Zeszyty Energetyczne Tom, VII

Wyzwania naukowe w dobie światowej transformacji energetycznej

2020, s. 107–127

Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych jako metoda do współspalania paliw ze zwiększonym udziałem wodoru

Jean-Marc Fąfara, Norbert Modliński

Politechnika Wrocławska, Katedra Inżynierii Konwersji Energii

e-mail: jean-marc.fafara@pwr.edu.pl

Streszczenie

Niniejszy artykuł prezentuje podstawowe charakterystyki technologii Power-to-Gas (P2G), mikroturbin gazowych oraz zasadność i trudności wzajemnego integrowania powyżej wymienionych technologii. W dalszej części publikacji zostanie opisana nowa koncepcja samoistnego wewnątrzkomorowego zawracania spalin w komorach spalania mikroturbin gazowych, której zadaniem będzie umożliwienie zintegrowania technologii P2G z mikroturbinami.

Słowa kluczowe: mikroturbiny gazowe, recyrkulacja spalin, wodór, P2G

1. Wprowadzenie

W energetyce coraz częściej mówi się o rozwoju odnawialnych źródeł energii. Do tych źródeł można zakwalifikować siłownie wiatrowe, wodne, panele fotowoltaiczne itp. Wspólną, niekorzystną cechą tych źródeł energii jest fakt, że generowana energia pochodzenia odnawialnego jest silnie uzależniona od warunków meteorologicznych, a co za tym idzie, następuje nierówno-

mierna generacja energii w czasie. Problemem staje się zatem możliwość magazynowana energii elektrycznej w czasie nadmiaru jej wytwarzania, celem wykorzystania w okresie niedoboru jej generowana. Istnieje możliwość generowania z uzyskanego nadmiaru energii elektrycznej mieszaniny metanu oraz wodoru. Jest to technologia zwana *Power-to-Gas* (P2G). Aby uzyskać zwiększoną sprawność przetwarzania energii odnawialnej należy zwiększyć udział wodoru w paliwie metanowo-wodorowym. Takie paliwo można w późniejszym czasie wykorzystać do napędzania urządzeń energetycznych, ponownie umożliwiających wytwarzanie energii elektrycznej.

Jednym z ciekawszych urządzeń, które można zasilać opisanym powyżej paliwem mogą okazać się mikroturbiny gazowe. Niestety, wraz ze wzrostem udziału wodoru w paliwie, zwiększa się gradient temperatury oraz prędkość spalania. Lokalne wzrosty temperatury mogą doprowadzić do uszkodzenia cieplnego elementów komory spalania, zaś wzrost prędkości spalania może prowadzić do cofania się czoła spalania, co z kolei może skutkować spalaniem w strefie przygotowania mieszaniny paliwowo-powietrznej, tj. w strefie nieprzeznaczonej do odbywania się procesu spalania.

W celu zintegrowania technologii P2G i mikroturbin zaproponowano koncepcję samoistnego wewnętrznego układu zawracania spalin w komorze spalania. Idea tego rozwiązania polega na wprowadzeniu do konstrukcji komory spalania układu umożliwiającego pobranie części spalin sprzed turbiny i przesłania ich do strefy tworzenia i spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej. Działanie spalin na strefę spalania, zarówno z punktu widzenia chemicznego jak i fizycznego, może spowodować uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu temperatur oraz ograniczenie maksymalnej prędkości spalania, co z kolei umożliwiłoby zwiększenie udziału wodoru w paliwie metanowo-wodorowym.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione główne charakterystyki technologii P2G, mikroturbin gazowych, zasadność ich wzajemnego zintegrowania oraz badania nowej koncepcji samoistnego, wewnątrzkomorowego zawracania spalin.

2. Integracja paliwa wodorowego (P2G) z mikroturbinami gazowymi

2.1. Wodór jako paliwo odnawialne

Odnawialne źródła energii są pojęciem, z którym każdy się spotkał. Aby sprawnie przejść do problematyki związanej z tym tematem należy przytoczyć definicję odnawialnych źródeł energii, opracowaną przez roboczą grupę ds. odnawialnych nośników energii REWP (*The Renewable Energy Working Party*), powołaną przez IEA (*International Energy Agency*), przedstawioną

w opracowaniu [1]: „Odnawialna energia jest tą ilością energii, jaką pozyskuje się w naturalnych procesach przyrodniczych stale odnawialnych. Występując w różnej postaci, jest generowana bezpośrednio lub pośrednio przez energię słoneczną lub z ciepła pochodzącego z jądra Ziemi. Zakres tej definicji obejmuje energię generowaną przez promieniowanie słoneczne, wiatr, z biomasy, geotermalną cieków wodnych i zasobów oceanicznych oraz biopaliwo i wodór pozyskany z wykorzystaniem wspomnianych odnawialnych źródeł energii". Można zatem szybko zauważyć, że do energii odnawialnej wliczają się między innymi takie źródła energii, jak siłownie wiatrowe, siłownie hydrodynamiczne oraz panele fotowoltaiczne. Charakterystyką wymienionych źródeł energii jest silne uzależnienie generowanej energii elektrycznej od warunków środowiskowych. Warunki te nieustannie ulegają zmianom. Oznacza to, że generacja energii elektrycznej jest niejednostajna w czasie. W określonych warunkach istnieje możliwość generowania większych ilości energii elektrycznej, zaś w innych okresach, przy zmianie warunków środowiskowych, możliwe jest generowanie jej niedostatecznej ilości. Jest to zagadnienie utrudniające eksploatację tego rodzaju źródeł energii elektrycznej. Równocześnie, w dzisiejszej oraz jutrzejszej branży energetycznej, można dostrzec coraz większe znaczenie energii odnawialnych [2]. Przykładowo w Stanach Zjednoczonych energetyka odnawialna wynosiła 8% udziału w energetyce krajowej w 2010 r. [3], natomiast w Polsce w tym samym roku było to już 15% [4]. Można zatem stwierdzić, że odnawialne źródła energii charakteryzują się zarówno coraz bardziej dynamicznym zastosowaniem oraz niejednostajnością generowanej energii elektrycznej, zwłaszcza z takich obiektów, jak siłownie wiatrowe, siłownie hydrodynamiczne oraz panele fotowoltaiczne. Aby sprostać tym problemom naukowcy oraz inżynierowie zaproponowali rozwiązanie, które umożliwi magazynowanie nadmiaru energii elektrycznej w celu ujednolicenia produkcji energii z odnawialnych źródeł. Tym rozwiązaniem naukowo-inżynierskim jest technologia P2G.

Technologia Power-to-Gas polega na zamianie (nadmiaru generowanej) energii elektrycznej na gaz wodorowy przy wykorzystaniu zjawiska hydrolizy, a następnie na zamianie części uzyskanego wodoru na gaz metanowy przy wykorzystaniu procesu metanacji. Uzyskane gazy są sobą mieszane w wybranych proporcjach lub zachowywane oddzielnie i tak uzyskany gaz metanowo-wodorowy, metan lub wodór stanowią paliwa. Ponadto uzyskane paliwa można magazynować i transportować, a zatem wykorzystać w innej lokalizacji, niż miejsce jego produkcji. Przykładem ilustrującym technologię Power-to-Gas jest demonstrator „Jupiter 1000" zbudowany we Francji. Jupiter 1000 wprowadził po raz pierwszy do miejskiej instalacji gazowej dodatek paliwa wodorowego dnia 20 lutego 2020 r. [5].

W zastosowaniu energetycznym wodór lub metan są stosowane do zasilania ogniw paliwowych, których zadaniem jest generacja prądu elektrycznego oraz do zasilania urządzeń energetycznych, takich jak turbiny gazowe.

Ogniwa paliwowe są zasilane tylko paliwem wodorowym lub tylko paliwem metanowym. W zależności od wybranej technologii zasilania ogniw paliwowych ogólna sprawność procesu wykorzystania nadmiaru energii elektrycznej odnawialnej jest zmienna. Wykorzystanie czystego wodoru do zasilania ogniw paliwowych charakteryzuje się większą sprawnością ogólną (40% – uwzględniając proces hydrolizy i ewentualnie metanizacji, magazynowania, przesyłania i wytwarzania energii elektrycznej), niż zastosowanie metanu (36%), gdyż nie ma strat energii związanych z procesem metanacji [6]. Podane sprawności odnoszą się do konwersji energii elektrycznej na energię elektryczną. Przy wykorzystaniu paliw z technologii P2G do napędzania turbin gazowych można wyróżnić nawet trzy warianty zasilania: czystym wodorem, czystym metanem lub mieszaniną obydwóch gazów. Oszacowane zostało, że zasilanie turbiny gazowej czystym metanem charakteryzuje się sprawnością rzędu 21%, zaś zasilenie turbiny gazowej czystym wodorem – 28%. Mowa tutaj o sprawności przetwarzania energii elektrycznej pochodzenia odnawialnego, na energię elektryczną wygenerowaną przez turbiny gazowe, zasilaną paliwem wytwarzanym technologią P2G [7]. Zasilanie turbiny gazowej mieszaniną paliwa wodorowego oraz metanowego posiada zmienne wartości sprawności, w zależności od zastosowanych proporcji. Podane sprawności odnoszą się do konwersji energii elektrycznej pochodzenia odnawialnego, na energię elektryczną wygenerowaną przez turbinę gazową, przechodząc przez technologię P2G. Oznacza to, że optymalnie byłoby stosować tylko wodór, bez konieczności stosowania metanu. Ponadto spalanie wodoru umożliwia redukcję substancji węglopochodnych.

Mimo możliwości zyskania na sprawności procesu preferuje się dzisiaj eksploatację metanu. Stosowanie paliwa o zwiększonej zawartości wodoru przedstawia szereg wad. Faktem jest, że paliwo wodorowe posiada bardzo dużą gęstość energii (ok. 120 MJ/kg [6]), w porównaniu do metanu (ok. 50 MJ/kg [6]), natomiast gęstość wodoru jest bardzo niska (0,0899 kg/m^3 przy ciśnieniu 1013,25 hPa, w temperaturze 0°C [8]) w porównaniu do gęstości metanu (0,717 kg/m^3 przy ciśnieniu 1013,25 hPa, w temperaturze 0°C [9]). Istnieje możliwość skroplenia wodoru, co umożliwia nadanie mu gęstości ponad 71 kg/m^3, natomiast nawet do 50% energii wodoru jest tracone na proces skraplania [6]. Co za tym idzie, jest wymagana duża przestrzeń do magazynowania wodoru zawierającego tą samą ilość energii, co metan. Wynika z tego pierwsza wada stosowania wodoru – trudności z jego magazynowaniem. Poza tym wodór posiada odmienne właściwości pod względem procesu spalania, niż większość powszechnie stosowanych paliw. Badania wykazują modyfikację procesu spalania przy dodawaniu wodoru do konwencjonalnych paliw. Za przykład mogą posłużyć badania symulacyjne oraz doświadczalne, opisane w pracy Jerzaka [10], które obrazują zmianę adiabatycznej temperatury spalania oraz prędkości laminarnego płomienia podczas dodawania wodoru do metanu. Między czystym metanem a czystym wodorem adiabatyczna temperatura spalania zmienia się w zakresie od

ok. 2225 K do ok. 2375 K, zaś prędkość spalania płomienia laminarnego zmienia się w zakresie od ok. 40 cm/s do ok. 250 cm/s, w warunkach stechiometrycznych. Zmiana tych parametrów powoduje utrudnienia w procesie spalania/współspalania wodoru z paliwami konwencjonalnymi w urządzeniach energetycznych, co stanowi trzecią wadę tego paliwa.

Aktualnie naukowcy oraz inżynierowie pracują nad minimalizacją wyżej opisanych wad użytkowania paliwa wodorowego. Korzystanie z wodoru jako paliwa jest motywowane jego czystością w procesach utleniania, natomiast przed znaczącym przejściem na to paliwo należy rozwiązać problemy z jego magazynowaniem, zabezpieczaniem oraz użytkowaniem w urządzeniach energetycznych.

2.2. Charakterystyka mikroturbin gazowych

Mikroturbiny gazowe są urządzeniami energetycznymi, których zastosowanie można odnaleźć w codziennym życiu, można również przewidzieć ich zastosowanie w przyszłości. Przed opisaniem możliwości zastosowania mikroturbin gazowych należy wskazać zarówno ich zalety, jak i wady. Do zalet mikroturbin gazowych można zaliczyć [11]:

- zwartą konstrukcję,
- wysoki stosunek mocy generowanej na masę urządzenia,
- ograniczoną liczbę ruchomych elementów,
- niższy poziom emisji hałasu (w porównaniu z napędami tłokowymi),
- elastyczność pod względem stosowanego paliwa (ciekłe lub gazowe),
- niższą emisję zanieczyszczeń atmosferycznych (ograniczenie emisji tlenków azotu poniżej 9 ppm),
- możliwość wykorzystania ciepła spalin,
- niskie koszty eksploatacyjne,
- krótki czas rozruchu,
- niski poziom drgań,
- niskie zużycie środków do smarowania (można również wykorzystywać pneumatyczne łożyskowanie wału).

Niestety, mikroturbiny gazowe posiadają wady, które ograniczają ich zastosowanie:

- niska sprawność przy niskim lub średnim obciążeniu [12],
- kosztowna technologia produkcji,
- zależność mocy i sprawności od warunków otoczenia.

Aktualnie mikroturbiny posiadają niższą sprawność niż konwencjonalne turbiny gazowe. Wynika to z faktu, że miniaturyzacja konstrukcji wiąże się z pomniejszeniem kanałów przepływowych, a co za tym idzie zwiększeniem strat przepływu [13]. Na przykładow, turbina gazowa 9F.04 produkcji General Electric posiada sprawność elektryczną pojedynczego cyklu na poziomie 38,7% (dla produkcji energii elektrycznej na poziomie 288 MW) [14], zaś mikroturbina gazowa C30 produkcji Capstone posiada sprawność elektrycz-

ną pojedynczego cyklu na poziomie 26% (dla produkcji energii elektrycznej na poziomie 30 kW, z zastosowaniem rekuperatora ciepła) [15]. Należy podkreślić, że turbiny gazowe konwencjonalne oraz miniaturowe często są połączone z urządzeniami, które wykorzystują ciepło zawarte w spalinach, co również umożliwia zwiększenie sprawności całościowej wykorzystania energii paliwa.

Mikroturbiny gazowe mogą być stosowane do celów energetycznych w przemyśle. Nie są one powszechnie użytkowane w energetyce zawodowej, ponieważ charakteryzują się mniejszą sprawnością. Są natomiast wykorzystywane do generowania przetwarzania energii (najczęściej elektrycznej oraz cieplnej) w tych ośrodkach, w których uzyskuje się paliwo odpadowe. Ich zastosowanie jest wtedy jak najbardziej uzasadnione, zwłaszcza że umożliwia wykorzystanie energii odpadowej. Poniżej zostaną podane dwa przykłady takich rozwiązań, które okazały się być sukcesem [11].

Mikroturbiny gazowe są wykorzystywane również w transporcie. Samoloty pasażerskie oraz wojskowe są wyposażane w mikroturbiny gazowe, które odgrywają istotną rolę w funkcjonowaniu oraz bezpieczeństwie lotów. Mikroturbiny w tych rozwiązaniach są nazywane APU (*Auxiliary Power Unit*) lub EPU (*Emergency Power Unit*), w zależności od ich zastosowania. APU są mikroturbinami gazowymi zasilanymi zasadniczo paliwem lotniczym, których rolą jest dostarczenie energii niezbędnej do rozruchu silników zasadniczych podczas uruchamiania napędów samolotów. Podczas lotu APU nie pracuje, za wyjątkiem awarii, która powoduję utratę energii pokładowej, generowanej przez zasadnicze zespoły napędowe. W takiej sytuacji APU jest uruchamiane i umożliwia generowanie energii elektrycznej (do podtrzymywania przyrządów pokładowych w stanie pracy oraz do napędzania elektrycznych pomp hydraulicznych, co umożliwia sterowanie statkiem powietrznym) oraz energii pneumatycznej (służącej do zasilania rozruszników silników zasadniczych). Urządzenie EPU różni się od APU zasilaniem (jest zasilane hydrazyną) oraz faktem, że nie jest wykorzystywane tylko w sytuacjach awaryjnych podczas lotu. EPU jest stosowane w lotnictwie wojskowym (np. F-16), niemniej preferowane jest tam używanie APU i jedynie nieliczne maszyny wyposażone są w EPU. Innym zastosowaniem mikroturbin w transporcie są miniaturowe napędy turboodrzutowe lub turbowałowe, stosowane do napędzania modeli lotniczych lub dronów. Ponadto od połowy XX w. najwięksi producenci samochodowi próbowali zaprojektować i wdrożyć do powszechnego użytku samochody o napędzie turbinowym. Nad rozwojem napędów turbinowych dla samochodów pracowały m.in. takie firmy, jak: Rover, Fiat, Ford, Chrysler, General Motor [16]. Zastosowanie napędów mikroturbinowych do napędzania samochodów pozostaje dzisiaj rozwiązaniem „egzotycznym", stosowanym w pojedynczych seriach, często jako część napędu hybrydowego (np. H600, Jaguar C-X75 itp.). Aby mikrotur-

biny gazowe stały się coraz bardziej konkurencyjne w przemyśle samochodowym należy zwiększyć ich sprawność.

Mikroturbiny gazowe mogą się już teraz okazać bardzo pożądanymi urządzeniami do generowania energii potrzebnej w gospodarstwach domowych (lub mobilnych). Mimo nadal ograniczonej sprawności generowania przez nie energii elektrycznej łatwo można wykorzystywać ciepło ze spalin, co umożliwia zwiększenie sprawności całego urządzenia do poziomu nawet 90% [17]. W ten sposób mikroturbiny gazowe pracujące w systemie CHP, mogą zarówno produkować energię elektryczną, jak i energię cieplną (np. ogrzewanie oraz ciepła woda bieżąca). Można bez trudu wyobrazić sobie takie rozwiązania do zasilania przyczep kempingowych, mobilnych laboratoriów, odizolowanych domów w naturze itp. Dzisiaj nie są one jeszcze stosowane w związku z wysokim kosztem produkcji oraz zbyt niską sprawnością elektryczną (ok. 26% w przeciwieństwie do ok. 35% dla silników tłokowych benzynowych).

2.3. Połączenie techniki wodorowej z mikroturbinami gazowymi

Powyżej zaprezentowano potencjał wykorzystywania paliwa metanowo-wodorowego w ujęciu odnawialnych źródeł energii oraz mikroturbin ga-zowych. Oba rozwiązania charakteryzują się znaczącymi zaletami – paliwo odnawialne jest metodą magazynowania energii przy tworzeniu czystszych paliw (metanu oraz wodoru), zaś mikroturbiny są niskoemisyjne, ciche, tanie w eksploatacji, z możliwością uzyskania sprawności energetycznej nawet na poziomie 90%.

Połączenie obu technologii oraz ich rozwój umożliwi:

- zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii,
- generowanie oraz użytkowanie najprostszych oraz najmniej emisyjnych paliw (metanu z wodorem),
- czerpanie korzyści z zalet mikroturbin gazowych (tania eksploatacja, niska emisyjność, prostota konstrukcji, dogodne warunki eksploatacji itp.).

Oba rozwiązania dotyczą zarówno sektora przemysłowego, energetycznego, transportowego, jak i domowego. Oznacza to, że posiadają wspólną płaszczyznę, na której mogą się wzajemnie integrować w przyszłości.

Uzyskane paliwo metanowo-wodorowe generowane technologią Power-to-Gas może zostać magazynowane oraz transportowane do odbiorców tego paliwa. Jednymi z potencjalnych odbiorców tego paliwa mogą się okazać użytkownicy mikroturbin gazowych. Stąd wywodzi się kwestia oceny możliwości zastosowania paliwa wzbogaconego w wodór do zasilania mikroturbin gazowych. Aby zwiększyć sprawność tego sposobu wykorzystywania paliwa należy dążyć do zwiększania udziału wodoru w metanie.

3. Identyfikacja problemów związanych z zastosowaniem paliwa wzbogaconego w wodór do napędzania mikroturbin gazowych

Paliwo wodorowe (H_2) jest zbudowane z dwóch pierwiastków wodoru. Wodór jest pierwiastkiem najbardziej rozpowszechnionym wokół nas, lecz w stanie naturalnym występuje w połączeniu z innymi pierwiastkami. Oznacza to, że wodór nie może być traktowany jak pozostałe paliwa kopalniane, gdyż do jego uzyskania należy go po prostu wytworzyć. Paliwo wodorowe jest powszechnie określane jako „nośnik energii" i może zostać porównane do energii elektrycznej, którą aby móc wykorzystać, należy najpierw wytworzyć. Faktem jest, że paliwo wodorowe posiada bardzo dużą gęstość energii w porównaniu do metanu, natomiast gęstość wodoru jest bardzo niska, co skutkuje odpowiednio dużą przestrzenią do magazynowania wodoru, zawierającego taką samą ilość energii, co metan. Dodatkową właściwością wodoru jest jego łatwość do przenikania materii, spowodowana małymi rozmiarami molekuł H_2. Niemniej niska gęstość wodoru ułatwi mu szybką dyfuzję w powietrzu (szybszą niż dla innych paliw gazowych), co zwiększa bezpieczeństwo jego stosowania, za wyjątkiem przestrzeni o objętości zamkniętej (np. pomieszczenia bez odpowiedniej wentylacji, zamknięte luki maszyn i pojazdów itp.). Właściwości te utrudniają użytkowanie wodoru pod względem jego pozyskiwania, transportowania oraz magazynowania.

Paliwo wodorowe charakteryzuje również jego wysoka reakcyjność podczas procesu spalania. Zakres palności dla paliwa wodorowego wynosi od 4 do 74% obj. w powietrzu [18]. Dla porównania, dla metanu zakres palności w powietrzu wynosi od 5 do 14% obj. [18]. Dodatkowo należy podkreślić, że wodór ma znacznie większą prędkość spalania, niż inne powszechnie stosowane paliwa gazowe (lub ciekłe). Prędkość laminarnego spalania wodoru wynosi w powietrzu nawet ponad 450 cm/s, z kolei dla metanu ten parametr wynosi nieco ponad 50 cm/s (ze średnią na poziomie 40 cm/s) [18]. Podane wartości dotyczą spalania paliw w warunkach normalnych. Mimo tego, w komorach spalania urządzeń energetycznych, mimo modyfikacji warunków spalania nadal pozostaje znacząca różnica w prędkości spalania wodoru oraz innych paliw. Zwiększona prędkość laminarnego spalania oraz bardzo szeroki zakres palności sprawiają, że w komorach spalania turbin gazowych może dochodzić do spalania wodoru w strefie, w której dochodzi do mieszania wodoru oraz powietrza. Strefa ta nie jest przeznaczona do pracy w płomieniu, co może doprowadzić do jej uszkodzenia. Zjawisko to jest zwane *flashback*. Wysoka prędkość spalania i szeroki zakres spalania w powietrzu mogą doprowadzać do flashback-ów w komorach spalania turbin gazowych.

Inną właściwością związaną ze spalaniem wodoru jest jego wysoka temperatura spalania w powietrzu (w warunkach normalnych). Dla wodoru

temperatura spalania w powietrzu wynosi ok. 2300 K, zaś dla metanu jest to ok. 2150 K [19]. Można zatem zaobserwować przyrost ok. 150 K temperatury spalania, przy przejściu ze spalania metanu na wodór. Podczas spalania w komorach spalania turbin gazowych wskazywane temperatury są osiągane lokalnie. Wzrost lokalny temperatury w komorze spalania turbin gazowych nie jest pożądany podczas zmiany paliwa, z dwóch podstawowych przyczyn. Pierwszą z nich jest obniżenie wytrzymałości materiałów tworzących komorę spalania. Drugą przyczyną jest wzrost tworzonego tlenku azotu, zgodnie z mechanizmem Zeldowicza [20]. Oznacza to, że wysoka lokalna temperatura spalania paliwa wodorowego w powietrzu może doprowadzać do przedwczesnego zużycia elementów składowych komory spalania oraz do generowania większych emisji tlenków azotu.

Z powyższego wynika, że paliwo wodorowe posiada bardzo odmienne właściwości spalania od pozostałych paliw współcześnie stosowanych do napędu turbin gazowych (oraz mikroturbin gazowych). Dlatego w chwili obecnej dobrym rozwiązaniem jest traktowanie paliwa wodorowego jako dodatku do paliwa metanowego (w ujęciu technologii P2G), w celu zasilania mikroturbin gazowych. Badania przeprowadzone przez Jansohna w Instytucie Paul Scherrer (Szwajcaria) pozwoliły stwierdzić możliwość współspalania paliwa metanowo-wodorowego z przekroczeniem 20% udziału wodoru w palniku, bez spowodowania jego uszkodzenia [21]. Planowane są dalsze badania, mające na celu określenie, jaki udział wodoru może znieść mikroturbina gazowa.

Aby umożliwić zwiększenie udziału wodoru w paliwie metanowym (w ujęciu technologii P2G) do zasilania mikroturbin gazowych, należy rozwiązać następujące problemy względem zasilania metanowego: ograniczenie temperatur spalania (maksymalnych), w celu uniknięcia termicznego uszkodzenia komory spalania, ograniczenie emisyjności tlenków azotu oraz ograniczenie prędkości spalania, w celu uniknięcia zjawiska „flashback-u".

4. Koncepcja wewnętrznej recyrkulacji spalin dla mikroturbin gazowych w ujęciu zwiększania zawartości wodoru w paliwie odnawialnym – paliwo metanowo-wodorowe

4.1. Zaproponowana koncepcja wewnętrznej recyrkulacji spalin

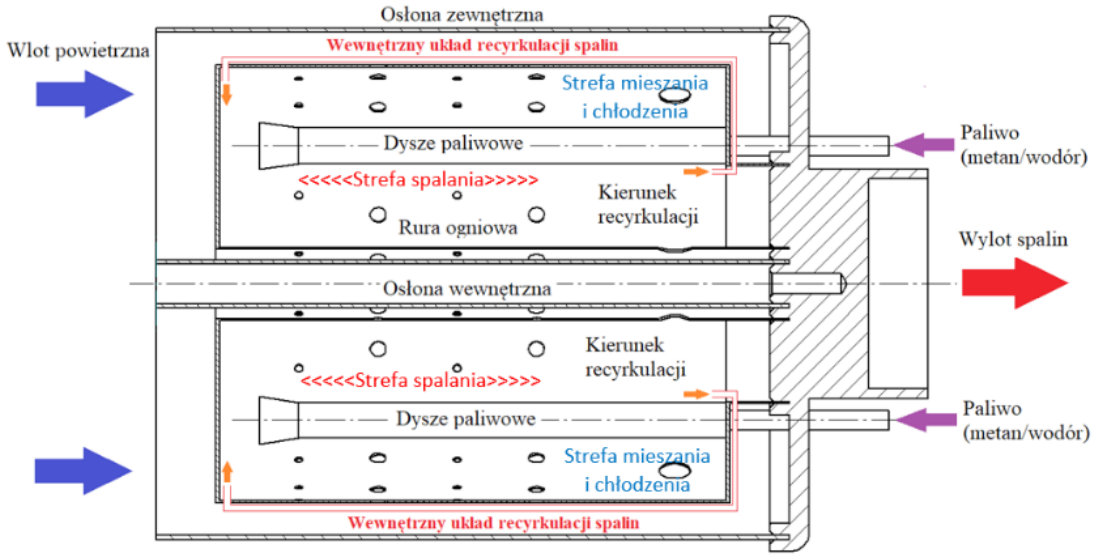
Należy podkreślić, że paliwo metanowo-wodorowe może niebawem okazać się paliwem przyszłości. Część wodorowa paliwa wyróżnia się od pozostałych znanych i wykorzystywanych paliw tym, że nie jest wydobywane, lecz wytwarzane przez człowieka. Technologią silnie wspierającą stosowa-

nie paliwa metanowo-wodorowego jest technologia Power-to Gas, która umożliwia zamianę nadmiaru generowanej energii elektrycznej pochodzenia odnawialnego na wodór, a następnie metan. Pod względem sprawności energetycznej najkorzystniejsze byłby wytwarzanie i użytkowanie czystego wodoru. Niemniej eksploatacja wodoru niesie za sobą liczne utrudnienia techniczne, takie jak transportowanie, magazynowanie oraz spalanie, które dzisiaj ograniczają jego użytkowanie. Dlatego stosuje się preferencyjne paliwo metanowo-wodorowe, jednak dąży się do zwiększania udziału w nim wodoru. Mikroturbiny gazowe są urządzeniami, które umożliwiają przekształcenie energii paliwa na inne postacie energii, np. na energię elektryczną i/lub energię cieplną (gdy są generowane obie formy energii, to technologia ta nazywa się *Combined Heat and Power* (CHP)). W zależności od zastosowanej technologii, sprawności mikroturbin gazowych sięgają ok. 25% (przy generowaniu tylko energii elektrycznej) oraz ok. 90% (przy generowaniu energii elektrycznej oraz cieplnej). Mikroturbiny gazowe są i będą stosowane w branży przemysłowo-energetycznej, transportowej oraz w gospodarstwach domowych. Biorąc pod uwagę powyżej opisane punkty można z łatwością przewidzieć, że mikroturbiny gazowe będą również korzystały z paliwa metanowo-wodorowego.

Przed przystąpieniem do przedstawienia oraz opisania zaproponowanego rozwiązania technicznego, które może się okazać korzystne do wykorzystania w budowaniu mikroturbin gazowych działających na paliwo metanowe ze zwiększonym udziałem wodoru, należy wskazać na problemy, związane ze spalaniem paliwa wodorowego. Wraz ze wzrostem udziału wodoru w paliwie metanowo-wodorowym (od 0% wodoru do 100% wodoru), można zauważyć wzrost prędkości płomienia laminarnego z ok. 40 cm/s do ok. 450 cm/s oraz wzrost adiabatycznej temperatury spalania z 2150 K do 2300 K. Wzrost prędkości spalania może powodować cofanie się frontu spalania do strefy tworzenia się mieszaniny paliwowo-powietrznej („flashback"), co może przełożyć się na obniżenie jakości spalania, a także uszkodzić elementy komory spalania, które nie są przystosowane do funkcjonowania w strefie spalania. Wzrost temperatury spalania (maksymalnej) przyczynia się do powstawania większej emisyjności tlenków azotu (NO_x) oraz do zintensyfikowania procesu cieplnego zmęczenia elementów tworzących komorę spalania.

W celu rozwiązania powyżej opisanych problemów, związanych z użytkowaniem paliw wzbogaconych w wodór, powstała koncepcja wewnętrznego samoistnego układu recyrkulacji spalin, umieszczonych bezpośrednio w komorze spalania mikroturbiny gazowej. Wewnętrzny układ recyrkulacji spalin jest układem znajdującym się wewnątrz komory spalania, który umożliwia zawrócenie spalin ze strefy przed wylotem z komory spalania, do strefy tworzenia się mieszaniny paliwowo-powietrznej. W komorze spalania dochodzi do straty ciśnienia całkowitego, co utrudnia proces zawracania spalin. Zjawiskami, które zostaną wykorzystane w opracowywaniu tego roz-

wiązania będą efekt Venturiego (umożliwiający zassanie spalin z końca komory spalania) oraz różnica między ciśnieniami statycznymi a całkowitymi. Poniżej zostaną opisane spodziewane zjawiska, które zajdą komorze spalania w wyniku zawrócenia spalin. Schemat ilustrujący opisywaną koncepcję przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Koncepcja wewnętrznej recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych

4.2. Oczekiwane działanie wewnętrznej recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbin gazowych

Rozwiązanie zostanie zastosowane na mikroturbinie gazowej z komorą spalania zawierającą zasadniczo rurę ogniową z otworami stopniującymi doprowadzane powietrze do strefy spalania. W ten sposób mieszanina paliwowo-powietrzna przechodzi progresywnie z bardzo bogatej do bardzo ubogiej. Należy podkreślić, że osiągi mikroturbiny gazowej są uzależnione od strumienia masy powietrza, zatem w wyniku zastosowania recyrkulacji spalin strumień masy powietrza przepływającego przez turbinę gazową nie powinien ulegać zmianom. Z powyższego wynika, że doprowadzenie spalin do strefy tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej, przy wyparciu odpowiadającej ilości powietrza, spowoduje wzbogacenie początkowej strefy spalania. Natomiast ilość powietrza, która nie trafiła do strefy tworzenia mieszaniny paliwowo-powietrznej, trafi przez pozostałe otwory rury ogniowej do dalszej strefy spalania, co z kolei spowoduje zubożenie strefy spalania w pozostałej części komory spalania. W wyniku zabiegu zawrócenia spalin pod względem działania tlenu, można zauważyć początkowe wzbogacenie strefy spalania oraz następujące zubożenie strefy spalania, co może spowodować jedynie lekkie przesunięcie strefy spalania do wylotu komory spalania, przy spalaniu standardowego paliwa. Podczas współspalania wo-

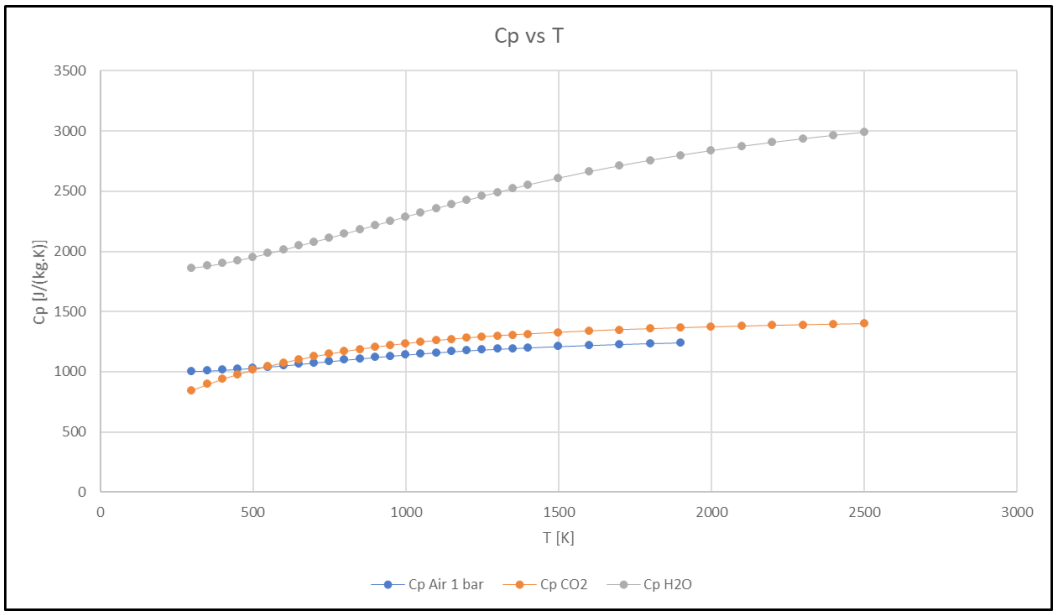
doru przesunięcie może ponownie się przemieścić do pierwotnego położenia, w wyniku większej reakcyjności składowej wodorowej paliwa. Poza tym możliwym przesunięciem strefy spalania nie oczekuje się innego działania zmiany przepływu tlenu, gdyż w bilansie doprowadzonej ilości powietrza, a zatem i tlenu, do komory spalania, bilans pozostaje niezmienny przed i po zastosowaniu wewnętrznego układu recyrkulacji spalin. Nawet jeżeli zmiana przepływu tlenu w komorze spalania nie jest elementem, który odmieni proces spalania, należy podkreślić, że w początkowej strefie spalania, w wyniku zastosowania zaproponowanego rozwiązania, pojawia się dodatkowy składnik – są to spaliny. Zawierają one wiele substancji, takich jak czyste powietrze (które nie brało udziału w spalaniu), parę wodną, tlenek węgla, dwutlenek węgla, węglowodory oraz inne związki chemiczne. Można zatem rozpatrywać zarówno działanie fizyczne, jak i chemiczne spalin na proces spalania.

Działanie chemiczne spalin – omówione przez Guethego i in. [22] – dotyczy oceny wpływu podawania do wlotu sprężarki turbiny gazowej gazów spalinowych na reakcyjność oraz pracę turbiny gazowej, w drodze badań numerycznych oraz doświadczalnych. Badania były prowadzone dla komory spalania ALSTOM GT26, stosowanej przykładowo w instalacji energetycznej. Mimo że układ jest zasilany gazem ziemnym, opisano pracę ze względu na analizę wpływu spalin na proces spalania. Spaliny są pobierane w odpowiedniej ilości za układem odzyskiwania ciepła (HRSG), następnie są chłodzone do temperatury otoczenia. Tak przetwarzana odpowiednia proporcja spalin jest podawana do wlotu sprężarki turbiny gazowej. Badania numeryczne były prowadzone przy wykorzystaniu oprogramowania CHEMKIN II. Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na stanowisku odwzorującym warunki pracy komory spalania w turbinie gazowej. Pomiary zostały przeprowadzone dla różnych stopni zawracania spalin. Ważnym wnioskiem z badań jest stwierdzenie, że podczas zawracania spalin w turbinach gazowych reakcyjność procesu spalania jest ograniczona przez dwa czynniki. Pierwszym z nich jest zubożenie atmosfery spalania w tlen, co przyczynia się do przyhamowania procesu spalania (dochodzi do wzbogacenia mieszaniny paliwowo-powietrznej). Z punktu widzenia chemicznego procesu spalania, zmniejszenie stężenia tlenu w strefie spalania ogranicza stężenie jego rodników O. Rodniki są elementami składowymi procesu spalania, które napędzają ten proces. Drugim z czynników jest zwiększone stężenie dwutlenku węgla w atmosferze spalania. W wyniku przeprowadzonych badań podkreślono, że dwutlenek węgla nie jest gazem „doskonale obojętnym". Oznacza to, że część tlenku węgla obecna w procesie spalania ulega pewnej reakcyjności. Zidentyfikowana reakcja dwutlenku węgla jest następująca: $OH + CO \leftrightarrow H + CO_2$. Jak można stwierdzić, ta reakcja jest obustronna. Wynika z niej, że dwutlenek węgla posiada zdolność do reagowania z atomem wodoru H, który w procesie spalania jest jednym z rodników. W nawiązaniu do innej pracy badawczej prowadzonej przez Liu i in. [23],

zwrócono uwagę również na fakt, że rodnik wodoru H bierze udział w procesie spalania w następującej reakcji: $H + O_2 \leftrightarrow O + OH$. Biorąc pod uwagę, że dwutlenek węgla ogranicza obecność rodników wodoru H, ta druga reakcja ma również inhibitowany proces. Druga przemiana, w obliczu zubożenia atmosfery spalania w tlen, jest dodatkowo ograniczona także przez utrudniony dostęp do tlenu, co z kolei ogranicza generację substancji O oraz OH, które również są rodnikami, znacząco wpływającymi na reakcyjność procesu spalania. Ograniczona reakcyjność procesu spalania wiąże się z redukcją temperatury spalania oraz zmniejszeniem prędkości laminarnego spalania. Chemiczne działanie dwutlenku węgla jest bardziej intensywne w procesie spalania metanu niż wodoru. Spaliny zawierają również dwutlenek węgla, którego działanie chemiczne także może wpłynąć na proces spalania. W wyniku ograniczenia stężenia rodników H w strefie spalania, proces spalania zostanie ograniczony. W wyniku takiego działania spalin na proces spalania można się spodziewać obniżenia temperatury spalania (maksymalnej) oraz jego prędkości. Przy współspalaniu coraz bardziej bogatych w wodór paliw można oczekiwać, że proces ten umożliwi wydłużenie okresu wydzielania energii cieplnej wodoru, w taki sposób, aby zachować prędkość spalania tradycyjnego paliwa (w tym przypadku metanu). Spowolnienie procesu wydzielania ciepła na dłuższy okres czasowy oraz wymiarowy, umożliwione przez proces zawracania spalin, pozwoli na ograniczenie temperatury spalania (maksymalnej), co umożliwi zachowanie znamieniowych temperatur oraz prędkości spalania.

Działanie fizyczne spalin – zawracane gazy są gazami spalinowymi, które zawierają między innymi czyste spaliny. Czyste spaliny składają się między innymi z dwutlenku węgla oraz pary wodnej. Dla dwutlenku węgla oraz pary wodnej ciepło właściwe dla stałego ciśnienia jest pomijalnie zależne od ciśnienia (przy pominięciu zjawiska dysocjacji chemicznej, które następuje po przekroczeniu temperatury 1500 K), natomiast jest znacząco zależne od temperatury [24], [25]. Ciepło właściwe dla powietrza jest zależne od temperatury oraz ciśnienia. Można stwierdzić, że poczynając od temperatur od 300/400 K ciepło właściwe dla powietrza jest *quasi* niezależne od ciśnienia, dla zakresu ciśnień od 1 do 100 barów [26]. Poniżej przedstawiona zależność ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu dla powietrza dla 1 bar (w mikroturbinach gazowych ciśnienie w komorach spalania jest dosyć mocno ograniczone z powodu niewielkich strumieni powietrza, które narzucają stosowanie sprężarek promieniowych, które z kolei ograniczają spręż do około 4/4,5 [13]), w zależności od temperatury [26]. Na podstawie zebranych danych zbudowano wykres (rys. 2) przedstawiający ewolucję ciepła właściwego dla stałego ciśnienia, dla powietrza, dwutlenku węgla oraz pary wodnej, w zależności od temperatury. Ciepło właściwe dla stałego ciśnienia dwutlenku węgla oraz pary wodnej jest większe niż ciepło właściwe dla stałego ciśnienia powietrza przy stałym ciśnieniu, począwszy od temperatury ok. 550 K. W komorach spalania mikroturbin gazowych w obszarze

rury ogniowej temperatura mieści się w zakresie od 500 do nawet 2000°C [13]. Oznacza to, że w zakresie pracy komory spalania ciepło właściwe dla stałego ciśnienia spalin jest większe od ciepła właściwego powietrza dostarczanego do komory spalania. Z powyższego wynika, że zawracane spaliny mogą pochłonąć ciepło wynikające z procesu spalania, przy równoczesnym mniejszym przeroście temperatury, niż bez zawracania spalin. Można zatem przewidzieć, że działanie fizyczne spalin umożliwi ograniczenie temperatury spalania w komorze spalania (minimalizacja „hot spotów"). Ograniczenie temperatury spalania wpływa również na ograniczenie prędkości spalania płomienia laminarnego (zgodnie z prawem van't Hoffa wraz ze spadkiem temperatury reakcji chemicznej maleje również prędkość reakcji). Uzyskane obniżenie temperatur pozwoli na zastosowanie paliwa o zwiększonym udziale wodoru.

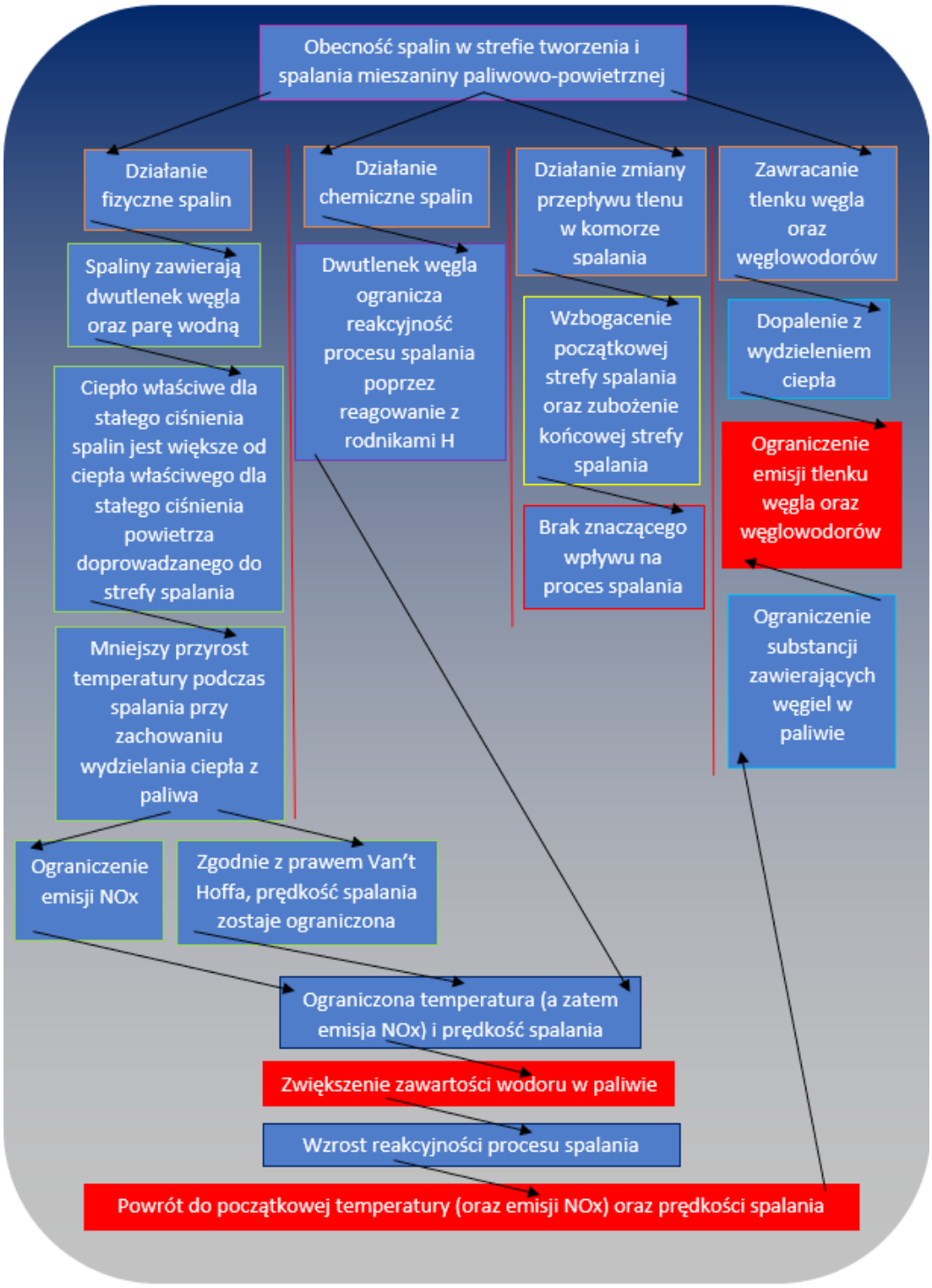


Rys. 2. Zależność ciepła właściwego dla stałego ciśnienia powietrza, dwutlenku węgla oraz pary wodnej od temperatury, dla zakresu ciśnień przeciętnie panujących w komorach spalania mikroturbin gazowych

Działanie na spaliny – w wyniku zawracania spalin do strefy spalania, będzie istniała również możliwość dopalenia tlenków węgla oraz węglowodorów, co umożliwi wydzielenie ciepła również ze spalin, a tym samym zwiększenie efektywności procesu spalania. Można ograniczyć także emisję tlenku węgla oraz węglowodorów. Ponadto zawracanie spalin umożliwiając spalanie większej ilości wodoru pozwoli na redukcję zawartości związków węglopochodnych w paliwie, co może się przyczynić do obniżenia emisji tlenku węgla oraz węglowodorów.

Podsumowując, zawrócenie spalin umożliwi ograniczenie temperatury (maksymalnej) oraz prędkości spalania, co może zostać zniwelowane przez współspalanie bogatszych w wodór paliw. Dąży się w tej koncepcji do zwiększenia udziału wodoru w paliwie, przy równoczesnym zachowaniu pierwotnych para-

metrów pracy mikroturbiny gazowej, poprzez badanie wewnętrznego układu zawracania spalin. Rysunek 3 ilustruje przeprowadzoną analizę przewidywanych efektów działania wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w mikroturbinach gazowych, w ujęciu zwiększenia ilości współspalanego wodoru.



Rys. 3. Oczekiwane efekty działania wewnętrznej recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej na proces spalania w ujęciu spalania paliwa (metanu), o zwiększającym się udziale wodoru

Przeprowadzono numeryczne badanie zaproponowanego układu recyrkulacji spalin do zastosowania w komorach spalania mikroturbin gazowych, w celu zwiększenia udziału wodoru w paliwie metanowym, przy równoczesnym zachowywaniu znamieniowych parametrów procesu spalania (temperatury oraz prędkości spalania). Wprowadzony układ ma za zadanie ograniczenie procesu spalania, co umożliwi zwiększenie udziału wodoru w paliwie, co z kolei spowoduje powrócenie do znamionowej dynamiki procesu spalania. Zaproponowane rozwiązanie ma na celu zwiększenie udziału wodoru w paliwie zasilającym mikroturbinę gazową, bez znacznego modyfikowania procesu spalania (jaki jest spotykany przy spalaniu paliwa metanowego).

5. Planowane badania

5.1. Sformułowanie tez badawczych

W związku z planowanymi badaniami opisanego układu, postawiono następujące tezy:

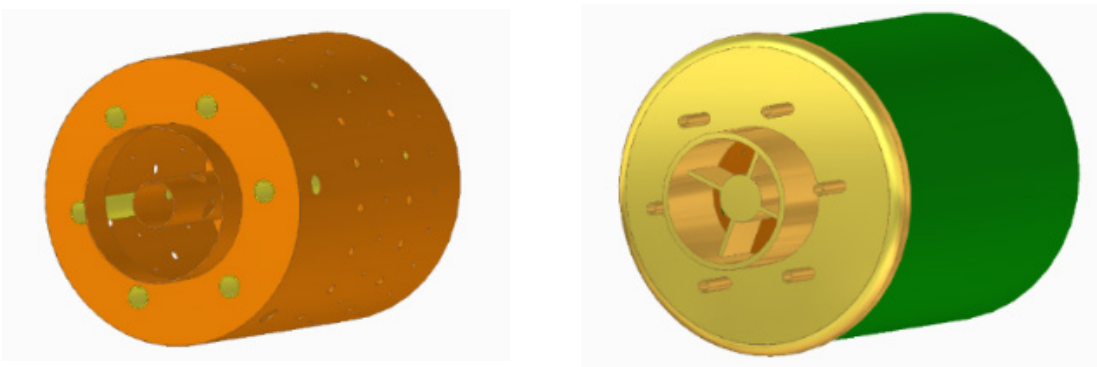
1. Istnieje możliwość zastosowania wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorach spalania mikroturbin gazowych.
2. Istnieje możliwość kontrolowania procesu spalania paliwa w komorze spalania mikroturbiny gazowej, poprzez wprowadzenie wewnętrznego układu recyrkulacji spalin.
3. Zastosowanie wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi redukcję temperatur spalania (zmniejszenie gradientu temperatur), w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru (zachowanie znamieniowej temperatury spalania paliwa, przy równoczesnym zwiększeniu zawartości wodoru w paliwie).
4. Zastosowanie wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi redukcję prędkości spalania, w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru (zachowanie znamieniowej prędkości spalania paliwa, przy równoczesnym zwiększeniu zawartości wodoru w paliwie).
5. Zastosowanie wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi redukcję emisji tlenków azotu, w celu spalania metanu o zwiększonym udziale wodoru (zachowanie znamieniowej emisji tlenków azotu, przy równoczesnym zwiększeniu zawartości wodoru w paliwie).
6. Zastosowanie wewnętrznego układu recyrkulacji spalin w komorze spalania mikroturbiny gazowej umożliwi redukcję emisji tlen-

ku węgla oraz węglowodorów, przy spalaniu metanu o zwiększonej zawartości wodoru.

5.2. Planowane badania numeryczne opisanej koncepcji

W celu zweryfikowania przedstawionych tez zostaną wykonane następujące działania:

1. Wykonanie obliczeń mikroturbiny gazowej, zasilanej domyślnie paliwem metanowym.
2. Stworzenie modelu trójwymiarowego komory spalania zaprojektowanej mikroturbiny gazowej (w programie Solid Edge – rys. 4) oraz przygotowanie modelu „wodnego" do badań numerycznych (w programie ANSYS).
3. Przeprowadzenie analizy numerycznej przepływowo-spaleniowej komory spalania dla paliwa metanowego, progresywnie wzbogacanego w wodór (od 0% wodoru do 100% wodoru w paliwie).
4. Analiza uzyskanych wyników pod kątem oceny możliwości tworzenia wewnętrznego układu recyrkulacji spalin.
5. Zaprojektowanie i zaimplementowanie układu wewnętrznej recyrkulacji spalin do istniejącego modelu komory spalania (w programie Solid Edge).
6. Przygotowanie nowego modelu „wodnego" do badań numerycznych (w programie ANSYS).
7. Przeprowadzenie analizy numerycznej przepływowo-spaleniowej modyfikowanej komory spalania dla paliwa metanowego, progresywnie wzbogacanego w wodór (od 0% wodoru do 100% wodoru w paliwie).
8. Analiza i konfrontacja uzyskanych wyników.
9. Ewentualne powtórzenie badań, dla poprawionego wewnętrznego układu recyrkulacji spalin.
10. Podsumowanie wyników badań numerycznych oraz potwierdzenie lub odrzucenie przyjętych tez.



Rys. 4. Widok referencyjnej komory spalania mikroturbiny gazowej, przeznaczonej do badań numerycznych koncepcji wewnętrznego układu recyrkulacji spalin

5.3. Badania numeryczne

Model trójwymiarowy komory spalania zostanie przygotowany za pomocą programu Solid Edge. Tak uzyskany model komory spalania zostanie następnie przetworzony w programie Ansys Design Modeler, w celu przypisania odpowiednich nazw do powierzchni komory spalania. Model zostanie w dalszej kolejności wprowadzony do programu Ansys Fluent Meshing, w celu wygenerowania siatki numerycznej. W oparciu o analizę literaturową [13], [27]–[29] można stwierdzić, że komory spalania o budowie porównywalnej do badanej komory spalania są dyskretyzowane za pomocą elementów typu tetrahedron. W ostatnich latach opracowano i przebadano również elementy typu polyhedron [30], [31], które są oparte o elementy typu tetrahedron. Elementy polyhedron w badaniach numerycznych przepływów pozwalają na uzyskanie szybszej zbieżności, a równocześnie ich budowa umożliwia lepsze dostosowanie się do geometrii badanego obiektu. Ponadto siatka numeryczna będzie posiadała warstwę przyścienną, wytworzoną z elementów typu prism. Dodanie warstwy przyściennej będzie miało za zadanie zachowanie wartości bezwymiarowej grubości ścianki przyściennej w zakresie do wartości Y+ = 300 – taki wybór wynika z zastosowanego modelu turbulencji, opisanego w dalszej części. Następnie siatka numeryczna zostanie wczytana do programu Ansys Fluent. Najpierw zostaną wybrane modele, które umożliwią wykonanie symulacji procesów przepływowych oraz spalania. Zostanie włączone równanie energii, które umożliwi zamodelowanie wymian ciepła wewnątrz obszaru obliczeniowego. Włączony zostanie model promieniowania „Discrete Ordinates" [13], który pozwoli na zamodelowanie ścianek komory spalania jako czarne ciało, natomiast obszar obliczeniowy będzie traktowany jako szare ciało [32]. Wybrano model turbulencji z grupy RANS – k-epsilon Realizable. Dobór modelu turbulencji został przeprowadzony na podstawie analizy literaturowej [13], [28], [33]. Wykorzystany zostanie model spalania typu „Non-Premixed" [13], [28], [33], wraz z użyciem mechanizmu spalania Grimech 3.0. [34], [35], stworzonego do modelowania procesu spalania metanu. We właściwościach materiałowych dla „pdf-mixture" zostanie włączony model dla wyznaczania współczynnika absorbcji promieniowania „Weighted-Sum-of-Gray-Gases" (WSGGM), który bierze pod uwagę pasma absorpcyjne poszczególnych gazów [13]. Badania będą prowadzone w stanie stacjonarnym (*steady*). Wykorzystany zostanie solver „Pressure Based" oraz schemat dyskretyzacji drugiego stopnia z opcją „Pressure-velocity Coupled". Warunki brzegowe będą dobrane zgodnie z obliczeniami projektowymi komory spalania odniesienia. Po przeprowadzeniu badań w celu opracowania wyników wykorzystane zostaną narzędzia programów Ansys Fluent oraz Ansys CFD-Post. Przedstawione parametry badań numerycznych zostały dobrane na podstawie przytoczonej literatury oraz zaleceń firmy Ansys [36], [37].

6. Podsumowanie

Przedstawiona koncepcja wewnętrznej recyrkulacji spalin wewnątrz komory spalania mikroturbiny gazowej polega na zawróceniu części spalin sprzed wlotu do turbiny do miejsca tworzenia i spalania mieszaniny paliwowo-powietrznej. Jest to nowe podejście do układu recyrkulacji spalin i planowane jest prowadzenie badań na ten temat. W pierwszej kolejności będą to badania numeryczne, a jeżeli okażą się zasadne, to zostaną planowane badania eksperymentalne. W wyniku analiz literaturowych oczekuje się od takiego układu złagodzenia gradientu temperatur oraz ograniczenia prędkości spalania. Zjawiska te są niezmiernie pożądane, gdy do paliwa konwencjonalnego dodaje się paliwo wodorowe. Przedstawiona koncepcja ma za zadanie umożliwienie zintegrowania mikroturbin gazowych z technologią Power-to-Gas. Należy dodatkowo podkreślić, że obie technologie, mikroturbiny gazowe oraz P2G, prężnie się rozwijają i istnieje możliwość ich potencjalnej współpracy na różnych polach przemysłu, energetyki oraz transportu.

Literatura

[1] Norwisz J., Musielak T., Boryczko B., *Odnawialne źródła energii – polskie definicje i standardy*, Rynek Energii 2006, 1, 10–20.

[2] *International Energy Outlook 2019 – with projections to 2050*, EIA (Energy Information Administration), 2019.

[3] Mohtasham J., *Review article – renewable energies*, Energy Procedia 2015, 74, 1289–1297. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.774.

[4] Ignarska M., *Odnawialne źródła energii w Polsce*, Poliarchia 2013, 1, 57–72. DOI: 10.12797/Poliarchia.01.2013.01.06.

[5] *Power to Gas : de l'hydrogène injecté sur le réseau gazier par Jupiter 1000*, https://www.connaissancedesenergies.org/power-gas-de-lhydrogene-injecte-sur-le-reseau-gazier-par-jupiter-1000-200227 (dostęp: 28.06.2020).

[6] Boudellal M., *Power to Gas*, De Gruyter, Berlin 2018.

[7] Chmielniak T., Lepszy S., Mońka P., *Energetyka wodorowa – podstawowe problemy*, Polityka Energetyczna 2017, 20(3), 55–66.

[8] *Gas Encyclopedia by Air Liquide*; https://encyclopedia.airliquide.com/fr/hydrogene (dostęp: 28.06.2020).

[9] *Gas Encyclopedia by Air Liquide*; https://encyclopedia.airliquide.com/fr/methane (dostęp: 28.06.2020).

[10] Jerzak W., *Adiabatyczna temperatura płomienia oraz prędkość spalania laminarnego dla mieszanin CH_4/H_2/powietrze*, Archiwum Spalania 2012, 11(3–4), 197–206.

[11] Chitrarth L., Chaitanya K., Raj S., Anurag R., *Potential of microturbines for small scale power generation*, International Journal of Advanced Information Science and Technology 2013, 13(13), 35–39.

[12] Henrique E., Cunha K., Kyprianidis G., *Investigation of the potential of gas turbines for vehicular applications*, [w:] *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012 (GT2012). Copenhagen, 11–15 czerwca* 2012. DOI: 10.1115/GT2012-68402.
[13] Gieras M., *Miniaturowe silniki turboodrzutowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
[14] *9F power plants*, General Electric, 2018; https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/product/gas%20turbines/Fact%20Sheet/2018-prod-specs/9F_Power_Plants_R3.pdf (dostęp: 04.07.2020).
[15] *C30 Microturbine*, Capstone, 2019, https://d1io3yog0oux5.cloudfront.net/_54221bc5fa0f9c4d683775b53651e4c3/capstoneturbine/db/235/7013/file/C30+HPNatGas_331140A_lowres.pdf (dostęp: 04.07.2020).
[16] Boicea V.A., *Essentials of Natural Gas Microturbines*, CRC PressTaylor & Francis Group, Boca Raton 2014.
[17] *C30 Microturbine*, Capstone, 2019; https://www.capstoneturbine.com/products/c30 (dostęp: 04.07.2020).
[18] *Spalanie paliw gazowych*, Politechnika Wrocławska, http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_energetyka/SPALANIE_I_PALNIKI/Spalanie_paliw_gazowych.pdf (dostęp: 05.07.2020).
[19] *Temperatura spalania*, Politechnika Wrocławska; http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_mechanika/chemia_spalania/TEMPERATURA_SPALANIA.PDF (dostęp: 05.07.2020).
[20] *Powstawanie tlenków azotu podczas spalania*, Politechnika Wrocławska; http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_mechanika/NOx/2_POWSTAWANIE_NOx.PDF (dostęp: 05.07.2020).
[21] Goldhahn S., *Nouvelles perspectives énergétiques avec l'hydrogène*, 2018; https://www.psi.ch/fr/media/actualites-recherche/nouvelles-perspectives-energetiques-avec-lhydrogene (dostęp: 05.07.2020).
[22] Güthe F., García M., Burdet A., *Flue gas recirculation in gas turbine: Investigation of combustion reactivity and NOx emission*, [w]: *Proceedings of the ASME Turbo Expo. Orlando (USA), 8–12 czerwca 2009*, New Jork 2009.
[23] Liu F., Guo H., Smallwood G., *The chemical effect of CO2 replacement of N2 in air on the burning velocity of CH_4 and H_2 premixed flames*, Combustion and Flame 2003, 133, 496–497.
[24] *Carbon dioxide gas – specific heat*, Engineering ToolBox, 2005; https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-dioxide-d_974.html (dostęp: 28.06.2020).
[25] *Water vapor – specific heat*, Engineering ToolBox, 2005; https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d_979.html (dostęp: 28.06.2020).
[26] *Air – specific heat at constant pressure and varying temperature*, Engineering ToolBox, 2004; https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html (dostęp: 28.06.2020).
[27] Gieras M., Stańkowski T., *Computational study of an aerodynamic flow through a micro-turbine engine combustor*, Journal of Power Technologies 2012, 92(2), 68–79.

[28] Suchocki T., Lampart P., Klonowicz P., *Numerical investigation of a GTM 140 turbojet engine*, Open Engineering 2015, 5, 478–484. DOI: 10.1515/eng-2015-0053.
[29] Vilag V., Vilag J., Carlanescu R., Mangra A., Florean F., *CFD Application for Gas Turbine Combustion Simulations*, [w:] Ji G., Zhu J., *Computational Fluid Dynamics Simulations, IntechOpen*, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.89759.
[30] Zahid Iqbal M., Chan A., *A study of the effect of element types on flow and turbulence characteristics around an isolated high-rise building*, [w:] *Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 7–9 grudnia 2015*.
[31] Sosnowski M., Krzywanski J., Gnatowska R., *Polyhedral meshing as an innovative approach to computational domain discretization of a cyclone in a fluidized bed CLC unit*, E3S Web of Conferences 2017, 14, 01027, 1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/20171401027.
[32] Fuchs F., Meidinger V., Neuburger N., Reiter T., Zündel M., Hupfer A., *Challenges in designing very small jet engines fuel distribution and atomization*, [w]: *International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hawaii, Honolulu, 10–15 kwietnia 2016*.
[33] Suchocki T., Lampart P., Surwiło J., *Wyznaczenie charakterystyk pracy mini silnika turboodrzutowego oraz weryfikacja modelu numerycznego*, Mechanik 2015, 7, 813–820.
[34] Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M., Moriarty N.W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C.T., Hanson R.K., Song S., Gardiner W.C., Lissianski V.V., Qin Z.; http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/index.html (dostęp: 02.04.2021).
[35] Changwei J., Wang D., Jinxin Y., Shuofeng W., *A comprehensive study of light hydrocarbon mechanisms performance in predicting methane/hydrogen/air laminar burning velocities*, International Journal of Hydrogen Energy 2017, 42(27), 17260–17274. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.203.
[36] *Ansys Fluent Theory Guide – Release 15.0.*, Ansys Inc., 2013.
[37] *Ansys Fluent Tutorial Guide – Release 18.0.*, Ansys Inc., 2017.