

Dr hab. inż. Rafał KOBYLECKI, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa

Częstochowa, 2023.03.06

Recenzja

Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO

WPROWADZENIE

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej RIE-BD.512.66.2022 oraz zawartą na jego podstawie z autorem niniejszej recenzji umową o dzieło UMC/0037/2023 na wykonanie recenzji (stopień doktora) do wniosku nr 40/UMC/RIE0-1/2023.

ZAKRES ROZPRAWY

Będąca przedmiotem niniejszej oceny rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO nosi tytuł "Optymalizacja pracy kotła fluidalnego uwzględniającego zużycie erozyjne, zwiększająca dyspozycyjność jednostki w aspekcie ucieplnienia bloku energetycznego". Praca została zrealizowana w ramach tzw. doktoratu wdrożeniowego we współpracy Politechniki Śląskiej z Tauron Wytwarzanie S.A. i stanowi ją łącznie 130 stron maszynopisu, na których rozmieszczono 51 rysunków i 29 tabel. Manuskrypt oparty jest na 79 pozycjach bibliograficznych, w większości anglojęzycznych. Rozprawa została podzielona na 4 główne rozdziały i zawiera dodatkowo wykaz użytych w pracy skrótów i oznaczeń, 3 załączniki (A, B, C) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Zakres merytoryczny rozprawy jest aktualny i wpisuje się w realizowane wciąż na świecie badania z zakresu problematyki kotłowej, ukierunkowane na monitoring oraz analizę i ocenę pracy kotłów i bloków energetycznych w celu zwiększenia dyspozycyjności. Badania tego rodzaju są obecnie wymuszone aktualną sytuacją polityczną – z jednej strony węgiel w ujęciu krótkookresowym zdaje się powracać do łask (vide nowa odkrywka węgla tworzona przez RWE na miejscu farmy wiatraków w Lützerath), a z drugiej jest eliminowany poprzez politykę, m.in. Unii Europejskiej oraz innych wiodących gospodarek ze względu na konieczność przeciwdziałania wzrostowi stężenia dwutlenku węgla w atmosferze i wywoływanym przez to zmianom klimatycznym. Taki cel w dłuższej perspektywie czasowej wymusza odejście od węgla (pytanie na ile realne w obecnej sytuacji geopolitycznej), co ma być osiągnięte poprzez zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii i ograniczenie (poprzez stymulowany wzrost kosztów – opłata za CO₂) klasycznych siłowni ciepłych opalanych węglem kamiennym i brunatnym. Niemniej jednak nim to nastąpi, w okresie przejściowym siłownie ciepłe opalane paliwami stałymi pełnić będą rolę stabilizującą i zabezpieczającą system energetyczny – zwłaszcza wobec braku odpowiednich magazynów energii elektrycznej wytworzonej w siłowniach wiatrowych i słonecznych. Uwzględniając planowaną rolę siłowni węglowych oraz wymuszony tym reżim pracy wymuszający częste okresowe zmiany wydajności w dużym zakresie w zależności od bieżących potrzeb liczyć się należy z pogorszeniem warunków pracy urządzeń oraz obniżeniem trwałości i skróceniem ich żywotności eksploatacyjnej.

Mając na uwadze ograniczone i wciąż redukowane nakłady na odtworzenie majątku oraz planowane uwarunkowania eksploatacyjne kotłów wchodzących w skład bloków energetycznych w ramach powstającego holdingu Narodowej Agencji Bezpieczeństwa Energetycznego (NABE), gdzie dążyć się będzie raczej do minimalizacji kosztów utrzymywania parku maszynowego, tak aby przy minimalnych nakładach finansowych dotrzeć do technicznej śmierci urządzeń energetyki węglowej i ich zastąpienia przez źródła odnawialne, tematyka badawcza podjęta przez Autora recenzowanej rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej aktualna i przydatna, a wyniki pracy, ukierunkowane *per se* na ograniczenie kosztów remontów i erozyjnego zużycia rur ekranowych dzięki optymalizacji nastaw kotła, realizowanej z wykorzystaniem sieci neuronowych, posiadają potencjał wdrożeniowy (to w końcu istota doktoratu wdrożeniowego) i przyczynić się mogą do zwiększenia bezpieczeństwa pracy, ograniczenia liczby nieplanowanych odstawień oraz wydłużenia okresów pewnej eksploatacji już istniejących urządzeń. Co istotne, wydłużenie czasu pracy już istniejących kotłów i bloków energetycznych pozwoli także niewątpliwie na obniżenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej – kluczowych dla zapewnienia odpowiedniego wzrostu ekonomicznego i konkurencyjności polskiej gospodarki. Podjęta w pracy Autora problematyka jest szczególnie istotna w przypadku bloków energetycznych z kotłami nadkrytycznymi, które to urządzenia cechują się wyższymi wymaganiami w zakresie wytrzymałości i jakości użytych materiałów oraz dyspozycyjności oferując jednocześnie wyższą sprawność konwersji energii oraz niższe jednostkowe emisje zanieczyszczeń (w tym CO₂) wyprowadzanych do środowiska w przeliczeniu na MWh produkowanej energii elektrycznej.

W tym ujęciu, zakres merytoryczny rozprawy mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO oraz propozycja predykcji stanu kotła w oparciu o obliczenia z wykorzystaniem sieci neuronowych i uczenia maszynowego ciepła są ważne, gdyż – w założeniu – pozwalają na śledzenie stanu aktualnego i bieżącą predykcję oraz identyfikację miejsc najbardziej narażonych na potencjalne uszkodzenia erozyjne w komorze paleniskowej, a perspektywa wdrożenia wyników i możliwości kontroli oraz predykcji *quasi on-line* stanu urządzeń kotłowych wniesie niewątpliwie istotny wkład dla poprawy warunków pracy oraz wydłużenia czasu bezpiecznej eksploatacji urządzeń energetycznych przyczyniając się do ograniczenia kosztów konwersji energii chemicznej paliw stałych w energię elektryczną.

Recenzowaną rozprawę tworzą cztery główne rozdziały. W pierwszym z nich, o bardzo szerokim zakresie merytorycznym, Autor omawia uwarunkowania środowiskowe i wyzwania stojące przed polską energetyką w aspekcie polityki Unii Europejskiej. Ponadto, rozdział ten zawiera również krótki opis analizowanego rzeczywistego obiektu przemysłowego (bloku z kotłem fluidalnym o mocy 460 MW_e), sposób i metodologię prowadzonej diagnostyki rur ekranowych w okresie trzech lat eksploatacji, wybrane wyniki analizy awaryjności kotła, a także przegląd literatury oraz cel i zakres pracy.

W kolejnym rozdziale (nr 2) przedstawiono podstawowe informacje o sieciach neuronowych i obecnych możliwościach ich zastosowania. Opisano także techniki obliczeniowe oparte na algorytmach sztucznej inteligencji i wykorzystujące techniki uczenia maszynowego w celu rozwiązywania określonych problemów technicznych pracy urządzeń. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki obliczeń korelacji pomiędzy wybranymi parametrami eksploatacyjnymi kotła. Ponadto omówiono i przedstawiono wyniki obliczeń dokładności predykcji temperatury dla poszczególnych modeli obliczeniowych. Na zakończenie tego rozdziału odniesiono się i omówiono wyniki testów obiektowych, wykonanych w celu potwierdzenia możliwości kontroli rozkładu temperatury w dolnej części leja komory paleniskowej kotła poprzez zmiany rozdziału powietrza wtórnego i paliwa wprowadzanych do komory paleniskowej. Zdecydowano się uwzględnić jedynie te dwa czynniki, gdyż podstawowym kryterium dla ewentualnych zmian nastaw kotła stanowiło zapewnienie jego bezpiecznej pracy jako elementu podstawowego polskiego systemu elektroenergetycznego.

Rozdział trzeci rozprawy poświęcony jest obliczeniom numerycznym kotła ukierunkowanym na potwierdzenie tezy, że wyrównany rozkład temperatury w poprzecznym przekroju w dolnej części komory paleniskowej wpływa na ograniczenie erozyjnego zużycia

mur ekranowych w okolicy odgięcia kick-out. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania Ansys® Fluent dla dwóch przypadków pracy kotła, tj. kiedy rozkład temperatury w okolicy rusztu był wyrównany oraz znacząco (o około 80°C) różny. Efektem obliczeń są m.in. mapy erozyjnego zużycia na ścianach prawej i lewej kotła (rys. 3.8-3.9 oraz 3.12-3.13) po założonych 100s obliczeń.

Podsumowanie i przedstawienie wniosków uzyskanych w efekcie realizacji recenzowanej rozprawy doktorskiej zawiera rozdział czwarty – ostatni w pracy.

OCENA ROZPRAWY

Zdaniem recenzenta tematyka podjęta w pracy jest ważna, zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia, gdyż planowane ograniczenia środków finansowych na podtrzymywanie eksploatacji bloków opalanych konwencjonalnymi paliwami stałymi wymuszają zintensyfikowanie działań predykcyjnych, gdzie wiedza operatorów bloków energetycznych może być wykorzystywana do poprawy oraz wydłużenia czasu ich bezpiecznej eksploatacji przy ograniczonych nakładach finansowych oraz coraz ostrzejszych wymaganiach środowiskowych.

W tym ujęciu tematyka pracy jest niewątpliwie aktualna i perspektywiczna, mimo znaczącego dotychczasowego dorobku światowej nauki w zakresie kontroli eksploatacji urządzeń energetycznych, a wyniki uzyskane w ramach realizacji przez mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO rozprawy doktorskiej niewątpliwie cechuje użyteczność, gdyż ich zastosowanie w praktyce przyczyni się do wydłużenia okresu bezpiecznej pracy istniejących kotłów fluidalnych w zmiennych warunkach, skutkując poprawą i bardziej efektywnym wykorzystaniem majątku produkcyjnego oraz ograniczeniem zakresu i kosztów prac remontowych – szczególnie dotkliwych w przypadku konieczności diagnostyki i napraw elementów ciśnieniowych narażonych na oddziaływania mechaniczne w podwyższonych temperaturach.

Zdaniem recenzenta, wyniki zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO stanowią oryginalny wkład do rozwoju nauki w obszarze szeroko rozumianej energetyki, a opracowanie praktycznego modelu predykcyjnego oraz wykonanie stosownych obliczeń numerycznych i ich weryfikacja są cenne z punktu widzenia możliwych zastosowań w przemyśle, co pozwoli na bardziej dokładną predykcję potencjalnych zagrożeń, poprawiając bezpieczeństwo pracy urządzeń kotłowych, wydłużając czas ich eksploatacji oraz ograniczając liczbę nieplanowanych i kosztownych odstawień awaryjnych.

UWAGI KRYTYCZNE

W trakcie lektury rozprawy nasuwają się jednak także uwagi krytyczne i pytania odnośnie zawartych w niej treści merytorycznych. Najważniejsze z nich to:

1. Zakres merytoryczny rozdziału 1 „Wprowadzenie” jest moim zdaniem zbyt obszerny i chyba niezbyt uporządkowany, gdyż zawiera zarówno przegląd literatury (rozdział 1.5), jak i opis analizowanego obiektu (1.2) oraz koncepcję (1.6) i zakres pracy (1.7). Opis obiektu będącego przedmiotem analizy powinien być raczej umieszczony po wprowadzeniu oraz przedstawieniu celu, sformułowaniu tez oraz omówieniu zakresu pracy. Ponadto, rozdział „Cel, tezy i zakres pracy” powinien stanowić odrębny rozdział główny i być umieszczony po części literaturowej (rozdział 1), gdyż jego treść stanowi naturalny wynik przeglądu literatury w danej tematyce i jest jednocześnie wstępem do części badawczej (eksperymentalno-obliczeniowej).
2. Na rys. 1.2, 1.3 i 1.12 brak jest stosownych oznaczeń, dla wlotów paliwa, materiału recykulowanego, itp. co utrudnia lekturę.
3. W zależności (1.1) nie podano miana (np. [mm/rok]).
4. Rys. 1.13 jest słabo czytelny, ponadto nie podano względem czego ubytek wynosi 100%? Jaki był punkt odniesienia? Proszę o informacje w tym zakresie.

5. Skale na osiach Y na rys. 1.14 i 1.15 powinny być takie same. To samo dotyczy skali na osiach X i Y na rys. 2.8-2.9 oraz powinny być takie same. To samo dotyczy rys. 2.12-2.14. Ponadto osie rys. 3.10 i 3.14 powinny mieć ten sam zakres.
6. Oznaczenia (a) i (b) na rys. 1.16 powinny być chyba zamieszczone odwrotnie.
7. Na str. 32-33 autor wspomina o wyrównaniu rozkładu temperatury aby ograniczyć „fluktuację erozji” (raczej chyba erozję). Moim zdaniem znacznie ważniejszy byłby rozkład ciśnienia statycznego złoża – dlaczego pominięto ten parametr?
8. Na str. 37 autor pisze o sieciach neuronowych, które pozwalają „rozwiązać problemy” – niestety nic nie wspomina o – chyba koniecznej – weryfikacji praktycznej uzyskanych w ten sposób wyników. Dlaczego?
9. W tekście pracy pod rys. 2.2 autor pisze o obliczaniu wartości współczynnika korelacji, lecz nie podaje stosownego wzoru.
10. Rozdz. 2.3, str. 42: proszę o wyjaśnienie co znaczy że „dane wejściowe do sieci neuronowej dobrze są skorelowane z temperaturą, jednocześnie odzwierciedlają jakość dostarczanego paliwa do kotła (np. ciśnienie mierzone w dolnej części komory paleniskowej)”? Jak należy to rozumieć?
11. Dlaczego (rys. 2.10) pokazano obliczony błąd tylko dla T1? W jaki sposób obliczano wartości tych temp. T1-T12 o których pisze autor (str. 53)?
12. W Tabelach 2.2-2.4, oraz 2.7-2.8 nie podano mian dla wszystkich parametrów.
13. Na str. 69 autor pisze o problemie zmienności paliwa, ale nie podaje żadnych danych. Proszę o stosowne uzupełnienie/wyjaśnienie.
14. Dlaczego, skoro mówimy o wartości bezwzględnej, podane są ujemne wartości w Tabelach 2.10 i 2.13?
15. Odniesienie do rys. 2.19 (str. 77) w tekście rozprawy dotyczy chyba rys. 2.21? Proszę o wyjaśnienie dlaczego zmiany przepływu powietrza charakteryzowały tak znaczne fluktuacje jak pokazano na rys. 2.21? Co spowodowało, że od odczytania parametrów z DCS do ich przekazania operatorowi upłynęło aż 25 min?
16. Parametry modelu w Tabeli 3.1 są dość lakonicznie przedstawione w pracy – dla lektury treści znacznie lepsze byłoby podanie zależności lub konkretnych wartości.
17. Opis „całkowita ilość materiału” w Tabeli 3.2 nie odpowiada jednostce [kg/s]. Ponadto, jakie przyjęto parametry rozkładu? Z jakiej zależności (str. 88) obliczano erozję?
18. Rys. 3.3 i odpowiedni tekst – proszę o wyjaśnienie, dla jakiej wysokości obliczona i zmierzona różnica ciśnień wynosi 1100 Pa? Informacja praktyczna: dla celów porównawczych wygodniej byłoby zamienić osie wykresu.
19. Proszę o wyjaśnienie (str. 90-91) co oznacza parametr „C(dp)” – czy jest to średnica ziaren?
20. Na str. 97 zamiast Tab.3.12 powinno chyba być Tab. 3.7? Zwrot „całkowitą erozję jako sumę obliczonych erozji zestawiono w Tab. 3.12, a obliczoną wartość maksymalną erozji” jest chyba niezbyt nieszczęśliwy.
21. Jak obliczano erozję (Tabele 3.7-3.8)? Moim zdaniem po tych tabelach powinna dopiero być umieszczona Tabela 3.6. To samo dotyczy kolejności Tabel 3.11-3.13.
22. Wnioski sformułowano dość ogólnie – zdaniem recenzenta wygodniej jest je ująć w punktach wraz z podaniem najważniejszych wartości liczbowych odnośnie uzyskanych wyników.
23. Literatura dotycząca fluidyzacji jest moim zdaniem niepełna.

Inne drobne uwagi do manuskryptu dotyczą głównie zagadnień techniczno-edycyjnych oraz stylistycznych, np.:

- Tytuły podrozdziałów 2.3.1 „Zasada działania modelu...”, 3.1 „Model numeryczny...” oraz 3.4 „Obliczenia erozji” są chyba niezbyt fortunne – w tym ostatnim przypadku chodzi chyba o kinetykę procesu erozji? Podobne uwagi stylistyczne dotyczą Dodatku B „...kod źródłowy obliczający...” – raczej chyba „...kod źródłowy do obliczeń...”, itp..
- Brak wyjaśnienia dla części skrótów wykorzystanych w pracy; ponadto niektóre z nich podane są po polsku, a inne po angielsku bez tłumaczenia. Na str. 48-49 także brak jest wyjaśnień terminów angielskich użytych w tekście pracy (to samo dotyczy fragmentu na

- str. 85). Ponadto, w pracy używane są czasem sformułowania zbyt ogólne, tzn. bez podania konkretnych wartości (np. zwroty na str. 11, 14, 18, 23, 25, 28).
- Niewielkie niedociągnięcia stylistyczne i literówki (str. 1, 3, spis treści po angielsku, str. 7 i sformułowania „wdrożony nakład pracy zwiększy dyspozycyjność...” oraz „... zakończyć sukcesem moją przygodę z doktoratem...”, 14, 32, 37, 38, 43, 44, 47, 60, 74, 79, 88, 94, 109, itp.).
 - Brak cytowania literatury (m.in. str. 30, 31).
 - Uwagi stylistyczne, np. „postępujący w coraz szybszym tempie Zielony Zwrot”, „rozprawa doktorska przedstawia możliwość optymalizacji” (str. 11) itp..

WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO pt. „Optymalizacja pracy kotła fluidalnego uwzględniającego zużycie erozyjne, zwiększająca dyspozycyjność jednostki w aspekcie ucieplownienia bloku energetycznego” zawiera moim zdaniem elementy oryginalne, które mogą być wykorzystane i wdrożone praktycznie, zwłaszcza w zakresie predykcji i bieżącej kontroli stanu eksploatacji kotła fluidalnego ze złożem cyrkulacyjnym. Zaproponowany przez Autora model predykcyjny wykorzystujący sieci neuronowe dla ograniczenia erozji rur ekranowych w komorze paleniskowej kotła może zostać wykorzystany w praktyce, co w efekcie powinno poprawić warunki kontroli eksploatacji oraz wydłużyć czas bezpiecznej pracy i cykl życia kotłów fluidalnych opalanych paliwami stałymi. Tym samym, treści merytoryczne zawarte w rozprawie powinny bezpośrednio skutkować pozytywnymi efektami gospodarczymi i środowiskowymi (niższe koszty, lepsze wykorzystanie zasobów, itp.).

W opinii końcowej chcę podkreślić złożoność problematyki i trudności techniczno-badawcze realizacji przez Doktoranta prac na obiekcie (zarówno w zakresie diagnostyki, jak i testów przemysłowych oraz obliczeń i symulacji), które musiały być realizowane w takim zakresie, aby nie spowodować awaryjnego odstawienia kotła. Moim zdaniem autor wykazał się w tym zakresie umiejętnościami wystarczającymi. Kompozycja i zakres merytoryczny recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława GROCHOWALSKIEGO spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach (art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki) i tym samym **wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Częstochowa, 2023.03.06

Podpisał Rafał Kobylecki