

OPINIA

rozprawy doktorskiej

mgr inż. Łukasza Śladowskiego

nt. „On-line, automatic optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of an acoustic system for in-furnace temperature distribution measurement”

Recenzja opracowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska i Energetyki Politechniki Warszawskiej z dnia 30 czerwca 2020r.

1. Przegląd rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Śladowskiego napisana została na 157 stronach wydania książkowego formatu C5. Składa się z 10 rozdziałów numerowanych, krótkich streszczeń w języku angielskim i polskim, wykazu skrótów i spisu treści umieszczonych na początku rozprawy oraz zamieszczonego na końcu spisu literatury (101 pozycji literaturowych). W pracy zamieszczono 87 rysunków i 10 tabel.

Praca z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, poświęcona jest optymalizacji procesów spalania paliwa w pyłowych kotłach węglowych elektrowni zawodowych.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Zagadnienia eksploatacyjne zawsze zajmowały czołowe miejsca wśród tematów związanych z energetyką zawodową, zwłaszcza, że w 77% energetyka krajowa oparta jest na węglu kamiennym i brunatnym. Ostatnie lata charakteryzują się dużymi obostrzeniami emisyjnymi zwłaszcza w stosunku do emisji związków azotu NO_x . W celu redukcji związków azotu powszechnie stosuje się metody pierwotne, zwykle w połączeniu z metodami wtórnymi (SNCR, SCR). Największy wpływ na zmiany sposobu spalania paliw mają metody pierwotne czyli stopniowanie powietrza (dysze powietrza dopalającego OFA, SOFA, ROFA i inne), stopniowanie paliwa, zastosowanie palników niskoemisyjnych, obniżanie nadmiaru powietrza w komorze paleniskowej, temperatury powietrza czy recyrkulacja spalin. Zwykle stosowane są łącznie: metody pierwotne (palniki niskoemisyjne, dwustopniowe dysze OFA), metody niekatalityczne SNCR. Znaczne obniżenie nadmiaru powietrza w głównej strefie spalania (w rejonie palników) powoduje zmniejszenie zawartości tlenu i wzrost CO , co stwarza dogodne warunki do wystąpienia korozja niskotlenowej powierzchni ogrzewalnych. Problem jest na tyle duży, że w ramach wprowadzanych modernizacji przewidywano również system ochrony przed korozją ściany tylnej i ścian bocznych kotła. Oprócz tego często obserwuje się wzrost stężenia

CO w spalinach wylotowych, obniżenie temperatury pary wylotowej czy wzrost zawartości części palnych w popiele lotnym i żużlu. Wszystko to powoduje, że rośnie ilość czynników decydujących o przebiegu spalania w komorze paleniskowej, temperaturach spalin biorących udział w wymianie ciepła w przegrzewaczach (zwłaszcza po stronie pary wtórnie przegrzanej), ilości wody wtryskowej w schładzaczach. Przy tym najlepiej byłoby prowadzić kocioł tak, aby utrzymywać stabilne parametry pary na turbinę, dotrzymywane były normy emisyjne ale także z najwyższą sprawnością.

Dlatego cenne jest podjęcie się przez Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego opracowania efektywnego systemu sterowania pracą kotła poprzez wykorzystanie rozkładu temperatury na poprzecznym przekroju komory paleniskowej uzyskanego z systemu akustycznego pomiaru temperatury AGAM do zoptymalizowania procesu spalania paliwa, tak aby zadane parametry pary i emisji były dotrzymywane przy zachowaniu wysokiej sprawności kotła. Na tej podstawie można powiedzieć, że tematyka pracy jest bardzo aktualna. To oraz właściwie sformułowana w rozdziale 1.2 teza dysertacji świadczą o bardzo dobrym rozeznaniu Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego w aktualnych problemach eksploatacyjnych elektrowni, poparte bogatą wiedzą z zakresu budowy kotłów oraz wiedzą z zakresu modelowania procesów technologicznych oraz wiedzy z dziedziny informatyki.

3. Szczegółowe omówienie rozprawy

Rozdział 1. Wstęp. W pierwszej części rozdziału Autor sygnalizuje potrzebę poprawy sprawności węglowych kotłów energetycznych z uwagi na duży udział paliw kopalnych (ok. 40%) w produkcji energii na świecie. Dostrzega możliwości wykorzystania nowoczesnych systemów DCS (Distributed Control System), które w chwili obecnej są standardem w elektrowniach, do opisu i optymalizacji takich procesów jak spalanie paliwa w kotle energetycznym. Krótco opisuje podstawowe metody bezkontaktowych pomiarów temperatury wykorzystywanych do wyznaczania rozkładu temperatury na przekroju komory paleniskowej kotła oraz przedstawia niektóre z algorytmów pomocnych w optymalizacji procesów spalania, w tym takie jak sztuczne sieci neuronowe, czy inspirowane układem odpornościowym, takie jak np. SILO. Tę część rozdziału można potraktować jako krótki przegląd literatury.

Dalsza część pierwszego rozdziału podzielona została na dwa krótkie podrozdziały zatytułowane 1.1 Struktura rozprawy oraz 1.2 Tezy rozprawy doktorskiej. W pierwszej, przedstawiony został układ rozdziałów pracy z krótkim omówieniem każdego z nich.

Bardzo ważny jest podrozdział drugi w którym Autor zawarł tezę pracy w brzmieniu: „Właściwa kontrola rozkładu temperatury gazów spalinowych na wyjściu z kotła pozwala na efektywną optymalizację procesu spalania on-line w węglowych kotłach pyłowych.” Teza ta uzupełniona została dodatkowo dwoma tezami pomocniczymi: Teza pomocnicza 1: „Uwzględnienie rozkładu temperatury gazu na wyjściu z kotła w modelu procesu spalania poprawia jakość modelu stosowanego do optymalizacji spalania on-line.” oraz Teza pomocnicza 2: Sztuczny układ immunologiczny - SILO jest w stanie modelować proces spalania z rozkładem temperatury spalin na wyjściu z kotła i przeprowadzić optymalizację on-line. Rozdział ten zawiera również głównych kierunków badań, w tym analizę pracy urządzeń do akustycznego pomiaru temperatury, modelowania procesu spalania z wykorzystaniem rozkładu temperatury AGAM, przeprowadzenie symulacji CFD procesu spalania oraz przeprowadzenie testów na obiekcie.

Rozdział 2 Modelowanie spalania pyłu węglowego. W rozdziale tym omówione zostały modele procesu spalania na podstawie źródeł literaturowych. Autor opisał główne typy modeli procesów spalania obejmujące różne modele empiryczne, modele CFD i modele pierwszego rzędu oraz uwypuklił ich niewątpliwe zalety i przydatność w fazach projektowych komór spalania oraz możliwość weryfikacji procesów spalania na podstawie zebranych danych pomiarowych. Opisane modele analizowane były zwłaszcza pod kątem ich przydatności do

obliczeń on-line tak, aby można było wykorzystać je do sterowania na bieżąco procesem spalania na podstawie pomiarów rozkładu temperatury spalin na wylocie z kotła, w tym przypadku realizowanych za pomocą pirometrii akustycznej. Do modelowania i symulacji CFD stosowane są przeważnie ANSYS Fluent. Dalsza część rozdziału poświęcona jest analizie CFD spalania pyłu węglowego z wykorzystaniem najbardziej popularnego modelu turbulentnego $k-\epsilon$ oraz walidacji symulacji CFD za pomocą pomiarów rozkładu temperatury za pomocą pirometrii akustycznej – AGAM.

Zasadniczą część tworzą dwa podrozdziały w których opisane zostały modele tzw. First-principle models (podrozdział 2.2) oraz modele empiryczne (podrozdział 2.3). Pierwsze z nich oparte na pierwszej zasadzie zawierają bilanse masy i energii, z reguły zawierające opis fizyki zjawisk i reakcji chemicznych. Łączą podstawowe zasady z korelacjami, takimi jak przenoszenie ciepła, porowatość i prężność par w zakresie termodynamiki, mechaniki płynów, kinetyki itp., i pozwalają opisać pełny zasięg instalacji. Modele charakteryzują się nieliniowością, szczególnie te z reakcjami chemicznymi. Jako przykład Autor przedstawił modele spalania paliw formułowane jako równania bilansowe pierwiastków, które pochodzą z reakcji chemicznych zachodzących w trakcie procesu spalania paliwa. Przedstawione zostały równania bilansowe dla określonego składu paliwa (C, H, O, N, S), których analityczne rozwiązanie daje udział molowy poszczególnych składników spalin i udziału molowy tlenu w stosunku do paliwa. Podane zostały zależności na obliczenie parametrów wejściowych dla opisanego modelu. Autor zaznacza jednak, że stosowanie tego typu modeli do zaawansowanej kontroli lub optymalizacji spalania pyłu węglowego nie jest wystarczające. Sterowanie on-line lub optymalizacja spalania pyłu węglowego musi uwzględniać system dystrybucji paliwa i powietrza.

W drugim podrozdziale 2.3. omówione zostały modele empiryczne. Jest to konsekwentnym poszukiwaniem takiego modelu, aby można było znaleźć rozwiązanie dla procesów słabo rozpoznanych lub gdy wpływ wielu zmiennych parametrów powoduje, że proces bardzo trudno jednoznacznie opisać równaniami. Podane zostały ogólne zasady budowy poprawnych modeli empirycznych i uwarunkowania od jakości prowadzonego procesu eksperymentalnego dla modeli liniowych i nieliniowych. Z uwagi na nieliniowy proces spalania Autor sięgnął po sprawdzony model NARMAX (Non-linear AutoRegressive Moving Average with eXogenous input model), podając równanie na relację między wejściami i wyjściami procesu nieliniowego. Podane zostały również etapy procesu projektowania modeli empirycznych, takie jak: określenie klasy modelu, definicja struktury modelu, obliczanie współczynników modelu oraz jego walidacja. Szerzej omówione zostały metody statyczne i jakościowe walidacji modeli empirycznych.

Ze względu na wykorzystywanie sztucznego układu odpornościowego do modelowania spalania, szczegółowy opis tej empirycznej metody modelowania spalania zamieszczony został w podrozdziale 2.4 Model w systemie SILO. Autor szczegółowo opisał zasadę działania optymalizatora SILO, począwszy od zapisu wektorowego sygnałów wejściowych, wyjściowych i sygnałów zakłóceń, definicję modułu uczenia rejestrującego statyczne odpowiedzi obiektu na zmiany sterowania i zapisującego powstałe w ten sposób limfocyty do pamięci immunologicznej, po określenie relacji zachodzących w analizowanym procesie czyli tworzenie modelu. Model tworzony jest na każdym etapie optymalizacji w oparciu o informacje o aktualnym punkcie pracy procesu oraz przy wykorzystaniu najnowszych limfocytów, które są rejestrowane i wykorzystywane w przyszłych etapach optymalizacji.

W dalszej części podane jest ogólne równanie liniowego, przyrostowego i statycznego modelu wykorzystywanego w SILO wraz ze zdefiniowaną macierzą współczynników szacowanych, na podstawie bieżących lokalnych i globalnych limfocytów, metodą najmniejszych kwadratów. Współczynniki te szacowane są przed obliczeniami optymalizacyjnymi aby można było wykorzystać model liniowy dla poszczególnych chwil czasowych do odtworzenia procesu nieliniowego, jakim jest proces spalania paliwa w stanach nieustalonych np. zmieniając obciążenie kotła. Kolejnym szczegółowo opisanym etapem jest

opis identyfikacji procesu spalania, którego wynikiem jest zdefiniowanie zmiennych sterowanych procesowo w systemie, ich korelacje wzajemne (w celu ograniczenia ilości zmiennych wejściowych) oraz wpływ na zmienne kontrolowane. Związane jest to również z zaprojektowaniem i zaplanowaniem eksperymentów identyfikacyjnych w celu zbadania, jak dane wejściowe wpływają na wyniki, zwłaszcza jaka jest temperatura pary i zawartość tlenu w spalinach. Pozwala to na prawidłowe prowadzenie procesów optymalizacyjnych również tak aby ograniczana była emisja NO_x .

Zasygnalizowane zostało także nowe podejście do modelowania i optymalizacji procesu spalania polegające na modelowaniu procesu spalania z rozkładem temperatury gazów na wyjściu z paleniska. Jak podaje Autor, optymalizacja spalania może być bardziej precyzyjna i zapewniać lepsze wyniki, gdy kształt płomienia jest odpowiednio kontrolowany, co realizowane jest w systemie SILO, gdzie relacja między wejściami procesowymi a kategoriami kształtów jest definiowana metodami empirycznymi, a rozkład temperatury silnie powiązany z wynikami CFD.

Rozdział 3 poświęcony został zaawansowanym rozwiązaniom sterowania i optymalizacji procesu spalania. Zaawansowane algorytmy sterowania są projektowane i rozwijane w celu zapewnienia wysokiej wydajności i dotrzymywania ustalonych parametrów, zwłaszcza gdy kontrolowany proces charakteryzuje się stale zmieniającymi się wartościami wejściowymi. Zaawansowane algorytmy sterowania i optymalizacji uwzględniają wielokryterialne cele optymalizacji, ograniczenia sygnałów sterujących oraz sterowanych wyjść procesowych, nieliniowość procesu oraz wielowymiarowy i dynamiczny model procesu. Jako przykład w podrozdziale 3.1 Autor omówił algorytmy klasy Model Predictive Control (MPC) należące do grupy Advanced Control, wyznaczające w każdej chwili próbkowania sterowanie przez optymalizację funkcji kryterialnej tzw. funkcji celu (wzór na str. 36) zdefiniowanej na skończonym horyzoncie, na którym w oparciu o model obiektu przewidywane jest jego zachowanie. Wspomniane są również algorytmy DMC (ang. Dynamic Matrix Control) dla modeli obiektu opisanych odpowiedzią skokową lub impulsową, GPC (Generalized Predictive Control) dla modeli obiektu w postaci dyskretnych równań różnicowych oraz nowsze takie jak SMOC (Shell Multivariable Optimizing Control), czy systemy ze sztuczną siecią neuronową i algorytmem genetycznym. Autor dostrzega jednak wady takich rozwiązań, związane głównie z ceną stworzenia modelu dynamicznego oraz konieczności okresowego dostrajania modelu matematycznego.

W rozdziale 4 opisane zostały: sztuczny system immunologiczny do optymalizacji spalania – SILO, poprzedzony opisem układu odpornościowego istot żywych (4.1) oraz przykładami w rozwiązaniach informatycznych (4.2). Autor porównał układ SILO z układem immunologicznym (4.3). Podrozdział 4.4 stanowi opis części wdrożeniowej SILO. Oprogramowanie SILO zwykle instalowane jest na serwerze dedykowanym, który musi być podłączony do sieci DCS lub system może być zainstalowany na jednej ze stacji inżynierskich DCS. Podane zostały warunki niezbędne jakie wymagane są dla prawidłowego funkcjonowania systemu, takie jak tworzenie pętli sterowania i grafiki operacyjnej do zarządzania optymalizacją, czy systemowy watchdog awaryjnego wyłączenia. Logika pętli sterowania DCS dla włączania i wyłączania optymalizacji SILO przedstawiona została na rysunku 1. Omówione i pokazane zostały również grafiki operatorskie dzięki którym mogą włączać i wyłączać optymalizację SILO, wybierać określone urządzenia kotłowe, które mają być sterowane przez SILO oraz monitorować kluczowe parametry procesu. Podczas optymalizacji system SILO modyfikuje (dwa rodzaje modyfikacji omówione i zilustrowane w tekście) wartości zadane lub odchylenia wartości zadanych w sterowaniu podstawowym. Pokazane zostało to na przykładzie zależności pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi ograniczeniami wartości zadanej O_2 w zależności od obciążenia jednostkowego.

W dalszej części Autor przedstawił zalety algorytmu wykorzystywanego w SILO (podrozdział 4.5) omawiając dwa główne, niezależne moduły, tj. gromadzenia i optymalizacji wiedzy. Algorytm Knowledge Gathering analizuje wartości wszystkich

kluczowych sygnałów procesowych takich jak zmienne sterowane, kontrolowane zmienne wyjściowe, czy zakłócenia procesu. Jeśli algorytm zidentyfikuje znaczącą zmianę sygnału sterującego, zaczyna analizować odpowiedź procesu. Na koniec, dla każdego sygnału indywidualnie, algorytm oblicza średnią przed zmianą sterowania i po zmianie sterowania. Przykładowe jednostki wiedzy (Knowledge units) przedstawiono na rysunkach 7 - 9. Dokładniej opisany został moduł optymalizacyjny jako niezależna usługa odpowiadająca za wyszukiwanie optymalnych rozwiązań według celów optymalizacyjnych i z uwzględnieniem ograniczeń. Ponieważ wykorzystuje model statyczny i liniowy, uzyskany dla aktualnego punktu pracy, decyzje optymalizacyjne mają zastosowanie tylko dla określonego punktu pracy, przy czym czas uzyskania nowej wartości zadanej zależy od procesu i zwykle wynosi od 5 do 15 minut. Dokładnie omówione zostały: modyfikacja funkcji celu poprzez wprowadzenie funkcji kary za przekroczenie ograniczeń oraz strategie optymalizacji wykorzystywanych w systemie SILO wraz z uwarunkowaniami ich identyfikacji.

Rozdział 5 Combustion process control in pulverized coal-fired boilers zawiera opis konstrukcji wysokociśnieniowych kotłów pyłowych i sterowanie procesem spalania. Krótko omówione zostały bilanse masy i energii. Przedstawiono układy regulacji obciążenia bloku energetycznego poprzez oddziaływanie na kocioł, przez oddziaływanie na turbinę układ regulacji bloku pracującego przy poślizgowym ciśnieniu pary. Omówiony został proces spalania paliwa w kotle energetycznym. Wiele uwagi poświęcono na omówienie zagadnień regulacyjnych, głównie ilości powietrza dostarczanego do spalania pyłu węglowego, gdyż odpowiednio dobrana (optymalna) ilość powietrza, jest jednym z czynników decydujących o sprawności kotła. Następnymi istotnymi elementami kotła omówionymi przez Autora są urządzenia przegrzewu pary wraz ze schładzaczami z kaskadowym układem regulacji temperatury. Omówiony dokładnie został układ nawęglania wraz z młynami oraz układem palników

W rozdziale 6 znajduje się opis kotła OP-650 pracującego w układzie blokowym z turbiną 225 MW. Blok znajduje się w Elektrowni Rybnik S.A. Opisany został układ młynów węglowych, układ palników w komorze paleniskowej oraz cały układ powietrze spaliny kotła ze szczególnym zwróceniem uwagi na instalacje redukcji NOx (dysze OFA, dodatkowe palniki III poziomu i palniki niskoemisyjne I i II poziomu).

Rozdział 7 zawiera opis instalacji AGAM do pomiaru rzeczywistej temperatury gazu, w która wyposażony był kocioł OP-650 w Rybniku (układ pomiarowy składał się z 8 nadajników/odbiorników, tworzących 21 torów pomiarowych). Autor podaje, że początkowo zadaniem systemu AGAM w Elektrowni Rybnik, blok 4, było sterowanie SNCR. Zespół z Panem mgr inż. Łukaszem Śladewskim, porównał wyniki modelowania CFD z pomiarami AGAM dla badanego kotła wykazując że dla tych samych warunków brzegowych i początkowych symulacja CFD i system AGAM zapewniają bardzo podobne profile temperaturowe, co umożliwiło opracowanie systemu optymalizacji pracy kotła łączącego algorytmy optymalizacyjne systemu SILO z informacjami o rozkładzie temperatury dostarczonymi przez pomiary AGAM. Dodatkowo w rozdziale tym autor zamieścił opis laserowego systemu monitorowania spalania, które podobnie jak akustyczne pomiary mogą być wykorzystane w systemach monitorujących spalanie w kotłach energetycznych.

Rozdział 8 zawiera opis części badawczej dotyczącej wykorzystania przez układ optymalizacyjny SILO informacji o rozkładzie temperatury (AGAM) na przekroju poprzecznym komory paleniskowej, zakładając, że kontrolując kształt jądra płomienia, do poprawy optymalizacji procesu spalania paliwa w kotle energetycznym przez system SILO. W pierwszej części rozdziału Autor analizuje wpływ różnych grup sygnałów na wyniki rozkładu temperatury wskazywanej przez system AGAM, zamieszczając szczegółowy opis i przykładowe wyniki testów każdej z grup. Stąd duża ilość wyników badań wpływu dysz OFA na kształt jądra płomienia i efektywność spalania, testów przeprowadzonych dla różnej zawartości tlenu w stosunku do zadanej oraz wpływu przepustnic powietrza wtórnego. Dalsza część rozdziału zawiera wyniki optymalizacji na danych historycznych zaczerpniętych z DCSu

potwierdzające (tabela 8), że zrównoważone spalanie pod względem rozkładu temperatur AGAM poprawia bilans standardowych wyników procesu spalania. Następnie przedstawione są: wyniki analizy relacji pomiędzy wartościami zadanymi sygnałów MV (Manipulated Variables), kształtem jądra płomienia, jego położeniem i wyjściami procesowymi, oraz opracowanie kategorii kształtu charakterystycznych dla różnych obciążeń kotła. Wyniki wpływu wartości średniej temperatury AGAM oraz odchylenia jądra płomienia na temperaturę pary pierwotnie przegrzanej, pary wtórnie przegrzanej, zawartości tlenu, NO_x , CO w spalinach, prezentują rysunki 41-50. Analiza danych jest używana do opracowania uproszczonego modelu liniowego każdej relacji. W tym celu możliwe jest także wykorzystanie wyników optymalizacji SILO, który wyposażony w szczegółowy model matematyczny procesu spalania (dedykowany dla różnych punktów pracy), jest w stanie znaleźć lepsze lub przynajmniej takie samo rozwiązanie o wzorcowym kształcie, maksymalizujące wydajność procesu. Pozwoliło to Autorowi na znalezienia najwyższej wydajności, odpowiedniego rozkładu temperatury AGAM (rys.51 i 52). Rozdział 8 zamyka obszernie opisany algorytm optymalizacji kształtu jądra płomienia do zastosowań w przyszłych systemach optymalizacyjnych.

W rozdziale 9 przedstawiona została analiza wyników optymalizacji spalania. W obliczeniach wykorzystane zostały filtrowane dane historyczne. Filtry danych szczegółowo zostały opisane na początku rozdziału. Brane były okresy ustalonej pracy kotła, tzn. bez rozruchów i wyłączenia kotła z ruchu a ponadto dane zostały rozdzielone ze względu na obciążenie kotła. Dobór rodzajów filtrów świadczy o doskonałym rozeznaniu Autora w procesy cieplne zachodzące w pracującym kotle, bardzo dobrej znajomości zagadnień optymalizacyjnych oraz automatyki kotłowej. Potwierdza to również fakt przeprowadzenia testu parametrycznego Kołmogorowa-Smirnowa czy dane pochodziły z rozkładu zbliżonego do normalnego oraz testu Manna-Whitneya-Wilcoxonona służy do sprawdzania, czy dwie próbkowane populacje są tożsame pod względem położenia, przy czym obserwacje z obu grup są łączone i nadawane są im rangi. Wyniki testów zostały zamieszczone w zestawieniu tabelarycznym (tabela 9 i 10). Następnie przedstawione zostały wyniki optymalizacji spalania w taki sposób, aby pokazać jedynie efekt optymalizacji SILO. I tak graficznie pokazany został wpływ optymalizacji na sprawność kotła, na temperaturę pary pierwotnej i wtórnie przegrzanej, na ilość wody wtryskowej schładzaczy. Pokazane zostały również odchylenia od nastawy dla emisji NO_x oraz przedstawiono wpływ optymalizacji spalania na średnią emisję CO. W celu identyfikacji procesów spalania pyłu węglowego w komorze paleniskowej kotła OP-650 wykonano obliczenia CFD. Wyniki obliczeń dla kotła pod obciążeniem 135 MW i 200 MW pokazano na pionowych przekrojach kotła oraz na poziomym przekroju komory paleniskowej w rejonie AGAM dla kotła pracującego bez modułu SILO i z włączonym modulem SILO. Podobnie dla tych samych obciążeń kotła, pokazane zostały powierzchnie izotermiczne odzwierciedlające kształt jądra płomienia przy włączonym i wyłączonym module SILO. Dla wymienionych obciążeń kotła przeprowadzona została również analiza procesu spalania, z włączonym i wyłączonym modulem optymalizacyjnym SILO, w celu monitorowania procesu formułowania i emisji NO_x , CO, O_2 .

Dysertację kończy rozdział 10, będący podsumowaniem działań związanych z częścią merytoryczną i sprawdzeniem procedur na danych rzeczywistych, co opisane zostało w rozdziałach 1-9.

4. Nowości w pracy

Do niewątpliwie nowatorskich, innowacyjnych rozwiązań należą wyszczególnione poniżej a szczegółowo opisane w dysertacji:

- a) opracowany efektywny system sterowania pracą kotła poprzez wykorzystanie rozkładu temperatury na poprzecznym przekroju komory paleniskowej, uzyskanego z systemu akustycznego pomiaru temperatury AGAM, do

zoptymalizowania procesu spalania paliwa, tak aby zadane parametry pary na wylocie z kotła i poziom emisji były dotrzymywane, przy zachowaniu wysokiej sprawności kotła.

- b) zwiększenie efektów optymalizacji poprzez uwzględnienie otrzymanej na podstawie analizy lokalnego (na wylocie z komory spalania) rozkładu temperatury spalin z systemu AGAM, lokalnej stechiometrii w empirycznym modelu matematycznym optymalizatora SILO
- c) opracowanie innowacyjnej koncepcji optymalizacji procesu spalania, w której regulacji dokonuje się za pomocą dystrybucji paliwa i powietrza w takich ilościach i miejscach aby położenie jądra płomienia i rozkład temperatury spalin na wylocie z kotła, kontrolowany przez AGAM, był optymalny dla aktualnego obciążenia kotła. Autor opracował dwa współpracujące ze sobą algorytmy. Pierwszy algorytm służy do analizy pomiarów rozkładu temperatury w celu obliczenia wielkości charakteryzujących kształt płomienia - przesunięcie lewo-prawo, przesunięcie przód-tył, skupienie i intensywność. Algorytm ten opiera się na obliczeniach z wykorzystaniem logiki rozmytej. Drugi algorytm poszukuje optymalnego kształtu płomienia dla aktualnych warunków pracy kotła. W tym algorytmie Autor wykorzystał funkcję nieograniczonej optymalizacji gradientowej. Autor przeprowadził integrację opracowanych algorytmów z optymalizatorem immunologicznym SILO.

5. Utylitarny aspekt pracy

Pracę cechuje wyraźny aspekt utylitarny. Zespół w skład którego wchodził również pracownicy Elektrowni Rybnik S.A oraz pracownicy Politechniki Wrocławskiej dostali dofinansowanie projektu w programie GEKON. Umożliwiło to zainstalowanie na kotle OP-650 bloku 200MW nr 4 w Elektrowni Rybnik, systemu SILO oraz testowanie algorytmów optymalizacyjnych, gdyż kocioł wyposażony był w system akustycznego pomiaru temperatury AGAM oraz korzystający z temperatur SNCR. Pan mgr inż. Łukasz Śladewski był liderem zespołu w części merytorycznej odpowiedzialny za opracowanie koncepcji projektu. W fazie realizacji był autorem optymalizacji zarówno w klasycznym podejściu jak również w podejściu innowacyjnym z wykorzystaniem systemu do pomiaru rozkładu temperatury w komorze paleniskowej. W części wdrożeniowej opracował projekt modyfikacji i dokonał zmian układów automatycznej regulacji na potrzeby wdrożenia systemu optymalizacji. Ponadto opracował planu testów weryfikujących efektywność działania opracowanej koncepcji oraz przygotował szczegółowego raportu dokumentującego wyniki badań oraz efekty optymalizacji. Zdefiniował również zmiany w konstrukcji kotła, zwiększające potencjał opracowanej koncepcji takie jak np. sterowanie rozdzielaczami pyłu na pyłoprzewodach oraz sterowanie odsiewaczy młynowych.

6. Uwagi edytorskie

Koncepcja i układ pracy nie budzi zastrzeżeń jednak w publikacjach naukowych tej rangi Autor powinien postarać się zmienić styl pisania z inżynierskiego na bardziej naukowy oraz dbać o szczegóły, powodujące że treść publikacji jest łatwiejsza w odbiorze.

1. Brak spisu oznaczeń
2. Brak numeracji wzorów
3. Niestaranne podpisy niektórych rysunków. Np. „Figure 75 – CFD results presentation” str.137. Widać, że pokazane wyniki to temperatury w °C, ale można było napisać to w podpisie rysunku. Miałem jeszcze wymienić następny tj. Rysunek 76, gdzie co prawda

podane jest, że rysunek przedstawia rozkład temperatury ale nie podano w jakich jednostkach, ponieważ okazało się, że przy wszystkich rysunkach przedstawiających wyniki obliczeń CFD (w tym dotyczących NO_x, CO, O₂), w podpisach rysunków nie zostały podane jednostki.

4. Niepotrzebny jest niepodpisany rysunek na str.123 bo taki sam rysunek jest na str. 124 jako rys. 61. Wygląda na to, że został wstawiony w tekst przez przypadek.
5. W na końcu spisu treści brakuje „Bibliography”
6. Na str. 5 wiersz 9 od góry, jest: ID – forced draft fan, powinno być ID - induced draft fan
Oprócz tego jest trochę literówek – parę przykładów poniżej, i sporo braków przedimków a i the.
7. Str. 9 wiersz 2 od dołu, jest: Exiting... powinno być: Existing
8. Str. 16 wiersz 15 od góry, jest: temperatpure.. powinno być: temperaturę
9. Str. 19 wiersz 10 od góry, jest: stochiometric. powinno być: stoichiometric
10. Str. 104 wiersz 7 od dołu, jest: increaeases powinno być: increases
11. Str. 106 wiersz 5 od dołu, jest: anlyzed powinno być: analyzed
12. Str. 106 wiersz 3 od dołu, jest: enginge powinno być: engine
13. Str. 106 wiersz 2 od dołu, jest: metodology powinno być: methodology

Uwagi powyższe nie mają wpływu na merytoryczną zawartość pracy. Mają na celu zwrócenie Autorowi uwagi na pewne niedociągnięcia, które warto poprawić w przypadku publikowania całości lub fragmentów pracy w renomowanych czasopismach.

7. Uwagi dyskusyjne i dostrzeżone nieścisłości

1. Na stronie 137 Autor napisał: Rozkład temperatury symulacji CFD na poziomie AGAM odzwierciedla rozkład temperatur mierzony przez AGAM, szczególnie w odniesieniu do różnicy temperatur z lewej do prawej strony. Na rysunku 80 przedstawiono temperaturę spalin na poziomie AGAM dla SILO WYŁĄCZONY i SILO WŁĄCZONY.
W pracy nie ma zamieszczonego porównania temperatury otrzymanej z pomiarów AGAM z temperaturami obliczonymi za pomocą CFD, co może budzić wątpliwości w dobrą ich zgodność.
2. W celu identyfikacji procesów spalania pyłu węglowego w komorze paleniskowej kotła OP-650 wykonano obliczenia CFD a wyniki obliczeń dla kotła pod obciążeniem 135 MW i 200 MW pokazano na pionowych przekrojach kotła oraz na poziomym przekroju komory paleniskowej w rejonie AGAM dla kotła pracującego bez modułu SILO i z włączonym modulem SILO. Podobnie dla tych samych obciążeń kotła, pokazane zostały powierzchnie izotermiczne odzwierciedlające kształt jądra płomienia przy włączonym i wyłączonym module SILO. Dla wymienionych obciążeń kotła przeprowadzona została również analiza procesu spalania, z włączonym i wyłączonym modulem optymalizacyjnym SILO, w celu monitorowania procesu formułowania i emisji NO_x, CO, O₂.
Szkoda, że analiza porównawcza sprowadza się wyłącznie do analizy jakościowej czyli w tym przypadku do porównania wzrokowego, że coś się zmienia albo nie. Wnioski autora na tej podstawie generalnie są słuszne, natomiast wyniki obliczeń w formie cyfrowej dają wiele bogatsze możliwości porównawcze i można było wykorzystać je do analizy ilościowej, co niewątpliwie wzbogaciłoby merytorycznie dysertację.
3. Czy były porównywane wyniki optymalizacji z wykorzystaniem samego systemu SILO, który był opracowany już kilka lat temu, z „nowym SILO” działającym w oparciu o rozkład temperatur AGAM. Pozwoliłoby to sprawdzić efektywność modyfikacji

algorytmów. W pracy porównywana jest wyłącznie praca kotła z SILO i bez SILO. Więc nie ma informacji na ile opracowany algorytm jest lepszy od poprzednika.

8. Wnioski końcowe

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego pt. "On-line, automatic optimization of combustion process in coal-fired power plant with utilization of an acoustic system for in-furnace temperature distribution measurement" napisana została w sposób uporządkowany i logiczny a dokładne rozeznanie literaturowe oraz przekazana w niej bogata wiedza z zakresu zagadnień związanych z optymalizacją sprawności pracy kotłów energetycznych czynią pracę wartościową, która wnosi duży wkład w rozwój systemów diagnostycznych i sterujących w układach automatyki kotłowej. Dużym sukcesem jest opracowania efektywnego systemu sterowania pracą kotła poprzez wykorzystanie rozkładu temperatury na poprzecznym przekroju komory paleniskowej uzyskanego z systemu akustycznego pomiaru temperatury AGAM do zoptymalizowania procesu spalania paliwa, tak aby zadane parametry pary i emisji były dotrzymywane przy zachowaniu wysokiej sprawności kotła. Na uwagę zasługują walory merytoryczne pracy które pokrywają się z wymienionymi w recenzji w punkcie dotyczącym nowości w pracy.

Praca z uwagi na tematykę z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że pomimo poczynionych uwag, które w części były uwagami porządkowymi, redakcyjnymi a w części uwagami dyskusyjnymi, że Pan mgr inż. Łukasz Śladewski w przedłożonej rozprawie doktorskiej poprawnie sformułował, rozwiązał i opisał postawione sobie zadanie jakim było opracowanie nowatorskiej metody optymalizacji pracy kotła a cel badawczy polegający na nowym podejściu do modelowania procesu spalania w oparciu o rozkład temperatury gazu na wyjściu z paleniska i wykorzystaniu tego modelu w optymalizacji procesu spalania on-line został w pełni zrealizowany.

Na szczególne podkreślenie zasługuje również zdolność Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego do prowadzenia badań na obiektach przemysłowych, umiejętność pracy w dużych międzyuczelnianych zespołach badawczych oraz dużą umiejętność współpracy z przemysłem energetycznym.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl obowiązującej ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. 2017, poz. 1789) i wobec powyższego, wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka o dopuszczenie Pana mgr inż. Łukasza Śladewskiego do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie tytułu doktora.

