

Opole, 26.05.2019 r.

dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa prof. PO
Politechnika Opolska
Wydział Mechaniczny
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
Tel.: +48 602 345 162
e-mail: m.rzasa@po.opole.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Janowskiej pt. **Badania cieplno-przepływowe śrubowej chłodnicy popiołu dennego kotła fluidalnego**

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Formalną podstawą przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Dziękana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gnutka W9/PW/650/2019 z dnia 23.04.2019 r. zlecające wykonanie recenzji w oparciu o uchwałę nr 297/40/2016-2020 Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 17 kwietnia 2019 r. oraz dostarczony egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Janowskiej pt. " Badania cieplno-przepływowe śrubowej chłodnicy popiołu dennego kotła fluidalnego".

Praca doktorska wykonana została na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej, której promotorem jest dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz prof. PWr. a promotorem pomocniczym jest dr Paweł Regucki.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Zagadnienie poprawy wydajności i sprawności bloków energetycznych jest wciąż aktualne. Jedną z metod poprawy wydajności jest odzysk ciepła traconego w różnych układach i elementach bloków energetycznych. Autorka pracy skupiła się na ocenie możliwości odzyskania części ciepła traconego w chłodnicach popiołu dennego. Swoje rozważania oparła na badaniach eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym dla dwóch typów chłodnic stosowanych w Elektrowni Turów. Na tej podstawie został opracowany model matematyczny opisujący wymianę ciepła. Model ten stanowi podstawę analizy możliwości odzysku ciepła z chłodnic śrubowych.

Rozprawa doktorska wydana została w formie raportu Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Nr. PRE 8/2019. we Wrocławiu. Obejmuje 110 stron i jest podzielona na 8 rozdziałów merytorycznych oraz wykaz literatury (96 poz. w tym 6 współautorstwa doktorantki). Literatura została ponumerowana w kolejności cytowania. Rozprawa doktorska rozpoczyna się od podziękowania oraz dwustronicowego streszczenia. Następnie zamieszczono listę symboli oraz spis treści.

Pierwszy rozdział przedstawia tło zagadnień podejmowanych w pracy doktorskiej. Opisuje krótki rys historyczny wprowadzenia kotłów fluidalnych do energetyki oraz zwraca uwagę na potrzebę chłodzenia popiołu.

W drugim rozdziale Autorka przedstawił cel i zakres pracy. Głównym celem pracy było wykonanie badań cieplno-przepływowych chłodnic popiołu dennego oraz opracowanie modelu

str. 1

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

03.06.2019

Wpłynęło dnia

19/298/2019

matematycznego procesu chłodzenia. Przedmiotem badań były dwa rodzaje chłodnic śrubowych: pojedyncze i podwójne. Chłodnice tego typu są obecnie stosowane w kotłach fluidalnych CFB i CBF. Zakres pracy obejmował określenie temperatur na wlocie i wylocie z chłodnic oraz strumienia wody chłodzącej w korelacji ze zmierzonymi temperaturami dla różnych obciążeń bloku energetycznego. Na tej podstawie dokonano obliczeń i opracowano model matematyczny. Niezbędne okazało się wyznaczenie współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego na specjalnie zbudowanym stanowisku laboratoryjnym.

Kolejny rozdział zawiera tezy pracy. Mianowicie oceną możliwości wykorzystania ciepła odpadowego z wody chłodzącej i możliwość lepszego zarządzania zespołem chłodnic w celu efektywnego wykorzystania ciepła odpadowego.

Rozdział czwarty obejmuje trzy podrozdziały i stanowi kompendium wiedzy w zakresie zagadnień omawianych w pracy. W pierwszym podrozdziale krótko opisano budowę wybranych typowych kotłów fluidalnych. Podrozdział drugi opisuje chłodnice popiołu dennego. Jest on znacznie obszerniejszy, co jest uzasadnione z uwagi na tytuł rozprawy doktorskiej. Autorka omawia w nim typowe rozwiązania techniczne chłodnic popiołu, kładąc nacisk na chłodnice śrubowe które są przedmiotem badań. W podrozdziale trzecim dokonano krótkiego przeglądu literatury związanej z modelowaniem chłodnic popiołu dennego. Czwarty rozdział potwierdza, że Doktorantka posiada wiedzę z zakresu zagadnień omawianych w pracy doktorskiej.

Rozdział piąty to opis wyników badań, który stanowi wkład własny doktorantki. Zawiera on wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym. W pierwszym podrozdziale zwięźle podano cel i zakres pomiarów. Podstawowym celem badania było określenie średnich wartości temperatur i strumieni w różnych punktach układu chłodzącego. W kolejnym podrozdziale opisano sposób przeprowadzonych pomiarów. Zwrócono uwagę na błędy graniczne zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz na parametry pracy badanych chłodnic. Opisano sposób i miejsca zainstalowania czujników pomiarowych. Podrozdział 5.3 zawiera wyniki przeprowadzonych pomiarów dla chłodnicy podwójnej. Wyniki przedstawiono w formie wykresów czasowych, ilustrujących zmianę w czasie mierzonego parametru. Na tej podstawie obliczono średnie wartości parametrów chłodnicy które zestawiono w tabelach. Tabele posłużyły do sporządzenia charakterystyk wybranych parametrów w zależności od prędkości obrotowej śruby chłodnicy. Analogicznie postąpiono z pomiarami dla chłodnicy pojedynczej. Wyniki przedstawiono w podrozdziale 5.4. Podrozdział 5.5 dotyczy wyznaczenia strumienia odebranego ciepła. Opisano w nim sposób obliczenia strumienia, ciepła oraz przeprowadzono obszerną analizę wyznaczonych strumieni ciepła. Wyniki zaprezentowano na szeregu wykresów przedstawiając wartości poszczególnych strumieni jako procent całkowitego strumienia ciepła.

Ze względu na brak jednoznacznej wartości współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego w literaturze lub normach. Doktorantka postanowiła samodzielnie wyznaczyć wartość współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego. Wyznaczenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla popiołu dennego przedstawiła w rozdziale 6. W tym celu zbudowała stanowisko pomiarowe którego konstrukcję opisała w podrozdziale 6.1. Następnie w podrozdziale 6.2 przedstawiła wyniki pomiaru. Wyniki pomiaru przedstawiono w postaci wykresów czasowych. Do dalszej analizy przyjęto niewielkie przedziały czasowe w których panowały stabilne warunki, co jest jak najbardziej słusznym założeniem.

W rozdziale 7 przedstawiono model matematyczny pojedynczej chłodnicy popiołu. Trudno jest jednak z treści pracy wywnioskować czy model ten został zapożyczony czy Doktorantka miała udział w jego tworzeniu. Przedstawiono w nim schemat konstrukcyjny chłodnicy oraz parametry popiołu pochodzącego z elektrowni Turów (podrozdziały 7.1 i 7.2). W kolejnym podrozdziale 7.3 przedstawiono założenia dotyczące sposobu pracy chłodnicy, a konkretnie stopnia wypełnienia popiołem. W podrozdziale 7.4 szczegółowo opisano sposób wyznaczenia

współczynnika przewodzenie ciepła dla śruby i płaszcza chłodnicy. Podrozdział 7.5 zawiera schemat modelu matematycznego. Model oparty jest o równanie Fouriera. Ta część pracy stanowi ważny element naukowy. Następnie w podrozdziale 7.6 przedstawiono wyniki symulacji numerycznej. Wyniki przedstawiono w formie wykresów.

Rozdział 8 to wnioski wynikające z pracy. Doktorantka podsumował rezultaty swojej pracy i przedstawił istotne pod względem poznawczym wnioski. Rozprawę kończy bibliografia.

3. Szczegółowa ocena pracy

3.1. Uzasadnienie podjętej tematyki

Kotły fluidalne dużej mocy zostały wprowadzone do systemów energetycznych stosunkowo niedawno, są one obecnie bardzo popularne i często stosowane. W Polsce w ostatnim trzydziestoleciu obserwuje się bardzo duży wzrost zastosowania kotłów fluidalnych w blokach energetycznych. Główną zaletą tego typu rozwiązań jest możliwość spalania różnego rodzaju paliw. Jednym z nieodzownych elementów tego rodzaju kotłów jest odprowadzenie popiołu. Odprowadzenie popiołu ściśle wiąże się z jego schłodzeniem. Odprowadzenie ciepła z popiołu nie tylko jest istotne z powodu prawidłowego sterowania procesem spalania, lecz również z uwagi na możliwości wykorzystania ciepła pochodzącego z schłodzenia popiołu. W kotłach fluidalnych możliwe jest spalanie biomasy lub innych paliw o dużej zawartości związków mineralnych, stąd uzasadniona jest wiedza z zakresu modelowania cieplno-przepływowego chłodnic popiołu, gdyż niejednokrotnie pozwoli to na lepszy dobór ich parametrów przy zastosowaniu różnych paliw i różnej mocy energetycznej kotła. Wiedza ta umożliwi przewidywanie skutków zwiększonej emisji popiołu dennego w kotle. Uważam, że tematyka podjęta w pracy jest jak najbardziej aktualna i dotyczy ważnego zagadnienia energetycznego. Podjęta w pracy próba zamodelowania procesu odprowadzenia ciepła jest potrzebna z punktu naukowego. Opublikowane w pracy wyniki badań cieplno-przepływowe śrubowych chłodnic popiołu dennego poszerzają wiedzę z zakresu eksploatacji tego rodzaju chłodnic.

Słuszna jest teza postawiona w pracy, że model matematyczny połączony z wiedzą eksperymentalną wpłynie na jakość optymalizacji pracy urządzeń. Również sprawa dotycząca wykorzystania ciepła odebranego z popiołu dennego nie jest sprawą banalną. W dobie szukania oszczędności i wykorzystywania ciepła odpadowego tego rodzaju działania są uzasadnione, a podjęta tematyka poszerza wiedzę w tym zakresie.

Biorąc powyższe pod uwagę, uważam wybór tematu rozprawy za uzasadniony.

3.2. Ocena wyników badań

Badania eksperymentalne przedstawione w pracy mają dwójaki charakter. Część badań była przeprowadzona na rzeczywistym obiekcie, którym był blok energetyczny Elektrowni Turów. Druga część badań to badania laboratoryjne. Przeprowadzono je na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym.

Badania na obiekcie rzeczywistym obejmowały pomiar temperatury i strumienia wody na wlocie i wylocie z chłodnic śrubowych popiołu dennego. Sposób realizacji pomiarów opisano w rozdziale 5.2. Brakuje w nim szczegółów dotyczących montażu poszczególnych czujników pomiarowych. Opis sprowadza się do jednego zdania i zamieszczeniu szeregu zdjęć z zamontowaną aparaturą pomiarową. Nie podano w jaki sposób był zamontowany przepływomierz ultradźwiękowy. Czy rura, na której był zamontowany przepływomierz była oczyszczona z farby i rdzy, czy stosowano jakiegoś rodzaju podkładki pod czujnikiem ultradźwiękowym itp. W przypadku montażu czujników temperatury istotne jest to, czy czujniki

miały bezpośredni kontakt z wodą chłodzącą, czy mierzył temperaturę na płaszczu rurociągu. Wszystkie tego rodzaju szczegóły mogą mieć wpływ na wynik pomiaru. Uważam, że powinno to być szerzej omówione.

Prezentacja wyników pomiarów jest przedstawiona czytelnie i zgodnie z obowiązującymi zasadami. Przedstawiono szereg wykresów czasowych i opisano warunki w jakich je uzyskano. Niepotrzebne jest natomiast podawanie wartości maksymalnych i minimalnych temperatur z dokładnością do jednego miejsca po przecinku, skoro jak podano w pracy dokładność pomiaru temperatury była na poziomie 0.5°C . Na podstawie zmierzonych parametrów wyliczono wartości średnie, które zestawiono w tabelach, a następnie na ich podstawie sporządzono charakterystyki chłodnic. Jest to jak najbardziej słuszne podejście do omawianego zagadnienia. Jednak sposób prezentacji punktów pomiarowych na charakterystykach nie do końca jest prawidłowy. Przykładowo na rysunku 5.22 zaznaczono punkty pomiarowe bez słupków błędów lub niepewności. Ponieważ punkty te przedstawiają wartości uśrednione wyznaczenie niepewności metodą typu A nie powinno nastęrczać większych problemów. W przypadku zaznaczenia słupków błędu możliwe byłoby wyznaczenia linii trendu która znacznie lepiej obrazowała by charakterystyką pracy chłodnicy niż linia łamana z punktu do punktu.

Uwzględniając przyjęte cele pracy metody badawcze zostały dobrane właściwie i umożliwiły realizację postawionych celów badawczych. Poprawnie opracowano i wyliczono strumienie odebranego ciepła, które posłużyły do sformułowania wniosków. Strumienie ciepła obliczono przy założeniu, że znane jest ciepło właściwe wody i jej gęstość. Ponieważ wielkości te są dobrze opisane i znane z literatury takie założenia są prawidłowe. Niepotrzebne uważam jest jednak przedstawianie na wykresach 5.42, 5.47, 5.48 linii dla całkowitego strumienia ciepła w wartościach procentowych. Wartość ta z definicji zawsze musi wynosić 100% więc prezentowanie jej w postaci poziomej linii prostej w maksimum osi pionowej wykresu mija się z celem.

Podsumowując tą część. Przedstawiona przez Doktorantkę metodyka badań jest prawidłowa. Otrzymała interesujące wyniki, które przedstawiła w licznych tabelach i wykresach. Wyniki te poszerzyły wiedzę z zakresu pracy śrubowych wymienników ciepła popiołu dennego. Wyniki pomiarów posłużyły do obliczenia istotnych parametrów chłodnic, które pozwalają na sformułowanie interesujących wniosków na temat możliwości wykorzystania ciepła odpadowego z tych chłodnic.

Druga część badań dotyczyła wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego. Badania zostały przeprowadzone na specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku laboratoryjnym. Stanowisko badawcze nie budzi zastrzeżeń, a przyjęte w nim założenia są poprawne. Wynik badań przedstawiono w postaci wykresów czasowych na których zaznaczono obszary, z których pobrano wartości do dalszych obliczeń. Współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczono w oparciu o prawo Fouriera. Z treści pracy niezbyt jasno wynika, jak określono strumień ciepła doprowadzony do złoża popiołu dennego. Patrząc na schemat stanowiska można domniemywać, że jest on równy dostarczonej mocy elektrycznej do płyty grzewczej. Założenie takie może mieć miejsce jedynie wtedy, gdy cała moc elektryczna zostanie zamieniona na ciepło, które dostarczone jest do złoża popiołu. W treści pracy nie ma jednak takiego uzasadnienia. **Należy to wyjaśnić podczas obrony rozprawy doktorskiej.** Na rysunku 6.13 przedstawiono jedynie punkty reprezentujące wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla wybranych temperatur. Jeśli ten wykres ma służyć do wyznaczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od temperatury popiołu należałoby przedstawić go w postaci linii. Pozostawienie go w tej formie nie odpowiada na pytanie czy ta zależność jest liniowa czy może nieliniowa. Ta część opracowanych wyników jest zdecydowanie niekompletna.

Podsumowując drugą część badawczą, badania zostały przeprowadzone prawidłowo,

a ich wyniki są niezbędne do opracowania modelu matematycznego. Wyraźnie można dostrzec celowość przeprowadzonych badań, które zostały wykonane wyraźnie na potrzeby dalszych prac bez zbędnych dodatków. Zależność wartości współczynnika przewodzenia ciepła popiołu dennego od temperatury uzasadnia rozbieżności jego wartości podawane w różnych źródłach literaturowych. Stanowi to cenny wkład w stan wiedzy na temat własności popiołu dennego.

Pomimo dostrzeżonych usterek/braków oceniam tą część pracy pozytywnie.

3.3. Ocena merytoryczna pracy

Praca jest logicznie uporządkowana i zawiera część badawczą, która następnie stanowiła podstawę analizy teoretycznej. W ramach prac teoretycznych opracowano model matematyczny opisujący w sposób ilościowy pracę chłodnicy śrubowej. Model teoretyczny poddano walidacji w oparciu o wyniki doświadczalne.

Szczegółowo model matematyczny pojedynczej chłodnicy popiołu opisano w rozdziale 7. Zarówno założenia jak i opracowany model teoretyczny oceniam jako poprawny. Stanowi on wkład naukowy do niniejszej pracy doktorskiej. Mam jednak pewne zastrzeżenia do walidacji wyników pomiaru i modelu teoretycznego. Wyniki uzyskane z pomiaru i obliczeń porównano na rysunkach 7.12 do 7.14. Układ punktów pochodzących z pomiarów i obliczeń niejednokrotnie mają wyraźny charakter nieliniowy. Doktorantka zdecydowała się jednak aproksymować punkty liniami prostymi. **Uważam, że powinno to być uzasadnione, jednak brak jest takiego uzasadnienia w treści pracy.**

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań i obliczeń w rozdziale 8 sformułowano bardzo szerokie wnioski. Wnioski opisano aż na dwóch stronach. Wynika z nich, że osiągnięto cel pracy i potwierdzono podstawowe tezy. Ten fragment pracy świadczy o umiejętności prawidłowego wyciągnięcia wniosków przez Doktorantkę.

Podsumowując ocenę merytoryczną uważam, że Doktorantka potrafi określać problemy badawcze, projektować eksperyment oraz formułować wnioski na podstawie porównania wyników badań z wiedzą teoretyczną.

3.4. Uwagi do pracy

Przedmiotowa praca doktorska jest napisana poprawnym językiem. Posiada prawidłową strukturę i podział treści. W trakcie jej czytania nasunęły mi się jednak następujące uwagi:

1. Tabela 4.1 pierwsza kolumna raczej przedstawia numery punktów pomiarowych a nie liczbę porządkową. Chociaż w tym przypadku numeracja jest zbieżna.
2. **W rozdziale 5.1 podano, że pomiary zostały przeprowadzone w zespole naukowym pod kierownictwem dr hab. inż. Artura Andruszkiewicz prof. PWr. Brak jest w nim jednak wyraźnego wskazania jaką rolę i w jakim zakresie uczestniczyła w tych badaniach Doktorantka.**
3. **Na stronie 68 przeprowadzono rachunek niepewności. Niepewność jest to wielkość, która związana jest z wynikiem pomiaru, stąd jednostką niepewności jest jednostka wielkości mierzonej. W pracy jednostką niepewności jest %. Rozumiem intencje autorki jednak jest to zbyt duży skrót, który powinien być wyjaśniony, tym bardziej, że wyniki są wartościami uśrednionymi więc wyznaczone niepewności mogą być różne w zależności od serii pomiarów.**
4. **Na rysunku 5.40 przedstawiono zależność gęstości wody od jej temperatury. Gęstość jest parametrem fizycznym. Jej wartość jest taka jaka jest, więc niezrozumiałe jest sformułowanie „błąd względny gęstości”. Błąd może wynikać z pomiaru lub sposobu wyznaczenia gęstości, nie jest możliwe jednak aby błędna była wielkość fizyczna. Stąd niezrozumiały jest dla mnie wykres 5.40b.**

5. Rozprawa doktorska została wydany w postaci książki. Jest to korzystne ze względu na poręczność i zwartość formatu książkowego. Jednak w przypadku książki należy zadbać o jakość składu. Elementarne wymogi takie składu wymagają, aby wiersze nie kończyły się na łącznikach np. a, i, itp.
6. Rysunek 6.1 Zasilanie powinno raczej być podłączone do płyty grzewczej a nie tak jak przedstawiono na rysunku do izolowanego cylindra. Jeśli jest inaczej i istnieje jakieś połączenie elektryczne pomiędzy cylindrem a płytą grzewczą to należałoby o tym napisać.
- 7.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Pomimo pewnych błędów i usterek rozprawa rzetelnie dokumentuje szeroko zakrojone i przeprowadzone badania. Praca dowodzi zrozumienia istoty działania analizowanego układu oraz zachodzących w nim zjawisk. Doktorantka wykazała się umiejętnością interpretacji wyników oraz symulacji numerycznych w połączeniu z wiedzą inżynierską o badanym urządzeniu.

W rozprawie opisano rozwiązanie problemu badawczego, tym samym potwierdzono wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz umiejętność prowadzenia badań. **Opiniowana praca spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (D. U. 2003, Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Marek N. Pien