

dr hab. inż. Adam Klimanek, Prof. Pol. Śl.
Katedra Techniki Ciepłej
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 22, 44-100 Gliwice
email: adam.klimanek@polsl.pl

Gliwice, 27.07.2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Jean-Marca Fąfary

pt. „Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych jako metoda do współspalania paliw ze zwiększonym udziałem wodoru”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka dra hab. inż. Bartosza Zajączkowskiego, prof. uczelni z dnia 23.05.2023 r. w związku z Uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej nr 641/30/RDND08/2021-2024 z dnia 17.05.2023 r. wyznaczającą mnie na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr. inż. Jean-Marcowi Fąfarze.

Recenzję wykonałem w oparciu o nadesłaną rozprawę doktorską mgra inż. Jean-Marca Fąfary.

2. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska Jean-Marca Fąfary poświęcona jest zagadnieniom projektowania i modelowania komór spalania mikroturbin gazowych z wewnętrzną recyrkulacją spalin zasilanych mieszaninami metanu i wodoru. Podjęta tematyka badawcza jest ciekawa i aktualna z kilku powodów: (i) przewiduje się, że wskutek zwiększającego się udziału odnawialnych źródeł energii w systemie elektro-energetycznym, jednym ze sposobów magazynowania energii elektrycznej będzie wytwarzanie wodoru, który z kolei będzie mógł być wykorzystany w turbinach gazowych, (ii) wykorzystanie paliw wzbogaconych w wodór będzie wymagało modyfikacji istniejących/nowoprojektowanych konstrukcji komór spalania, (iii) aktualnym pozostanie problem emisji substancji szkodliwych do środowiska podczas spalania w powietrzu paliw węglowodorowych, (iv) do projektowania komór spalania będzie można wykorzystać zaawansowane narzędzia obliczeniowe, co znacznie przyspiesza i obniża koszty projektowania i budowy prototypów tych urządzeń. Rozprawa doktorska Pana Fąfary odnosi się bezpośrednio do tych zagadnień.

Biorąc pod uwagę cel i zakres merytoryczny rozprawy, można jednoznacznie stwierdzić, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

3. Zakres rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska liczy łącznie 233 strony, przy czym główna jej część została spisana na 165 stronach. Pozostałe 68 stron zawiera załącznik do rozprawy (61 stron), w którym przedstawiono obliczenia i analizy służące określeniu parametrów pracy badanej komory spalania, a także spis literatury przedstawiony na 7 stronach.

Główna część pracy składa się ze streszczenia w j. polskim i angielskim, spisu treści i 5 rozdziałów.

Rozdział 1. stanowi wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Doktorant szczegółowo omawia genezę zajęcia się tematyką pracy, przedstawia jej najistotniejsze elementy i dokonuje przeglądu literatury w zakresie rozwiązań procesowych i technologicznych dotyczących komór spalania turbin gazowych. Rozdział ten jest obszerny, gdyż składa się aż z 55 stron, przy czym zawiera on również cel i tezy pracy. Autor wprowadza czytelnika w kolejne zagadnienia związane z potencjałem wodoru jako paliwa w kontekście technologii *power to gas*, omawia potencjał rozwoju i wykorzystania mikroturbin gazowych, możliwość wykorzystania w nich paliw wzbogaconych w wodór, dokonuje przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych komór spalania o niskim oddziaływaniu na środowisko, ale także przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych turbin wykorzystujących wodór jako składnik paliwa. W końcowej części rozdziału, bazując na wcześniejszych rozwiązaniach wykorzystujących recyrkulację spalin, przedstawia koncepcję wewnętrznej recyrkulacji spalin jako sposobu współspalania wodoru w mikroturbinach gazowych. Swoje rozważania podsumowuje na str. 62 przedstawiając schemat działań, które można podjąć przy konstruowaniu komory spalania i organizacji procesu spalania oraz przedstawia ich skutki wpływające na pracę komory i zachodzenie procesu spalania. Rozdział ten kończy podsumowanie celu i przedstawienie tezy rozprawy.

Rozdział 2. poświęcony jest określeniu parametrów pracy badanej komory spalania, przy czym stanowi on podsumowanie założeń, wyników obliczeń i przeprowadzonych analiz. Rozdział ten został przedstawiony na zaledwie 3 stronach, jest on jednak związany ze szczegółowym opisem tych działań przedstawionym w załączniku A do pracy.

W rozdziale 3. Doktorant omówił zastosowaną metodologię prowadzenia badań obliczeniowych z wykorzystaniem narzędzi numerycznej mechaniki płynów (skrót ang. CFD) i modeli niskowymiarowych. W rozdziale tym omówiono szczegółowo zastosowane podejście do symulacji przepływu turbulentnego, wymiany ciepła, a także ujęcia problemu modelowania turbulentnego spalania. Ponadto omówiono geometrie analizowanych komór spalania, pozostałe warunki jednoznaczności, siatki podziału numerycznego. Rozdział ten kończy omówienie zastosowanych modeli reaktorowych („plug flow reactor” i „perfectly stirred reactor”) wraz z zastosowanymi warunkami brzegowymi i innymi założeniami.

Rozdział 4. zawiera wyniki obliczeń oraz ich dyskusję. Rozdział ten podzielono na część dotyczącą obliczeń CFD, badań reaktorowych i analiz laminarnej prędkości spalania. W końcowej jego części zawarto wnioski i omówiono kwestie udowodnienia i obalenia postawionych tezy pracy.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie pracy, w którym przedstawiono cele i genezę podjęcia badań. Odniesiono się także do postawionych tezy pracy i wskazano potencjalne kierunki dalszych badań.

Pracę kończy wspomniany wcześniej załącznik A oraz bibliografia zawierająca 103 pozycje literaturowe, w tym 1 współautorstwa Doktoranta.

4. Ocena merytoryczna

Rozprawa doktorska mgr inż. Fąfary poświęcona jest aktualnej i ważnej problematyce badawczej związanej ze współspalaniem wodoru w mikroturbinach gazowych z wykorzystaniem wewnętrznej recyrkulacji spalin. Szerszy kontekst pracy dotyczy wykorzystania wodoru i metanu produkowanych z odnawialnych źródeł energii (OZE) wytwarzających nadwyżki energii elektrycznej (Power to Gas), przez co paliwa te wykorzystywane są do magazynowania energii elektrycznej z OZE. Produkcja syntetycznego metanu z wodoru jest bardziej pożądana, ze względu na łatwiejsze wykorzystanie metanu w istniejącej infrastrukturze. Wiąże się ona jednak ze spadkiem sprawności całego łańcucha konwersji energii, stąd wykorzystanie paliw wzbogaconych w wodór lub czystego wodoru ma również swoje uzasadnienie, wynikające z oszczędności energii. Finalne wykorzystanie tych paliw może odbywać się między innymi w kotłach, ogniach paliwowych i silnikach spalinowych, w tym w mikroturbinach gazowych.

Rozprawa doktorska Pana Fąfary wpisuje się w istotny nurt badań nad wykorzystaniem, spalaniem i współspalaniem wodoru prowadzonych obecnie w wielu ośrodkach naukowych na świecie, a temat i zakres pracy został trafnie wybrany. Tytuł rozprawy doktorskiej dobrze odzwierciedla jej treść i przeprowadzone badania.

W swojej pracy Doktorant badał możliwość modyfikacji referencyjnej komory spalania, w której wewnętrzna recyrkulacja spalin wymuszona jest właściwą organizacją przepływu gazów w komorze spalania, poprzez dodanie do istniejącej komory urządzeń wymuszających kierunek przepływu (kierownice, dodatkowe kanały, zwężki Venturiego, itp.). Celem wymuszenia wewnętrznej recyrkulacji jest zmiana organizacji spalania w taki sposób, aby dodatek wodoru do standardowego paliwa jakim jest metan, nie spowodował znacznego wzrostu temperatury. Wzrost temperatury w warunkach utleniających przyczynia się do przyspieszania szybkości procesu, przekłada się jednak na formowanie się termicznych tlenków azotu. Dodatkowym celem było utrzymanie niskiej emisji innych substancji szkodliwych, takich jak tlenek węgla czy nieutlenione węglowodory. Doktorant słusznie przyjął, że rozcieńczenie paliwa, utleniacza i/lub mieszanki palnej może przyczynić się do osiągnięcia tych celów.

Wszystkie prace badawcze zostały wykonane poprzez symulacje komputerowe z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi obliczeniowych. Należą do nich: oprogramowanie obliczeniowej mechaniki płynów (skrót ang. CFD) Ansys Fluent oraz oprogramowanie do symulacji procesów termochemicznych Ansys Chemkin. Dodatkowo Doktorant wykonał szereg obliczeń projektowych, których celem było określenie parametrów pracy autorskiego układu mikroturbiny gazowej Doktoranta (obliczenia dla kompresora, turbiny i komory spalania) oraz obliczenia służące doborowi warunków brzegowych dla analizowanych przypadków.

Doktorant opracował kilkanaście koncepcji modyfikacji układu przepływowego komory spalania w celu osiągnięcia wewnętrznej recyrkulacji spalin. Ze względu na znaczny spadek ciśnienia w komorze spalania, większość z zaproponowanych rozwiązań nie pozwoliła na wymuszenie oczekiwanej recyrkulacji. Tylko dwa z zaproponowanych rozwiązań (nazwane roboczo w pracy wariant A i B) pozwoliły na osiągnięcie autonomicznej recyrkulacji i te rozwiązania Doktorant badał szczegółowo.

W pierwszej kolejności wybrane warianty geometryczne analizowane były z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli numerycznych zbudowanych z wykorzystaniem oprogramowania Ansys

Fluent oraz dodatkowego oprogramowania do tworzenia modeli geometrycznych (Solid Edge) i siatek numerycznych (Ansys Fluent-Meshing). Modele te pozwoliły na przeprowadzenie symulacji procesu z uwzględnieniem turbulentnego przepływu z reakcjami. Spośród dodatkowych modeli uwzględniających szczegółowe zjawiska, Doktorant wybrał model Realizable $k - \epsilon$ do odwzorowania turbulencji przepływu w podejściu RANS, model Discrete Ordinates do uwzględnienia promieniowania cieplnego oraz model Non-Premixed Combustion (rozszerzony o modele Steady Diffusion Flamelet i Unsteady Diffusion Flamelet) do uwzględnienia turbulentnego spalania. Do reprezentacji zachodzących reakcji chemicznych wybrano znany mechanizm GRI3.0, który uwzględnia reakcje zachodzące podczas spalania metanu i wodoru. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na wyznaczenie pól prędkości, ciśnienia, temperatury, udziałów związków chemicznych i innych, które posłużyły do oceny procesu.

Oprócz modeli CFD, w dalszej kolejności Doktorant zbudował modele reaktorowe z wykorzystaniem oprogramowania Ansys Chemkin. Modele te oparte są o sieci prostszych, zero- i jedno-wymiarowych modeli reaktorów doskonałych (z doskonałym wymieszaniem (PSR) i z przepływem tłokowym (PFR)), których położenie w sieci powinno odzwierciedlać charakterystyczne procesy zachodzące w danym obszarze komory spalania. Do tej grupy badań można dołączyć również przeprowadzone symulacje, których celem było określenie wpływu współczynnika nadmiaru powietrza oraz rozcieńczenia mieszaniny spalinami na prędkość spalania, w warunkach podobnych do tych występujących w analizowanych komorach spalania. Część z uzyskanych wyników walidowano wykorzystując dane z pomiarów dostępnych w literaturze.

Przeprowadzone badania wykazały, że nawet dla dwóch najlepszych, spośród zaproponowanych układów recyrkulacji spalin, nie udało się uzyskać wystarczająco intensywnej recyrkulacji spalin, która pozwoliłaby na osiągnięcie zamierzonych efektów w postaci obniżonych maksymalnych temperatur spalania i gradientów temperatury oraz obniżonych wskaźników emisji CO i NOx.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki przedmiotu rozprawy. W rozdziale 1 stanowiącym wprowadzenie dokonał obszernych analiz dostępnych technologii i szczegółowych procesów, które pozwalają na realizację celów pracy. Dużą wartością pracy jest analiza i obliczenia doboru urządzeń dla układu mikroturbiny autorstwa Doktoranta. Zastosowane metody obliczeniowe w dalszej części pracy są zaawansowane i dobrane właściwie do rozwiązywanych problemów. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy wyników są krytyczne i szczegółowe. Doktorant dogłębnie rozważa różne kwestie związane z prowadzonymi badaniami i uzyskanymi wynikami, wykazując się dobrą znajomością problematyki badawczej. Postawiony cel osiągnięcia autonomicznej wewnętrznej recyrkulacji spalin był ambitny i nie został osiągnięty w stopniu, który przyniósłby zamierzone efekty, dlatego Doktorant odrzucił większość postawionych tez pracy. Pomimo tego wykonane badania mają duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Być może uzyskanie zamierzonych efektów będzie możliwe poprzez wykorzystanie cech komór spalania zaprojektowanych dla spalania bezpłomieniowego.

Struktura rozprawy jest poprawna i dobrze przemyślana. Zastrzeżenia może budzić rozdział II, który ma tylko 3 strony. Jak wspomniano wcześniej, Doktorant zdecydował się przenieść obliczenia i analizy odnoszące się do tego rozdziału do załącznika, co jest moim zdaniem uzasadnione.

Doktorant przedstawiał założenia, omawiał procesy i wyniki na schematach, wykresach i w tabelach. Poza nielicznymi przypadkami, takimi jak słabo widoczne skale interwałowe na mapach konturowych przedstawiających wyniki z programu Fluent, są one przejrzyste i starannie przygotowane.

Uwagi dyskusyjne

- 4.1. Istnieje wiele modeli turbulentnego spalania, dostępnych również w zastosowanym oprogramowaniu CFD. Do obliczeń w pracy doktorskiej wybrano model non-premixed combustion rozszerzony o modele bazujące na koncepcji spalania w tzw. „płomykach dyfuzyjnych”. Doktorant nie uzasadnia tego wyboru. Wiadomo, że jednym z założeń modelu non-premixed combustion jest przyjęcie liczby Lewisa równej jedności. Warunek ten w przypadku spalania wodoru nie jest spełniony, aczkolwiek może on nie mieć istotnego znaczenia w przypadku spalania turbulentnego. Dlaczego Doktorant wybrał ten model? Jakie ma on zalety w stosunku do innych modeli ogólnego stosowania, takich jak Eddy Dissipation Concept czy Composition PDF Transport?
- 4.2. W małych przestrzeniach komór spalania, w których grubość optyczna gazów nie jest duża, należy się spodziewać małego wpływu absorpcji promieniowania cieplnego przez gazy, również trójatomowe. Czy uzasadnionym byłoby uproszczenie obliczeń absorpcji lub wykorzystanie prostszego modelu promieniowania, np. modelu P1?
- 4.3. Czym można uzasadnić wybór modelu turbulencji Realizable $k - \epsilon$?
- 4.4. W pracy nie przedstawiono analizy wrażliwości rozwiązania na gęstość siatki podziału numerycznego. Czy wykorzystane siatki dają rozwiązania niezależne od ich gęstości?
- 4.5. W jaki sposób można uzasadnić wybór modeli reaktorów z doskonałym wymieszaniem PSR do symulacji obszarów komory spalania, w których zachodzi spalanie dyfuzyjne?
- 4.6. Do oceny zbieżności rozwiązań numerycznych uzyskanych w kodzie CFD użyto między innymi strumieni masy na wlocie i wylocie z komory. Podejście to jest słuszne, gdyż w stanach ustalonych wielkości te muszą się bilansować. Analogicznie bilansować powinny się strumienie energii (entalpie) na wlotach i wylotach oraz strumienie ciepła, choć często w tym przypadku zbieżność trudniej jest uzyskać. Dlaczego nie wykorzystano tej możliwości do oceny zbieżności rozwiązania?
- 4.7. Do oceny procesu spalania, w szczególności gdy wykorzystuje się model Non-Premixed combustion, dogodnie jest analizować rozkłady współczynnika mieszania (mixture fraction). Jego wartości, w odniesieniu do wartości stechiometrycznej, informują o obszarach w których paliwo nie zostało jeszcze spalane, co w kontekście tej pracy mogło przyczynić się do lepszego zrozumienia procesu i identyfikacji charakterystycznych obszarów spalania. Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na analizy współczynnika mieszania?
- 4.8. Do oceny emisji substancji szkodliwych (NO_x oraz CO) Doktorant wybrał wskaźnik emisji wyrażony poprzez udział objętościowy substancji w spalinach suchych, przeliczonych na 15 % zawartość tlenu. Podejście takie nie jest błędne, jednak uzależnia ocenę rzeczywistej emisji substancji szkodliwych od strumienia spalin, który zmienia się wraz ze zmianą strumienia paliwa w analizowanych przypadkach. Czy w związku z tym interpretacja wyników uzyskanych w rozdziale IV pkt 1) b) nie ulega zmianie?

Inne uwagi

Doktorant używa symbolu mnożenia „·”, który w wielu równaniach został zarezerwowany do reprezentacji iloczynu skalarnego, także do reprezentacji zwykłego mnożenia wielkości skalarnych (np. równania 3.23 i 3.37), co może prowadzić do nieporozumień. Zamiennie używa również notacji wektorowej i konwencji sumacyjnej Einsteina, co sprawia wrażenie niespójności formy zapisu równań.

Doktorant czasami wykorzystuje sformułowania, których znaczenie jest odmienne od tego stosowanego w nauce i technice, choć niektóre z nich można spotkać w języku potocznym. Należą do nich *emisyjność tlenków azotu*, używane w kontekście emisji tlenków azotu, *reakcja obustronna* jako reakcja dwukierunkowa (przyp. recenzenta), *znamieniowy* w kontekście *znamionowy*, *reakcyjność procesu spalania* w kontekście szybkości procesu, itp. Doktorant czasami niewłaściwie wykorzystuje słowa tłumaczone z języka angielskiego na język polski, przez co często niektóre zdania przyjmują inne znaczenie niż zamierzone. Jako przykład można podać kilkakrotnie występujące w pracy tłumaczenie słowa *complex* (przyp. recenzenta) przetłumaczonego jako *kompleksowe*, a użytego w znaczeniu *skomplikowane* (np. str. 68, 70 i 116). Kilkakrotnie pojawiają się również inne sformułowania lub słowa takie jak *elementy* (ang. elements) użyte w kontekście pierwiastków chemicznych. Przypuszczam, że wynika ono z częstego studiowania i wykorzystywania literatury angielskojęzycznej, jednak w pracy doktorskiej błędy tego typu nie powinny się pojawiać. W ocenianej pracy występują również inne i liczne błędy ortograficzne, składniowe, leksykalne i stylistyczne. Nie jest przedmiotem niniejszej recenzji ich ocena, jednak utrudniają one czytanie i poprawne zrozumienie treści.

5. Wniosek końcowy

Doktorant podjął się rozwiązania problemu naukowego, który jest aktualny i ważny z punktu widzenia badawczego i praktycznego. Wykazał się przy tym dobrą ogólną i szczegółową wiedzą teoretyczną, a także umiejętnościami praktycznego rozwiązywania problemów w zakresie prowadzonych badań, które wpisują się w tematykę badań podejmowanych w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorant dobrał właściwe metody badawcze, szczegółowo i krytycznie ocenił wyniki swoich działań. Na tej podstawie uważam, że Doktorant jest dobrze przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań.

Na podstawie analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej oraz powyższych argumentów stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki 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.) i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

