną układów grzewczych Doktorantka wykonała wykorzystując własny algorytm obliczeniowy. Podstawą do sformułowania algorytmu były równania bilansu energii magazynu wypełnionego parafiną oraz równanie bilansu kolektora słonecznego. Doktorantka przyjęła, o czym była mowa wcześniej, ustalony oraz prosty geometrycznie model obliczeniowy magazynu, to jest płytę płaską z użebrowanym wymiennikiem ciepła, gdzie dla szeregu założeń upraszczających znajdowała rozwiązania analityczne. Dla powodzenia obliczeń analitycznych płaskiego zasobnika z wymiennikiem istotne były założenia: (i) adiabatyczność układu zasobnika, (ii) wymiana ciepła

S. Rec

odbywająca się na powierzchni rozdziału czynnika grzewczego i parafiny - współczynnik przejmowania ciepła przez parafinę wyznaczono eksperymentalnie (Rozdział 4). W założonym modelu obliczeniowym temperatura czynnika grzewczego była zmienna w czasie – jest to zrozumiałe - natomiast wyjaśnienia wymaga przyjęcie stałej temperatury w objętości złoża (parafiny) dla badanego układu. Na stronie 65 w 11 linii od góry Doktorantka pisze, że temperaturę parafiny przyjmuje na podstawie jednej z dwóch zależności - jakie to zależności ?. Wyniki obliczeń ładowania zasobnika (strony 68 – 77) dostarczają wielu istotnych informacji w zakresie eksploatacji badanego obiektu. Odnoszą się, co zasługuje na uwagę, do wielu wariantów czasowych ładowania np.: w różnych porach dnia (o różnym nasłonecznieniu), dla różnych wydatków czynnika grzewczego. Komentarza wymagają wyniki obliczeniowe rozkładu temperatur w zasobniku w przypadkach „bez uproszczeń" i z „uproszczeniami".

Rys. 5.12. – Doktorantka zastosowała określenie „pewne uproszczenia". Niejasne jest o jakie uproszczenia chodzi i z czego one wynikają?

Na stronie 74 podaje, że możliwa jest jednakowa temperatura w całej objętości zasobnika – czy takie stwierdzenie ma charakter ogólny, czy odnosi się do przypadku modelu zasobnika rozważanego w Rozprawie?

Odnosząc się do wyników przestawionych na Rys. 5.13. nasuwa się pytanie, dlaczego Doktorantka przyjęła stosunek masowy parafina/czynnik solarny 50 ?

Na stronie 78 Doktorantka prowadzi rozważania rozładowania zasobnika, przyjmując taką jego konstrukcję, żeby podczas studzenia i grzania mieć do czynienia z jednakowym rozkładem temperatur w objętości zasobnika. Jaka jest ta konstrukcja zasobnika?

Czym Doktorantka uzasadnia zmienny w czasie strumień przepływu wody w wymienniku parafinowym i co z tego wynika (Rys. 5.15, str. 79)? Zazwyczaj wartość strumienia wody gorącej uzależniana jest od chwilowego zapotrzebowania.

W ostatniej części rozdziału Doktorantka zaprezentowała nową koncepcję współpracy zasobnika wypełnionego parafiną i kolektora słonecznego z układem grzewczym pompy ciepła zasilanej z wymiennika gruntowego. Celem analizy takiego układu grzewczego było wskazanie efektywności grzejnej pompy ciepła oraz uzyskanie danych niezbędnych do jego efektywnego sterowania. Parametrem zmiennym, który miał wpływ na efektywność pracy układu była gęstość promieniowania słonecznego, która zmieniała się w zależności od pory dnia. Analizy procesu Doktorantka dokonała na podstawie równań bilansowych poszczególnych elementów instalacji. Wyniki obliczeń przedstawiła na Rys. 5.21-5.26. W pierwszej kolejności obliczała rozkład temperatur w zasobniku i cieczy solarnej, w funkcji powierzchni czynnej

kolektora dla wybranego kąta nachylenia kolektora. Analizowała proces ładowania i rozładowania zasobnika. Rozważała efektywność współpracy układu solarnego (kolektor - zasobnik) z pompą ciepła, analizując współczynnik efektywności grzejnej (COP) pompy ciepła. Wyniki tej analizy pokazały, że taka konfiguracja układu grzewczego umożliwia uzyskanie wysokiej efektywności pompy ciepła, która nie jest wartością stałą, a zmienia się w zależności od zmiennych warunków pracy podczas rozładowania zasobnika. Doktorantka wykazała, że zastosowanie zasobnika pozwala osiągać wysokie wartości COP - od ok 13 do 7. Takich wartości COP nie osiąga się w klasycznych instalacjach grzejnych z pompą ciepła.

W rozdziale 6 Doktorantka krótko omówiła aspekt ekonomiczny analizowanego w rozprawie przykładu z dobudowaną pompą ciepła. W dyskusji wskazała, że według przyjętego kryterium prostego okresu zwrotu, można spodziewać się zwrotu nakładów inwestycyjnych w okresie 1,8 roku.

W rozdziale 7 Doktorantka prawidłowo sformułowała wnioski, dokonując przy tym krótkiej charakterystyki badań jakie przeprowadziła i wskazując na istotę swoich rozważań tj. na udowodnienie postawionej tezy.

Wnioski końcowe:

Badania, które Doktorantka zrealizowała, a ich wyniki z komentarzem zamieściła w Rozprawie stanowią zbiór wartościowej wiedzy naukowej z zakresu podstaw procesów wymiany ciepła w materiałach zmiennofazowych oraz wiedzy praktycznej zastosowania zasobników ciepła wypełnionych materiałami zmiennofazowymi do podwyższania efektywności grzejnej (COP) pomp ciepła. Realizowana tematyka wpisuje się w dziedzinę nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska.

Zawarte w recenzji uwagi krytyczne, nie pomniejszają wartości merytorycznej pracy.

Stwierdzam, że Rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dn. 14 marca 2013 roku (Dz.U.nr 65) o stopniach naukowych oraz stopniach w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę oryginalny charakter Rozprawy oraz jej wysoką wartość naukową ściśle powiązaną z aplikacją praktyczną, wnoszę o wyróżnienie Rozprawy Doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Stokowiec.

S. Poskrobko

Sławomir Poskrobko

Białystok 25. 09. 2018