



Prof. dr hab. inż. Waldemar Kuczyński
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
75 – 620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17
Tel. 94 3478-420,438
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin, 21.02.2022 r

RECENZJA

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

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego w oparciu o pismo nr RND-IŚGiE/2/2022 z dnia 12.01.2022 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **dr hab. inż. Artura Rusowicza prof. PW** oraz **dr inż. Marcina Bieleckiego** jako promotora pomocniczego.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza możliwości wykorzystania gazów wylotowych z Turbin Gazowych w zastosowaniach przemysłowych takich jak: przygotowanie powietrza pierwotnego i wtórnego w piecach przemysłowych, źródło energii cieplnej w suszarnictwie oraz jako ciepło odpadowe możliwe do realizacji lewo bieżnego obiegu termodynamicznego w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych. Przeprowadzone w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej rozeznanie w zakresie wykonanych projektów przez głównych producentów tego typu rozwiązań konstrukcyjnych pozwoliło na odpowiednie ukierunkowanie przeprowadzonych analiz. Odnoszą się one do następujących typów turbin gazowych: Przemysłowych Małej i Średniej Mocy oraz Lotniczo-pochodnych, których moc zawiera się w przedziale 5 do 35 MW firmy Baker Hughes o sprawności $\eta \geq 36\%$. Dobór tych urządzeń został dokonany ze względu na ich parametry techniczne i procesowe, emisję spalin i możliwość wykorzystania alternatywnych paliw gazowych do ich zasilania. W szczególności odnosi się to do zaazotowanego gazu ziemnego, gazu koksowniczego, wodoru oraz możliwego do pozyskania ze zgazowania węgla syngazu. Przeprowadzone analizy możliwości zastosowania wskazanych Turbin Gazowych rozpatrzono również w ujęciu oddziaływania otoczenia, charakterystyki ich pracy oraz uwzględniając stopień degradacji/zużycia ich poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Rozważono również wpływ stosowanych systemów regulacji i układów pomocniczych na kontrolowanie temperatury i przepływu gazów wylotowych.

Kolejnym elementem było opracowanie modeli opartych o bilans energii i masy opisujących stopień zintegrowania Turbin Gazowych z rozpatrywanymi procesami przemysłowymi. W oparciu o nie przedstawiono propozycję realizacji kontroli systemów regulacji i pomocniczych wykonywanych w tych urządzeniach. Zadaniem tego układu jest nadzorowanie i sterowanie temperaturą i przepływem gazów wylotowych w celu utrzymania stałej mocy turbiny. W tym celu opisano metody jakie stosuje się dla identyfikacji przepływu gazów wylotowych.

Przeprowadzona analiza wskazała, że do przewidzianych zastosowań rekomenduje się dwuwałowe konstrukcje Turbin Gazowych wyposażonych w modulację kierownic wlotowych do turbiny niskoprężnej (VNGV), która umożliwi zwiększenie sprawności przy częściowym obciążeniu i rozszerzenie obszaru regulacji dla temperatury i przepływu gazów wylotowych. Porównanie możliwych obszarów regulacji ze zmianami głównych parametrów Turbiny Gazowej pozwoliło określić najkorzystniejszy system dla każdej z badanych konstrukcji.

Zbadane rozwiązania wpisują się w pozyskane na etapie analizy literatury informacje dotyczące możliwości obniżenia energochłonności w zakresie 15-30%, a tym samym obniżenie w zakresie od 7% do 20% CO₂ do otoczenia. Okazuje się, że wieloetapowe zagospodarowanie gazów wylotowych z turbin gazowych może prowadzić do osiągnięcia całkowitej sprawności układów kogeneracji nawet powyżej 90%.

2. Omówienie struktury i treści pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 118 stronach w 11 rozdziałach z wykazem oznaczeń i literatury oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. W pierwszym rozdziale pt.: **Cel i zakres pracy**, przedstawiono motywację podjęcia tematu. Podano tu szczegółowe informacje dotyczące rozpatrywanych turbin gazowych tj.: Przemysłowych Małej Mocy z rodziny Nova LT (zakres mocy: 5-20 MW), Lotniczo-pochodnej (zakres mocy: 20-35 MW) oraz turbiny Przemysłowej Średniej Mocy – Nowej Generacji: MS5002E (zakres mocy: 30-35 MW), opalane alternatywnymi paliwami gazowymi. Zdefiniowano w tym rozdziale trzy podstawowe cele, z których pierwszy, to zakres proponowanych działań mających dać odpowiedź na pytania o możliwości integracji rozpatrywanych turbin gazowych z procesami technologicznymi takimi jak: przygotowanie powietrza pierwotnego i wtórnego w piecach przemysłowych, źródło energii cieplnej w suszarnictwie oraz jako ciepło odpadowe możliwe do wykorzystania w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych.

Kolejnym celem pracy jak wskazuje Doktorant, jest opracowanie odpowiednich modeli wykorzystujących bilans energii i masy dla turbin gazowych zintegrowanych ze wskazanymi procesami przemysłowymi w celu optymalizacji realizacji tych działań.

Ostatnim celem było opracowanie, jak Autor to określił, „filozofii” kontroli systemów regulacji i systemów pomocniczych, w celu umożliwienia: kompensacji wpływu warunków otoczenia za parametry gazów wylotowych, forsowanie parametrów gazów wylotowych oraz optymalizację całkowitej sprawności układów współpracy turbiny z procesami przemysłowymi.

Zdefiniowano tutaj również zakres wykorzystania gazów wylotowych w odniesieniu do rozpatrywanych procesów przemysłowych.

W następnym rozdziale 2 pt.: **Wprowadzenie**, opisano ogólne zasady doboru turbin gazowych do rozpatrywanych zastosowań gazów wylotowych w procesach przemysłowych, takich jak: podgrzanie powietrza w piecach przemysłowych, wykorzystanie jako źródło ciepła do bezpośredniego osuszania i wykorzystanie jako źródło ciepła w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych.

Szczegółowo każde z tych zagadnień przedstawiono w kolejnych rozdziałach. Zagadnienia związane z zastosowaniem gazów wylotowych w piecach przemysłowych opisano w **rozdziale 3 pt.: Piece i palniki przemysłowe**. We wstępie w **podrozdziale 3.1**. Autor, zwięźle scharakteryzował procesy produkcyjne, w jakich istnieje możliwość zintegrowania turbin gazowych. Skupiono się tutaj w szczególności na sektorze chemicznym, w którym odniesiono się do krakingu parowego przy produkcji etylenu, reformingu parowego metanu (SMR) stosowanego do pozyskiwania wodoru w zakładach azotowych lub rafineriach. W obu przypadkach istnieje możliwość wykorzystania ciepła odpadowego dla pozyskania pary, którą następnie stosuje się jako ciepło procesowe lub do zasilania turbin parowych napędzających kompresory procesowe. Ciepło procesowe może być następnie zastosowane w piecach do krakingu lub reformerach. W obu przypadkach istnieje możliwość zintegrowania turbin gazowych, co jak wykazano w analizie literatury może prowadzić do obniżenia energochłonności w zakresie 7 – 20%.

Wskazano też w **podrozdziale 3.1.1**. zakresy możliwości uzyskania obniżenia energochłonności dla produkcji amoniaku w zakładach azotowych, destylacji atmosferycznej i próżniowej w rafineriach przy jednoczesnej integracji turbin gazowych z tymi procesami.

Opisano w tej części pracy również zakres zastosowań proponowanych rozwiązań współpracy turbin gazowych w różnych procesach. W pierwszej kolejności przedstawiono informacje związane z produkcją azotu w ujęciu historycznym oraz w odniesieniu do poszczególnych krajów, w których takie metody są wykorzystywane. W następnej podano takie same informacje dla produkcji etylenu i funkcjonowania rafinerii.

W **podrozdziale 3.2**. Doktorant opisał podstawowe kryteria doboru turbin gazowych do integracji z piecami reformerów i krakingowych. Wskazano tutaj, na następujące istotne parametry tej klasyfikacji, uwzględniającej następujące elementy: odpowiednia zawartość tlenu w gazach wylotowych, wysoką ich temperaturę, przynajmniej 10% nadmiaru tlenu w masowym natężeniu przepływu gazów w odniesieniu do zapotrzebowania dla pieców, odpowiednio niską emisję NO_x , możliwość zagospodarowania nadmiaru uzyskanej pary i utleniania gazów procesowych oraz realizację procesu produkcyjnego niezależnie od integracji z daną turbiną gazową.

W kolejnym **podrozdziale 3.3**. opisano możliwości wykorzystania proponowanych układów integracji turbin gazowych w polskim przemyśle z opisanego powyżej sektora.

Rozdział 4. pt.: Bezpośrednie suszenie, z **podrozdziałem 4.1**. jak sam tytuł wskazuje, dotyczy opisu tego zjawiska przy możliwości wykorzystania integracji odpowiednich turbin gazowych. Przegląd zastosowań tej metody zaprezentowano w **podrozdziale 4.1.1**. z uwzględnieniem obszaru chemii nieorganicznej, przemysłu ceramicznego, drewnopochodnego, papierniczego i spożywczego. Następnie w podrozdziale 4.2. również przedstawiono kryteria doboru turbin gazowych dla wyszczególnionych w tej części pracy zastosowań określając następujące parametry: konieczność zachowania odpowiedniej relacji energii cieplnej zawartej w gazach wylotowych do wymaganej mocy turbiny i procesu wskazując, że musi to być przynajmniej krotność wynosząca 1.5, możliwość wykorzystania energii cieplnej w strumieniu gazów wylotowych z 10% nadmiarem w stosunku do koniecznego pokrycia zapotrzebowania suszarni, odpowiednio niska zawartość wilgoci (6 - 7%) w gazach wylotowych, odpowiednio wysoka temperatura tych gazów i ich stały przepływ masowy lub objętościowy.

W **podrozdziale 4.3**. opisano możliwości wykorzystania proponowanych układów integracji turbin gazowych w polskim przemyśle suszarniczym.

Kontynuując Doktorant w **rozdziale 5. pt.: Trójgeneracja – Absorpcyjne Urządzenia Chłodnicze**, wykonał analizę wiedzy z zakresu wykorzystania zastosowania gazów wylotowych z turbin gazowych do zasilania lewobieżnych układów termodynamicznych. W **podrozdziale 5.1**. scha-

raktyzowano funkcjonowanie tego typu układów, a w **podrozdz. 5.1.1.** opisano zakres zastosowań w ujęciu sieci chłodniczych i ciepłowniczych oraz przemysłu. W **podrozdziale 5.2.** opisano zasady doboru turbin gazowych do integracji z absorpcyjnymi układami chłodniczymi, wskazując, że koniecznym jest uzyskanie: stosunku wynoszącego 2 w odniesieniu do strumienia ciepła w gazach wylotowych do mocy, 10% nadmiaru energii cieplnej w gazach wylotowych w stosunku do zapotrzebowania urządzeń chłodniczych absorpcyjnych oraz wysoką temperaturę gazów wylotowych. W podsumowaniu tej części pracy również wskazano w podrozdziale 5.3. możliwość zastosowania proponowanych rozwiązań w krajowych strukturach przemysłowych.

W **rozdziale 6**, który Autor zatytułował *Selekcja Turbin Gazowych*, wskazano metodologię doboru odpowiednich turbin gazowych w zależności od zakresu mocy, sprawności oraz parametrów gazów wylotowych (**podrozdział 6.1.**), emisji tlenków azotu i dwutlenku węgla (**podrozdział 6.2.**), możliwości spalania alternatywnych paliw gazowych (**podrozdział 6.3.**) z wyszczególnieniem zaazotowanego gazu ziemnego (**podrozdz. 6.1.1.**), gazu koksowniczego (**podrozdz. 6.1.2.**), produktów zgazowania węgla (**podrozdz. 6.1.3.**) oraz wodoru (**podrozdz. 6.1.4.**).

W **rozdziale 7**, o tytule *Analiza zmienności parametrów gazów wylotowych z TG*, opisano podstawowe właściwości jakie w odniesieniu do koniecznej utrzymanej mocy turbin gazowych powinny zachować gazy wylotowe. Zastosowano tutaj metodę obliczeniową dla określenia tych wielkości w oparciu o zadany zakres temperatury, ciśnienia otoczenia, wilgotności i prędkości obrotowej, dla mocy maksymalnej oraz mocy odpowiadającej 70% obciążeniu, jakie podano w **rozdziale 6.1.**, tego opracowania. Parametry te definiowano dla wskazanych powyżej zastosowań integracji turbin gazowych z procesami przemysłowymi. Rozważono te zagadnienia w odniesieniu do przyjętych w celu pracy turbin gazowych firmy Baker Hughes. Ze względu na standardowe konstrukcje turbin gazowych niewymagających odpowiedniej instalacji pomiarowej, większość wymaganych do analizy funkcjonowania tych układów parametrów wyznaczono na drodze szacunkowej. W tym celu posłużono się oprogramowaniem do modelowania obiegu termodynamicznego turbin gazowych udostępnione przez producenta Baker Hughes. Opis tej metody bazującej na platformie Numerical Propulsion System Simulation (NPSS) opracowanej przez NASA w 1995 roku, obecnie dystrybuowanej i rozwijanej przez Southwest Research Institute oraz platformy Gas Turbine Performance (GTP), zawarto w **podrozdziale 7.1.** Pierwsze z narzędzi modelowania, stosuje się dla Turbin Gazowych Przemysłowych turbin Małej Mocy, Lotniczo-pochodnych oraz Przemysłowych Nowej Generacji, drugie dedykowane jest do Turbin Gazowych Przemysłowych Średniej Mocy. Podano tutaj główne założenia oraz zależności na których oparte są te procedury obliczeniowe. W **podrozdziale 7.2.** przedstawiono wyniki modelowania w odniesieniu do wpływu warunków otoczenia i zmiennego obciążenia na napęd generatora. Rezultaty zaprezentowano w formie graficznej w postaci zależności temperatury otoczenia, wilgotności i obciążenia do skumulowanego czasu pracy turbozespołu. Wyniki te poddano analizie statystycznej i przedstawiono w formie wykresów skrzynkowych. Następnie podano wnioski, mówiące o możliwości potwierdzenia statystycznie istotnej różnicy w wariancjach między Turbinami Gazowymi Średniej Mocy a silnikami Nowej Generacji. Stwierdzono, że nie identyfikuje się znaczących różnic między zmianami kluczowych parametrów funkcjonowania rozpatrywanych turbin, co potwierdza brak przeciwwskazań dla ich zastosowania do napędu generatora. Analizę wpływu warunków otoczenia i zmiennego obciążenia na napęd kompresora przedstawiono w **podrozdziale 7.3.**, gdzie w ten sam sposób przedstawiono uzyskane wyniki badań. Stwierdzono, brak znaczących różnic w zmianach większości kluczowych parametrów rozpatrywanych turbin, z wyjątkiem ich sprawności. Jednocześnie zaobserwowano, że widoczna jest

w odniesieniu do generatora, większa zmienność wszystkich kluczowych parametrów w przypadku zasilania kompresora.

W **podrozdziale 7.4.** opisano wpływ zużycia komponentów turbin gazowych na sprawność kompresora i generatora oraz parametry gazów wylotowych. W tym przypadku zastosowano model zużycia Turbiny Gazowej Lotniczo-pochodnej. W wyniku analizy stwierdzono, że koniecznym jest uwzględnienie wpływu degradacji elementów konstrukcyjnych turbin gazowych na rozpatrywane parametry ich współpracy w rozpatrywanych integracjach przemysłowych.

Rozdział 8 tej dysertacji pt.: *Regulacja parametrów gazów wylotowych przez systemy pomocnicze i regulacyjne TG*, traktuje o wpływie dwóch grup sterujących pracą turbin gazowych. Pierwsza z nich dotyczy regulacji temperatury za pomocą recyrkulacji upustu z wylotu kompresora (ang. nom. IBH), system upustu powietrza z wylotu kompresora (ang. nom. OBB) oraz system regulacji paliwa - praca w warunkach przegrzewania oraz przy zmniejszonej temperaturze maksymalnej. Druga dotyczy sposobów regulacji przepływu gazów wlotowych do kompresora oraz części niskoprężnej turbiny gazowej. Wykonuje się to za pomocą odpowiednich łopatek kierowniczych określonych jako nastawialnych kierownic pierwszego stopnia kompresora turbiny gazowej (ang. nomogram VIGV) oraz nastawialnych kierownic pierwszego stopnia turbiny gazowej niskoprężnej ((ang. nomogram VNGV). W rozdziale tym opisano zakresy wykorzystania różnych wariantów współpracy regulacji temperatury oraz elementów determinujących przepływ gazów dolotowych w zależności od danej rozpatrywanej turbiny gazowej. Badania oparto o standardowe konfiguracje tych układów z turbinami gazowymi: Małej Mocy (1-wałowe), Małej Mocy (2-wałowe), Śr. Mocy (1-wałowe), Śr. Mocy (2-wałowe), Śr. Mocy – Nowej Generacji i Lotniczo-pochodne co przedstawiono w tabeli 13. Natomiast konfigurację poszczególnych rozwiązań przedstawiono w tabeli 14. Uzyskane wyniki badań przestawiono w kolejnych **podrozdziałach** i tak w **8.1.** dla Przemysłowych Turbin Gazowych Średniej Mocy, w **8.2.** Przemysłowych Turbin Gazowych Małej Mocy i w **8.3.** Lotniczo-pochodnych i Przemysłowych Średniej Mocy – Nowej Generacji.

Uzyskane wyniki modelowania przedstawiono dla wszystkich rozpatrywanych rozwiązań w postaci zależności obrazujących zakres regulacji temperatury i systemów przepływu gazów wylotowych mających wpływ na uzyskiwane sprawności turbin gazowych, zawartości tlenu O₂ i strumienia energii cieplnej. Analiza tych zależności dała odpowiedź jaka konfiguracja systemów sterowania temperaturą i przepływem jest najkorzystniejsza dla danej turbiny gazowej. Wyniki te przedstawiono w tabelach 15 do 19.

W kolejnym rozdziale 9 pt.: *Wpływ parametrów gazów wylotowych z TG na wybrane procesy przemysłowe*, przedstawiono wyniki modelowania wykonanego na symulatorze procesów HYSYS firmy ASPEN współpracy turbin gazowych ze wskazanymi w celu pracy procesami przemysłowymi. W **podrozdziale 9.1.** w oparciu o równania stanu Penga-Robinsona zaprezentowano uzyskane badania dla pieców i palników przemysłowych, w **podrozdziale 9.2.** dla bezpośredniego suszenia i w **podrozdziale 9.3.** dla układów trójgeneracyjnych z wykorzystaniem absorpcyjnych urządzeń chłodniczych. W ostatnim przypadku, obliczenia wykonano w oparciu o równania stanu NRTL stosowanych w obliczeniach równowagowych ciec-z-para. Uzyskane dla każdego rozpatrywanego zagadnienia wyniki umieszczono w tabelach 20 do 24.

Rozdział 10 pt.: *Filozofia kontroli systemów regulacyjnych i pomocniczych TG*, zawiera propozycję własnego modelu kontroli systemów pomocniczych i regulacyjnych turbin gazowych umożliwiający jednoczesną regulację temperatury i przepływu gazów wylotowych przy utrzymaniu stałej mocy. Następnie w **podrozdziale 10.1.**, przedstawiono metody identyfikacji przepływu gazów wylotowych z turbin gazowych. W tej części pracy opisano wykorzystywaną aparaturę

pomiarową oraz stosowane metody obliczeniowe. W drugim przypadku przedstawiono zasady pomiaru pośredniego w oparciu o bilans energii wykonany w oprogramowaniu ASME PTC22. Następnie pośredni pomiar w oparciu o Estymator Zredukowanego Przepływu na wlocie do turbiny niskoprężnej (LPT) i pośredni pomiar w oparciu o Estymator Skorygowanego Przepływu na wlocie do kompresora turbiny gazowej.

W podsumowaniu tego rozdziału stwierdzono, że bezpośredni pomiar jest niezbyt często stosowany ponieważ charakteryzuje się on niską dokładnością. Spowodowane jest to przede wszystkim wymiarami systemu wylotowego oraz dostępnością pośrednich metod pomiaru, których dokładność może być nawet dwukrotnie większa.

Rozdział 11 to zbiorcze podsumowanie zredagowanej rozprawy wskazujące na istotne elementy tego opracowania. Najważniejsze z nich to informacje o ilości redukcji emisji CO₂ i wzroście sprawności całkowitej badanych turbin gazowych we współpracy z układami przemysłowymi takimi jak: piece przemysłowe (energochłonność, obniżenie od 1% do 25%, emisja 78% do 89%), suszenie bezpośrednie (energochłonność, obniżenie do 0,5, emisja 9% do 20%, wzrost sprawności +8,3% ÷ +13,6% przy całkowitej wynoszącej 67,6% ÷ 71,1%), trójgeneracji z zastosowaniem absorpcyjnego urządzenia chłodniczego (redukcja CO₂ w odniesieniu do MWh 30% ÷ 40% w stosunku do średniego wskaźnika dla ciepłownictwa w Polsce wynoszącego 347 kg CO₂/MWh wg URE, sprawność całkowita układu na poziomie 81,5% ÷ 96,5%)

Określono również, które konstrukcje turbin są najodpowiedniejsze dla integracji z danym procesem przemysłowym przy możliwości spalania alternatywnych paliw gazowych. Zidentyfikowano również zakres optymalnej regulacji pracy turbin gazowych przy wykorzystaniu układów sterujących temperaturą gazów wylotowych oraz systemami kierowniczymi na dopływie do kompresora oraz części niskoprężnej turbiny. Wykonano to w odniesieniu do parametrów zewnętrznych w jakich funkcjonują te konstrukcje. Zaproponowano również model sterowania tymi układami w oparciu o identyfikacje parametrów gazów wylotowych z uwzględnieniem odpowiednich estymatorów przepływu. Informacje te odniesiono do proponowanych konstrukcji firmy Baker Hughes z grupy produktów o sprawności ($\eta \geq 36\%$).

Kolejną pozycją w opracowaniu jest **Bibliografia** z wykazem 79 pozycji z literatury przedmiotu, raportów, stron internetowych oraz aktów prawnych. Pośród nich 3 publikacje są współautorstwa Doktoranta. Zarówno pod względem merytorycznym jak i ilościowym tę część dysertacji można ocenić pozytywnie.

3. Oryginalność pracy

Oryginalne osiągnięcia jakie uzyskano w pracy, przedstawiono zbiorczo w jej podsumowaniu. Istotnym elementem jest wykazanie możliwości obniżenia emisji związków szkodliwych do otoczenia takich jak CO₂ i NO_x w układach integracji turbin gazowych z systemami przemysłowymi takimi jak piece i palniki, suszarnictwo i układy trójgeneracyjne wykorzystujące absorpcyjne urządzenia chłodnicze. W pracy rozważono kilka konstrukcji turbin gazowych identyfikując zakres ich wykorzystania w zależności od integracji z danym procesem, rodzajem spalanego paliwa oraz układami regulacji temperatury gazów wylotowych oraz przepływu gazów dolotowych do kompresora i części niskoprężnej turbiny gazowej. Pozwoliło to na stworzenie modelu optymalizacji funkcjonowania tych układów co jest niewątpliwie elementem innowacyjnym na tle obecnie wykorzystywanych rozwiązań w tym zakresie. Świadczą o tym uzyskane zakresy obniżenia energochłonności tych procesów, uzyskanych sprawności oraz obniżenia emisji związków szkodliwych do otoczenia.

4. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

W odniesieniu do strony redakcyjnej pracy, pojawiają się następujące uwagi:

1. W spisie oznaczeń zatytułowanym *Nomenklatura*, brak jest polskich wyjaśnień większości zastosowanych oznaczeń.
2. W tym samym miejscu, zastosowano jedno oznaczenie η o kilku znaczeniach, nie zastosowano natomiast rozróżnienia za pomocą np. indeksu dolnego.
3. W pracy często stosowane są skróty, lub anagramy bez ich wyjaśnień. Przykładowo str. 13 „*Na podstawie danych firmy GE...*” – należało podać chociaż jeden raz pełną nazwę firmy. Potencjalny odbiorca tego opracowania nie musi posiadać tak szczegółowej wiedzy aby był w stanie zidentyfikować takie oznaczenia.
4. Na stronie 15 tytuł **rozdziału 3** został zapisany jako: *Piece i palniki przemysłowe*. Moim zdaniem tytuł ten lepiej by brzmiał np.: *Metody wykorzystania podgrzanego powietrza w piecach przemysłowych*, ze względu na informacje podaną w **rozdziale 2 pt.: Wprowadzenie**, gdzie jasno zdefiniowano zakresy wykorzystania integracji turbin gazowych z procesami przemysłowymi.
5. Na przedstawionych schematach np. Rys. 1 str. 16, brak jest wskazania, co sprężarka dostacza do komory spalania. Oczywiście można przyjąć, że jest to powietrze atmosferyczne, ale może być też np. zasilanie wtórne a nie pierwotne.
6. W pracy zdarzyło się Autorowi nie zastosowanie indeksów dolnych w oznaczeniach, np. str.21, podpis pod rys. 7, gdzie zapisano oznaczenie tlenu jako „O2”, str. 35, str. 36, tabela nr 10 na str. 40, tabela nr 12 na str. 42, str. 48, str. 97, str. 110 i jeszcze w innych miejscach. Uwaga ta jest oczywiście czysto redakcyjna.
7. W pracy umieszczono też określenia, które pod względem stylistycznym mogą być uznane za dyskusyjne. Przykładowo, na str. 14, Autor podaje zapis: „*Kolejne rozdziały pracy zawierają szczegółowy opis procesów, w których TG zostały bezpośrednio zintegrowane wraz z przeglądem udokumentowanych zastosowań...*”. Zdanie to wskazuje na to, że turbiny gazowe (TG) zostały zintegrowane z dokumentacją, a nie z procesami, których np. parametry techniczne zostały odpowiednio opisane. Podobnie na stronie 17 w podrozdziale 3.1.1. Przegląd zastosowań, rodzi się pytanie, czym różni się „*Manualna kontrola IGV...*” od „*ręcznej regulacji IBH...*”, skoro manualny oznacza to samo co ręczny. Wskazane powyżej niedociągnięcia nie są jedynymi, ale nie ma potrzeby wyszczególniać ich wszystkich. Uwaga ta ma na celu wskazanie Doktorantowi większej dbałości w tym zakresie w Jego kolejnych opracowaniach i publikacjach.
8. Na str. 24 pojawił się błąd w tekście dotyczącym rys. 3.
9. W pracy wskazano kilka konstrukcji turbin gazowych producenta Baker Hughes, jako te, które były rozważane w integracji z procesami przemysłowymi. Nigdzie w pracy nie umieszczono przykładowego zdjęcia wraz ze schematycznym opisem tych urządzeń. Na stronach internetowych firmy Baker Hughes są one ogólnie dostępne, więc nie ma tutaj chyba żadnych ograniczeń wynikających z odrębnych umów na zgodę aby te dane opublikować.

Podsumowując część redakcją opracowania należy zauważyć, że jest ono sformułowane w miarę poprawnym językiem technicznym. Zdarzają się w niej dość często tzw. określenia branżowe, co może wynikać ze ścisłej współpracy Doktoranta z producentem rozpatrywanych

turbin gazowych. Wskazane wyżej niedociągnięcia nie mają znaczącego wpływu na część merytoryczną tego opracowania co powoduje, że opinia jest w tej części oceny pozytywna.

Niektóre uwagi o charakterze dyskusyjnym i pytania:

1. W przedstawionej do oceny dysertacji podano w **rozdziale 1** jej cel i zakres. Brakuje natomiast jasno postawionej tezy lub hipotezy, które powinny być udowodnione lub potwierdzone. Skoro rozpatrywano możliwość współpracy turbin gazowych z trzema wskazanymi procesami przemysłowymi, w zakresie wykorzystania gazów wylotowych, to wydaje się, że nie jest to trywialne zagadnienie.
2. W kilku miejscach opracowania zastosowano określenie „*strumień ciepła do mocy*” np. Tabela 1 str. 13. Pytanie, co Doktorant identyfikuje pod tym określeniem?
3. W **rozdziale 6** na str. 37, w tabeli 8 przedstawiono zbiorczo wpływ temperatury otoczenia na moc na wale i sprawność η (Q_w). Interpretacja tych wyników oraz ich procentowe ujęcie jest niejasne. Pytanie do jakiej w rzeczywistości sprawności odnoszą się te wyniki i dlaczego np. mamy ujemne wartości przepływu tlenu, skoro objętościowo wskazuje się jego brak?
4. W tym samym rozdziale na str. 38 podano, że uwzględnia się częściową prędkość obrotową wału na podstawie referencyjnych projektów w wartości 70%, ale nie podano ile to w rzeczywistości jest.
5. W **rozdziale 6** na str. 43 na rys. 3 zastosowano linie trendu, które w wielu przypadkach nie odzwierciedlają rzeczywistego przebiegu opisywanego zjawiska. Rodzi się tutaj pytanie, czy jest to tylko błąd edycyjny?
6. **Rozdział 7**, str. 52 i dalej pojawiają się informacje o modelu termodynamicznym turbiny gazowej. Pojawia się informacja o tym, że straty ciepła do otoczenia są uwzględnione w sprawności komory spalania. Zgodnie z normami dla kotłów i pieców przemysłowych straty te nie powinny być większe od 2%, czy taką wartość tutaj przyjęto. Dalej rozdzi się pytanie, czy umieszczone od str. 53 główne zależności mają zapis wynikający z konotacji charakterystycznej dla zastosowanego oprogramowania i gdzie w opracowaniu znajdują się dane na podstawie których wykonano obliczenia przedstawione na kolejnych stronach 55 do 73.
7. Na str. 102 w tabeli 25 określono zakresy odchylenia standardowego dla poszczególnych wartości zmierzonych. W tekście pojawia się informacja o tym, że są to m.in. założenia Autora. Pytanie, jakie to założenia?

Uwagi o charakterze ogólnym:

1. Praca niewątpliwie stanowi ciekawe i potrzebne opracowanie dotyczące określenia możliwości współpracy turbin gazowych z procesami przemysłowymi.
2. Istotnym jest zakres rozpatrywanych procesów przemysłowych, ponieważ każdy z nich w układzie zintegrowanym z turbinami gazowymi i przy wykorzystaniu gazów wylotowych charakteryzuje się naczynym obniżeniem emisji związków szkodliwych do otoczenia.
3. Opracowanie to może mieć aplikacyjny charakter jeśli jej wyniki zostaną zaimplementowane przez producenta turbin gazowych, które były w niej rozpatrywane.

5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora mgr inż. Marka Cichockiego naukowych oraz analitycznych metod badawczych w dyscyplinie naukowej inżynierii środowiska, górnictwo i energetyka - według poprzedniej klasyfikacji w energetyce, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art. 187 ust. 1-2 z dnia 20 lipca 2018 r i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony o co wnioskuję.


Przewodniczący, inż. Waldemar Kuczajski