

dr hab. inż. Krzysztof Bieńczak, prof. PP
ul. H. Kołłątaja 138
61-421 Poznań

Poznań, dnia 23.03.2022 r.

Recenzja

Dotyczy: rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Cichockiego pt. „Analiza zastosowania turbin gazowych w przemyśle przetwórczym”.

Opinia została przygotowana na podstawie zlecenia prof. dr. hab. inż. Janusza Frączka Dziekana Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej (zlecenie 50444700069).

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Artur Rusowicz, prof. Uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. Marcin Bielecki.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 118 stron, podzielonych na 11 rozdziałów.

Dodatkowo: streszczenie w języku polskimi i angielskim, spis treści, nomenklaturę i bibliografię obejmującą 79 pozycji.

W treści rozprawy zawarto:

1. Cel i zakres pracy

Celem pracy, według jej Autora, jest zbadanie rozwiązań, które obniżają energochłonność produktu i tym samym emisję CO₂ z procesów przemysłowych poprzez układy bazujące na bezpośredniej integracji gazów wylotowych z turbin gazowych w przemyśle przetwórczym (szczególnie polskim).

W pracy zostały przeanalizowane możliwości bezpośredniego wykorzystania gazów wylotowych z turbiny:

- w piecach i palnikach przemysłowych,
- bezpośrednim suszeniu,
- chłodziarkach absorpcyjnych.

2. Wprowadzenie

Dążenie do redukcji kosztów i ograniczenie emisji do środowiska zanieczyszczeń stymuluje rozwój prac nad zwiększeniem sprawności procesów w przemyśle przetwórczym. Jednym ze sposobów realizacji tegoż postulatu jest budowa układów ze skojarzoną produkcją ciepła i energii elektrycznej. Turbiny gazowe dzięki korzystnemu stosunkowi ciepła w gazach wylotowych do mocy na wale (1,0 - 1,9) są atrakcyjnym rozwiązaniem dla procesów wymagających znacznego strumienia ciepła w porównaniu do zapotrzebowania na moc.

3. Piece i palniki przemysłowe

Wysokotemperaturowe reakcje wykorzystywane są w produkcji wielu wyrobów przemysłu chemicznego. Typowe przykłady to kraking parowy przy produkcji etylenu oraz reforming parowy metanu przy produkcji wodoru. W dysertacji został zaprezentowany schemat zintegrowanej turbiny gazowej z piecami krakingowymi w zakładach etylenowych oraz piecami pierwszego reformera w zakładach azotowych. Następnie Doktorant omawia przykładowe rozwiązania z wykorzystaniem turbin gazowych w zakładach azotowych, produkujących etylen i rafineriach. W oparciu o źródła literaturowe podaje kryteria brane pod uwagę przy doborze turbiny gazowej do integracji z piecami reformera i piecami krakingowymi.

W zakończeniu rozdziału znajdują się rozważania na temat możliwości integracji gazów wylotowych z piecami przemysłowymi w polskim przemyśle.

4. Bezpośrednie suszenie

Procesy suszenia stosowane są w przemyśle w celu usunięcia wody z surowca. Gorące gazy mogą być doprowadzane bezpośrednio do suszarni. Wyjątek stanowi przemysł spożywczy, w którym bezpośrednie suszenie nie może być stosowane.

Po wprowadzeniu do tematyki i zaprezentowaniu schematu turbiny gazowej zintegrowanej z suszarniami rozpyłowymi Autor rozprawy dokonuje przeglądu zastosowań turbin gazowych w zakładach przemysłu chemicznego, ceramicznego, drzewnego i papierniczego.

W dalszej części rozdziału Doktorant sformułował kryteria jakie należy uwzględnić, aby gazy wylotowe z turbin mogły być wykorzystane w sposób bezpośredni w komorach suszarniczych. W zakończeniu rozdziału zostały zamieszczone rozważania o możliwościach zastosowania w polskim przemyśle.

5. Trójgeneracja – absorpcyjne urządzenia chłodnicze

Chłodziarki absorpcyjne zasilane są ciepłem. W przypadku chłodziarek jednostopniowych może być wykorzystane ciepło niskotemperaturowe (gorąca woda, para wodna). Natomiast chłodziarki dwustopniowe wymagają zasilania ciepłem wysokotemperaturowym. Największe zainteresowanie układami trójgeneracyjnymi bazującymi na chłodziarkach absorpcyjnych jest w sieciach ciepłowniczych dużych aglomeracji, kampusach uniwersyteckich, szpitalach, zespołach budynków biurowych. Po ogólnych informacjach Autor dokonuje prezentacji trójgeneracyjnych rozwiązań w sieciach chłodniczych, ciepłowniczych i przemyśle. W dalszej części rozdziału definiuje warunki jakie muszą być spełnione, aby uzasadnione było stosowanie układów trójgeneracyjnych z chłodziarkami absorpcyjnymi. W zakończeniu, podobnie jak w poprzednich rozdziałach, zamieszczona jest analiza możliwości zastosowania układów w polskim przemyśle.

6. Selekcja turbin gazowych

W rozdziale 6 Doktorant dokonał klasyfikacji turbin gazowych oferowanych przez firmę Baker Hughes Company o mocy poniżej 50 MW. Dla wyspecyfikowanych turbin, przy użyciu programów wzmiankowanej firmy, dokonał obliczeń termodynamicznych dla pełnego i częściowego obciążenia. Pokazał także dla turbin nowej generacji poziom redukcji emisji NO_x i CO_2 w porównaniu do starszych rozwiązań.

Przeanalizował również możliwość zasilania turbin: zaazotowanym gazem ziemnym, gazem koksowniczym, zgazowanym węglem i wodorem.

7. Analiza zmienności parametrów gazów wylotowych z TG

Analizę zmienności parametrów gazów wylotowych Doktorant wykonał wspomagając się oprogramowaniem firmy Baker Hughes, przy założeniu, iż turbina jest w stanie ustalonym. W sposób szczegółowy przeanalizował wpływ otoczenia i zmiennego obciążenia przy napędzie:

- generatora,
- sprężarki.

Również analizował skutki zużycia eksploatacyjnego turbiny na parametry gazów wylotowych.

8. Regulacja parametrów gazów wylotowych przez systemy pomocnicze i regulacyjne
W pracy Autor rozpatrzył wpływ na parametry gazów wylotowych systemów regulacyjnych oraz pomocniczych turbiny gazowej podzielonych na dwie grupy.

Regulacja temperatury:

- system recyrkulacji upustu z wylotu sprężarki,
- system upustu powietrza z wylotu sprężarki.

Regulacja przepływu:

- nastawialne kierownice wlotowe do sprężarki,
- nastawialne kierownice wlotowe do turbiny niskoprężnej.

Oddziaływanie badanych systemów na temperaturę i przepływ gazów wylotowych został przedstawiony w sposób tabelaryczny i graficzny dla wyspecyfikowanych grup turbin.

9. Wpływ parametrów gazów wylotowych z TG na wybrane procesy przemysłowe

W celu określenia wpływu parametrów gazów wylotowych z turbiny Doktorant opracował modele obejmujące bilanse masowe i cieplne pozwalające uwzględnić zmienne parametry gazów wylotowych oraz modele procesów przemysłowych.

Dla opracowanych modeli Autor podał przyjęte założenia. Uzyskane wyniki obliczeń zamieścił w tabelach.

10. Filozofia kontroli systemów regulacyjnych i pomocniczych TG

Systemy pomocnicze mogą być wykorzystane do regulacji temperatury gazów wylotowych, systemy regulacyjne do kontroli przepływu gazów wylotowych i utrzymania stałej mocy. W rozdziale Autor przedstawił bezpośrednie i pośrednie metody pomiaru parametrów gazów wylotowych.

11. Podsumowanie

W zakończeniu rozprawy Doktorant stwierdza, iż wykonane analizy pokazały możliwość wykorzystania gazów wylotowych z turbiny w celu redukcji energochłonności procesów przemysłowych, obniżenia emisji CO₂ oraz wzrostu sprawności układów.

2. Cel i zakres rozprawy

Doktorant cel i zakres pracy, w oparciu o wiedzę zdobytą w trakcie pracy w firmie Baker Hughes Company, sformułował w rozdziale 1 w następujący sposób „Celem pracy jest zbadanie rozwiązań, które obniżają energochłonność wyrażoną w MJ na kg produktu i tym

samym emisję gazów wylotowych z turbiny gazowej nowej generacji w przemyśle przetwórczym w szczególności na polskim rynku”.

Realizacja powyższego celu wymagała według Autora rozprawy opracowania następujących zagadnień szczegółowych:

- opis procesów, w których gazy wylotowe z turbiny gazowej zostały bezpośrednio wykorzystane,
- przegląd udokumentowanych zastosowań z uwzględnieniem uwarunkowań technicznych i ekonomicznych,
- zdefiniowania kryteriów doboru turbin gazowych,
- omówienia potencjalnych możliwości bezpośredniej integracji gazów wylotowych z turbin gazowych w polskim przemyśle przetwórczym,
- selekcji turbin gazowych produkowanych przez Baker Hughes pod względem zakresu mocy, parametrów spalin, emisji oraz możliwości spalania alternatywnych paliw gazowych,
- analizę wpływu warunków otoczenia, zmiennego obciążenia, zmiennej prędkości obrotowej oraz degradacji turbin na parametry gazów wylotowych,
- zbadanie możliwości regulacji parametrów gazów wylotowych przez systemy regulacji oraz systemy pomocnicze turbiny gazowej,
- analizę wpływu parametrów gazów wylotowych z turbiny gazowej na wybrane procesy przemysłowe,
- opracowanie filozofii kontroli systemów regulacyjnych i pomocniczych turbin gazowych w celu umożliwienia regulacji temperatury i przepływu gazów wylotowych z turbiny gazowej,
- zbadania bezpośrednich i pośrednich metod przepływu gazów wylotowych.

3. Ocena merytoryczna pracy

Autor w rozprawie podjął bardzo istotny problem obniżenia energochłonności w przemyśle przetwórczym a co za tym idzie zmniejszenia emisji CO₂ do otoczenia. Dlatego też można stwierdzić, iż praca nie tylko dotyczy zagadnień związanych z realizacją obiektów technicznych, ale również obejmuje szeroko rozumianą problematykę ochrony klimatu. W swoich rozważaniach opierał się na rozwiązaniach firmy Baker Hughes, w której jest zatrudniony. Szkoda, że nie odniósł się do rozwiązań innych wytwórców. Informacje te mogłyby znaleźć się w rozdziale Przegląd literatury, którego brak jest w pracy. Brak tegoż rozdziału utrudnia stwierdzenie poprawności przyjętego celu pracy oraz zadań niezbędnych

do jego realizacji. Rozdział „Cel pracy” mógłby znajdować się po rozdziałach „Wprowadzenie” i „Przegląd literatury”.

Rozdziały 3, 4 i 5 mają podobną strukturę. Wartościowe w tych rozdziałach jest sformułowanie kryteriów doboru turbin do konkretnych zastosowań oraz analiza możliwości implementacji w polskim przemyśle. Przy doborze turbin bardzo pomocna jest przedstawiona w pracy klasyfikacja turbin. W rozdziale 7 Autor dokonał analizy zmienności parametrów gazów wylotowych z turbiny.

Sformułował założenia przyjęte przy budowie modeli oraz podał zależności wykorzystywanych we wspomnianych modelach. Łatwiej można by było prześledzić tok obliczeń, gdyby wzory zapisać w formie schematu blokowego. Myślę, iż ta problematyka mogłaby stać się tematem dalszych rozważań po pomyślniej obronie doktoratu.

W sposób jasny Doktorant omówił stosowane w turbinach przemysłowych sposoby regulacji. Ciekawe są zawarte w rozdziale 9 rozważania dotyczące wpływu parametrów gazów wylotowych na wybrane procesy przemysłowe. Poruszane w rozdziale zagadnienia warto rozszerzyć w przyszłej działalności badawczej.

W podsumowaniu Autor podkreślił celowość stosowania turbin gazowych ze względów ekonomicznych i ekologicznych.

W pracy brakuje rozdziału, w którym Autor wskazałby kierunki dalszych badań. Rozdział ten pozwoliłby między innymi przygotować wniosek o finansowanie dalszych badań ze źródeł zewnętrznych.

Nie celowe było wydzielanie w pracy podpunktu 10.1, gdy nie ma kolejnych podpunktów.

W pracy drażni używanie potocznego słownictwa np. kompresor zamiast sprężarka, absorber zamiast chłodziarka absorpcyjna.

4. Wartość użyteczna pracy

Opiniowana praca ma duży potencjał użyteczny, gdyż Autor wskazuje możliwości zastosowania turbin gazowych w polskim przemyśle przetwórczym. Sformułowane kryteria doborowe pozwolą poprawnie dobrać turbinę do konkretnych zastosowań. Zaproponowane schematy rozwiązań pozwolą projektantom poszukiwać rozwiązań nie tylko efektywnych ekonomicznie, ale również przyjaznych dla środowiska.

5. Uwagi końcowe

Prezentowaną rozprawą doktorską napisaną jest rzeczowo i w sposób zrozumiały. Wyrażone uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowatorskich rozwiązań w dziedzinie zastosowań turbin gazowych w przemyśle. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam pozytywnie.

6. Wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał się także umiejętnością wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu zastosowania turbin gazowych w przemyśle przetwórczym.

Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr. inż. Marka Cichockiego jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach i tytule naukowym i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

