

Dr hab. inż. Sławomir WIERZBICKI, prof. UWM
Katedra Mechatroniki
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Suchockiego
pt. „Określenie i analiza charakterystyk pracy i emisyjności turbin
gazowych zasilanych paliwami różnego typu”
Promotor: dr hab. inż. Piotr Lampart

Recenzja wykonana zgodnie z pismem nr RN-421-25/21 Dyrektora ds. naukowych dr hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAM w Gdańsku z 23 czerwca 2023r.

Ocena problematyki pracy

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, konieczność ograniczenia emisji związków toksycznych do atmosfery oraz opracowanie efektywnych metod recyklingu odpadów chemicznych, w tym z tworzyw sztucznych to obecnie jedne z największych wyzwań ludzkości. W związku z tym zachodzi konieczność poszukiwania alternatywnych paliw oraz metod ich przetwarzania na energię elektryczną.

Jednym z możliwych kierunków rozwoju energetyki jest wzrost wykorzystania turbin gazowych jako urządzeń umożliwiających efektywne wykorzystanie różnego rodzaju paliw do wytwarzania energii elektrycznej. Wynika to z niewątpliwych zalet turbin gazowych takich jak: wysoka sprawność energetyczna, niska emisja związków toksycznych, prosta i szybka regulacja mocy pozwalająca na stabilizację parametrów sieci energetycznej.

Problematyka ocenianej rozprawy dotycząca określenia charakterystyk pracy turbiny gazowej zasilanej różnymi paliwami, w tym pochodzącymi z utylizacji opon samochodowych oraz tworzyw sztucznych jest problemem aktualnym nie tylko pod względem naukowym, ale również utylitarnym. Z punktu widzenia walorów naukowych i praktycznych należy uznać, że tematyka recenzowanej pracy doktorskiej jest ważna i aktualna. **Oceniana rozprawa doktorska spełnia zatem wymagania jakie są stawiane tematом prac doktorskich realizowanym w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna).**

Analiza rozprawy doktorskiej

Oceniana rozprawa doktorska liczy łącznie 122 strony.

Treść pracy podzielona jest na 7 rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem oznaczeń i skrótów. Na końcu pracy zamieszczony został wykaz literatury. Struktura ocenianej rozprawy jest poprawna, a kolejność rozdziałów logicznie powiązana z sobą.

W Rozdziale 1 „Wstęp” (str. 10-19), Autor wprowadza w tematykę pracy, opisując szeroko zagadnienia związane z wykorzystaniem turbin gazowych w energetyce, zwracając uwagę na ich niewątpliwe zalety. Kolejnym ważnym zagadnieniem poruszonym w tym rozdziale jest kwestia wykorzystania biopaliw w energetyce. W rozdziale tym zamieszczone jest również tabelaryczne zestawienie wpływu zasilania paliwami alternatywnymi turbin gazowych opracowane na podstawie przeglądu literatury. Na końcu tego rozdziału Doktorant określił cel pracy, tezy pracy oraz opisał układ pracy.

Cel pracy został sformułowany jest następująco *„ocena wpływu zastosowania różnych rodzajów paliw na proces spalania oraz charakterystyki pracy, wydajności cieplnej i emisji turbiny gazowej – lotniczego silnika odrzutowego JETPOL GTM-140”*.

Tezy rozprawy Doktorant sformułował jako:

- *„Możliwe jest spalanie paliw alternatywnych w turbinie gazowej bez konieczności modyfikacji konstrukcji oraz układu zasilania paliwa.*
- *Dodatek biokomponentów do konwencjonalnych paliw ma znaczący wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń.*
- *Możliwa jest stabilna praca turbiny gazowej zasilanej wyselekcjonowanymi paliwami pirolitycznymi.”*

Drugi rozdział rozprawy „Paliwa alternatywne dla turbin gazowych” (str. 20-48) zawiera przegląd paliw, które mogą być wykorzystane w turbinach gazowych, takich jak: biodiesel, paliwo otrzymane w procesie Fischera-Tropscha, bio-olej, bio-alkohole, biometanol, bioetanol, BME, wodór oraz paliw pirolityczne z tworzyw sztucznych. Doktorant opisał proces wytwarzania tych paliw, scharakteryzował ich właściwości z szczególnym uwzględnieniem przebiegu ich spalania.

Rozdział 3. „Stanowisko badawcze mikroturbiny gazowej GTM 140” (str. 49-57) zawiera opis stanowiska badawczego wykorzystanego podczas badań. Doktorant w rozdziale tym szczegółowo opisał obiekt badań jakim była turbina gazowa GTM-140, zamieścił specyfikację aparatury pomiarowej, scharakteryzował wskaźniki wykorzystywane do oceny pracy obiektu badań.

Kolejny, 4 rozdział **„Badania eksperymentalne turbiny gazowej GTM-140 zasilanej paliwem lotniczym Jet A-1 z dodatkiem alkoholi: propanolu/butanolu/ pentanolu” (str. 58-74)** zawiera zarówno przegląd literatury jak i wyniki badań uzyskanych podczas badań

turbiny zasilanej mieszaninami paliwa referencyjnego Jet A-1 z alkoholami (propanol, butanol i pentanol) w proporcjach 25, 50 i 75% obj. oraz samym pentanolem. W rozdziale tym Doktorant szczegółowo przedstawił przebieg analizowanych parametrów pracy obiektu badań w funkcji prędkości obrotowej. W obszernym podsumowaniu tego rozdziału Doktorant zauważa m.in., że krzywe ciągu statycznego zarejestrowane dla badanych mieszanek nie wykazują istotnych różnic oraz że wraz z wzrostem udziału alkoholu w mieszance zasilającej maleje emisja NO_x .

Rozdział 5 „Badania eksperymentalne turbiny gazowej GTM-140 zasilanej paliwem lotniczym Jet A-1 z dodatkiem oleju pirolitycznego pochodzącego z pirolizy zużytych opon samochodowych” (str. 75-87) jak wskazuje tytuł, rozdział ten dotyczy badań, w których jako dodatek do paliwa wykorzystano olej pirolityczny pochodzący z pirolizy opon samochodowych. W krótkim przeglądzie literatury zamieszczonym na początku rozdziału Doktorant charakteryzuje problemy związane z utylizacją zużytych opon oraz przedstawia wyniki badań tłokowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami zawierającymi olej z pirolizy opon (TPO). W dalszej części przytacza proces wytwarzania paliwa z opon użytego podczas badań, charakteryzując również, co istotne jego właściwości. Następnie opisuje wyniki przeprowadzonych badań, w których dodatkiem do paliwa referencyjnego Jet A-1 było TPO w ilości 10, 20 i 50%. W podsumowaniu rozdziału Doktorant zauważa, że dodatek TPO powoduje nieznaczny wzrost temperatury spalin, wyższą emisję NO_x i CO. Na zakończenie Doktorant podkreśla, że piroliza opon i wykorzystanie uzyskanego oleju pirolitycznego jako paliwa może być racjonalnym rozwiązaniem przetwarzania tego typu odpadów.

Rozdział 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 i polipropylenu)” (str. 88-108) dotyczy wykorzystania dodatków olejów pirolitycznych z tworzyw sztucznych do zasilania turbiny gazowej. Na wstępie rozdziału Doktorant zamieszcza krótki przegląd literatury dotyczący wykorzystania tego typu paliw do zasilania silników spalinowych, turbin i kotłów. Następnie opisuje proces wytwarzania olejów pirolitycznych użytych podczas badań oraz właściwości otrzymanych paliw. Do wytworzenia olejów pirolitycznych Doktorant użył polistyrenu (PS) i polipropylenu (PP), traktując je jako oddzielne paliwa. Następnie zamieścił wyniki badań analizowanej turbiny zasilanej paliwami w których udział badanych paliw w mieszaninie z Jet A-1 wynosił odpowiednio 25, 50, 75% objętości oraz dla paliw zawierających 100% oleju otrzymanego z pirolizy PS i PP. W dalszej kolejności tego rozdziału Doktorant przedstawia wyniki badań oraz ich interpretację. W dalszej części zamieszczona jest również ocena środowiska i ekonomiczny aspekt wykorzystania analizowanych paliw. Podsumowując ten etap badań Doktorant stwierdza że sprawność cieplna badanej turbiny zasilanej olejem polisternowym jest porównywalna z paliwem referencyjnym, a przypadku zasilania turbiny olejem polipropylenowym wyższa. Dodatek tego typu paliw powoduje również wzrost emisji NO_x oraz niewielki wzrost emisji CO.

Ostatni siódmy rozdział „Wnioski i uwagi końcowe” (str. 109-112) zawiera podsumowanie pracy. W rozdziale tym Doktorant zamieścił dość obszerne streszczenie całej rozprawy.

Na końcu rozprawy zamieszczona jest bibliografia zawierająca 133 pozycje. Co niezwykle istotne wykaz ten poza nielicznymi publikacjami w języku polskim zawiera publikacje anglojęzyczne pochodzące z renomowanych czasopism i co równie istotne są to publikacje prezentujące wyniki badań z ostatnich kilku lat. Wśród cytowanej literatury 6 pozycji to pozycje w których jest Doktorant współautorem.

Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy aktualnego problemu badawczego. Rozprawa mgr inż. Tomasza Suchockiego stanowi spójną logiczną całość, zawartość poszczególnych rozdziałów jest kompletna i logicznie powiązana z sobą. Doktorant prawidłowo sformułował problem badawczy, następnie zaplanował szeroki zakres badań, które następnie zrealizował i dokonał dość wnikliwej analizy uzyskanych wyników. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż użyte podczas badań takie komponenty jak olej pirolityczny z opon jak i z tworzyw sztucznych zostały wytworzone przez doktoranta na stanowiskach IMP PAN. Badania zostały przeprowadzone na prawidłowo oprzyrządowanym stanowisku, jednak w pracy nie podano sposobu rejestracji/odczytu poszczególnych parametrów.

Na końcach rozdziałów omawiających poszczególne etapy badań Doktorant zamieszcza podsumowanie przeprowadzonych badań oraz zamieszcza wnioski z nich wynikające. Natomiast końcowy rozdział rozprawy „Wnioski i uwagi końcowe” de facto nie zawiera żadnych wniosków, poza stwierdzeniem że „Praca doktorska, której celem była ocena wpływu ... została z powodzeniem zrealizowana”. Wydaje się że można było sformułować kilka ogólnych wniosków potwierdzających postawione tezy.

Co dość istotne, Doktorant w tym rozdziale sugeruje dalsze kierunki badań oraz odwołuje się do prac prowadzonych w innych ośrodkach potwierdzających wskazane kierunki badań.

Uwagi krytyczne dotyczące ocenianej rozprawy:

- Różne nazewnictwo w rozprawie obiektu badań. Przykładowo: str. 17 – turbina gazowa silnika lotniczego JETPOL GTM-140, str. 17 – turbina gazowa – lotniczego silnika odrzutowego JETPOL GTM-140, str. 18 – silnik odrzutowy GTM-140, nagłówek 3 (str. 49) – mikroturbina gazowa GTM 140, str. 52 – silnik lotniczy GTM-140, str. 62 – silnik GTM, str. 109 – turbina gazowa – lotniczego silnika odrzutowego JETPOL GTM-140. Dodatkowo na str. 49 jest też określenie w odniesieniu do obiektu badań „małych silników turbodrzutowych”. Symbol GTM-140 pisany jest zazwyczaj z „-”, na stronie 49 jest „GTM 140. Symbolem JETPOL GTM-140 oznaczana jest zazwyczaj turbina gazowa, a na str. 50 podana jest informacja, że jest to symbol hamowni turbinowej. Wydaje się, że Doktorant niektórych z tych sformułowań używa nieprawidłowo i zamiennie, trudno

choćby uznać badany obiekt jako turbinę lotniczą, zgodnie z deklaracją producenta jest ona przeznaczona do celów modelarskich.

- Teza „*Dodatek biokomponentów do konwencjonalnych paliw ma znaczący wpływ na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń*” jest zbyt ogólna i nie została potwierdzona w rozprawie. Przedstawione w rozprawie wyniki dowodzą, że dodatek olejów pirolitycznych zarówno z opon samochodowych jak i z tworzyw sztucznych powoduje wzrost emisji NO_x i CO;
- Błędne stwierdzenie „*Emisja tlenków azotu rośnie w miarę wzrostu współczynnika φ* ” (str. 47). Skoro tlenki azotu powstają przy nadmiarze powietrza, a $\varphi=1/\lambda$, to wzrost współczynnika φ oznacza wzbogacanie mieszanki, zatem emisja NO_x powinna spadać;
- Charakteryzując pentanol jako jeden z dodatków do badanego paliwa powinno się szerzej opisać ten związek. Na str. 61 – podany jest sumaryczny wzór chemiczny tego związku jako „C₅H₁₂O” – powinno się podać raczej wzór strukturalny tego składnika. Zgodnie z literaturą pentanol, inaczej alkohol amylový jest to grupa organicznych związków chemicznych będących nasyconymi monohydroksylowymi alkoholami alifatycznymi zawierającymi 5 atomów węgla. Znanych jest 8 izomerów pentanolu – cztery z nich są pierwszorzędowe, trzy drugorzędowe i jeden trzeciorzędowy. Możliwa różna budowa tego związku wpływa na jego właściwości, a tym samym na przebieg jego spalania. Należałoby jednoznacznie określić który z tych izomerów został użyty podczas badań – prawdopodobnie w pracy chodziło o C₅H₁₁OH, gdyż taki wzór pojawia się później w tekście rozprawy;
- Jak rozumieć sformułowanie „wpływ dodatku pentanolu do nafty lotniczej – Jet A-1 (w proporcjach 25%, 50%, 75% i 100%)” (str. 73), zatem jak wytworzono mieszaninę Jet A-1 z 100% dodatkiem pentanolu? Podobne stwierdzenie o 100% dodatku olejów pirolitycznych z tworzyw sztucznych do paliwa Jet A-1 znajduje się na stronie 106. Z informacji podanych w innych miejscach rozprawy można przypuszczać, że przytoczone proporcje dotyczą udziału procentowego badanego dodatku w paliwie, a nie wielkości badanego dodatku do paliwa bazowego. Natomiast tytuły rozdziałów 4 i 6 wskazują, że badane komponenty były jednak dodatkiem do paliwa bazowego.
- mechanizm tworzenia tlenków siarki (SO_x) został niejasno opisany (str. 85). Naprzemienne stosowanie określeń: dwutlenek siarki (SO₂) i tlenki siarki (IV) może wprowadzać czytelnika w błąd. To samo dotyczy określeń: tlenek siarki (VI) i SO₃ (Tritlenek siarki). Często w tym fragmencie pojedynczy związek SO₂ lub SO₃ nazywany jest ogólnie tlenkami siarki.

Oczekiwałbym ustosunkowania się Doktoranta do powyższych kwestii podczas obrony rozprawy.

Praca napisana jest poprawnym językiem technicznym, nie mniej jednak w trakcie jej czytania zauważyłem drobne błędy językowe i stylistyczne n.p.:

- str. 4 (streszczenie) – jest „*odpadów plastikowych*” – zamiast zwrotu „plastikowych” powinno się używać określenia „polimerowych” lub „tworzyw sztucznych”;

- str. 14 – Autor pisze o „zabrudzeniu paliwa” – nie jest jasne o co chodzi czy „o zanieczyszczenie paliwa” czy „o odkładanie się produktów spalania w turbinie”;
- str. 14 – jest „komercyjnego diesla” – nie precyzyjne określenie, można wnioskować że chodzi o olej napędowy stosowany jako paliwo do silników o ZS, należałoby jednak wskazać czy jest to olej napędowy letni czy zimowy;
- str. 18 – jest „zmniejszenie emisji zanieczyszczeń”, raczej „zmniejszenie emisji związków toksycznych”;
- str. 18 – jest „zainstalowanym sprzętem pomiarowym” właściwsze było by użycie określenia osprzętem lub oprzyrządowaniem;
- str. 19 – jest „pirolizy plastików” powinno być „tworzyw sztucznych”;
- str. 21 – jest „tworzeniem się gum”, raczej powinno być „kauczuków”;
- str. 24 – pojedyncza litera „W” na końcu akapitu;
- str. 29 – jest „silników Diesla”, w języku polskim używa się określenia „silników o zapłonie samoczynnym”;
- str. 29 – jest „lepsza jakość spalania” - nieprecyzyjne określenie;
- str. 30 – jest „dimetyloeter, C_2H_6O ” w przypadku związków organicznych zamiast wzorów sumarycznych lepiej jest używać wzorów strukturalnych, w tym przypadku CH_3-O-CH_3 ;
- str. 30 – jest „energetyk” powinno być „energetyki”;
- str. 31 – jest „spalanie wodoru nie generuje szkodliwych emisji, takich jak dwutlenek węgla, tlenki azotu ...” – sformułowanie jest poprawne jeśli wodór spala się w czystym tlenie, w przypadku spalania wodoru w powietrzu, tlenki azotu niestety powstają;
- str. 33 – jest „jego właściwości spalania” – nieprecyzyjne określenie;
- str. 40 – jest „samoloty działają najbardziej ekonomicznie” – nieprecyzyjne określenie;
- str. 42 – nazwa podrozdziału 2.3.: „Formowanie się związków toksycznych w paliwie”, sugeruje, że związki toksyczne tworzą się bezpośrednio w paliwie, a nie w wyniku jego spalania;
- str. 43 – jest „dokładnie stechiometryczna” – nieprecyzyjne określenie;
- str. 43 – jest „Wartości λ większe niż 1 wskazują na mieszkankę ubogą (więcej powietrza niż teoretycznie idealne), a wartości mniejsze niż 1 oznaczają mieszkankę bogatą (więcej paliwa niż teoretycznie idealne) ...” – nieprecyzyjne określenie co oznacza określenie „teoretycznie idealne”;
- str. 49 – jest „To przekłada się na lepsze wyniki badań” – nieprecyzyjne określenie „lepsze wyniki badań”;
- str. 66 – jest „TIT mierzono przed wirnikiem turbiny za pomocą 3 termopar umieszczonych co 180° ...”, prawdopodobnie termopary były rozmieszczone równomiernie co 120° ;
- str. 82 – jest „Uśredniając całość” – literówka;
- str. 91 – jest „frakcja gazowa ulegała spalaniu i uwalniała się do atmosfery” – nieprecyzyjne określenie. Wydaje się, że to spaliny były uwalniane do atmosfery;
- str. 103 – jest „oleje z plastiku”, powinno być oleje z tworzyw sztucznych;

- str. 105 – jest „olejów pirolitycznych z plastików”, powinno być olejów pirolitycznych z tworzyw sztucznych;
- str. 106 – jest „oleju z pirolizy plastików” powinno być olejów z pirolizy tworzyw sztucznych;

Konkluzja

Zawarte w mojej recenzji uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy, a często uwagi te mogą mieć charakter dyskusyjny.

Biorąc, zatem pod uwagę omówione i ocenione wyżej rezultaty rozprawy doktorskiej stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr inż. Tomasza Suchockiego pt. „Określenie i analiza charakterystyk pracy i emisyjności turbin gazowych zasilanych paliwami różnego typu”** spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (*Dz. U. nr 65, poz.595 z późniejszymi zmianami*) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (*Dz. U. 2018 poz. 1668*). Wnioskuje zatem o **dopuszczenie mgr inż. Tomasza Suchockiego do publicznej obrony** przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Wienicki