



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych
i Urządzeń Ochrony Środowiska
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

Kraków, 05.08.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Jean-Marc Fafary
zatytułowanej " **Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych jako metoda do współspalania paliw ze zwiększonym udziałem wodoru**" wykonanej na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym pod opieką promotora dr hab. inż. Norberta Modlińskiego, prof. PWr

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej, Pana dr hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. PWr – zgodnie z pismem nr W9/PW/366/2023.

2. Zasadność podjęcia tematu

Praca jest poświęcona problematyce badań numerycznych układu recyrkulacji spalin dla zastosowania w dyfuzyjnych komorach spalania w mikroturbinach gazowych. Celem badań było udowodnienie na drodze obliczeń numerycznych z zastosowaniem Komputerowej Mechaniki Płynów (CFD – Computational Fluid Dynamics), że dobrze zaprojektowany i przystosowany układ recyrkulacji spalin umożliwi zwiększenie udziału wodoru w paliwie metanowym, przy zachowaniu znamionowych parametrów procesu spalania (maksymalna temperatura, gradient temperatury, prędkość spalania laminarnego) typowych dla spalania metanu. Zastosowanie wodoru w układach energetycznych będzie odgrywać coraz to większą rolę, a badania nad możliwością wykorzystania tego paliwa w istniejących, czy modernizowanych układach energetycznych jest współczesnym wyzwaniem. Modyfikacja

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

tel. +48 12 617 39 59

www.agh.edu.pl

Regon: 000001577 NIP: 6750001923

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
W9/642/2023
Wpłynęło dnia 21.08.2023 r.

istniejących układów energetycznych, w tym silników gazowych i turbin gazowych, poprzez zastosowanie np. recyrkulacji spalin wydaje się zagadnieniem technologicznie możliwym do realizacji dla osiągnięcia celu w postaci utrzymania stabilnych warunków w komorze spalania przy zwiększonym udziale paliwa wodorowego. Wykorzystanie metod modelowania CFD w próbach rozwiązania zagadnienia konstrukcyjnego budowy komory spalania oraz oceny wpływu warunków brzegowych na proces spalania jest słuszne i wydaje się najlepszym dostępnym narzędziem do prowadzenia prac w tym kierunku.

Zadanie badawcze podjęte przez Doktoranta wymagało wiedzy z zakresu teorii procesów spalania oraz modelowania numerycznego CFD procesów spalania. Temat należy uznać za trudny, bardzo aktualny, a wybór poruszanej w rozprawie mgr inż. Jean-Marc Fafary problematyki badawczej uznaje za trafny oraz interesujący z naukowego, ale przede wszystkim z aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jean-Marc Fafary posiada 233 strony, 5 rozdziałów, które stanowią główną część pracy, streszczenie w języku polskim i angielskim, bibliografię złożoną z 106 pozycji literaturowych oraz jeden załącznik. Rozprawa została napisana w języku polskim.

Rozdział 1 „Wprowadzenie” składa się z 56 stron szczegółowego wprowadzenia dla uzasadnienia naukowego problemu przedstawionego w rozprawie. Rozdział składa się z 65 rysunków i 2 tabel.

W rozdziale autor omawia potencjał paliwa wodorowego, kierunki rozwoju mikroturbin gazowych z możliwością stosowania paliwa wzbogaconego w wodór, przegląd rozwiązań konstrukcyjnych niskoemisyjnych komór spalania turbin wraz z rozwiązaniami konstrukcyjnymi komór spalania przeznaczonych do spalania lub współspalania wodoru.

Rozdział został podsumowany informacją, że praca Doktoranta koncentruje się na **przeprowadzeniu badań numerycznych dla zaproponowanego układu recyrkulacji spalin do zastosowania w dyfuzyjnych komorach spalania mikroturbin gazowych w celu zwiększania udziału wodoru w paliwie metanowym, przy równoczesnym zachowaniu znamionowych parametrów procesu spalania (temperatury – maksymalnej/jej gradientu oraz prędkości spalania laminarnego mieszaniny paliwowo-powietrznej) typowych dla spalania metanu.**

W tym miejscu Doktorant przedstawia tezy:

1. *Istnieje możliwość zastosowania samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorach spalania mikroturbin gazowych.*
2. *Istnieje możliwość kontrolowania procesu spalania paliwa w komorze spalania mikroturbiny gazowej poprzez wprowadzenie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin (działaniem zawróconych spalin).*
3. *Zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi (działaniem zawróconych spalin) redukcję temperatur spalania (gradient i maksimum) w celu umożliwienia spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru.*
4. *Zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi (działaniem zawróconych spalin) redukcję prędkości spalania laminarnego w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru.*
5. *Zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi (działaniem zawróconych spalin) redukcję emisji tlenków azotu w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru.*
6. *Zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi redukcję emisji tlenku węgla przy spalaniu metanu o zwiększonej zawartości wodoru.*

oraz zadania do wykonania w trakcie realizacji pracy:

1. *Wykonanie 0-D obliczeń projektowych mikroturbiny gazowej zasilanej domyślnie paliwem metanowym.*
2. *Stworzenie modelu trójwymiarowego komory spalania zaprojektowanej mikroturbiny gazowej (w programie Solid Edge, Ansys Design Modeler).*
3. *Przeprowadzenie analizy numerycznej przepływu ze spalaniem w komorze dla paliwa metanowego, progresywnie wzbogacanego w wodór (od 0 do 50% w paliwie – udział masowy).*
4. *Analiza uzyskanych wyników pod kątem oceny możliwości uzyskania wewnętrznego układu recyrkulacji spalin.*
5. *Zaprojektowanie i zaimplementowanie układu/ów wewnętrznej recyrkulacji spalin do istniejącego modelu komory spalania (w programie Solid Edge).*
6. *Przeprowadzenie analizy numerycznej przepływu ze spalaniem w zmodyfikowanej komorze dla paliwa metanowego, progresywnie wzbogacanego w wodór (od 0% wodoru do 50% wodoru w paliwie – udział masowy).*

7. Wykonanie 0-D badań kinetyki chemicznej w oparciu o model układu reaktorów idealnych odwzorowujących pracę komory spalania (Chemkin).
8. Analiza uzyskanych wyników. Potwierdzenie lub odrzucenie przedstawionych tez.

Postawione przez Doktoranta tezy są poprawne, aczkolwiek mogły zostać zredukowane do bardziej ogólnej tezy mówiącej wprost, że zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi (działaniem zawróconych spalin) redukcję temperatur spalania (gradient i maksimum), redukcję prędkości spalania laminarnego, redukcję emisji tlenków azotu oraz redukcję emisji tlenku węgla w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru.

Rozdział 2 i 3 przedstawia opis parametrów pracy badanej komory spalania, wraz ze szczegółowym opisem wybranych modeli do symulacji CFD, takich jak model przepływu i turbulencji, model promieniowania, model reagowania w fazie gazowej. Doktorant przedstawia modele 3D wariantów komory spalania, które stanowią obiekt badań, omawia metody stworzenia i zweryfikowania jakości siatki numerycznej oraz przedstawia przystosowane do obliczeń warunki brzegowe. Rozdział 2 posiada 3 strony, 2 rysunki oraz 4 tabele, a rozdział 3 zawiera się na 47 stronach, oraz posiada 34 rysunki i 15 tabel. W rozdziale niestety brak jednoznacznej informacji i kryterium wyboru modeli oraz ich przewagi nad dostępnymi innymi technikami i modelami.

W rozdziale 4 doktorant przedstawił wyniki uzyskane z obliczeń dla opracowanych modeli komór spalania z zastosowaniem metod CFD. Rozdział posiada 48 stron, 41 rysunków oraz 3 tabele. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań, Doktorant przygotował zestawy wykresów, map oraz tabel dla umożliwienia opisu i oceny zjawisk zachodzących w komorach spalania. Najważniejsze wnioski z przedstawionych wyników obliczeń to:

- Istnieje możliwość uzyskania zawracania spalin wewnątrz komory spalania mikroturbiny gazowej przy zastosowaniu zaproponowanych autonomicznych układów zawracania spalin.
- Zawrócone spaliny nie wpływają na zaobserwowane zmiany parametrów spalania w komorach wyposażonych w układy zawracania spalin względem komory referencyjnej. Zostały rozpatrzone takie parametry spalania jak maksymalna temperatura statyczna spalania oraz gradient temperatury statycznej spalania w przekroju reprezentacyjnym komory, emisje tlenku węgla oraz tlenków azotu.

- Przedstawione układy zawracania spalin nie przynoszą oczekiwanego wpływu na proces spalania, a uzyskane zmiany można uzyskać w drodze przebudowy rury ogniowej referencyjnej komory spalania. Zawrócone spaliny przez samoczynne układy zawracania spalin charakteryzują się zbyt niskimi strumieniami masy aby mieć wymierny wpływ na proces spalania.

- Wzrost udziału wodoru w paliwie, w większości przypadków, przynosi spodziewany wpływ (często negatywny) na rozpatrywane parametry procesu spalania.

- Komora spalania w wariantcie A nie prezentuje żadnych widocznych odchyień pod kątem maksymalnej temperatury statycznej spalania, lecz przedstawia lekkie obniżenie gradientu temperatury w przekroju reprezentatywnym, względem tych parametrów dla komory referencyjnej, dla wszystkich rozpatrywanych wariantów zasilania. Zaproponowane układy zawracania spalin, nie umożliwiają za pośrednictwem zawróconych spalin na obniżenie maksymalnej temperatury statycznej spalania oraz gradientu temperatury (w przekroju reprezentatywnym), w celu uzyskania zapasu umożliwiającego wprowadzenie określonej ilości wodoru do paliwa metanowego. Wzrost udziału wodoru w paliwie referencyjnych powoduje oczekiwane, negatywne, zwiększenie maksymalnej temperatury statycznej spalania (ok. 150 K) oraz degradacje (wzrost) gradientu temperatury statycznej w przekroju reprezentacyjnym.

- Zastosowanie samoczynnego wewnętrznego układu zawracania spalin, spowodowało obniżenie maksymalnej statycznej temperatury spalania w komorze spalania w wariantcie B, oraz umożliwiło obniżenie gradientu temperatury statycznej w przekroju reprezentatywnym komory spalania, względem komory referencyjnej, dla wszystkich wariantów zasilania. Pozwoliło to na zachowanie nominalnej maksymalnej temperatury statycznej spalania (jak w referencyjnej komorze spalania) przy podawaniu wodoru do paliwa (w przedziale od 0 % do 10 % udziału masowego wodoru w paliwie).

- W wyniku przeprowadzonych badań prędkości spalania laminarnego w komorach spalania nie stwierdzono różnic, które by wynikały z działania zawróconych spalin. Niestety zawrócone spaliny nie wpływają na widoczne zmiany prędkości spalania laminarnego, a zatem nie umożliwiają stworzenia zapasu na wprowadzenie wodoru do paliwa metanowego bez przesunięcia strefy spalania w kierunku strefy tworzenia mieszaniny palnej w czołowej części rury ogniowej.

- Zaproponowane układy zawracania spalin nie wpływają pozytywnie na poziom emisji tlenku węgla, oraz zawracanie spalin nie przyniosło oczekiwanego obniżenia emisji tlenków azotu.

Rozdział 5 to podsumowanie pracy, składa się z 3 stron, na których doktorant omawia genezę podjęcia tematu, podsumowuje zakres zrealizowanych badań numerycznych. Na podstawie badań numerycznych doktorant uzyskał odpowiedzi na zadane tezy, stwierdzając, że istnieje możliwość stworzenia funkcjonalnego samoczynnego wewnątrzkomorowego układu zawracania spalin dla komory spalania mikroturbiny gazowej, a maksymalnie zawrót spalin wynosi 0,54 %. Wynik z pozostałej części badań wykazały, że zawrócone spaliny nie pozwalają kontrolować w sposób pożądanym procesu spalania oraz, że zawracane spaliny nie wpływają na proces spalania. Potwierdzona została jedynie pierwsza z tez, natomiast pozostałe tezy zostały odrzucone. W rozdziale tym doktorant wskazuje także na kierunki i ścieżki rozwoju badań komór turbin i mikroturbin gazowych takich MILD (Moderate and Intense Low-Oxygen Dilution).

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne, które powinny zostać poddane dyskusji i omówieniu w trakcie obrony rozprawy.

1. Opis wybranych modeli, w szczególności modelu turbulencji „k-e” oraz modelu spalania dyfuzyjnego „Steady Diffusion Flamelet Model” został przedstawiony przez doktoranta w sposób poprawny i szczegółowy. Brakuje w tej części niestety wskazania dlaczego te modele wg. Doktoranta są najlepszym wyborem, czy można zastosować inne i jak bardzo duży będą miały wpływ na uzyskane wyniki. W sytuacji, gdy jest brak jakiegokolwiek np. eksperymentalnej weryfikacji wyników modelowania, sprawdzenie jakości wyników poprzez porównanie różnych podejść i modeli wydaje się być niezbędne. Ta kwestia wymaga co najmniej doprecyzowania w postaci przejrzystych wniosków z przeglądu i porównania dostępnych i możliwych oraz wybranych przez doktoranta modeli.
2. Wyniki przedstawione w tabeli 3.12 (strona 112) prezentują wartości strumienia zawracanych spalin, a ich poziom jest ekstremalnie niski (do ok. 0,003% strumienia masy mieszaniny palnej). Dlaczego tak niskie wartości są brane pod uwagę i co na celu ma wskazanie braku wpływu zawracania tak niewielkiej ilości spalin?
3. W pracy brakuje walidacji uzyskiwanych wyników. Doktorant podaje jako jedno z zadań konieczność przeprowadzenia analizy numerycznej przepływu ze spalaniem w komorze dla paliwa metanowego, progresywnie wzbogacanego w wodór (od 0 do 50% w paliwie – udział masowy) wraz analizą uzyskanych wyników pod kątem oceny możliwości uzyskania wewnętrznego układu recyrkulacji spalin. Zwiększanie ilości wodoru

w mieszance paliwowej z założenia, nie tylko w rozprawie, wpływa na proces spalania, dlatego w przypadku braku możliwości walidacji eksperymentalnej komory spalania, wskazana jest bardziej szczegółowa analiza otrzymanych wyników wraz z fizyczną interpretacją zachodzących procesów w celu potwierdzenia jakości wyników modelowania. Jak bardzo zwiększanie udziału wodoru zmienia charakter pracy komory spalania, czy istnieją wartości, dla których zmiany mogą być się akceptowalne, czy 50% udziału wodoru to maksymalny możliwy udział i dlaczego?

4. We wstępie Doktorant podaje *„Na podstawie przeglądu literaturowego wywnioskowano, że potencjalną metodą na obniżenie maksymalnej temperatury spalania oraz jej gradientu, obniżenie prędkości spalania laminarnego oraz obniżenie emisji tlenków azotu, może się okazać zawrócenie spalin do strefy tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej oraz jej spalania. Uzyskane efekty, poprzez obniżenie wartości wyżej wspomnianych parametrów spalania, umożliwiłoby na dodanie określonej ilości wodoru do paliwa metanowego, tym samym powracając do nominalnych parametrów spalania i pracy komory. Dodatkowo, oczekiwano zwiększonej skuteczności utlenienia tlenku węgla podczas zawracania spalin, co mogłoby się przełożyć równocześnie na obniżenie emisji tego czynnika z komory.”* Dlaczego w przypadku analizowanym przez Doktoranta te efekty nie zostały potwierdzone? Czy wynika to z konstrukcji i parametrów geometrycznych analizowanego układu mikroturbiny, parametrów pracy turbiny? Czy ograniczenia w uzyskaniu zakładanych efektów są lokalne, czy należy się spodziewać ich we wszystkich konstrukcjach mikroturbin gazowych?

Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy.

Poniżej uwagi o charakterze redakcyjnym:

- wiele rysunków posiada opisy w języku angielskim zaczynając od rys. 1.1. bez dodatkowego opisu i tłumaczenia na język polski,
- strona 15: „...tego paliwo”,
- strona 19: brak indeksów w opisie obiegu gazowego,
- strona 28: „...spalania w palikach.”,
- strona 57: „...spalania komory spalania.”,
- strona 233: błąd w numeracji pozycji literaturowych,
- strona 102: „Ideom...”,

W pracy można spotkać jeszcze kilka literówek, brakujących znaków interpunkcyjnych i niedociągnięć redakcyjnych.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Jako osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy, moim zdaniem, wskazać:

1. Budowę modelu CFD dla badań numerycznych zaproponowanego układu recyrkulacji spalin do zastosowania w dyfuzyjnych komorach spalania mikroturbin gazowych.
2. Zaprojektowanie oraz implementacja układów wewnętrznej recyrkulacji spalin do istniejącego modelu komory spalania.
3. Przeprowadzenie szeregu analiz z zastosowaniem opracowanych modeli CFD, oraz badań kinetyki chemicznej w oparciu o model układu reaktorów.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy. Doktorant zrealizował postawione sobie podstawowe cele, przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu **przeprowadzenia badań numerycznych dla zaproponowanego układu recyrkulacji spalin do zastosowania w dyfuzyjnych komorach spalania mikroturbin gazowych w celu zwiększania udziału wodoru w paliwie metanowym, przy równoczesnym zachowaniu znamionowych parametrów procesu spalania (temperatury – maksymalnej / jej gradientu oraz prędkości spalania laminarnego mieszaniny paliwowo-powietrznej) typowych dla spalania metanu.**

Autor rozprawy, mgr inż. Jean-Marc Fařara, wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w zakresie problematyki turbin gazowych, budowy i obliczeń pracy komory spalania w mikroturbinie gazowej oraz modelowania CFD turbulentnych procesów reakcyjnych w trakcie spalania paliwa gazowego, niezbędną do przygotowania pracy doktorskiej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Jean-Marc Fařary pt. *„Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych jako metoda do współspalania paliw ze zwiększonym udziałem wodoru”* będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Spełnia w całości warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

