



Prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński  
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny  
Katedra Energetyki  
75 – 620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17  
Tel. 94 3478-420,438  
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin, 29.03.2022 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Rutkowskiego pt.:  
„Bilansowanie energetyczne komór paleniskowych kotłów  
rusztowych średniej mocy – eksperymentalna weryfikacja metod  
obliczeniowych”

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina w oparciu o pismo nr RIE-BD.512.7.2022 z dnia 04.03.2022 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **prof. dr hab. inż. Ireneusza Szczygła**

### 1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza możliwości wykorzystania numerycznych metod obliczeniowych (CFD) opartych o rozwiązania dostępne w kodzie oprogramowania Ansys Fluent, do identyfikacji funkcjonowania komór paleniskowych kotłów energetycznych. W szczególności przeprowadzono rozpoznanie możliwości zastosowania powszechnie stosowanych rozwiązań dla dużych kotłów energetycznych w odniesieniu do mniejszych jednostek rusztowych. W przeprowadzonej analizie literatury, wymieniono stosowane obecnie metody obliczeniowe palenisk urządzeń kotłowych. W oparciu o te informacje w przedstawionej dysertacji, zastosowano algorytm SIMPLE uwzględniający relacje między współczynnikami prędkości i ciśnienia oraz model typu *Second-Order Upwind Scheme* w celu wyznaczenia algebraicznych równań modelu dyskretnego. Oparte są one o równania zachowania masy, energii, pędu oraz reakcji chemicznych w postaci uśrednionych równań *Naviera-Stokesa* i *Reynoldsa*. W szczególności wykorzystano w opisanym procesie modelowania: model standardowy turbulencji *k-ε*, model promieniowania *Discrete Ordinates* (DO) oraz model spalania odnoszący się do fazy gazowej z obliczeniami metodami Arrheniusa i z uwzględnieniem dyssypacji *Eddy-dissipation Magnussena* i *Hiertagera* w celu wyznaczenia wzajemnych zależności pomiędzy turbulencją i reakcjami chemicznymi.

W oparciu o powyższe informacje, wykonano obliczenia dla palenisk kotłów energetycznych wodnych z paleniskiem rusztowym typu WR40 i WR10. Uzyskane wyniki zweryfikowano w odniesieniu do rzeczywistych badań, które uzyskano podczas pomiarów rzeczywistych tych

obiektów prowadzonych podczas odbiorów gwarancyjnych lub bezpośrednio z urządzeń pomiarowych kotłów. Podstawą podjęcia tego tematu w przedstawionej dysertacji, jest fakt, że metody stosowane w obliczeniach komór paleniskowych nie są ujednolicone i opierają się na odmiennych założeniach. Wynika to z konieczności przyjęcia odpowiednich warunków brzegowych w procesie modelowania, wynikających z indywidualnych rozwiązań konstrukcyjnych tych jednostek. Założenia te są konieczne niezależnie od rozpatrywanych obiektów oraz skali ich wielkości. Obecnie w literaturze przedmiotu, identyfikuje się np. metody opracowane dla dużych kotłów energetycznych wodnych i parowych o paleniskach pyłowych. Istotnym jest fakt, że rozwiązania te mogą być z powodzeniem stosowane w mniejszych jednostkach, o innym charakterze pracy wynikającym z innej konstrukcji paleniska np. rusztowych lub czynnika transportującego energię cieplną (woda). Podobieństwo tych metod wynika z takiego samego sposobu wyznaczania geometrii palenisk urządzeń kotłowych i parametrów ich pracy opartych o te same zależności.

## 2. Omówienie struktury i treści pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 168 stronach w 9 rozdziałach z wykazem oznaczeń, literatury, załącznikiem oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. W rozdziale pierwszym zatytułowanym **Wstęp**, przedstawiono uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy doktorskiej. Wskazano na problemy związane z procesem projektowania urządzeń kotłowych w oparciu o stosowane normy i branżowe pozycje literaturowe. Zwrócono uwagę na konieczność zastosowania indywidualnych, jednostkowych rozwiązań projektowych i konstrukcyjnych oraz na fakt, że dotyczą one tzw. dużych urządzeń. Stwierdzono, że istnieje możliwość wykorzystania modeli obliczeniowych opracowanych dla tego typu jednostek również dla tzw. małych urządzeń kotłowych. Na tej podstawie w **rozdziale 2 pt. Cel, zakres oraz teza pracy**, przedstawiono zakres realizacji rozprawy doktorskiej oraz postawione tezy. Kolejny **rozdział 3 Normy i dyrektywy dotyczące projektowania i eksploatacji kotłów obowiązujące w Polsce**, to wykaz norm i aktów prawnych europejskich i polskich regulujących zasady projektowania i funkcjonowania urządzeń kotłowych. W **rozdziale 4 pt.: Przegląd literatury**, opisano w ujęciu historycznym metody obliczeń i projektowania urządzeń kotłowych. Wykaz ten zredagowano chronologicznie poczynając od informacji odnoszących się do rozwiązań stosowanych już w XIX w., aż do obecnie wykorzystywanych. Wskazano tutaj na metody opracowane w krajach zachodnich i w Rosji oraz obecnie stosowanych w Polsce o akronimie CKTI, czyli metoda normatywna o edycji zależnej o roku publikacji. **Rozdział 5 Kotły rusztowe. Budowa i podstawowe informacje**, poświęcony został jak sam tytuł wskazuje na opis tego typu urządzeń. Umieszczono w nim informacje o budowie rusztów taśmowych i procesach spalania na nich paliwa. Zilustrowano to odpowiednimi schematami oraz rysunkami i zdjęciami. Rozdział ten bezpośrednio nawiązuje do następnego **szóstego**, w którym umieszczono **Dane i parametry ruchowe badanych kotłów. Opis techniczny kotłów WR10 i WR40** będących przedmiotem analizy numerycznej w tej rozprawie umieszczono w **podrozdziale 6.1**. Podano tutaj podstawowe informacje dotyczące rozwiązań konstrukcyjnych tych urządzeń. W **podrozdziale 6.2**, umieszczono informacje o sposobie pozyskania danych pomiarowych dla rozpatrywanych kotłów. **Podrozdział 6.2.1**. Zawiera dane dla kotła WR40 z **Pomiarów gwarancyjnych (podrodz. 6.2.1.1.) i Pomiarów ruchowych (podrodz. 6.2.1.2.)**, a w **podrozdz. 6.2.1.3. Analizę wyników pomiarów kotła WR40**. Informacje o tym samym charakterze przedstawiono dla kotła WR10 w **podrozdziale 6.2.2**. W obu przypadkach uzyskane wyniki i ich analizę zaprezentowano w tabelach z odpowiednimi schematami rozpatrywanych kotłów. Kolejny **podrozdział 6.3. Badanie modeli** zawiera składowe bilan-

su cieplnego badanych kotłów, przedstawione w formie graficznej mającej postać diagramów Sankeya.

W rozdziale 7 o tytule **Metodyki obliczania komory paleniskowej kotłów rusztowych**, w poszczególnych podrozdziałach przedstawiono metody obliczeniowe stosowane do opisu komór paleniskowych kotłów. Metody te, to: **(podrozdz. 7.1) Metody teoretyczne wykorzystujące podstawowe prawa fizyczne**, **(podrozdz. 7.2) Metody zachodnie**, opracowane przez świat naukowy z państw zachodnich w osobach Orroka i Hudsona, Wohlenberga w 1925 r., Zinnena z 1950 i 1957 r., Ledinego z 1952 i 1966 r., **(podrozdz. 7.3) Metody badaczy radzieckich**, opracowane przez Konakowa w 1951 r. wraz z kolejnymi modyfikacjami, Gurewicza wraz z zespołem w 1937, 1945 i 1951 roku, określone, jako normatywne. Podlegały one kolejnym modyfikacjom i zostały one przedstawione, jako wydanie pierwsze w 1957 i wydanie drugie w 1973 roku. Natomiast w tym samym 1973 roku miało miejsce kolejne rozwinięcie metody normatywnej przedstawione przez A.G. Blokha i ostatnie, jako wydanie trzecie w 1998 roku. W międzyczasie miały miejsce kolejne modyfikacje metod normatywnych wykonane przez różnych autorów, co w konsekwencji doprowadziło do możliwości ich wykorzystania powstania specjalistycznych oprogramowań służących do obliczeń cieplnych kotłów. W **podrozdz. 7.4. Metody numeryczne**, ostatnim dotyczącym sposobów modelowania pracy palenisk kotłowych, przedstawiono zasady wykorzystania tych metod (CFD). Oparte są one na rozwiązaniu równań różniczkowych metodami elementów skończonych (MES). Standardowo metody te są oparte o zasadę zachowania ilości substancji, pędu, energii z uwzględnieniem oddziaływania otoczenia (sił zewnętrznych). W opracowaniu do modelowania pracy kotłów WR40 i WR10 zastosowano jeden z najpopularniejszych i najczęściej wykorzystywanych w tego typu obliczeniach środowisk Ansys Fluent. Założenia do przeprowadzonych obliczeń wybranych urządzeń kotłowych przedstawiono w **podrozdz. 7.4.1. Model obliczeniowy w środowisku Ansys Fluent**. Zaproponowano tutaj odpowiednie warunki brzegowe i uproszczenia. Pozwoliło to na stworzenie dwóch siatek obliczeniowych typu Tet4 (złożona z czworościanów) i Quad (sześciiany). Zastosowane uproszczenia dotyczyły przede wszystkim rozkładu temperatury ścianek wewnątrz komory paleniskowej pozwoliło na zastosowanie algorytmu UDF (User Defined Function), czyli funkcje własne użytkownika. Następnie w **podrozdz. 7.4.1.1. Zastosowane modele w analizie numerycznej i uproszczenia**, stosując algorytm SAMPLE i poszczególne modele: standardowy turbulencji  $k-\epsilon$ , promieniowania *Discret Ordinates* (DO) oraz spalania przedstawiono wyniki uzyskanych obliczeń modelowych w **podrozdz. 7.4.2. Wyniki analizy numerycznej kotłów WR10 i WR40**. Następnie w **rozdziale 8 pt.: Analiza oraz interpretacja wyników obliczeniowych** jak sama nazwa wskazuje, zaprezentowano ocenę uzyskanych wyników obliczeń modelowych. Uczyniono to w formie tabelarycznej w odniesieniu do zastosowanych 14 metod, pośród których 6 to kolejne warianty metody normatywnej określanej, jako CKTI od nazwy Centralny Kotłowo-Turbinowy Instytut w Leningradzie w kolejnych wariantach, 2 według metody Orroka-Hudsona, metody CFD i resztę, jako pozostałych. Wyniki badań obliczeniowych porównano z eksperymentalnymi uzyskanymi według opisanych wyżej metod dla obu rozpatrywanych kotłów.

W **podrozdz. 8.1. Wpływ obciążenia kotłów** przedstawiono wyniki wpływu tego parametru na funkcjonowanie palenisk badanych kotłów. Uczyniono to w formie tabelarycznej dla wszystkich opisanych w pracy metod. Analiza ta dotyczyła określenia wpływu zmiany obciążenia komory paleniskowej kotła na temperaturę spalin na wyjściu z paleniska. Następnie w **podrozdz. 8.2. Wpływ metody na temperaturę obliczeniową na wylocie z komory paleniskowej**, przedstawiono wynik porównania temperatur obliczeniowych z eksperymentalnymi dla badanych kotłów.

W następnym **rozdziale 9 Podsumowanie i wnioski końcowe**, opisano strukturę przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej wraz z opisem poszczególnych jej działów. Istotnym elementem jest tutaj natomiast stwierdzenie dotyczące weryfikacji tez postawionych w pracy w rozdziale 2 oraz stwierdzenie dotyczące realizacji postawionego celu. Podano również, z jakiego powodu nie uwzględniono wszystkich aspektów dotyczących obszaru rozpatrywanego w tej rozprawie doktorskiej.

Kolejnym w dysertacji jest **wykaz Literatury**, w którym umieszczono 229 publikacji, z czego 144 to pozycje zwarte i 85 artykułów naukowych. Niestety pośród nich nie zidentyfikowano żadnej pozycji, której autorem lub współautorem byłby Doktorant. Niemniej pod względem merytorycznym i ilościowym wykaz ten jest odpowiedni.

Następnie w pracy umieszczono **Załącznik 1. Określenie obciążenia cieplnego ścian komory paleniskowej**, gdzie przedstawiono metodykę wykorzystaną do modelowania w programie CFD pracy komór paleniskowych badanych kotłów.

Ostatnim elementem w dysertacji są streszczenia w języku polskim oraz angielskim.

### 3. Oryginalność pracy

Za główne osiągnięcie pracy doktorskiej należy uznać przeprowadzenie analizy możliwości wykorzystania różnych rozwiązań modelowania i obliczania palenisk urządzeń kotłowych z weryfikacją ich przeniesienia z tzw. instalacji dużych mocy na mniejsze gdzie medium pośredniczącym jest woda. Stwierdzono, że najczęściej stosowana w Polsce normatywna metoda opublikowana w 1973 roku wykazuje dużą zgodność w odniesieniu do pomiarów wykonanych podczas przeglądów gwarancyjnych tych urządzeń. Dotyczy to identyfikacji temperatury spalin na wylocie z paleniska. Natomiast w przedstawionej do oceny pracy wykonano obliczenia za pomocą kolejnych edycji tej metody, co nie jest odnotowywane w przypadku prac projektowych turządzeń kotłowych w Polsce. Należy uznać, że jest to istotny element uzupełniający wiedzę z tego zakresu. W odniesieniu do innych metod, stwierdzono, że nie ma jednoznacznej odpowiedzi co do ich dokładności w przypadku nowych konstrukcji i ich oddziaływaniu na środowisko. Pojawienie się możliwości zastosowania oprogramowania typu CFD a w szczególności pakietu Ansys Fluent, w projektowaniu urządzeń kotłowych, stworzyło nowe obszary do identyfikacji istotnych elementów ich funkcjonowania. W pracy również podjęto taką próbę, wykazując zasadność stosowania technik numerycznych w analizie funkcjonowania urządzeń kotłowych i walidacji tworzonych w tym celu modeli matematycznych.

### 4. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Oceniając stronę redakcyjną opracowania należy stwierdzić, że wykonano je w sposób poprawny. Pojawiają się nieliczne błędy edycyjne, takie jak:

1. W spisie oznaczeń zatytułowanym **Spis oznaczeń i symboli**, w przypadku oznaczenia dla powierzchni opromieniowania powinien być zastosowany indeks górny dla określenia powierzchni.
2. W **rozdziale 1 pt. Wstęp**, na stronie 10 znajduje się zdanie: *Procesy te mają wpływ na wymianę ciepła w komorach paleniskowych kotłów, a uwzględnienie ich nastręcza trudności ze względu na 0-wymiarowy charakter literaturowych, powszechnie stosowanych metod obliczeniowych*. Zdanie jest zupełnie niezrozumiałe, ze względu na

zastosowany styl. Zapewne chodzi o „0-wymiarowe modele obliczeniowe opublikowane w literaturze przedmiotu”, ale tego trzeba się domyślić.

3. W pracy zdarzają się dość częste powtórzenia np. str. 11 i takie określenia jak: „metody” czy „pomiarowe” itp.
4. W wielu miejscach zastosowany język, stylistycznie wykazuje nieprawidłowości jak choćby na str. 15, zaczynające się od: „*Wraz z odkryciem G.Kirchhofa...*” jest zbyt długie.
5. Str. 27 podano oznaczenie DCS odnoszące się do kotłów WR40 i WR10, ale nie wyjaśniono co oznacza.
6. Na stronie 42 wskazano w jednym „ciągu” wykaz pozycji literaturowych jako odwołanie. Liczbę ponad 41 taki odwołań w jednym miejscu nie jest pod względem redakcyjnym zbyt trafne.
7. Na tej samej str. 42 treść odnosząca się do rys. 13 powinna zawierać informacje o modelu rozkładu pól temperatury w kotle a w szczególności w strefach wymiany ciepła i ich rodzajów. Zastosowany zapis w tym miejscu jest dosyć niejasny.
8. Na str. 46 zamieszczono informację o sposobie całkowania równania nr 65? Wydaje się, że to błąd i odnosi się ta informacja do równania nr 6.
9. Str. 51, brak indeksu dolnego w zapisie dotyczącym wzorów obliczeniowych Schacka, jest  $p_{CO_2}$  i  $p_{H_2O}$ , apowinno być  $p_{CO_2}$  i  $p_{H_2O}$ .
10. Na str. 54 pojawiło się zdanie: *Prawa strona równania to różnica pomiędzy ciepłem zawartym w spalinach na wylocie z komory paleniskowej a temperaturą otoczenia jest wyrażona wyrażeniem.* Jest ono zupełnie niezrozumiałe i należy wyjaśnić co Autor miał tutaj do przekazania.
11. W opracowaniu zdarzają się również tzw. określenia branżowe, jak chodźby o „opletwowaniu” wymiennika ciepła a nie o ożebrowaniu – str. 59.
12. Na str. 68 dół strony, teks niewyjustowany.
13. Wszystkie podrozdziały rozdziału 7, tj. 7.1., 7.2 i 7.3. rozpoczynają się od tego samego zdania: *Parametrami wejściowymi metody są dane geometryczne komory paleniskowej i rusztu, parametry fizyczne mediów biorących udział w procesie spalania w komorze paleniskowej a także szereg współczynników empirycznych.* Zrozumiały jest przekaz zawarty w tej informacji ale od strony redakcyjnej również nie jest to trafne.

Podsumowując część redakcją opracowania należy zauważyć, że jest ono sformułowane w miarę poprawnym językiem technicznym.. Wskazane wyżej niedociągnięcia nie mają znaczącego wpływu na część merytoryczną tego opracowania co powoduje, że opinia jest w tej części oceny dysertacji pozytywna.

#### Niektóre uwagi o charakterze dyskusyjnym i pytania:

1. W przedstawionej do oceny dysertacji podano w **rozdziale 2** jej cel, zakres i tezy pracy. W podsumowaniu natomiast pojawia się informacja o tym, że w ramach pracy udowodniono tezy na podstawie postawionej hipotezy. Z definicji hipotezę należy udowodnić, natomiast teza jest twierdzeniem z założenia prawdziwym. Trudno się natomiast zgodzić z tym aby na podstawie hipotezy udowadniać tezy.
2. Na stronie 45 w podrozdz. 7.1. w opisie znajdującym się pod wzorem nr 6 znajduje się informacja o założeniu dotyczącym obszaru wykorzystanego pola powierzchni rusztu. Rodzi się tu pytanie, czy dotyczy to całej powierzchni czy też jakiejś jej części?

3. Na str. 49 umieszczono rys. 18 wraz z opisem. Pytanie czy informacje tutaj zawarte odnoszą się do wymiany ciepła na drodze promieniowania?
4. Na str. 82 podano informacje o współczynniku  $M$  i dosyć lakonicznie wyjaśniono, że określa on funkcyjnie współrzędne położenie maksymalnej temperatury w palenisku oraz rodzaju spalanego paliwa. Następnie, że wartość ta wynosi zgodnie z pierwszym wydaniem  $M = 0,445$ . Dla jakiego paliwa ta wartość i jakie są to wartości dla innych paliw?
5. Na stronie 93 podano informację o tym, że: *Metody numeryczne pozwalają na rozwiązywanie układów równań różniczkowych tworzących model matematyczny procesów transportu w płynach i ciałach stałych*. Nie uściślono transportu czego?
6. Na str. 94 podano informacje o przyjętych założeniach uproszczających proces modelowania. Odnoszą się one jedynie do komory paleniskowej co jest zrozumiałe, ale czy nie byłoby koniecznym uwzględnienie strat energii cieplnej do otoczenia, które normatywnie wynoszą do 2% zależnie od zaawansowanej konstrukcji. W związku z tym, czy koniecznym było uznanie, że proces musi być rozpatrywany jako zupełnie adiabatyczny i jaki wpływ miałoby to na zaproponowane w modelowni siatki numerycznych badanych kotłów?
7. Na str. 101 przyjęto założenie o tym, że: *Transport ciepła i masy w kierunku przesuwu złoża został pominięty z powodu pomijalnie małych gradientów w kierunku ruchu złoża zarówno temperatury jak i poszczególnych stężeń związków chemicznych w porównaniu z gradientami w kierunku przepływu spalin*. Na jakiej podstawie stwierdzono, że występują tutaj tak małe gradienty temperatury skoro w przypadku węgla kamiennego może to być zakres 250 – 300 °C a węgla brunatnego 800 – 100 °C? Znaczne różnice temperatur są również zauważalne na rys. 48 i 49 tego opracowania.
8. Na tej samej stronie podano, że ruszt dla celów obliczeniowych podzielono na 7 stref podając, że jest to zgodne z konstrukcją kotła i lokalizacją wlotów powietrza. Należy to uściślić ponieważ w rzeczywistych układach identyfikuje się 3 do 4 stref: suszenia i nagrzania paliwa, odgazowania, zgazowania i popiołu.
9. W tym samym miejscu stwierdzono, że w analizie uwzględniono występowanie jedynie strefy gazowej nad rusztem przy odpowiednich warunkach brzegowych opartych o równania stechiometryczne. Brak informacji o tym konkretnie jakie to są parametry. Dalej trudno się zgodzić z tym, że procesy zachodzące w samej warstwie na długości całego złoża mogą być pomijalne. Brak jest tutaj uzasadnienia tak dużych uproszczeń oraz jakie konsekwencje w procesie modelowania będzie miało uwzględnienie tych parametrów.

#### **Uwagi o charakterze ogólnym:**

Praca stanowi ciekawe i potrzebne opracowanie dotyczące analizy możliwości wykorzystania istniejących obecnie sposobów modelowania palenisk urządzeń kotłowych o małej mocy w oparciu o metody stosowane dla tzw. dużych. Należy się zgodzić, ze stwierdzeniem Autora, że ma ona charakter eksploracyjny dający odpowiedź na pytanie czy można stosować nowe metody oparte o techniki cyfrowe CFD z wykorzystaniem istniejącego już oprogramowania typu Ansys Fluent.

Podsumowując tę część opinii, należy wskazać, że powyższe uwagi mają jak najbardziej charakter dyskusyjny.

#### **5. Ocena pracy i wniosek końcowy**

Zapoznawszy się z treścią przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że zawiera ona oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora mgr inż. Łukasza Rutkowskiego naukowych oraz analitycznych metod badawczych w dyscyplinie naukowej inżynierii środowiska, górnictwo i energetyka. W związku z powyższym wyczerpuje ona warunki określone przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art. 187 ust. 1-2 z dnia 20 lipca 2018 r i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony o co wnioskuję.

prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński