POLITECHNIKA ŚLĄSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI

INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

UL. KONARSKIEGO 22
44-100 GLIWICE
TEL.: +48 32 237 1661
+48 32 237 2212
FAX: +48 32 237 2872
E-MAIL: rie6@polsl.pl

www.itc.polsl.pl

NIP: 631-020-07-36 / REGON: 000001637 / ING BANK ŚLĄSKI S.A. O/GLIWICE / NR RACHUNKU: 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek
Politechnika Śląska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Techniki Cieplnej
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
wojciech.stanek@polsl.pl

Gliwice, 12 września 2018

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Katarzyny Stokowiec

pt. *„ Badania symulacyjne instalacji solarnej z akumulatorem energii"*

Podstawą niniejszej recenzji było zlecenie dr hab. inż. Lidii Dąbek, prof. PŚk, Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tadeusz Orzechowski, prof. PŚk.

1. Tematyka pracy doktorskiej i trafność jej doboru

Praca poświęcona jest analizie i ocenie pracy zintegrowanego układu do wytwarzania ciepła użytecznego. Zasadniczymi komponentami układu są pompa ciepła zintegrowana z instalacją solarną z akumulacją ciepła. Głównym z założonych celów pracy jest szczegółowe zbadanie procesów wymiany ciepła w zasobniku materiału zmiennofazowego (PEM). Ten etap badań dotyczy etapu ładowania, w którym następuje topienie PCM podczas magazynowania energii oraz procesu rozładowania zasobnika, gdzie zachodzi pobieranie ciepła. Zaproponowana szczegółowa analiza procesów wymiany ciepła w procesie akumulacji jest podstawą do kolejnego etapu badań w zakresie symulacji pracy układu wyposażonego w pompę ciepła i system kolektorów słonecznych wraz z zasobnikiem akumulującym energię. Badania dotyczące procesów wymiany ciepła w procesie akumulacji PEM oraz ich wykorzystanie do oceny efektywności energetycznej oraz ekonomicznej zaproponowane w pracy mgr inż. Katarzyny Stokowiec z całą pewnością należy uznać jako ważne z punktu widzenia dalszej poprawy efektywności nowoczesnych systemów grzewczych, w tym wyposażonych w pompy ciepła wspomagane odnawialną energią promieniowania słonecznego. Z całą pewnością praca wpisuje się więc w obszar ważnych i aktualnych problemów dotyczących tak zwanego zrównoważonego rozwoju oraz racjonalnego gospodarowania zasobami energii pierwotnej, a podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione.

W. Stanek

2. Ogólna charakterystyka pracy

Na podstawie szczegółowej analizy istniejącego stanu wiedzy Autorka pracy doktorskiej formułuje wniosek, iż publikowane informacje dotyczące określania liczby Nuselta są niekompletne i niewystarczające. Nie obejmują zaś prawie wcale lub są niedokładnie opisane w przypadku procesów krzepnięcia i topnienia zachodzących w zasobniku PCM. Szczegółowe badania literaturowe pozwoliły sformułować jeden z celów pracy: *„Określenie współczynnika przejmowania ciepła dla wymiennika pracującego w złożu parafinowym i o zadanej geometrii jest jednym z celów pracy"*. Badania w zakresie wymiany ciepła są podstawą realizacji kolejnego z zaplanowanych celów pracy – symulacji pracy układu wyposażonego w pompę ciepła i system kolektorów słonecznych wraz z zasobnikiem akumulującym energię. Autorka stawia tezę, że konieczne jest *„indywidualne, w zależności od konfiguracji wymiennika, zbadania wartości współczynników przejmowania ciepła dla dobranego układu, a do efektywnego pomiaru jego wielkości konieczne jest opracowanie metodyki badań z analizą dokładności"*. W ramach realizacji pracy Autorka konsekwentnie dąży do udowodnienia postawionej tezy i realizacji założonych celów, ważnych z punktu widzenia oceny efektywności zintegrowanego układu do wytwarzania ciepła użytecznego, którego zasadniczymi komponentami są pompa ciepła zintegrowana z instalacją solarną z akumulacją ciepła.

Praca podzielona jest na siedem rozdziałów. Rozdziały te, dotyczą odpowiednio:

1) Rozdział 1 – przedstawia wprowadzenie do tematyki związanej z badaniami, oraz przegląd stanu wiedzy z zakresu akumulacji ciepła, energii promieniowania słonecznego oraz współpracy zasobnika materiału zmiennofazowego z pompą ciepła,
2) Rozdział 2 – prezentuje szczegółowo cele pracy,
3) Rozdział 3 – przedstawia tezy pracy,
4) Rozdział 4 – przedstawia szczegółowo badania w zakresie wymiany ciepła w zasobniku materiału zmiennofazowego,
5) Rozdział 5 – zawiera analizę pracy instalacji solarnej zintegrowanej z zasobnikiem materiału zmiennofazowego,
6) Rozdział 6 – poświęcony jest analizie ekonomicznej współpracy zasobnika materiału zmiennofazowego z pompą ciepła,
7) Rozdział 7 – zawiera szczegółowe wnioski z przeprowadzonych analiz.

Przyjęty w pracy plan badań nie budzi zastrzeżeń, a zastosowana metodyka badawcza jest w pełni uzasadniona z punktu widzenia założonych celów pracy oraz z punktu widzenia tezy sformułowanej w pracy.

W zakresie prezentacji aktualnego stanu wiedzy (Rozdział 1) Autorka przedstawia wyczerpujące wprowadzenie do tematyki. Wychodząc od problemów dotyczących dostępności zasobów energii poprzez ogólne problemy związane z integracją odnawialnych źródeł energii z akumulacją energii oraz szczegółowym przeglądem ogólnych zagadnień

W. Stawek

związanych z PEM. Przegląd zagadnień uważam za jak najbardziej potrzebny i wyczerpujący z odpowiednim odwołaniem do źródeł literaturowych. Uważam jednak że wspomniany przegląd stanu wiedzy i technologii powinien stanowić odrębny rozdział podczas gdy rozdział „Wstęp" powinien zawierać jedynie skondensowane i ogólne wprowadzenie do tematyki pracy.

Kolejny Rozdział 2 zawiera szczegółową prezentację celów pracy. Szczegółowy przegląd stanu wiedzy pozwolił Autorce na sformułowanie wniosku, iż publikowane informacje dotyczące określania liczby Nuselta są niekompletne i niewystarczające. Nie obejmują zaś prawie wcale lub są niedokładnie opisane w przypadku krzepnięcia i topnienia (istotnych w obiektach zainteresowania pracy). Szczegółowe badania literaturowe pozwoliły sformułować jeden z celów pracy: „*Określenie współczynnika przejmowania ciepła dla wymiennika pracującego w złożu parafinowym i o zadanej geometrii jest jednym z celów pracy*" Głównym celem jest zaś symulacja pracy układu wyposażonego w pompę ciepła i system kolektorów słonecznych wraz z zasobnikiem akumulującym energię. Podjęcie badań w tym zakresie uważam bez wątpliwości za uzasadnione i dotyczące aktualnych problemów energetycznych. W Rozdziale 3 Autorka prezentuje tezy pracy.

Rozdział 4 przedstawia szczegółowo badania podjęte w ramach realizacji pracy w zakresie wymiany ciepła w zasobniku materiału zmiennofazowego. W ramach prac eksperymentalnych dokonano m.in. pomiarów pola temperatury w żebrze. Dokonane pomiary posłużyły do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła przez przyrównanie zmierzonego pola temperatury z rozwiązaniem analitycznym opisującym jednowymiarowy rozkład temperatury w żebrze, przy czym założono jednowymiarowy rozkład temperatury żebra oraz stałe współczynniki przewodności cieplnej żebra i współczynnik wnikania na powierzchni żebra. Zaproponowane podejście oraz przyjęte założenia należy uznać za poprawne i uzasadnione. Otrzymane zestawy pomiarowe rozkładów temperatury pozwoliły na określenie zależności następujących wielkości, ważnych z punktu widzenia dalszych etapów realizacji pracy:

- zastępczego współczynnika przejmowania ciepła żebra w funkcji czasu podczas procesu topienia parafiny,
- zastępczego współczynnika przejmowania ciepła żebra w funkcji temperatury podstawy żebra,
- zmian wartości współczynnika przejmowania ciepła w trakcie procesu odbierania ciepła zakumulowanego w zasobniku parafinowym dla zadanej temperatury podstawy żebra,

Dokonane badania eksperymentalne są kluczowe dla dalszej realizacji pracy umożliwiając wyznaczanie gęstości strumienia ciepła przekazywanego do złoża parafinowego. W szczególności przeprowadzone badania są podstawą kolejnego istotnego etapu badań dotyczącego analizy pracy instalacji solarnej z zasobnikiem materiału zmiennofazowego. Wart podkreślenia jest fakt, iż projekt i koncepcja stanowiska pomiarowego powstał w ramach realizacji pracy doktorskiej. Należy jednocześnie stwierdzić, że Autorka przedstawia bardzo szczegółowy i wyczerpujący opis zaproponowanego do badań stanowiska.

Rozdział 5 dotyczy analizy pracy instalacji solarnej z zasobnikiem materiału zmiennofazowego. W podrozdziale 5.1 opisano szczegółowo modelowanie procesu ładowania zasobnika wraz z przyjętymi założeniami. Przyjęty do obliczeń algorytm jest opisany wystarczająco szczegółowo i jest poprawny merytorycznie z punktu widzenia zaplanowanych obliczeń symulacyjnych. Zaproponowany algorytm pozwala na określenie: rozkładu temperatur czynnika solarnego i materiału zmiennofazowego dla różnych czasów ładowania zasobnika; rozkładu temperatur czynnika solarnego i materiału zmiennofazowego dla różnych parametrów eksploatacji zasobnika i pozwala uwzględnić w analizach wpływ sposobu eksploatacji zasobnika. W kolejnym podrozdziale 5.2 przedstawiono wyniki modelowania procesu rozładowania zasobnika. Wyznaczono m.in. zależność strumienia przepływu wody w wymienniku parafinowym w funkcji czasu oraz w funkcji temperatury parafiny. Podstawowym narzędziem był bilans energii, a otrzymane charakterystyki mogą być użyteczne dla sterowana procesem rozładowania zasobnika. Zaproponowany algorytm pozwala dodatkowo określić rozkład temperatury w funkcji czasu w procesie rozładowania zasobnika. Kolejny ważny podrozdział 5.3 dotyczy analizy współpracy zasobnika PCM z pompą ciepła. Przedstawione rezultaty są istotne z punktu widzenia wykorzystania źródeł OZE do wspomagania instalacji podstawowej wykorzystującej nieodnawialne źródła energii. W szczególności dotyczy to integracji wykorzystania energii słonecznej oraz pompy ciepła gdzie elementem integrującym jest zasobnik PCM. W obszarze współpracy kolektorów słonecznych i pompy ciepła Autorka słusznie wyróżnia dwie możliwości 1) w okresie dużej dostępności promieniowania słonecznego OZE służy do podgrzania CWU do wymaganej temperatury, 2) w okresie niedostatecznego napromieniowania ciepło z OZE może mieć charakter „wspomagający" i służyć jako dolne źródło (wspomaganie dolnego źródła) dla pompy ciepła. Opracowana metodyka i algorytmy pozwalają na analizę: rozkładu temperatury w zasobniku PCM od powierzchni zasobnika, rozkładu temperatury parafiny w zależności od czasu trwania procesu rozładowania zasobnika PCM oraz wydajności procesu akumulacji w zależności od warunków nasłonecznienia dla różnych miesięcy. Przedstawione zależności również należy uznać za istotne z punktu widzenia sterowania zaproponowanego układu zintegrowanego produkcji ciepła. Ponadto wyniki analizy wykazują jednoznacznie, iż integracja pompy ciepła z ciepłem akumulowanym w zasobniku PEM znacząco wpływa na poprawę efektywności energetycznej wyrażonej za pomocą współczynnika COP.

Kolejny rozdział 6 pracy poświęcony jest analizie ekonomicznej. Oczywiście analiza ekonomiczna jest kluczowym elementem potwierdzającym zwykle uzasadnienie proponowanych działań w kierunku poprawy efektywności termodynamicznej. Opis analizy ekonomicznej przedstawiony w pracy jest moim zdaniem zbyt skrótowy. Ponadto autorka stosuje wyłącznie kryterium prostego czasu zwrotu.

Jeszcze raz pragnę podkreślić, że badania przedstawione w recenzowanej pracy doktorskiej są jak najbardziej aktualne i niezwykle ważne z punktu widzenia poprawy efektywności nowoczesnych systemów grzewczych, w tym wyposażonych w pompy ciepła wspomagane odnawialną energią promieniowania słonecznego. Uważam, że uzyskane wyniki

W. Stawell

oraz wnioski powinny być przedmiotem publikacji w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Rozpowszechnienie wiedzy uzyskanej w ramach zrealizowanej pracy jest z całą pewnością cenne z punktu widzenia dalszego rozwoju technologii akumulacji energii zintegrowanych z odnawialnymi źródłami energii. Należy również dodać, że prezentowana praca stanowi zwartą prezentację podjętego tematu i jest napisana dobrym językiem technicznym. Zauważone w pracy usterki (zarówno o charakterze merytoryczny jak i redakcyjnym) oraz elementy dyskusyjne omówiono w kolejnym punkcie niniejszej recenzji.

3. Uwagi do pracy

3.1 Uwagi merytoryczne o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

1. W pracy brak szczegółowych informacji jakie dane i założenia brano pod uwagę by uwzględnić godzinową zmienność w ciągu roku promieniowania słonecznego zasilającego analizowaną instalację solarną. Na stornie 63 zamieszczono informację, że *„gęstość strumienia promieniowania słonecznego oszacowano na podstawie dostępnych danych wartości energii promieniowania w miesiącu referencyjnym …"*. Rodzi się zatem pytanie dlaczego nie wykorzystano powszechnie dostępnych danych godzinowych pokrywających okres pełnego roku.
2. Na stronie 67 Autorka podaje informację, że obliczenia dla układu zintegrowanego z kolektorem słonecznym przeprowadzono dla dwóch miesięcy. Brak szczegółowych wyjaśnień dlaczego do obliczeń założono wyłącznie dwa miesiące – czerwiec i wrzesień.
3. Na str. 84 Autorka podaje, że *„W układzie grzewczym źródłem energii jest pompa ciepła pobierająca energie z gruntu"*. Należy mieć na uwadze, że pompa ciepła nie pobiera energii wyłącznie z gruntu ale głównym źródłem energii dla pompy ciepła jest elektryczność. Dlatego obiektywna ocena wymaga, oprócz zastosowania wskaźnika lokalnej efektywności energetycznej COP, metod pozwalających na ocenę efektywności w skali globalnej na poziomie nieodnawialnych bogactw naturalnych. Ocena w skali globalnej jest szczególnie istotna w przypadku systemów składających się z technologii wykorzystujących odnawialne i nieodnawialne źródła energii.
4. Str. 84, Rys. 5.20 Autorka nie precyzuje jasno jakie jest źródło danych godzinowych wartości promieniowania słonecznego.

3.2. Wybrane uwagi o charakterze redakcyjnym

1. Autorka w wielu miejscach pracy stosuje pojęcie *„energia cieplna"* (np. str. 8, 10, 15, 29, 57, 59, 77, 88). Z punktu widzenia praw termodynamiki pojęcie to nie jest poprawne. Ciepło jest sposobem przekazywania energii a nie jej postacią.
2. Str. 4 Czy zastosowany zwrot „zwiększając drastycznie konsumpcję" cechuje styl odpowiedni dla prac naukowych i doktorskich ?

W. Stawski

3. Str. 6 Autorka stwierdza „zapotrzebowania na energię, czyli 300 GW" – GW to nie jest jednostka ilości energii tylko mocy.
4. Rozdział 1. WSTĘP kończy zdanie „celem niniejszej pracy jest ..." po czym następuje rozdział 2 „CELE PRACY", w którym szczegółowo autorka je przedstawia.
5. W pracy w kilku miejscach występuje niekonsekwencja oznaczeń – na str. 30 współczynnik przenikania oznaczony jest symbolem α a na stronie 60 oznaczono go jako U. Symbol F jest używany na str. 60 do oznaczenia całkowitej powierzchni wymiennika, na str. 63 oznacza współczynnik odprowadzania ciepła z kolektora, zaś na str. 64 – sprawność żebra. Generalnie w pracy brakuje odrębnego spisu głównych oznaczeń, który z całą pewnością ułatwiłby analizę pracy.
6. Odnośnie uwagi 7. Rodzi się zatem pytanie co oznacza F na rysunkach na str. 68-70 skoro przynajmniej trzy wielkości były wcześniej oznaczone jako F.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując, należy stwierdzić, że prezentowana praca stanowi zwartą i szczegółową prezentację kompleksowych badań poświęconych analizie i ocenie pracy zintegrowanego układu do wytwarzania ciepła użytecznego, którego zasadniczymi komponentami są pompa ciepła zintegrowana z instalacją solarną i akumulacją ciepła. Głównym z założonych celów pracy jest szczegółowe zbadanie procesów wymiany ciepła w zasobniku materiału zmiennofazowego. Szczegółowa analiza przeprowadzona w pracy w zakresie procesów wymiany ciepła w procesie akumulacji jest podstawą do kolejnego etapu badań w zakresie symulacji pracy układu wyposażonego w pompę ciepła i system kolektorów słonecznych wraz z zasobnikiem akumulującym energię. Badania dotyczące procesów wymiany ciepła w procesie akumulacji PEM oraz ich wykorzystanie do oceny efektywności energetycznej oraz ekonomicznej zaproponowane w pracy mgr inż. Katarzyny Stokowiec z całą pewnością należy uznać jako ważne z punktu widzenia dalszej poprawy efektywności nowoczesnych systemów grzewczych, w tym wyposażonych w pompy ciepła wspomagane odnawialną energią promieniowania słonecznego. Z całą pewnością stwierdzam również, że Autorka osiągnęła zamierzony cel. Mimo wypunktowanych drobnych uchybień o charakterze merytorycznym i redakcyjnym pracę oceniam bardzo dobrze. Jestem przekonany, że oceniona praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Katarzyny Stokowiec do publicznej obrony pracy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Stanek

Wojciech Stanek

Instytut Techniki Cieplnej
Politechnika Śląska