

dr hab. inż. Krzysztof Bieńczyk, 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 polskim 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 CO<sub>2</sub> 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  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$  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 uwzględniać 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 pomyślnej 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.

