

Dr hab. inż. Rafał KOBYŁECKI, prof. PCz  
Politechnika Częstochowska  
Wydział Infrastruktury i Środowiska  
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych  
ul. Brzeźnicka 60A, 42-201 Częstochowa  
Tel.: 603.783.933; E-mail: [rafal.kobylecki@pcz.pl](mailto:rafal.kobylecki@pcz.pl)

Częstochowa, 2021.09.04

## **Recenzja**

### **Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Marka MAJDAKA**

#### **WPROWADZENIE**

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej nr ŚO.52-918/2021 AJK z dnia 2021.06.22 oraz zawartą na jego podstawie umową o dzieło z autorem niniejszej recenzji.

#### **ZAKRES ROZPRAWY**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Marka MAJDAKA nosi tytuł "Ciepłoprzepływową i wytrzymałościową analizą pracy ekranów komór paleniskowych". Pracę stanowi łącznie 115 stron maszynopisu, na których rozmieszczono 53 rysunki i 19 tabel. Manuskrypt oparty jest na 107 pozycjach bibliograficznych, w większości anglojęzycznych. Rozprawa została podzielona na 9 głównych rozdziałów i zawiera dodatkowo wykaz użytych w pracy oznaczeń, spis tabel, spis rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Zakres merytoryczny rozprawy jest aktualny i wpisuje się w realizowane na świecie badania z zakresu problematyki kotłowej, ukierunkowanej na monitoring oraz analizę i ocenę wytrzymałości ciepłno-mechanicznej powierzchni ogrzewalnych kotłów energetycznych. Ze względu na bieżącą politykę światową, realizowaną przez Unię Europejską oraz inne wiodące gospodarki i ukierunkowaną na przeciwdziałanie zmianom klimatycznym i ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>, klasyczne siłownie ciepłe opalane węglem będą „wypychane” z rynku i wygaszane. Nim to jednak nastąpi, w okresie przejściowym siłownie te pracować będą głównie jako tzw. stabilizator i regulator rynku. Wobec braku odpowiedniego wolumenu dla akumulacji energii elektrycznej wytworzonej w elektrowniach wiatrowych i słonecznych, zakładany dla siłowni węglowych reżim pracy wymusi niewątpliwie częste okresowe zmiany wydajności kotłów i mocy bloków w zależności od bieżących potrzeb systemu energetycznego. Taka eksploatacja skróci niewątpliwie żywotność kotłów i wytrzymałość ich kluczowych elementów (głównie ciśnieniowych).

W świetle powyższych uwarunkowań i perspektyw, tematyka badawcza podjęta przez Autora recenzowanej rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej aktualna i wskazana, a jej wyniki niewątpliwie cechuje użyteczność, gdyż stanowią ważny materiał porównawczy i studyjny dla osób odpowiedzialnych za eksploatację kotłów i bloków energetycznych siłowni ciepłych, pozwalając na zwiększenie bezpieczeństwa pracy oraz wydłużając możliwości pewnej eksploatacji już istniejących kotłów. Co istotne, wydłużenie czasu pracy już istniejących kotłów i bloków energetycznych pozwoli także niewątpliwie na obniżenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej – kluczowych dla zapewnienia odpowiedniego mixu energetycznego kraju w warunkach zwiększonego udziału tzw. energetyki odnawialnej. Podjęta w pracy Autora problematyka jest szczególnie istotna w przypadku kotłów nadkrytycznych, cechujących się wyższymi wymaganiami w zakresie inżynierii materiałowej oraz bezpieczeństwa pracy elementów ciśnieniowych, lecz jednocześnie oferujących wysokie sprawności, niższe koszty jednostkowe eksploatacji oraz niższe jednostkowe emisje zanieczyszczeń (w tym CO<sub>2</sub>).

W tym ujęciu, zakres rozprawy mgr inż. Marka MAJDAKA oraz obliczenia rozkładów temperatury i naprężeń cieplnych na powierzchniach wymienników ciepła są bardzo ważne, gdyż pozwalają na identyfikację miejsc najbardziej narażonych na potencjalne uszkodzenia wynikające z wymuszanych przez rynek przekroczeń wartości parametrów eksploatacyjnych danego kotła. Zdaniem recenzenta wyniki rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka MAJDAKA i perspektywy ich przyszłego wykorzystania wnoszą istotny wkład dla ekonomicznego wykorzystania energii chemicznej paliw, realizowanego jednocześnie z minimalną uciążliwością dla środowiska.

W krótkim, jednostronicowym wstępie do pracy Autor zwięźle omawia podstawowe kwestie związane z najistotniejszymi problemami eksploatacji komór spalania kotłów (w tym nadkrytycznych) – wysokie naprężenia cieplne oraz zmęczenie materiału prowadzić mogą, zdaniem Autora, do skrócenia okresów bezpiecznej eksploatacji i uszkodzenia elementów ciśnieniowych. W kolejnym rozdziale (nr 2) przedstawiono cel i zakres rozprawy – celem pracy było stworzenie modelu matematycznego pozwalającego na wyznaczenie rozkładu temperatury oraz naprężeń cieplnych w połączonych płetwami rurach ekranowych kotłów nadkrytycznych. Jako cel Autor postawił sobie ponadto weryfikację swojego modelu poprzez dokonanie analizy numerycznej, obliczeń CFD i przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Do weryfikacji modelu Autor wykorzystał wybrane dane pomiarowe z jednej z pracujących elektrowni z kotłami pyłowymi. W rozdziale 2 umieszczono także tezę pracy, którą sformułowano następująco: „Różnicowanie strumienia ciepła padającego na powierzchnię sąsiednich rur ekranowych wpływa na wzrost naprężeń cieplnych występujących w rurach ekranowych i łączących je płetwach”. Część literaturowa rozprawy to rozdział 3, w którym przedstawiono skrótowo zagadnienia związane z eksploatacją rur ekranowych kotłów różnego typu (pyłowe i fluidalne). Kolejny rozdział (4) zawiera analizę zjawisk ciepło-przepływowych w rurach ekranów komór paleniskowych. W rozdziale tym krótko omówiono również równania bilansowe masy, pędu i energii oraz przedstawiono wartości współczynnika wnikania ciepła. Rozdział 5 rozprawy poświęcony jest omówieniu metodyki określania rozkładu temperatury na powierzchniach ekranów komór paleniskowych (rury i płetwy) – metodykę tą Autor wykorzystał dla stworzenia modelu numerycznego pozwalającego na wyznaczenie rozkładu temperatury. Rozdział 6 stanowi opis przyjętego sposobu rozwiązania równań bilansowych przedstawionych w rozdziale 5. Przyjęta metodyka pozwoliła Autorowi na stworzenie algorytmu numerycznego w programie Matlab, który mógł być rozwiązany metodą Runge-Kutta. Autor przedstawił szczegóły odnośnie obliczania temperatury w wybranych punktach modelu (rys. 5.7 oraz równania 6.9-6.44). W rozdziale tym zawarto także wybrane dane fizyczne materiałów przyjęte w modelu (Tabele 6.1-6.5) oraz przedstawiono i omówiono wyniki obliczeń modelowych w wybranych przekrojach – zarówno dla rur ogrzewanych równomiernie (rys. 6.1-6.9 oraz Tabele 6.6-6.8), jak i nierównomiernie (rys. 6.10-6.24 oraz Tabele 6.9-6.11). W rozdziale 7 scharakteryzowano stanowisko laboratoryjne wykorzystane przez Doktoranta w badaniach eksperymentalnych ukierunkowanych na weryfikację obliczeń modelowych. Dodatkowo, w rozdziale tym krótko omówiono także kluczowe elementy użytej w badaniach instalacji eksperymentalnej. Poza wykonaniem badań i ich analizą, istotny wkład merytoryczny Doktoranta stanowi opracowanie koncepcji modyfikacji układu oraz dobór elementów i dostosowanie instalacji do realizacji badań eksperymentalnych. Treść merytoryczną rozdziału 8 stanowi przedstawienie i omówienie wyników badań eksperymentalnych wykonanych z wykorzystaniem instalacji scharakteryzowanej w rozdziale siódmym wraz z przedstawieniem i omówieniem wyników obliczeń numerycznych uzyskanych z wykorzystaniem modelu stworzonego przez Autora. Podsumowanie i przedstawienie wniosków uzyskanych w efekcie realizacji recenzowanej rozprawy doktorskiej zawiera rozdział dziewiąty – ostatni w pracy.

## **OCENA ROZPRAWY**

Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia, gdyż operatorzy pracujących kotłów i bloków energetycznych siłowni cieplnych muszą brać pod uwagę zarówno aktualne uwarunkowania rynkowe w dziedzinie energetyki, jak i

uwzględniać aspekty ekonomiczne i środowiskowe, związane m.in. z koniecznością eksploatacji starzejącego się parku maszynowego w warunkach dalece odbiegających od projektowych i przy ograniczonych zasobach finansowych oraz coraz ostrzejszych wymaganiach środowiskowych. Powyższe sprawia, że zaproponowana tematyka pracy jest wciąż aktualna, mimo znacznego dotychczasowego dorobku światowej nauki w tym zakresie na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat.

Wyniki uzyskane w ramach realizacji przez mgr inż. Marka MAJDAKA rozprawy doktorskiej niewątpliwie cechuje użyteczność, a zastosowanie opracowanego modelu w praktyce pozwoli na wydłużenie okresu bezpiecznej pracy istniejących kotłów w zmiennych warunkach skutkując lepszym i bardziej efektywnym wykorzystaniem majątku produkcyjnego znajdującego się zarówno w polskich, jak i zagranicznych siłowniach cieplnych – także tych bardziej nowoczesnych, gdzie eksploatowane są kotły wytwarzające czynnik o parametrach nadkrytycznych. W przypadku tych jednostek wytwórczych, predykcja i identyfikacja miejsc elementów ciśnieniowych najbardziej narażonych na uszkodzenia jest szczególnie istotna.

Zdaniem recenzenta, wyniki rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka MAJDAKA stanowią istotny wkład do rozwoju nauki w obszarze szeroko rozumianej energetyki, a opracowanie praktycznego modelu matematycznego i wykonanie obliczeń numerycznych oraz weryfikacja wybranych obliczeń na stanowisku laboratoryjnym jest cenna z punktu widzenia możliwych zastosowań w praktyce dla szacowania rozkładów temperatury na powierzchniach wymienników ciepła, co pozwoli na lepszą predykcję potencjalnych zagrożeń, poprawiając bezpieczeństwo, zwiększając żywotność i czas eksploatacji oraz ograniczając liczbę nieplanowanych odstawień awaryjnych kotłów energetycznych.

#### UWAGI KRYTYCZNE

W efekcie lektury rozprawy nasuwają się jednak także pewne uwagi krytyczne i pytania odnośnie przedstawionej w pracy treści merytorycznej. Najważniejsze z nich to:

1. Rozdział „Cel i zakres pracy” (nr 2 w recenzowanej rozprawie) należałoby – zdaniem recenzenta – nazwać raczej „Cel, tezy i zakres pracy” i chyba umieścić go po części literaturowej (rozdział 3), gdyż jego treść stanowi naturalny wynik przeglądu literatury w danej tematyce i jest jednocześnie wstępem do części eksperymentalnej. W rozdziale 2 niedostateczne jest także jednoznaczne wskazanie tezy pracy – dopiero w kolejnym (trzecim) akapicie rozdziału Autor powołuje się na tezę przedstawioną w akapicie drugim.
2. Autor pisze o „efektywności kotła energetycznego” (str. 10 linia 16), lecz chyba lepiej byłoby tu użyć pojęcia „sprawność”?
3. W kilku miejscach tekst pracy jest zbyt popularnonaukowy – np. pojęcie „zdecydowanie wyższe” (str. 10 linia 19) powinno być poparte jakąś wartością liczbową (konkretnie ile, lub od...do...) – inaczej czytelnikowi pozostaje pole do dość szerokiej interpretacji. Podobne uwagi dotyczą sformułowań typu „zdecydowanie...” (str. 15 linia 6), czy też „znaczące” oraz „wysoki” (str. 37 przedostatni i ostatni akapit), czy też „...w wyższych temperaturach...” (str. 63 przedostatnia linia), „bardzo długich i stosunkowo wąskich” (str. 65), „prawie niezauważalna” i „bardziej zróżnicowanym” (str. 66), czy też „po długiej analizie” (str. 88), „większość elementów” (str. 93).
4. Str. 11 linia 1: nie ma pojęcia „pyłowych kotłów fluidalnych” – są albo kotły pyłowe, albo fluidalne (fluidyzacyjne). Podobnie nieprecyzyjne jest (str. 13 czwarty akapit) użycie określenia „zawieranej strudze paliwa wewnątrz kotła fluidalnego” – w kotle fluidalnym ruch ziaren jest losowy, a w publikacji mówimy o palenisku cyklonowym.
5. W kilku miejscach Autor używa pojęcia „para” (str. 10 linia 11 od dołu) na określenie czynnika roboczego o parametrach nadkrytycznych – z punktu widzenia fizyki należałoby chyba mówić raczej o „czynniku nadkrytycznym”?
6. Zamiast „masowe natężenie przepływu” (str. 29 ponad równaniem 4.43 i str. 34 przedostatnia linia) należałoby chyba użyć terminu „strumień masy”. Mówiąc o wielkości  $[kg/(m^2s)]$  używamy terminu „natężenie strumienia masy” (ang. 'mass flux') w odróżnieniu od „strumienia masy”  $[kg/s]$  ('mass flow').

7. W kilku miejscach (np. str. 30 linia 10; str. 37 linia 8) Autor używa terminów „model matematyczny”, czy też „model numeryczny”. Z punktu widzenia poprawności lingwistycznej należałoby chyba mówić o: modelu fizycznym, opisie matematycznym (modelu fizycznego) oraz rozwiązaniu numerycznym (przyjętego opisu matematycznego). Recenzent zdaje sobie oczywiście sprawę, że potocznie używa się określeń jakimi posługuje się Autor, niemniej jednak proponuję w przyszłości rozważyć tę uwagę – tym bardziej, że (str. 30 linia 10) zwrot „stanowiły podstawę opisu matematycznego” brzmiałby chyba lepiej.
8. Rys. 4.3 – proszę o wyjaśnienie w jaki sposób przyjęto lokalizację punktów 6 i 6' (podobna uwaga dotyczy także odpowiednich pkt. na rys. 5.7).
9. Numeracja długich wieloczłonowych równań (4.55-4.58) powinna znajdować się po ostatnim członie danego równania gdyż ułatwia to lekturę.
10. Rys. 5.1 i odnoszący się do niego odpowiedni fragment tekstu: brak jest odniesienia się Autora do konstrukcji kotła z rurami pionowymi. Proszę o krótki komentarz autora odnośnie tego typu konstrukcji.
11. Opis pod rys. 5.2: czy nie chodzi tutaj o rozkład obciążenia w przekroju poprzecznym?
12. Brak – choćby krótkiego – komentarza odnośnie lokalizacji ekstremów krzywej na rys. 5.3. Z czego one wynikają?
13. Wartości zestawione w Tabelach 6.3 i 6.5 byłyby łatwiejsze do analizy gdyby je przedstawiono w formie graficznej.
14. Z czego wynikał przyjęty model obliczeń i walidacji jedynie dla 3 rur?
15. Czy w przypadku różnic w strumieniu ciepła pochłanianego przez rury (str. 65 pierwszy akapit) nie należałoby założyć różnych prędkości? Proszę o wypowiedź w tej sprawie.
16. Na czym polegała „problematyczność” w konstrukcji modelu CFD o której pisze autor w ostatnim akapicie na str. 65? Ponadto stwierdzenie tamże, iż „zdefiniowano parametry materiału” z wykorzystaniem „zależności aproksymujących” jest chyba niezbyt jasne i precyzyjne.
17. Czy wyniki obliczeń (rozdziały 6.4-6.6) dotyczą przekrojów (45m, 90m i 135m) wzdłuż długości rur czy względem wysokości kotła licząc od dolnego kolektora ekranu?
18. Skala kolorów dla pokazanych wyników (rys. 6.2-6.18) powinna być taka sama – ułatwiałoby to ich porównanie i analizę. Ta sama uwaga dotyczy wyników na rys. 6.19-6.24. Proszę także o wyjaśnienie, dlaczego w niektórych przekrojach (np. rys. 6.3, 6.6, 6.9, 6.12, 6.15, 6.18) część rur ma niekołową geometrię? Ponadto, dyskusja wyników (tekst pod rys. 6.3, 6.6 i 6.9) jest dość uboga, a to jest przecież ważny efekt realizacji pracy i należałoby się pokusić o szersze omówienie i analizę uzyskanych wyników.
19. Podanie wartości temperatur (m.in. Tabela 6.6) z dokładnością do jednego miejsca po przecinku byłoby moim zdaniem wystarczające. Natomiast można by szerzej odnieść się do możliwych przyczyn wyższych wartości błędów dla niektórych punktów charakterystycznych (np. dla danych w Tabeli 6.10 i 6.11).
20. Proszę podać zależność dla wyznaczania rozkładu naprężeń o której wspomina Autor (str. 77 ostatnia linia). Ponadto proszę o odniesienie się do określenia „po przeanalizowaniu wielu wariantów” o którym pisze Autor na str. 78 – co to za warianty, jakie były problemy, jakie uzyskano wyniki, itp.
21. Z czego wynikało maksimum wartości obliczonych naprężeń dla wys. 90m (rys. 6.20 i 6.23) w porównaniu do pozostałych (45m i 135m).
22. Jaki materiał wykorzystano na izolację cieplną stanowiska (rys. 7.1) i jak była jej grubość? Ponadto proszę o wyjaśnienie ograniczeń konstrukcyjnych, które spowodowały konieczność wspawania szerszych płaskowników (pletw). Na rys. 7.1 należałoby także umieścić wymiary prezentowanego układu. Brak opisu poz. nr 7 w podpisie pod tym rysunkiem oraz lokalizacji przepływomierza i miejsc pomiaru temp. wody na wlocie do sekcji pomiarowej. Niezbyt jasne jest także przyjęty układ linii ciągłych i przerywanych. Jaka była objętość zbiornika nr 3 i jak długo trwał pomiar?
23. Rys. 7.10 – proszę o wyjaśnienie wartości na osi X w funkcji danej odległości (opis każdej z krzywych). Ponadto brak jest źródła cytowania w podpisie pod rys. 7.10.

24. Podrozdział 7.2.5: jakiej pasty termoprzewodzącej użyto? Jaka była rola i jak umieszczono magnesy neodymowe?
25. Wyniki w Tabelach 8.1 i 8.2 wygodniej byłoby przedstawić w formie graficznej. Dlaczego błędy względne są wyższe dla danych w Tabeli 8.2? Ponadto (tekst bezpośrednio pod Tabelą 8.2), proszę o wyjaśnienie o jakich problemach z przymocowaniem termopar pisze Autor? Czy na wyniki nie miała też wpływu morfologia i struktura materiału rur oraz jakość spoin?
26. Wnioski sformułowano dość ogólnie – zdaniem recenzenta wygodniej jest je ująć w punktach wraz z podaniem najważniejszych wartości liczbowych (np. odnośnie temperatur, naprężeń, itp.)

Inne drobniejsze uwagi do manuskryptu (głównie techniczno-edycyjne oraz stylistyczne – do ewentualnego wzięcia pod uwagę przez Autora):

- Nierównomierne wyjustowanie spisu treści (główne rozdziały 5-8),
- W wykazie oznaczeń (str. 5) przyjęty symbol 'G' to -zdaniem recenzenta – natężenie strumienia masy [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ] a nie prędkość masowa,
- Brak cytowania literatury w kilku miejscach w tekście rozprawy (np. str. 9 linia 8; str. 12 linia 12).
- Niewielkie niedociągnięcia stylistyczne (str. 10 linia 5; str. 12 linia 11; podrozdział 4.1.2 linia 2 „tempo zmian pędu nagromadzonego”; str. 38 linia trzecia od dołu: zamiast 'po wysokości' należałoby użyć raczej „wzdłuż wysokości”).
- Str. 11 przedostatnia linia: zamiast „czynnik” należałoby chyba użyć słowa „element”.
- Poszczególne pozycje w rozdziałach „Spis ilustracji” oraz „Spis tabel” należałoby wyjustować podobnie jak zrobiono to dla rozdziału „Bibliografia”, gdyż w aktualnym układzie lektura treści jest utrudniona.

## WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Marka MAJDAKA pt. „Ciepłoprzepływowa i wytrzymałościowa analiza pracy ekranów komór paleniskowych” zawiera oryginalne informacje, które mogą być wykorzystane praktycznie, zwłaszcza w zakresie bieżącej kontroli i monitoringu eksploatacji oraz rozwiązywania problemów związanych z pracą kotłów energetycznych w zmiennych warunkach obciążenia (nabór mocy oraz zmniejszanie wydajności). Zaproponowany i zweryfikowany przez Autora model wykorzystać można dla predykcji możliwości wydłużania okresów bezpiecznej pracy tego typu urządzeń, a w ujęciu praktycznym liczyć można zarówno na poprawę ekonomiki konwersji energii w klasycznych siłowniach, jak i na wydłużenie cyklu życia kotłów, co bezpośrednio przedkłada się na pozytywne efekty społeczne i środowiskowe (niższe koszty i emisja zanieczyszczeń, lepsze wykorzystanie zasobów, itp.).

W opinii końcowej chcę podkreślić złożoność problematyki i trudności techniczno-badawcze w obszarze zainteresowań naukowych Doktoranta (zarówno w zakresie modelowania, jak i realizacji obliczeń oraz badań laboratoryjnych), których wyjaśnienie wymagało rozwiązania wielu problemów inżynierskich i naukowych. Mgr inż. Marek MAJDAK wykazał się w tym zakresie wystarczającymi umiejętnościami. Kompozycja i zakres merytoryczny pracy doktorskiej mgr inż. Marka MAJDAKA 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 **wobec powyższego wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Częstochowa, 2021.09.04

