

**prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda**  
**Instytut Techniki Ciepłej**  
**Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa**  
**Politechnika Warszawska**

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Łukasza Rutkowskiego, zatytułowanej „**Bilansowanie energetyczne komór paleniskowych kotłów rusztowych średniej mocy – eksperymentalna weryfikacja metod**”

### **1. Podstawa formalna. Sylwetka Doktoranta**

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 4.03.2022 r. w wyniku uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka tej Uczelni z dnia 17.02.2022 r.

Dane dotyczące sylwetki Doktoranta, mgr inż. Łukasza Rutkowskiego, wymagane w treści niniejszej recenzji zgodnie z zapisami podanymi w zleceniu Przewodniczącego Rady przedstawione zostały w dokumencie stanowiącym załącznik do niniejszej recenzji.

Według mojej wiedzy Doktorant nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

### **2. Zasadność podjęcia tematu**

Kotły rusztowe stanowią ważny komponent infrastruktury należącej do instalacji ciepłowniczych i energetycznych działających w małej i średniej skali, przede wszystkim w ciepłownictwie. Tylko w zakresie mocy obiektów odpowiadających instalacjom LCP liczba jednostek kotłowych tej kategorii, o mocy z zakresu od 15 do 50 MW działających w Polsce to blisko 700. Dochodzi do tego znacząca liczba jednostek kwalifikowanych do obiektów kategorii MCP, a więc ulokowanych w obiektach o mocy dostarczanej w paliwie poniżej 50 MW, bądź nie podlegających agregacji mocy w przepisach dotyczących wymogów środowiskowych.

Polska użytkuje najwięcej kotłów rusztowych w Europie. Są to w przeważającej mierze jednostki opalane węglem kamiennym. Jako kraj dysponujemy znaczącym potencjałem produkcyjnym, zlokalizowanym przede wszystkim w dużych wytwórniach kotłowych (RaFaKo, SeFaKo). Sędziszowska Fabryka Kotłów (SeFaKo) jest jednym z kluczowych producentów kotłów rusztowych w naszym kraju, w tym znaczącym eksporterem.

Obecnie mamy do czynienia z silnym naciskiem na rezygnację z wykorzystania węgla do celów energetycznych. Polska, w ramach Krajowego Planu na Rzecz Energii i Klimatu (KPEiK) złożonego w grudniu 2019 do Komisji Europejskiej, zobowiązała się do działań na rzecz eliminacji węgla z ciepłownictwa indywidualnego. Zostało to potwierdzone w Polityce Energetycznej Polski do roku 2040. Deklarowana także rezygnacja z wykorzystania węgla w ciepłownictwie scentralizowanym do roku 2035 wyznacza stosunkowo już krótki (kilkunastoletni) horyzont czasowy użytkowania w naszym kraju dla węglowych

ciepłowniczych kotłów rusztowych średniej mocy. Nie wyklucza to jednak innych, bardziej perspektywicznych zastosowań technologii rusztowej, związanych ze spalaniem paliw biomasowych oraz z zakresu termicznej utylizacji odpadów. W tym ostatnim przypadku mamy do czynienia z potencjalnie szerokim rozwojem zapotrzebowania. Istotnym wątkiem pozostaje także bieżące dostosowywanie pracujących jednostek węglowych do zaostrożanych wymogów emisyjnych, co wiąże się z zapotrzebowaniem na kompetencje w zakresie doskonalenia pod tym względem konstrukcji, przede wszystkim w obiektach istniejących. Oznacza to zapotrzebowanie na utrzymanie, a także rozwijanie wiedzy z zakresu doskonalenia konstrukcji kotłów rusztowych.

Politechnika Śląska, a w szczególności Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki tej Uczelni to kluczowy w Polsce ośrodek akademicki, w którym rozwijane są od dawna szerokie kompetencje w zakresie techniki kotłowej. Mgr inż. Łukasz Rutkowski łączy zatrudnienie w SeFaKo z przewodem doktorskim realizowanym w strukturach Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej. Dobór tematyki rozprawy związany z syntezą wiedzy na temat metod projektowania kotłów (rusztowych) oraz ich dostosowaniem do restrykcji środowiskowych jest moim zdaniem w pełni trafny, odpowiada potrzebom technicznym oraz stanowi interesujące pole do prac o charakterze badawczym.

### 3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Rozprawa dotyczy analizy zastosowania metod obliczeniowych komór paleniskowych dużych kotłów energetycznych dla mniejszych jednostek rusztowych. Rozważania w niej prezentowane oparte są na wskazanej przez Doktoranta tezie podstawowej, sformułowanej następująco: *Metody obliczeniowe komór paleniskowych dużych kotłów energetycznych mogą być z sukcesem stosowane dla mniejszych jednostek rusztowych, pomimo różnic konstrukcyjnych.*

Oceniana rozprawa podzielona została na 9 ponumerowanych rozdziałów, w tym trzy stanowią „Wstęp”, „Cel i zakres oraz tezy pracy” oraz „Podsumowanie i wnioski końcowe”. Jej uzupełnienie stanowi załącznik zatytułowany: *Określenie obciążenia cieplnego ścian komory paleniskowej.*

Bibliografia cytowana w rozprawie zawiera bardzo dużą liczbę, bo aż 229 pozycji, autor nie zamieścił na tej liście własnych prac. Doktorant jest współautorem publikowanej w recenzowanym czasopiśmie naukowym (Archives of Thermodynamics), spełnia tym samym warunki ustawowe do otwarcia i przeprowadzenia przewodu doktorskiego.

Krótki rozdział 3 dotyczy obowiązujących w Polsce norm dotyczących projektowania i eksploatacji kotłów oraz Dyrektywy 97/23/EC dotyczącej urządzeń ciśnieniowych, zharmonizowanej z normą PN-EN 12952.

W rozdziale 4, zatytułowanym *Przegląd literatury* Doktorant przedstawił w postaci starannie opracowanego rysu historycznego zmiany w metodyce obliczeń cieplnych komór paleniskowych kotłów, ze szczególnym wskazaniem na metody mające cechy normatywnych, w tym kolejnych edycji metody CKTI. Autor rozprawy wskazał tu także na rozwój zaawansowanych technik komputerowych zaznaczając możliwość poprawy skuteczności i skrócenia procesu obliczeniowego.

Rozdział 5 poświęcony został omówieniu budowy kotłów rusztowych z napędzanym mechanicznie rusztem taśmowym, które Doktorant obrał sobie za obiekt rozważań. W sposób czytelny i przystępny omówione zostały podstawowe procesy charakterystyczne dla konstrukcji takich rusztów, z uwzględnieniem najbardziej istotnych cech konstrukcji i przebiegu charakterystycznych etapów procesu spalania.

Rozwinięcie informacji dotyczących strony konstrukcyjnej i bilansowej stanowi rozdział 6 pracy, w którym opisane zostały wodne kotły rusztowe WR-10 i WR-40 stanowiące szczegółowe obiekty rozważań w części obliczeniowej rozprawy. Opisane zostały schematy układów przepływowych obu kotłów po stronie wodnej, sylwetki ze wskazaniem rozkładu powierzchni ogrzewalnych i ich układy pomiarowe. W obu przypadkach podstawę do przeprowadzonych w dalszej części rozprawy obliczeń stanowiły wyniki pomiarów gwarancyjnych, stwarzające możliwość skompletowania informacji dotyczących pracy w warunkach ustalonych dla charakterystycznych stanów obciążenia. Podsumowanie wyników pomiarów stanowią bilanse cieplne obu kotłów, ze wskazaniem rozdziału ciepła pomiędzy poszczególne powierzchnie ogrzewalne, strat, wyznaczoną temperaturą spalin na wylocie z komory paleniskowej oraz opisem stechiometrii procesu spalania.

Jednym z dwóch kluczowych dla pracy jest najbardziej rozległy, liczący ponad 80 stron rozdział 7 zawierający opis poddanych analizie metod obliczania komory paleniskowej kotłów rusztowych. Przedmiotem opisu i analiz są cztery kategorie metod sklasyfikowanych jako:

- metoda teoretyczna oparta na podstawowych bilansach wewnątrz komory i uwzględniająca zachodzące w niej zjawiska,
- metody określone mianem zachodnich opisane w poddanych przez Doktoranta analizie publikacjach,
- metody rosyjskie (radzieckie), przede wszystkim kolejne edycje metody normatywnej CKTI,
- metoda CFD oparta na rozwiązywaniu równań różniczkowych w obszarze elementów dyskretnych.

Zgodnie z tytułem pracy Autor zajął się jedynie tą częścią obliczeń cieplnych kotłów, która dotyczy bilansowania energetycznego komór paleniskowych i kończy się na wyznaczeniu temperatury spalin na ich wylocie. Charakterystykę poszczególnych metod ujęto w czytelnej formie obejmującej każdorazowo prezentację schematów obliczeń cieplnych w formie blokowej, opis algorytmu w postaci równań, ewentualnie stanowiących ich uzupełnienie wykresów czy nomogramów służących wyznaczeniu określanych empirycznie współczynników korekcyjnych do równań. Całość rozdziału stanowi unikalne kompendium informacji o kluczowej, z punktu widzenia celu rozprawy części obliczeń cieplnych kotłów, opatrzone dodatkowymi analizami odnoszącymi się do rozważanej w rozprawie kategorii kotłów z rusztem taśmowym. W ostatniej części, poświęconej metodzie CFD zademonstrowany został model obliczeniowy obu rozpatrywanych jednostek kotłowych, przygotowany dla komory paleniskowej w środowisku oprogramowania Ansys Fluent. Komponent uzupełniający i współzależny stanowi tu model rusztu w którym w obu kotłach zastosowano podział na 7 stref, z uwzględnieniem lokalizacji wlotów powietrza pierwotnego. Przyjęte założenia i uproszczenia są, moim zdaniem, adekwatne do potrzeb wynikających z podjętego zadania. W obliczeniach uwzględniono 2 stany pracy dla kotła WR40 (praca podstawowa oraz praca szczytowa) oraz 4 stany dla kotła WR10 (obciążenie 35%, 68%, 100% oraz 135%).

Cała rozprawa została skomponowana logicznie. Jej treść ułożona została w postaci zawartej w kolejnych rozdziałach sekwencji informacji wprowadzających czytelnika w kolejne aspekty rozważanego problemu naukowego. Istotnymi jej walorami są: charakter aplikacyjny oraz realizacja we współpracy pomiędzy podmiotem przemysłowym (tu SeFaKo) a ośrodkiem badawczym. Unikalne wyniki stanowią porównawcze rezultaty obliczeń cieplnych komór paleniskowych dwóch rozpatrywanych kotłów rusztowych z wykorzystaniem szerokiej puli prezentowanych w rozprawie metod skonfrontowanych z wynikami obliczeń opartych na CFD.

Strona redakcyjna rozprawy została oceniona w kolejnym rozdziale niniejszej opinii.

### 3. Uwagi krytyczne, uwagi redakcyjne

Podkreślam, że przygotowanie rozprawy, w której ujęto szczegółowy opis szeregu różnych modeli, opisanych za pomocą równań o często skomplikowanej budowie było zadaniem bardzo pracochłonnym i obciążonym wysokim ryzykiem pomyłek w ich opisie. Duży nakład pracy na opracowanie koncepcji, przygotowanie i realizację obliczeń, estymacji współczynników empirycznych oraz walidacji modeli cząstkowych mógł także być źródłem trudności w bezbłędnym przygotowaniu strony redakcyjnej. Po lekturze pracy uważam, że liczba usterek o charakterze redakcyjnym, w postaci literówek, pomyłek, czy nie do końca zweryfikowanych informacji jest w ocenianej rozprawie stosunkowo niewielka.

Przykładowe usterki redakcyjne wymieniam poniżej:

- str. 11, pierwszy wiersz w treści rozdziału 2, słowo „przestawiono” należy zastąpić wyrazem „przedstawiono”;
- str. 21, trzy ostatnie akapity zawierają różne sposoby odwołania do rysunków, to znaczy, na końcu trzeciego akapitu od dołu (rys.1 i rys.2), na końcu drugiego akapitu od dołu (rysunek 3), w ostatnim akapicie (Rysunek 4), brak przyjętego konsekwentnie systemu odwołań do rysunków ma miejsce również w innych miejscach w dalszej części rozprawy;
- str. 44, ostatnia linia o treści: „Ilość ciepła odebrana przez  $1\text{ m}^2$  powierzchni  $F_2$  można wyznaczyć z zależności:” powinna zostać zastąpiona informacją „Ilość ciepła odebraną przez  $1\text{ m}^2$  powierzchni  $F_2$  od  $1\text{ m}^2$  powierzchni  $F_1$  można wyznaczyć z zależności:”. stanowi to warunek spójności równania (2) z równaniem (1) w sąsiadującym tekście;
- str. 49, zdanie na początku trzeciego akapitu „Całkowity współczynnik promieniowania  $C$  występujący w równaniach (5), (7) oraz (8) jest zależny od ...” sugeruję skorygować do postaci: „Całkowity współczynnik promieniowania  $C$  występujący w równaniach (2), (6) oraz (7) jest zależny od ...” jako, że w tych równaniach symbolu  $C$  użyto;
- str. 54, zdanie pod równaniem (38): „Prawa strona równania to różnica pomiędzy ciepłem zawartym w spalinach na wylocie z komory paleniskowej a temperaturą otoczenia jest wyrażona wyrażeniem.” wymaga moim zdaniem korekty, oczekuję propozycji od Autora rozprawy;
- str. 55, podpis pod rysunkiem 20 nie odpowiada treści rysunku. Jak należy rozumieć z wcześniejszego komentarza treść rysunku dotyczy wartości współczynnika  $f_v$  uwzględniającego stopień zanieczyszczenia powierzchni popiołem, w funkcji stopnia tego zanieczyszczenia;
- str. 55, ostatnia linia, słowo „postać”, pojawił się znak specjalny miejsce litery „s”, podobnie jest w słowie „współczynnik” na początku strony 56 oraz na stronie 66 nad wzorem (102), kolejne przykłady dotyczą strony 100, gdzie w miejsce litery „s” pojawiają

się te same znaki specjalne. Przyczyną jest prawdopodobnie niewłaściwie zdefiniowany lokalnie typ czcionki;

- str. 76, komentarz na dole „Pozostałe składniki wzoru (140) można zapisać jako”, wyrażenie ze wzoru (142) nie występuje we wzorze (140);
- str. 84, odwołanie do zależności (245) pod wzorem (190), sądząc po treści równania (245) nastąpiła pomyłka;
- str. 107 odwołanie do rysunku 49 nad wzorem (244), z treści wynika, że Autor chciał odwołać się do schematu blokowego na rysunku 47.

Szczegółowy wykaz zauważonych usterek tego typu zostanie przedstawiony Doktorantowi w opiniowanym egzemplarzu rozprawy.

Inną kategorię niedociągnięć w treści rozprawy skomentowałem poniżej zwracając się z prośbą do Doktoranta o przedstawienie jego wyjaśnień i komentarzy, ewentualnie również uwzględnienie przy ewentualnej przyszłej publikacji wyników pracy.

Niekompletny jest wykaz oznaczeń. Rozprawa zawiera w treści bardzo dużą liczbę wzorów, w tym dotyczących opisu różnych rozważanych metod obliczeń komory paleniskowej. Autor zaznaczył, że starał się zachować w tej części rozprawy oznaczenia oryginalne, ujednolicając tylko najważniejsze, odnoszące się do porównywanych dalej wyników obliczeń. Braki w wykazie dotyczą również tych oznaczeń które wykorzystano w części odnoszącej się do wzorów nie związanych z opisem poszczególnych metod obliczeń komór paleniskowych. Tu braki również występują. W opisie wzorów Doktorant przyjął zasadę opisywania wprowadzanych oznaczeń również bezpośrednio w sąsiedztwie komentowanych równań, ale często niektóre objaśnienia zostały pominięte, brak ich również w wykazie oznaczeń utrudnia niekiedy analizę tekstu. Przykład stanowi fragment zdania poprzedzającego wzór (10) i do niego się odnoszący: „Względem całej powierzchni opromieniowanej umożliwia to obliczenie stosunku kąтового dla całej powierzchni rusztu  $R$  względem całej powierzchni opromieniowanej jako:”. W równaniu (10) pojawia się oznaczenie  $R_r$  które należy w tym kontekście rozumieć jako całą powierzchnię opromieniowaną, choć Autor nie zaznaczył tego w komentarzu. Pojawia się też oznaczenie  $R$  odnoszące się do rusztu jako takiego oraz wielkości  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  itd. odnoszące się do kolejnych pasków rusztu (z postaci wzoru (10) oraz z rys. 17 wynika, że chodzi tu o wymiar liniowy). W wykazie oznaczeń symbol  $R$  opisano jako promień równoważny, jako symbol powierzchni wskazano zaś  $F$ , używany w opisie szeregu wzorów przytoczonych na stronach poprzedzających, do powierzchni opromieniowanej  $H_{opr}$  co zaznaczono w wykazie oznaczeń oraz wykorzystano we wzorze (13). We wzorach (21) oraz (22) pojawia się oznaczenie  $A_{sc}$  odpowiadające powierzchni opromieniowanej, jak można wnioskować z opisu nad wzorem (21), choć symbol ten nie został w nim użyty. Również oznaczenie  $A$  nie figuruje w wykazie jako symbolizujące powierzchnię.

Doktorant przyjął podział rusztu na strefy w przypadku obu rozważanych kotłów. Rozkład parametrów w poszczególnych strefach został zilustrowany odpowiednio, dla kotła WR40 na rysunku 48, a dla kotła WR10 na rysunku 49. W przypadku kotła WR40 odwzorowane są dwa stany pracy, w przypadku kotła WR10 cztery. Nadmiar powietrza nad rusztem jest każdorazowo inny, rozkład temperatury oraz rozkład poszczególnych stref odpowiadających suszeniu, pirolizie i gazyfikacji jest taki sam. Czy to uproszczenie nie było zbyt daleko idącym?

Oczekiwałbym szerszego komentarza ze strony Doktoranta do wyników uzyskanych w wyniku analizy numerycznej odnoszącej się do wykorzystanych w tym celu wyników pomiarów kotłów WR10 oraz WR40. Poziom temperatury znacząco przekraczającej wartości 1000°C w komorze paleniskowej kotła WR10 (rysunek 53) podobnie dla kotła WR40 (rys.54) i związane wartości uśrednione przedstawione na rysunkach 55 oraz 56 znacząco odbiegają w górę od wartości, których bym tu oczekiwał. Chciałbym się upewnić czy Doktorant dysponował stosownymi wynikami pomiarów temperatury w obrębie strefy nad rusztem dla rozważanych sesji pomiarowych, lub w ogólności dla wodnych kotłów rusztowych oraz czy próbował takie wyniki konfrontować z rezultatami uzyskanymi w przeprowadzonych obliczeniach.

Przedstawione w rozprawie wyniki obliczeń CFD dotyczą wyłącznie rozkładu temperatury. Zbudowanie tego modelu wymagało jednak przeprowadzenia symulacji w której pojawiły się zapewne wyniki dla rozptywu i prędkości strumienia powietrza/spalin. Jak rozumiem, cel pracy związany był z wyznaczeniem wartości temperatury na wylocie komory paleniskowej, ale analiza wyników uzyskanych dla innych parametrów mogła być pomocna w ocenie poprawności uzyskanych rezultatów.

Jak mi się wydaje, w przeprowadzonych obliczeniach CFD Doktorant nie uwzględnił obecności festonu w strefie wyprowadzenia spalin z komory paleniskowej. Skutkuje to nieco innym od oczekiwanego w analizowanych przypadkach rozkładu temperatury w komorze. Obecność powierzchni ogrzewalnych kotła w strefie wyprowadzenia spalin powodować powinno zauważalne odsunięcie ich strugi w kierunku ściany przedniej i pojawienie się wyższej temperatury w wyżej położonych strefach w jej sąsiedztwie. Tu również moja prośba o komentarz.

Jeśli porównamy rozkład temperatury w strefie nad rusztem uzyskany dla kotła WR10 (rys.53) oraz dla kotła WR40 (rys.54) daje się zauważyć charakterystyczną różnicę. Na rysunku 54 strefa wysokiej temperatury jest odsunięta od dolnej powierzchni na rysunku na kolejnych odcinkach odpowiadających prawdopodobnie kolejnym strefom doprowadzenia powietrza pierwotnego. Liczba stref podmuchu jest w obu kotłach taka sama. Charakter rozkładu temperatury w dolnej strefie komory w przypadku kotła WR40 jest tu istotnie różny. Występuje wyraźnie tylko jedna taka strefa – w sąsiedztwie przedniej ściany komory. Mam prośbę do Doktoranta o skomentowanie, a jeśli możliwe, o wyjaśnienie przyczyny tego zróżnicowania.

Wątpliwość budzi opis przedstawiony w zdaniu zaczynającym się na dole strony 145: „*W wyniku tego przepływająca woda w kierunku przeciwnym do tworzących się pęcherzyków pary może zdławić strumień czynnika a w skrajnym przypadku całkowicie go zablokować*”. Chodzi tu o komentarz do sytuacji w której obieg wody w kotle zostanie nieprawidłowo zaprojektowany, na przykład dla ścian w których przepływ wody jest skierowany w dół. W niesprzyjającym przypadku może dochodzić do lokalnego odparowania tej wody i tym samym możliwości spowolnienia, czy nawet zablokowania jej przepływu na skutek pojawienia się pęcherzyków parowych. Mam wrażenie, że w tej sytuacji to pęcherze pary stanowić mogą czynnik dławiący przepływ wody, a nie odwrotnie.

#### **4. Ostateczna ocena pracy**

Do osiągnięć własnych Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, według mojej oceny, zaliczyć:

- przygotowanie unikalnego przeglądu metod obliczeń bilansowych komór paleniskowych dużych kotłów energetycznych oraz weryfikację możliwości wykorzystania ich dla potrzeb obliczeniowych w odniesieniu do kotłów rusztowych (średniej mocy);
- twórcze wykorzystanie tych metod do obliczeń porównawczych dla kotłów rusztowych (badań empirycznych) włącznie z analizami opartymi na obliczeniach CFD oraz zestawienie i ocenę wyników obliczeń dla wspólnego zestawu danych wejściowych .

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, a Doktorant zrealizował postawione sobie cele, w tym zweryfikował postawione w pracy hipotezy badawcze. Uważam, że należy podkreślić wysoką pracowitość, poziom i użyteczny charakter przeprowadzonych badań.

Autor rozprawy, mgr inż. Łukasz Rutkowski, wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, niezbędną do przygotowania rozprawy. Wynika to jednoznacznie z jej treści.

Na podstawie przedstawionej do recenzji rozprawy stwierdzam, że jej Autor, mgr inż. Łukasz Rutkowski wykazał opanowanie podstaw teoretycznych badanego problemu, umiejętność formułowania zadania naukowego, znajomość stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej z pracą oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Będąca przedmiotem oceny rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Rutkowskiego **pt.: „Bilansowanie energetyczne komór paleniskowych kotłów rusztowych średniej mocy – eksperymentalna weryfikacja metod”** spełnia wymogi określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. W oparciu o powyższe stawiam wniosek o skierowanie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.



