

Wrocław, 9.03.2022r.

Dr hab. inż. Tomasz Hardy, prof. Uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Inżynierii Konwersji Energii
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Jarosława Grochowalskiego
pod tytułem**

**„Optymalizacja pracy kotła fluidalnego uwzględniającego zużycie erozyjne,
zwiększająca dyspozycyjność jednostki w aspekcie ucieplnienia bloku
energetycznego”**

Recenzja wykonana zgodnie z pismem RIE-BD.512.66.2022 na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 15.12.2022r.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. Jarosława Grochowalskiego powstała w ramach realizacji programu pn. „Doktorat wdrożeniowy”, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Praca powstała pod opieką naukową dr hab. inż. Bartłomieja Hernika, prof. PŚ.

Rozprawa składa się z 4 rozdziałów, obejmuje 129 stron maszynopisu. Wykaz literatury zawiera 48 pozycji dotyczących podręczników i renomowanych czasopism naukowych, a także 31 osobnych pozycji literaturowych jako źródeł internetowych dostępnych on-line.

W załączeniu do pracy Autor udostępnia wydruk kodu źródłowego opracowanego modelu obliczeniowego do predykcji temperatury na ruszcie kotła fluidalnego i modyfikacji rozprywu powietrza i paliwa w celu wyrównania profilu temperatury.

Ocena merytoryczna rozprawy

Celem recenzowanej pracy było opracowanie metody optymalizacji pracy kotła fluidalnego (poprzez modyfikację rozptyłu powietrza i paliwa do kotła) pod kątem zmniejszenia niekorzystnego zjawiska erozji rur ekranowych w dolnej części komory paleniskowej.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki pracy i jednocześnie w zwięzły sposób Autor opisuje w nim obiekt badawczy w postaci kotła fluidalnego ze złożem cyrkulacyjnym na parametry nadkrytyczne o wydajności 1300 ton pary na godzinę, zlokalizowanego Elektrowni Łagisza. Prezentowany obiekt został zmodernizowany w 2019 roku pod kątem jego ucieplnienia, a więc oprócz wytwarzania energii elektrycznej umożliwia równoczesną produkcję ciepła, co wymusza niezawodną pracę przez cały okres grzewczy, tak aby nie zakłócić dostaw energii cieplnej do okolicznych miejscowości.

Problemy związane z erozją i korozją wysokotemperaturową rur parowników i przegrzewaczy kotłów parowych należą do jednych z najczęstszych przyczyn awarii kotłów. Także w przypadku badanego obiektu Autor wskazuje (na podstawie analizy danych historycznych dotyczących awaryjności bloku), że nieszczelności części ciśnieniowej kotła stanowią znaczący udział we wszystkich awariach bloku.

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest więc aktualna i ważna w aspekcie poprawy niezawodności kotłów parowych i bloków energetycznych, a zdefiniowany zakres tematyczny i cel pracy nie budzi zastrzeżeń.

Jednym ze sposobów na ograniczenie miejscowego zmniejszenia zużycia erozyjnego rur ekranowych jest wyrównanie rozptyłu powietrza i paliwa w złożu, co pociąga za sobą wyrównanie profilu poprzecznego temperatury w złożu. Jednakże w tym przypadku można polegać jedynie na wykazanej przez Autora korelacji pomiędzy danymi historycznymi ubytków grubości ścian rur parownika, a temperaturami mierzonymi w warstwie fluidalnej (na ruszcie, a nie w warstwie przysciennej paleniska). Należy do tego podejść jednak z pewną ostrożnością, gdyż z uwagi na intensywne mieszanie paliwa z powietrzem trudno jednoznacznie wskazać jaka jest np. koncentracja cząstek stałych w pobliżu ścian parownika i jaki jest skład mieszaniny pyłowo-gazowej w danym miejscu co ma duży wpływ na procesy erozyjne. Oczywiście warto podjąć próbę weryfikacji przyjętych założeń gdyż w przypadku potwierdzenia ich słuszności opracowane narzędzie diagnostyczne może mieć dużą wartość praktyczną i być jednocześnie bardzo proste i tanie w implementacji na innych kotłach fluidalnych. W warunkach eksploatacyjnych bloków energetycznych największą wartość mają najprostsze rozwiązania diagnostyczne, które pozwalają na uzyskanie wiarygodnych wyników nie powodując jednocześnie same dodatkowych problemów eksploatacyjnych (np. częstych przeglądów i napraw).

W rozdziale drugim, stanowiącym zasadniczą część pracy, Autor przedstawia metodę optymalizacji pracy kotła przy wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji. Wykorzystuje w tym celu korelację pomiędzy temperaturą mierzoną nad rusztem, a parametrami ruchowymi kotła. Idea optymalizacji pracy kotła w tym przypadku polegałaby na przewidywaniu temperatury w wybranych punktach w oparciu o bieżące dane operacyjne kotła z systemu DCS. Docelowo może być możliwe modyfikowanie niektórych nastaw ruchowych w układzie

dystribucji powietrza i paliwa do kotła tak, aby uzyskiwać jak najkorzystniejszy rozkład temperatur w przekroju poprzecznym złoża.

W takim podejściu do problemu zawsze jednak kluczowe będzie pozyskanie wiarygodnych danych obiektowych i wykorzystanie ich do nauki sieci neuronowych tak, aby w wyniku obliczeń uzyskiwać wyniki jak najlepiej odzwierciedlające warunki rzeczywiste.

Opracowane w ramach niniejszej pracy narzędzie optymalizacyjne powinno więc zostać zaimplementowane jako system doradczy dla operatora kotła lub nawet jako element układu sterowania pracą kotła.

Rozdział ten został napisany w sposób zwięzły i przejrzysty. Autor przedstawił zbiór wybranych modeli sieci neuronowych i procedurę ich uczenia dla optymalnego ich doboru i wykorzystania dla jak najdokładniejszej predykcji rozkładu temperatury na ruszcie kotła fluidalnego.

Opracowany model obliczeniowy umożliwiać ma kontrolę temperatury nad rusztem w komorze paleniskowej, a docelowo ma umożliwić wpływ na rozkład temperatury poprzez zmianę parametrów ruchowych kotła (paliwa i powietrza wtórnego). Opracowany model umożliwia zmianę tych parametrów, bez zakłócenia wydajności analizowanego kotła fluidalnego, tak aby wyrównać temperaturę w przekroju poprzecznym komory paleniskowej. Efektem wyrównania profilu temperatury ma być ograniczenie intensywności erozji rur ekranowych w najbardziej newralgicznym obszarze, powyżej linii zakończenia obmurza w leju komory paleniskowej.

Autor zweryfikował skuteczność różnych modeli sieci neuronowych do predykcji temperatury, pokazując procedurę wyboru najkorzystniejszych z nich. Spośród dwudziestu wybranych modeli Autor wskazał 5 cechujących się wysoką dokładnością wyników obliczeń dla wszystkich 12 punktów pomiarowych, w których określano temperaturę (T_1 - T_{12}). Przetestowanie tak wielu modeli jest zaletą recenzowanej pracy, gdyż jednocześnie można się przekonać, że zbyt pochopny i niewłaściwy dobór modelu może prowadzić do nieprawidłowych wyników końcowych. Porównanie wartości temperatur obliczonych z wartościami wziętymi z pomiarów rzeczywistych pokazały niezwykle dużą zgodność wyników jak na warunki kotłowe (dotyczy to oczywiście wybranych konfiguracji pracy kotła).

Autor przedstawił także wyniki badań obiektowych nad możliwością wpływania na rozkład temperatury na ruszcie poprzez ingerencję w rozptyw powietrza wtórnego. Przedstawiono wyniki dwóch testów obiektowych. Zmierzone w trakcie testów obiektowych wartości temperatur porównano z wartościami obliczonymi przez sieci neuronowe. Uzyskane wyniki charakteryzują się wyjątkową dużą zbieżnością. Pewien niedosyt pozostawia mała ilość przetestowanych wariantów dla różnych konfiguracji pracy kotła, gdyż parametry ruchowe kotła dla obu zrealizowanych testów nie różniły się w sposób istotny.

W pracy nie przedstawiono pełnej weryfikacji skuteczności działania opracowanego narzędzia diagnostycznego na obiekcie z powodu utrudnionej dostępności do obiektu i braku możliwości dużych zmian rozptywu strumienia powietrza i paliwa, na co Autor wskazał w pracy (str. 108). Ze zrozumieniem należy jednak przyjąć problemy z pełną weryfikacją modelu na obiekcie w warunkach rzeczywistych, gdyż zwykle trudno namówić właściciela bloku energetycznego na testy badawcze, które niosą za sobą jakiekolwiek ryzyko nieoczekiwanego jego odstawienia lub awarii. Z tego powodu dobrym uzupełnieniem pracy, mającym na celu potwierdzenie słuszności przyjętych założeń, mogą być wyniki modelowania numerycznego przepływu wielofazowego w kotle przedstawione w rozdziale trzecim. Wyniki obliczeń numerycznych CFD wskazują na korelację profilu temperatury w złożu z erozją ścian parownika co może

dowodzić słuszności przyjętego założenia, że wpływając na profil temperatury i eliminując lokalne piki temperatur w niektórych obszarach złoża (w konsekwencji też w warstwie przysściennnej) można ograniczyć szybkość zużycia erozyjnego rur parownika.

Uzyskane wyniki wskazują, że możliwe jest zaimplementowanie opracowanego narzędzia optymalizacyjnego na rzeczywistym obiekcie. Aplikacja takiego narzędzia nie powinna pociągać za sobą także dużych kosztów.

Uwagi redakcyjne i pytania szczegółowe dotyczące pracy

Generalnie praca została napisana starannie z dużą dbałością o jakość ilustracji prezentujących wyniki pomiarów i obliczeń. W treści pracy znaleźć można wiele drobnych błędów pisarskich co jednak nie pomniejsza ogólnego pozytywnego odbioru pracy w trakcie jej czytania i nie obniża jej wartości merytorycznej.

Przykładowe błędy w pisowni:

- str. 30₁₈ – Algorytmy sztucznej eliminują....
- str. 107₉– obliczenia związane z nauki...
- str. 109¹– modelu cyfrowy analizowanego kotła....

Uwagi szczegółowe:

- w rozdziale 1.4 Doktorant dość jasno przedstawia cel pracy, nie zostały jednak wyraźnie postawione żadne tezy i hipotezy badawcze. Można doszukać się tego między wierszami w punkcie 1.7 pt. *Zakres rozprawy*.
- co autor miał na myśli pisząc (str. 108), że w przypadku wdrożenia prezentowanej koncepcji i zautomatyzowaniu procesu efekt zmiany temperatury będzie wielokrotnie większy?
- na stronie 53 Doktorant omyłkowo wskazuje na model „o” wśród najlepszych (prawdopodobnie zamiast modelu „p”). Nie wskazano jednak wyraźnie który z nich został uznany za najlepszy i którego dotyczą wyniki na rysunkach 2.12-2.17.
- czy w części opisującej testy obiektowe w przypadku strumieni objętości powietrza mowa jest o Nm^3/s ? Prawdopodobnie tak jeśli bazuje się bezpośrednio na danych ruchowych kotła.
- czy pomiar temperatur został wykonany na potrzeby realizacji tej pracy?
- jak Doktorant mógłby uzasadnić powiązanie profilu temperatury z procesem erozji rur parownika? Na początkowym etapie realizacji pracy było to przecież założeniem bez pokrycia.
- jakie zdaniem Doktoranta uzyskane wyniki obliczeń erozji (rys. 3.12-3.13) mogą mieć przełożenie na rzeczywistą zmianę grubości rur parowników. Czy otrzymywane wyniki (rzęd wielkości) odpowiadają szybkiemu zużyciu rur czy wręcz przeciwnie? Czy może należy je rozpatrywać jedynie w kontekście jakościowym dla identyfikacji stref o dużym zagrożeniu przyspieszonym zużyciem korozyjnym? Z czego wynika przyjęty czas obliczeń 100 sekund?
- prezentowana praca nie zakończyła się wdrożeniem opracowanego narzędzia informatycznego. Jak Doktorant widzi możliwość jego implementacji na obiekcie? Czy podjęta była próba opracowania programu dedykowanego dla konkretnego kotła pracującego w sposób ciągły, np. stanowiącego narzędzie doradcze dla operatora kotła?

Wniosek końcowy

Temat rozprawy doktorskiej oraz jej wybór nie budzi zastrzeżeń zarówno merytorycznych jak i formalnych, a tematykę pracy należy uznać za odpowiednią dla dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemu badawczego, zaproponował właściwe metody jego rozwiązania oraz poprawnie przedstawił i zinterpretował uzyskane wyniki badań, co potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wynik jego pracy i opracowane narzędzie informatyczne służące optymalizacji pracy kotła fluidalnego jest autorskim rozwiązaniem i ma znamiona nowości w odniesieniu do techniki kotłowej.

Praca doktorska mgr inż. Jarosława Grochowalskiego pt. „Optymalizacja pracy kotła fluidalnego uwzględniającego zużycie erozyjne, zwiększająca dyspozycyjność jednostki w aspekcie ucieplownienia bloku energetycznego” spełnia wymagania wynikające z Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018r. poz. 1669 z późn. zm.) i zwracam się do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z wnioskiem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podpisał Tomasz Hardy