

dr hab. inż. Sławomir Stelmach, prof. ITPE
Instytut Technologii Paliw i Energii
ul. Zamkowa 1
41-803 Zabrze

Zabrze, dn. 24.08.2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Tomasza Suchockiego

pt.:

„OKREŚLENIE I ANALIZA CHARAKTERYSTYK PRACY I EMISYJNOŚCI TURBIN GAZOWYCH ZASILANYCH PALIWAMI RÓŻNEGO TYPU”

Recenzja została opracowana na zlecenie z-cy dyrektora ds. naukowych,
dr. hab. inż. Grzegorza Żywicy, profesora IMP PAN

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Określenie i analiza charakterystyk pracy i emisyjności turbin gazowych zasilanych paliwami różnego typu”, została opracowana przez Pana mgr inż. Tomasza Suchockiego w Zakładzie Turbin Ośrodka Energetyki Ciepłej, będącym jednostką organizacyjną Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego Polskiej Akademii Nauk. Praca w zasadniczej części została oparta na wynikach badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu mikroturbiny gazowej GTM-140 w IMP PAN oraz analizie źródeł literaturowych. Promotorem przedmiotowej rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Piotr Lampart.

W obecnej trudnej sytuacji gospodarczej i geopolitycznej poszukiwanie nowych, alternatywnych paliw do zasilania turbin gazowych wydaje się niezwykle istotne, zarówno z perspektywy działań związanych z ogólnie rozumianą ochroną środowiska, bezpieczeństwem energetycznym, jak również z punktu widzenia poprawy efektywności energetycznej maszyn i urządzeń. Turbiny gazowe są kluczowymi urządzeniami w produkcji energii elektrycznej, przemysłowych procesach cieplnych i innych licznych aplikacjach, a ich zasilanie ma duży wpływ na globalne wyzwania związane z emisją zanieczyszczeń gazowych do atmosfery. Badania nad alternatywnymi paliwami do zasilania turbin gazowych mają przede wszystkim na celu znalezienie nowych, efektywnych rozwiązań, które pozwolą na poszerzenie

wachlarza paliw możliwych do wykorzystania dla ich zasilania, a także na ograniczenie emisji CO₂ oraz innych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego.

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej było eksperymentalne określenie charakterystyk pracy oraz emisji zanieczyszczeń z mikroturbiny gazowej GTM-140, przy jej zasilaniu różnymi paliwami – paliwem lotniczym JET A-1 oraz jego mieszaninami z wybranymi alkoholami, a także olejami pirolitycznymi pochodzącymi z pirolizy zużytych opon samochodowych i odpadowych tworzyw sztucznych. Autor recenzowanej rozprawy przeprowadził głęboką analizę literaturową przedmiotowego zagadnienia oraz wykonał szereg interesujących eksperymentów z wykorzystaniem wymienionej mikroturbiny gazowej i różnych paliw ciekłych. Badania te miały na celu udowodnienie postawionych przez autora tez, dotyczących (I) możliwości wykorzystania paliw alternatywnych do zasilania turbin gazowych bez konieczności modyfikacji ich konstrukcji wraz z układem zasilania, (II) zmniejszenia emisji zanieczyszczeń w wyniku stosowania takich paliw w porównaniu do paliw tradycyjnych, a także (III) możliwości uzyskania stabilnej pracy turbin gazowych w przypadku zastosowania paliw nowego rodzaju.

Układ edycyjny recenzowanej pracy doktorskiej jest typowy dla prac o naukowym charakterze i w zrozumiały, logiczny sposób prezentuje istotę zagadnień opracowanych przez jej autora. Przekazany do recenzji wydrukowany jednostronnie i oprawiony w twardą oprawę egzemplarz rozprawy obejmuje 110 stron (jest nie w pełni kompletny, o czym w dalszej części recenzji) i jest podzielony na 7 rozdziałów: 1. Wstęp (przed którym autor umieścił ponadto streszczenie pracy w języku polskim i angielskim oraz wykaz użytych w pracy oznaczeń i skrótów), uwzględniający zarówno cel, jak i tezy pracy, 2. Paliwa alternatywne dla turbin gazowych, 3. Stanowisko badawcze mikroturbiny gazowej GTM-140, 4. Badania eksperymentalne turbiny gazowej GTM-140 zasilanej paliwem lotniczym JET A-1 z dodatkiem alkoholi: propanolu/butanolu/pentanolu, 5. Badania eksperymentalne turbiny gazowej GTM-140 zasilanej paliwem lotniczym JET A-1 z dodatkiem oleju pirolitycznego pochodzącego z pirolizy zużytych opon samochodowych, 6. Badania eksperymentalne turbiny gazowej GTM-140 zasilanej paliwem lotniczym JET A-1 z dodatkiem oleju pirolitycznego pochodzącego z pirolizy odpadów z tworzyw sztucznych (polistyrenu oraz polipropylenu) oraz 7. Wnioski i uwagi końcowe. Spis treści ujmuje także bibliografię, a rozdziały 1-6 zawierają dodatkowe podrozdziały. Treść rozprawy zawiera 58 rysunków oraz 21 tabel (brak odrębnego spisu rysunków

i tabel). Z treści rozprawy wynika, że przytaczana w niej bibliografia obejmuje 130 pozycji literaturowych. Niestety w przekazanym do recenzji egzemplarzu rozprawy brakuje zestawienia cytowanej literatury, co uniemożliwia ocenę poprawności jej doboru i trafności dokonanych przez autora cytowań. Wyjątkowo starannie przygotowany przez doktoranta tekst rozprawy oraz forma jej wydania każą przypuszczać, że niedociągnięcie to jest wynikiem niezawinionego przez niego, przypadkowego błędu (pominięcia kilku ostatnich kartek) na etapie procesu wydawniczego.

We wstępie do rozprawy autor dokonał wprowadzenia tematycznego w zakresie turbin gazowych i istotności ich zastosowania w kontekście aktualnej sytuacji na rynku energii oraz aspektów związanych z ochroną środowiska. Wskazał na wiele zalet ich wykorzystania w porównaniu do silników spalinowych. Omówił także kwestie wynikające z zastąpienia paliw kopalnych paliwami alternatywnymi pochodzącymi z biomasy oraz odpadów, a także wodoru i różnych alkoholi. Dokonał ponadto przeglądu literaturowego w zakresie wpływu zastosowania paliw alternatywnych dla zasilania turbin gazowych na emisję zanieczyszczeń oraz charakterystykę ich pracy. We wstępie doktorant sformułował także główny cel pracy (ocenę wpływu zastosowania różnych rodzajów paliw na proces spalania oraz charakterystykę pracy, wydajności cieplnej i emisji turbiny gazowej – lotniczego silnika odrzutowego JETPOL GTM-140), zakładając że zostanie on osiągnięty poprzez realizację wyspecyfikowanych w tym rozdziale pięciu zadań badawczych. Cel pracy został uzupełniony przez autora rozprawy trzema – przedstawionymi już wcześniej – тезami pracy doktorskiej.

W rozdziale drugim dotyczącym paliw alternatywnych dla turbin gazowych, autor przeanalizował szczegółowo właściwości fizykochemiczne wybranych potencjalnych zastępników paliw tradycyjnych, w tym olejów roślinnych, biodiesla, uwodornionego oleju roślinnego, paliw otrzymywanych z zastosowaniem syntezy Fischera-Tropscha, bio-oleju otrzymywanego w wyniku pirolizy biomasy, bio-alkoholi (w tym bio-metanolu i bio-etanolu), eteru dimetylowego (DME), wodoru oraz olejów pirolitycznych uzyskiwanych w wyniku termicznej konwersji odpadowych tworzyw sztucznych. Ponadto szczegółowo przedstawił najważniejsze parametry fizyczne tych paliw (m.in. gęstości względne, krzywe destylacji, wartości opałowe i in.) oraz omówił kwestie formowania się zanieczyszczeń w procesie ich spalania, co ma niezwykle

istotne znaczenie z punktu widzenia projektowania, budowy i eksploatacji turbin gazowych.

Trzeci rozdział rozprawy autor poświęcił szczegółowemu opisowi wykorzystanego w eksperymentach stanowiska badawczego, wyposażonego w mikroturbinę gazową GTM-140 i niezbędną aparaturę pomiarową. Opisał szczegółowo opracowaną przez siebie metodykę pomiarową, prezentując w postaci algorytmu procedurę przeprowadzania testów. Dokonał także krótkiej analizy błędów pomiarowych i wskazał wybraną w swojej pracy metodę uwzględniającą wpływ niepewności poszczególnych czynników na niepewność wyniku końcowego (metoda opracowana przez A.M. Moffat'a).

W kolejnych trzech rozdziałach rozprawy – 4, 5 i 6, autor przedstawił szczegółowo przebieg i wyniki przeprowadzonych przez siebie eksperymentów, dokonując także analizy uzyskanych rezultatów badań, z uwzględnieniem kwestii wynikających z przeglądu literatury będącego wprowadzeniem do każdego z tych rozdziałów. Rozdział czwarty poświęcił eksperymentom mającym na celu dokonanie oceny możliwości wykorzystania propanolu, butanolu oraz pentanolu w charakterze dodatków do paliwa zasadniczego dla zasilania turbin gazowych. W przeprowadzonych badaniach wykorzystał paliwo bazowe (JET A-1) oraz jego mieszanki z wymienionymi alkoholami o udziałach objętościowych alkoholi wynoszących 25, 50 i 75%, a także czyste alkohole (100%). Wykorzystując opracowaną przez siebie metodykę badawczą autor wyznaczył różne charakterystyki pracy testowanej mikroturbiny w zależności od prędkości obrotowej (w tym m.in. zmiany ciągu statycznego, zużycia paliwa oraz temperatury przed i za mikroturbiną). Wyznaczył ponadto indeksy emisji NO_x oraz CO dla testowanych paliw w różnych stanach pracy urządzenia. Rozdział podsumował sformułowaniem racjonalnych wniosków wynikających z przeprowadzonych eksperymentów i uzyskanych wyników badań.

Rozdział 5 opisuje wykonane przez doktoranta eksperymenty zasilania testowanej mikroturbiny gazowej mieszankami paliwa JET A-1 z dodatkiem oleju pirolitycznego wytworzonego w procesie pirolizy zużytych opon samochodowych. Co interesujące, zarówno wytworzenie surowego oleju pirolitycznego ze zużytych opon jak i proces jego uszlachetnienia poprzez zastosowanie procesu destylacji, zostały wykonane w IMP PAN, a więc miejscu zatrudnienia doktoranta. Autor pracy przeprowadził eksperymenty wykorzystując mieszanki zawierające 10, 20 i 50% obj.

uszlachetnionego oleju pirolitycznego ze zużytych opon samochodowych z paliwem bazowym (JET A-1). Wyznaczył charakterystyki pracy mikroturbiny w szerokim zakresie obciążenia, obejmujące ciąg statyczny, jednostkowe zużycie paliwa, wlotową i wylotową temperaturę oraz emisję NO_x , CO i SO_2 . Rozdział zakończył sformułowaniem wniosków podsumowujących wykonane eksperymenty i wskazujących na możliwość praktycznej realizacji kierunku zagospodarowania oleju pirolitycznego ze zużytych opon samochodowych proponowanego przez doktoranta.

Ostatnią część przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników autor przedstawił w rozdziale 6 rozprawy. Badania te dotyczyły wykorzystania do zasilania mikroturbiny gazowej mieszanek paliwa lotniczego JET A-1 i oleju pirolitycznego pochodzącego z pirolizy odpadowych tworzyw sztucznych, a konkretnie polistyrenu i polipropylenu. Podobnie jak w przypadku zużytych opon samochodowych, oleje pirolityczne użyte w badaniach zostały wytworzone w IMP PAN. Próby surowych olejów pirolitycznych uzyskanych z polistyrenu oraz polipropylenu poddawane były dwustopniowej filtracji (atmosferycznej oraz próżniowej). Na ich bazie zostały sporządzone mieszanki paliwowe o udziałach objętościowych olejów wynoszących 25, 50 i 75%. Autor przeprowadził szereg eksperymentów zasilając mikroturbinę testową przygotowanymi paliwami, wyznaczając szereg charakterystyk pracy mikroturbiny w szerokim zakresie obciążenia, obejmujących ciąg statyczny, masowe natężenie przepływu paliwa, jednostkowe zużycie paliwa odniesione do ciągu statycznego, temperaturę spalin oraz indeksy emisji NO_x i CO. Dokonał szczegółowej analizy uzyskanych trendów zaprezentowanych (podobnie jak w przypadku opisywanych wcześniej paliw) w postaci wykresów. Rozdział zakończyła część dotycząca oceny środowiskowej i ekonomicznej analizowanego przez autora rozwiązania. Autor obliczył w niej wskaźniki wpływu na środowisko i wskaźniki emisji energii, a także koszt środowiskowy oraz koszt środowiskowo-społeczny dla testowanych paliw i wybranych prędkości obrotowych wirnika mikroturbiny. Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały, że mimo nieznacznie gorszych wskaźników w porównaniu do paliwa lotniczego, wykorzystanie olejów z pirolizy tworzyw sztucznych do komponowania mieszanek paliwowych zasilających turbiny gazowe jest realne, zarówno z technicznego jak i środowiskowego punktu widzenia.

W podsumowaniu rozprawy (rozdział 7) autor dokonał syntetycznej analizy przeprowadzonych prac i uzyskanych wyników. Niestety dostarczony egzemplarz rozprawy obejmuje wyłącznie podsumowujące wnioski wyływające z badań

opisanych w rozdziałach 4 i 5. Brakuje wniosków odnoszących się do rozdziału 6 (być może także do całości pracy), co jest następstwem wspomnianego już niedociągnięcia wydawniczego (braku kilku ostatnich stron), najpewniej niezawinionego przez autora. Podsumowanie wyników prac zaprezentowanych w rozdziale 6, autor przedstawił jednak także w tym samym rozdziale.

W mojej opinii cel pracy został w pełni osiągnięty, a postawione przez autora tezy – udowodnione.

Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej w mojej ocenie wykazał się dużą wiedzą z zakresu energetyki, chemii, inżynierii mechanicznej oraz inżynierii środowiska, w tym szczególnie głęboką znajomością kwestii związanych z budową i eksploatacją turbin oraz silników zasilanych różnymi paliwami, a także efektami środowiskowymi wynikającymi z ich użytkowania. Powiązanie wiedzy z wymienionych obszarów pozwoliło doktorantowi na opracowanie uporządkowanej merytorycznie rozprawy, która – pomijając jej zasadniczy cel, a więc uzyskanie stopnia naukowego doktora – może stanowić użyteczne kompendium wiedzy dla projektantów i eksploataatorów turbin gazowych, a także dla pracowników naukowych interesujących się przedmiotową tematyką.

Analizując treść recenzowanej rozprawy mogę z pełną stanowczością stwierdzić, że prezentuje ona szeroką teoretyczną wiedzę ogólną kandydata w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna. Kandydat w mojej ocenie dysponuje wysokimi kompetencjami w tej dziedzinie, co stanowi solidną podstawę do podejmowania przez niego dalszych badań na najwyższym poziomie naukowym. Kandydat wykazał się głęboką znajomością zagadnień teoretycznych, technologicznych i metodologicznych powiązanych z prowadzeniem badań w obszarze przemian energetycznych i skojarzonych z nimi zagadnień ochrony środowiska. Jego zdolność do syntezy wiedzy, krytycznego myślenia i podejścia interdyscyplinarnego są niezwykle cenne w kontekście przyszłych badań i dalszego wkładu w rozwój nauki oraz praktyki w przedmiocie rozprawy.

Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam bardzo pozytywnie, pozwolę sobie jednak na sformułowanie kilku uwag i pytań, które w żadnym stopniu nie deprecjonują wartości dzieła opracowanego przez doktoranta. W niniejszej recenzji przedstawione zostaną tylko najważniejsze z nich. W pracy zidentyfikowałem tylko nieliczne błędy językowe (co po raz kolejny pozwala mi twierdzić, iż rozprawa została

przygotowana niezwykle starannie), dlatego ich wymienianie pozwolę sobie pominąć, koncentrując się na najważniejszych kwestiach:

1. Na str. 14 autor określił alkohole mianem 'węglowodorów'. Alkohole nie są węglowodorami (!).
2. Proszę o wyjaśnienie, co autor miał na myśli pisząc na str. 25 o 'zrównoważonym charakterze' bio-oleju.
3. Proszę o informację skąd autor zaczerpnął dane na temat zawartości popiołu w alkoholach, przedstawione w tabeli 2.5 na str. 27 (!).
4. Str. 28 – opisanie technologicznego procesu przygotowania węgla do produkcji metanolu jako 'sproszkowanie i oczyszczenie' jest trywializacją zagadnienia.
5. Str. 29, wzór 2.6 – błąd wynikający z przestawienia 'C' i '2'.
6. Str. 30/31 – sugeruję używać w kontekście termicznej konwersji paliw stałych prowadzonej w celu wytworzenia gazu palnego/syntezowego pojęcia 'zgazowanie' (nie 'gazyfikacja').
7. Str. 50 – określenie 'masowe natężenie powietrza' (tabela 3.1 i dalsza część pracy) jest niepoprawne; powinno być raczej 'masowe natężenie przepływu powietrza' ewentualnie 'strumień (masowy/masy) powietrza'; ponadto proszę o odniesienie się do wielkości strumienia powietrza podanej w tabeli 3.1; jak była mierzona i czy zdaniem autora jej wartość nie jest za wysoka?
8. Str. 51, cd. tabeli 3.1 – uwaga analogiczna j.w. odnośnie 'masowego natężenia paliwa'; ponadto proszę autora o odniesienie się do kwestii 4% dodatku środka smarującego do paliwa JET A-1; czym jest ten dodatek z chemicznego punktu widzenia i czy jego wpływ na określone w trakcie badań emisje był istotny, czy też nie?
9. Str. 61, tabela 4.3 – autor podał prawidłowe wartości, ale opis w tabeli powinien brzmieć 'masa molowa' (nie 'masa cząsteczkowa').
10. Str. 62 – odnośnik powinien być do rysunku 3.1, a nie do rysunku 3.4.
11. Str. 77, tabela 5.3 – proszę autora o odniesienie się do kwestii poprawności nazw składników oleju pirolitycznego z opon samochodowych.
12. Str. 79 – autor zapomniał napisać, że badał również emisję SO₂.
13. Str. 80 – rozdział ten dotyczy oleju pirolitycznego z opon samochodowych, a nie alkoholi (!).
14. Str. 85 – autor napisał „Ilość tlenu przesuwą równowagę...”; informacja jest nieprecyzyjna; jaka ilość?; ponadto autor pisze o „zerowej emisji” w kontekście

emisji SO₂; sugerowałbym raczej użycie określenia o emisji poniżej progu oznaczalności z zastosowaniem przyjętej metodyki pomiarowej.

15. Str. 94/95 – proszę autora o próbę skomentowania z czego mogła wynikać niestabilna praca mikroturbiny i jej wyłączanie dla mieszanek PPO/JET A-1 z udziałem oleju powyżej 75%?
16. Str. 102 – czy autor mógłby podać w jakich jednostkach wyrażony jest strumień 'm_{i,emitted}' we wzorach 6.1-6.4?; ponadto proszę o informację, dlaczego ocena środowiskowa i ekonomiczna została wykonana wyłącznie dla olejów pirolitycznych z tworzyw sztucznych?
17. Proszę o informację na temat wniosków, które autor sformułował, a których zabrakło w recenzowanym egzemplarzu rozprawy w wyniku zaistniałego błędu wydawniczego.

Przedstawione powyżej uwagi, komentarze i pytania nie wpływają na wysoką naukową i praktyczną wartość ocenianej pracy, a w mojej opinii są zachętą do dalszej dyskusji w trakcie obrony pracy doktorskiej. Wyrażam nadzieję, że w trakcie obrony publicznej doktorant będzie miał okazję ustosunkować się do większości przedstawionych powyżej kwestii. Przygotowaną przez niego rozprawę doktorską, nacechowaną znaczącym ładunkiem aspektów użytkowych, oceniam pozytywnie. W mojej ocenie stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a autor wykazał się szczegółową wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Po szczegółowej analizie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej ostatecznie stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz przepisach przejściowych Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Tomasza Suchockiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Stawomir Stelmasz

