

Palnik przemysłowy do współspalania gazu ziemnego i wodoru

An industrial burner for co-combustion of natural gas with hydrogen

BARTOSZ ŚWIĄTKOWSKI, JAROSŁAW HERCOG, ALEKSANDRA KIEDRZYŃSKA, PAWEŁ BOCIAN

DOI 10.36119/15.2021.10.1

W artykule przedstawiono prototyp palnika przemysłowego o mocy 100kW, przystosowanego do współspalania gazu ziemnego z wodorem (do 50% obj.). Koncepcja palnika została opracowana w Instytucie Energetyki Instytucie Badawczym przy wykorzystaniu metody modelowania numerycznego CFD. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla kilku koncepcji technicznych palnika w celu wytypowania najbardziej obiecującego rozwiązania. Prototyp palnika został następnie przetestowany na stanowisku badawczym zlokalizowanym w laboratorium Instytutu Energetyki. W wyniku tego procesu z sukcesem opracowano i zweryfikowano eksperymentalnie model palnika o mocy 100kW. Palnik ten może być wykorzystywany w wysokotemperaturowych procesach technologicznych, oferując przy tym rozwiązanie umożliwiające w przyszłości transformację w kierunku przemysłu neutralnego klimatycznie. *Słowa kluczowe: współspalanie wodoru, palnik wodorowy, neutralność klimatyczna, technologie zeroemisyjne*

The article presents a prototype of an industrial burner with a power of 100kW, adapted to the co-combustion of natural gas with hydrogen (up to 50% by volume). The burner concept was developed at the Institute of Power Engineering Research using the CFD numerical modelling method. Numerical calculations were carried out for several technical concepts of the burner in order to select the most promising solution. The burner prototype was tested in an experimental stand located in the laboratory of the Institute of Power Engineering. As a result of this process, a 100kW burner model was successfully developed and experimentally verified. This burner can be used in high-temperature technological processes, offering a solution for the future transformation towards a climate-neutral industry. *Keywords: hydrogen co-combustion, hydrogen burner, climate neutrality, zero-emission technologies*

Wstęp

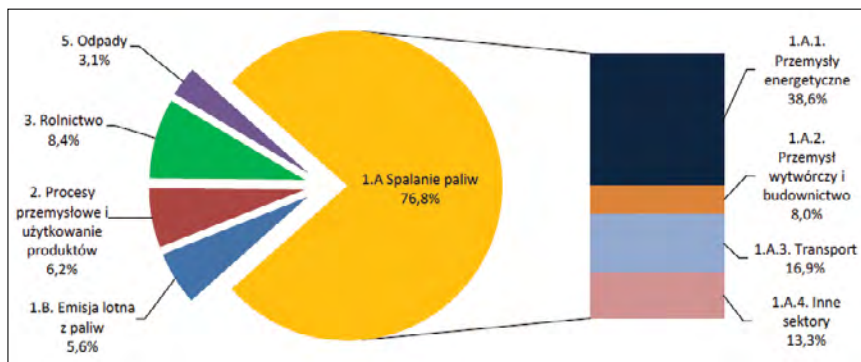
Powszechnie panująca opinia o wpływie emisji dwutlenku węgla na coraz szybciej zachodzące zmiany klimatyczne w skali całego świata wymusza konieczność rozwoju i implementacji technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii. Ponieważ większość technologii produkcji energii elektrycznej i ciepła oparta jest na spalaniu paliw kopalnych, w skład których wchodzi głównie dwa pierwiastki: węgiel i wodór, naturalnym zatem wydaje się konieczność stopniowego zmniejszania udziału pierwiastka węgla w tym procesie. Spalanie wodoru pozbawione jest negatywnego wpływu na środowisko naturalne i procesy zachodzące w atmosferze ziemskiej. Produktem spalania wodoru jest woda, która stanowi około 71% powierzchni kuli ziemskiej. Wodór jest również najprostszym, a jednocześnie najczęściej występującym pierwiastkiem we wszechświecie. Ponadto

z uwagi na ograniczone zasoby naturalne paliw kopalnych, w tym również gazu ziemnego, energetyczne wykorzystanie wodoru jako paliwa wydaje się absolutnie zasadne. Ponieważ zasoby wody na Ziemi można uważać za niemal nieograniczone, produkcja zielonego wodoru może odbywać się bez ryzyka wyczerpania jego zasobów. Produkcja wodoru w przeciwieństwie do paliw kopalnych może odbywać się lokalnie, bez negatywnego wpływu na środowisko naturalne oraz niezależnie od sytuacji geopolitycznej. Ma to niebagatelny wpływ na strategiczną stabilność i niezależność energetyczną kraju.

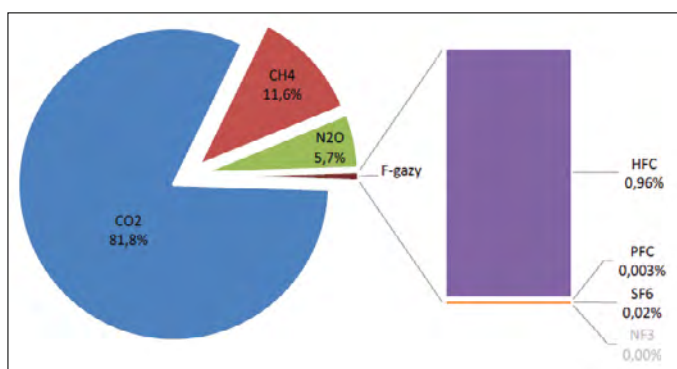
W roku 1992 podczas Konferencji Narodów Zjednoczonych na temat Środowiska i Rozwoju w Rio de Janeiro, została przyjęta Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu (UNFCCC). Była to międzynarodowa umowa określająca założenia o współpracy dotyczącej ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Następtwem tej

konwencji był traktat międzynarodowy wypracowany podczas konferencji w Kioto w 1997 roku. Wszedł on w życie 16 lutego 2005 roku. Na mocy tych postanowień kraje ratyfikujące traktat zobowiązały się do redukcji własnych emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 5% do roku 2012, w stosunku do emisji z roku 1990. Polska zobowiązała się ograniczyć emisję o 6%. W związku z zaistniałymi przemianami gospodarczymi w Polsce, w latach 1988-2001 emisja ta zmniejszyła się aż o 33%, zyskując w ten sposób do roku 2005 możliwość handlu nadwyżkami emisyjnymi [1] [2]. Obecnie obowiązujące w Unii Europejskiej cele redukcji emisji gazów cieplarnianych zostały przyjęte do 2030 roku w ramach energetyczno-klimatycznych. Celem jest redukcja emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej do roku 2030 o 40% w porównaniu z rokiem 1990. Głównym zaś celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do roku 2050 [3]. Wiąże się to docelowo z całkowitą

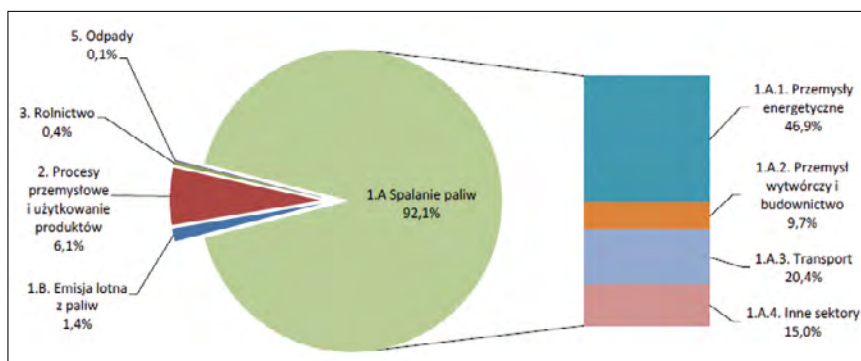
dr inż. Bartosz Świątkowski <https://orcid.org/0000-0002-4339-3436>, dr inż. Jarosław Hercog <https://orcid.org/0000-0003-4891-4592>, dr inż. Aleksandra Kiedrzyńska <https://orcid.org/0000-0002-9508-6163>, dr inż. Paweł Bocian <https://orcid.org/0000-0002-7714-2969> – Instytut Energetyki Instytut Badawczy, Zakład Procesów Ciepłych, Warszawa. Adres do korespondencji/ Corresponding author: Pawel.Bocian@ien.com.pl



Rys. 1 Udziały poszczególnych źródeł w całkowitej emisji gazów cieplarnianych w Polsce w 2019 r. (ekwiwalent CO₂) [4]



Rys. 2 Udziały poszczególnych gazów cieplarnianych w całkowitej emisji w Polsce w 2019 r. [4]



Rys. 3 Udziały poszczególnych źródeł w całkowitej emisji dwutlenku węgla w Polsce w 2019 r. (ekwiwalent CO₂) [4]

redukcją emisji gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla. Na rys. 1 przedstawiono udziały poszczególnych źródeł w emisji gazów cieplarnianych. Wynika z niego, że za ponad 76% tych emisji odpowiada spalanie paliw.

W okresie transformacji w kierunku gospodarki neutralnej klimatycznie wprowadzany jest szereg metod ograniczających emisję dwutlenku węgla. Podstawową metodą jest podnoszenie sprawności energetycznej procesów produkcyjnych oraz urządzeń, mające na celu redukcję zużycia paliw kopalnych wykorzystywanych w procesie wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła. Działania te osiągane są poprzez stosowanie układów regeneracji ciepła, obniżanie strat do otoczenia (izolacje termiczne), a także optymalizację pro-

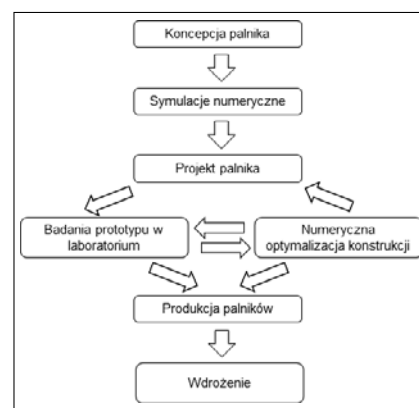
cesów wytwórczych i przesyłowych energii elektrycznej i ciepła. Pośrednio mogą być stosowane technologie wychwyty i składowania oraz przetwarzania dwutlenku węgla (CCUS). Celem tej transformacji jest jednak całkowite zaprzestanie wykorzystywania paliw kopalnych zawierających w swym składzie pierwiastek węgiel na rzecz zielonego wodoru. Wodór bowiem może być wykorzystywany nie tylko w procesie spalania w celu wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, ale również w wielu procesach produkcyjnych, w tym również w metalurgii do redukcji tlenków żelaza zawartych w rudzie wykorzystywanej do produkcji żelaza i stali (DRI). Właściwości fizykochemiczne wodoru znacznie odbiegają jednak od właściwości gazowych węglowodorów. Granice palności dla

wodoru są znacznie szersze niż dla metanu, a współczynnik dyfuzji wodoru w powietrzu jest około trzykrotnie wyższy niż metanu. W związku z tym, mieszanie wodoru z powietrzem zachodzi znacznie szybciej niż analogiczna mieszanina palna metanu z powietrzem. Ma to ogromny wpływ na wymogi bezpieczeństwa, ale zapewnia jednocześnie znacznie większą elastyczność i stabilność płomienia w palnikach gazowych przystosowanych do współspalania wodoru.

Komercjalizacja technologii wodorynych wymaga jednak także prac związanych z magazynowaniem i przesyłaniem wodoru. Ma to związek z ograniczeniami materiałowymi wynikającymi z możliwości powstawania korozji wodorowej związanej kruchością wodorową, spowodowaną przenikaniem atomów wodoru przez metal. Zjawisku temu można przeciwdziałać poprzez stosowanie stali wysokostopowych oraz pokrywanie materiałów warstwą miedzi, kobaltu lub wanadu [5].

W związku z nakierowaną na całkowitą dekarbonizację przemysłu i energetyki politykę klimatyczną, podjęto w Instytucie Energetyki prace mające na celu częściowe zastąpienie gazu ziemnego wodorem. W celu opracowania nowej konstrukcji palników umożliwiających współspalanie tego pierwiastka z gazem ziemnym, wykorzystano opracowaną przez Instytut Energetyki zmodyfikowaną metodykę badawczą [6]. Działania związane z opracowaniem nowej konstrukcji palnika mają następującą sekwencję (rys. 4):

1. Określenie pożądanego przebiegu zjawisk fizykochemicznych zachodzących podczas spalania paliw gazowych, w tym wodoru.
2. Opracowanie koncepcji nowego palnika umożliwiającego realizację tych procesów.
3. Symulacje numeryczne potencjalnych geometrii palników mające na celu wytypowanie najlepszej konstrukcji.

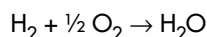
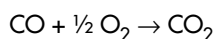
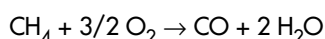


Rys. 4 Metodyka konstruowania palników

- Wykonanie i przetestowanie modelu palnika w warunkach laboratoryjnych.
- Optymalizacja konstrukcji na podstawie otrzymanych wyników badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych w celu komercjalizacji produktu.

Badania numeryczne

W celu właściwego odwzorowania zjawisk zachodzących podczas współspalania gazu ziemnego i wodoru w palniku przemysłowym wykorzystano oprogramowanie ANSYS FLUENT 2019R3. Zastosowano model turbulencji $k - \epsilon$ Realizable z modelem warstwy przysiennej Menter-Lechner oraz sprzężenie prędkości z ciśnieniem modelem SIMPLE. Uwzględniono proces radiacyjnego przenoszenia ciepła stosując model radiacji „discrete ordinates method”. Interakcje pomiędzy turbulentnym przepływem a kinetyką zachodzących reakcji chemicznych opisuje model Eddy-Dissipation (ED). Reakcje objęściowe uwzględnione podczas spalania:

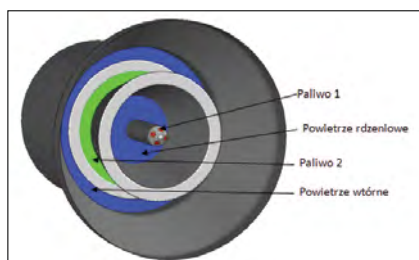


Modelowanie powstawania i destrukcji NO może odbywać się z wykorzystaniem różnych mechanizmów – w pracy wykorzystywane były następujące mechanizmy:

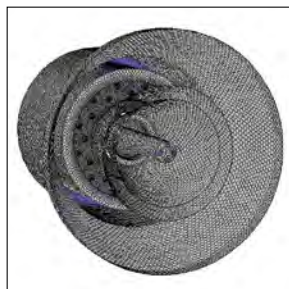
- NO termiczne – mechanizm Zeldovich’a,
- NO szybkie – mechanizm De Soete’a.

Symulacje zostały przeprowadzone dla paliwa składającego się w 100% z metanu (CH_4) oraz z mieszaniny metanu z wodorem. Ilość spalanego paliwa może dostarczyć 50-150kW ciepłnie przy współczynniku nadmiaru powietrza wynoszącym $\lambda = 1.05$.

Założono, że wyjściowa konstrukcja palnika składa się z dwóch wylotów powietrza (rdzeniowego i wtórnego) oraz dwóch możliwych wylotów paliwa: pierścieniowy wylot (paliwo 2) oraz osiowo położony wylot z czterema otworami (pali-



Rys. 5
Włoty paliw i powietrza do palnika



Rys. 6.
Ostateczna wersja palnika – siatka numeryczna

wo 1). Wszystkie wloty do palnika przedstawiono na rys. 5.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych stwierdzono, że należy zastosować stabilizator spalania na wylocie paliwa 2, który zwiększy prędkość paliwa na wylocie i poprawi jego mieszanie z powietrzem. Przetestowano cztery różne kształty stabilizatora, różniące się liczbą, średnicą i kształtem otworów wylotowych paliwa. Założono, że całe paliwo jest podawane przez wlot 2 (ze stabilizatorem), a przez wlot paliwo 1 podawane jest trochę powietrza (0.1 m/s). Stosunek powietrza rdzeniowego do całkowitego powietrza wynosi 8%.

Wyniki symulacji zestawiono w tab. 3, a profile temperatur przedstawiono na rys. 7. Wszystkie testowane stabilizatory za-

pewniły efektywne spalanie i emisję tlenków azotu poniżej $100 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ na 3% tlenu. Na podstawie osiągniętych wyników, do testów na stanowisku badawczym, wybrano stabilizator nr 4 przedstawiony na rys. 6.

Palnik we wszystkich warunkach pracował stabilnie dzięki silnemu zawirowaniu powietrza wtórnego, co zapewniało szybkie wymieszanie paliwa z powietrzem. Emisja NO_x wzrastała wraz ze zwiększaniem ilości wodoru w spalonym paliwie. Jest to spowodowane głównie wzrostem temperatury maksymalnej do wartości ok. 2000°C .

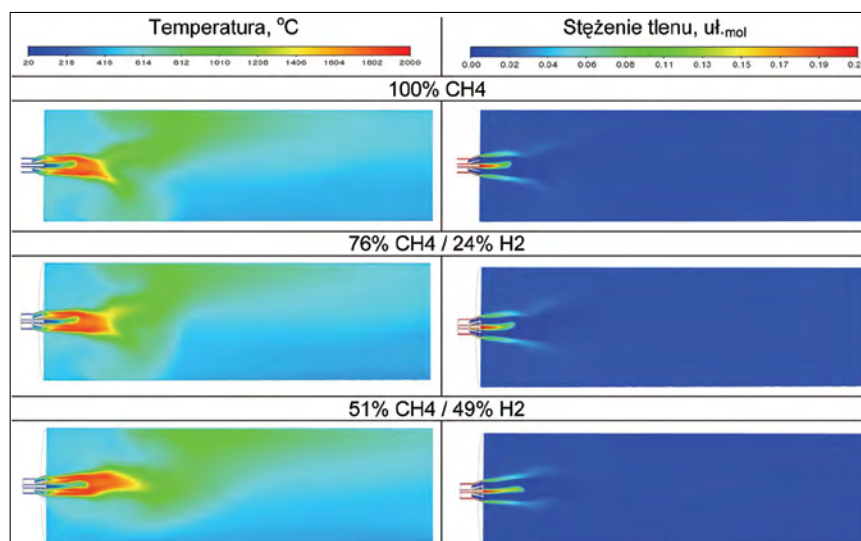
Badania laboratoryjne

W kolejnym kroku przeprowadzono krótki test laboratoryjny współspalania metanu z wodorem dla ułamka objęściowego wodoru w mieszaninie w zakresie 0-50%. Zasilanie palnika gazami odbywało się z wiązki butli transportowych technicznego metanu oraz wodoru.

W badaniach został zastosowany palnik w ostatecznej wersji wytypowanej w badaniach numerycznych. Eksperymenty przeprowadzono dla mocy palnika równej 100kW, a ich rezultaty przedstawiono w tab. 4. Wynika z nich, że dla udziału H_2

Tab. 3 Warunki i wyniki symulacji pracy palnika dla różnych mieszanin paliw

	Wielkość	Jednostka	Wartość		
Skład paliwa	CH_4	ut_{mol}	100%	76%	51%
	H_2	ut_{mol}	0%	24%	49%
Objęściowy strumień przepływu	CH_4	$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$	4.9	4.4	3.7
	H_2	$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$	0.0	1.4	3.5
	powietrze	$\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$	52.3	47.1	44.6
Stężenia na wylocie z komory	λ_{pal}	-	1.02	1.03	1.02
	O_2	%	2.40%	2.67%	2.22%
Temperatura w komorze	NO_x	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}@3\%\text{O}_2$	36	52	71
	Maks.	$^\circ\text{C}$	1705	2007	2087
	Min.	$^\circ\text{C}$	581	586	615



Rys. 7
Wyniki symulacji ostatecznej wersji palnika dla różnych składów mieszaniny CH_4/H_2

równego 0 lub 25 % objętościowo emisja tlenków azotu (wyrażona jako NO_x w przeliczeniu na 3% O_2 w spalinach) wyniosła ok. $50 \text{ mg/m}^3_{\text{N}_2}$, podczas gdy udział H_2 wyniósł 50% emisja ta wyniosła $28 \text{ mg/m}^3_{\text{N}_2}$. Można zatem stwierdzić, że, w warunkach eksperymentu, zwiększenie wodoru w mieszaninie gazowej ma pozytywny wpływ na emisję NO_x w spalinach.

Dodatkowo można stwierdzić, że wyniki eksperymentów są zgodne z obliczeniami numerycznymi, co potwierdza przyjęte założenia konstrukcji palnika.

Należy jednakże zauważyć, że wraz ze zwiększeniem się udziału H_2 w mieszaninie gazowej zwiększała się emisja CO (odpowiednio od 7 do 269 ppm), co mogło być efektem wychładzania komory spalania (na skutek obniżonej emisyjności płomienia), a zatem pogorszenia warunków do dopalania CO.

Tab. 4 Warunki eksperymentu i wyniki badań modelu palnika

Skład paliwa CH_4/H_2 , %obj.	100/0	75/25	50/50
Strumień H_2 , $\text{m}^3_{\text{N}_2}/\text{h}$	0.0	3.05	7.73
Strumień CH_4 , $\text{m}^3_{\text{N}_2}/\text{h}$	10.06	9.14	7.73
Powietrze do palnika, $\text{m}^3_{\text{N}_2}/\text{h}$	107	107	104
CO, ppm	7	11	269
NO_x , ppm	26	26	14
SO_2 , ppm	3	3	3
O_2 , %d	2.28	2.67	2.7
NO_x (@3% O_2), $\text{mg/m}^3_{\text{N}_2}$	51	52	28

Na rys. 8 przedstawiono widok palnika podczas pracy w trakcie badań. Można zauważyć charakterystyczny, krótki płomień wskazujący na wysoką stabilność spalania.



Rys. 8
Test palnika 100kW do współspalania metanu i wodoru – widok od czopa płomienia

Można zatem stwierdzić, że zaprojektowany palnik, który został przebadany na stanowisku badawczym w laboratorium spalania Instytutu Energetyki, potwierdza poprawność przyjętych założeń i osiąga zakładane parametry pracy oraz poziom emisji NO_x poniżej $100 \text{ mg/m}^3_{\text{N}_2}$ w zakresie udziału objętościowego wodoru w mieszaninie z metanem 0-50%.

Podsumowanie

Optymalna organizacja procesu spalania mieszanin wodoru z gazem ziemnym w komorach spalania instalacji przemysłowych wymaga zwrócenia uwagi na inną kinetykę procesu oraz inne mechanizmy generacji zanieczyszczeń. Wodór spala się 7 razy szybciej od metanu, generując przy tym płomień o wyższej gęstości cieplnej, co stawia dość poważne wyzwanie dla konstrukcji palników. Generowany za ich pośrednictwem płomień musi cechować się właściwą stabilnością, położeniem czopa płomienia za palnikiem, akceptowalną długością płomienia oraz jego zdolnością do wypromieniowania ciepła do ścian komory. Znacząco wyższa temperatura adiabatyka płomienia wodrowego jest również poważnym wyzwaniem dla kontroli emisji NO_x .

Najbardziej efektywnym sposobem obniżania emisji NO_x płomienia gazowego jest zastosowanie autorecykulacji spalin, czyli takich zabiegów aerodynamicznych, które powodują zasysanie chłodniejszych spalin o niskiej koncentracji tlenu z dalszych rejonów komory spalania w rejon palnika i świeżo wprowadzanej mieszaniny paliwowo-powietrznej. Proces ten dodatkowo wspomagany jest za pomocą stabilizatorów płomienia.

Zastosowanie wyżej wymienionych mechanizmów kontroli emisji było podstawą do opracowania palnika Instytutu Energetyki, wykonanego i przebadanego w skali ćwierć-technicznej. Wyniki testów były bardzo obiecujące zarówno pod kątem stabilizacji płomienia jak i osiągnięcia niskiej emisji, nawet przy znacznym udziale wodoru (do 50% obj.). Osiągnięty poziom emisji NO_x kwalifikuje tę konstrukcję do zastosowania w docelowych kotłach

zarówno pod kątem bieżących jak i przyszłych limitów emisyjnych.

Przedstawiony w tym artykule model palnika do współspalania wodoru z gazem ziemnym jest początkiem prac Instytutu Energetyki nad zastosowaniem wodoru w procesach spalania. Spalanie wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym stanowi na dzień dzisiejszy realną alternatywę redukcji emisji dwutlenku węgla. Nadal kontynuowane będą badania, których celem będzie opracowanie konstrukcji palnika zasilanego czystym wodorem.

Podziękowania

Praca została zrealizowana w ramach projektu badawczego nr CPC/32/STAT/20, pt. "Opracowanie konstrukcji palnika na gaz ziemny dedykowanego do istniejących komór spalania kotłów węglowych" finansowanego z dotacji na działalność statutową Instytutu Energetyki I.B.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Protokół z Kioto do Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzony w Kioto dnia 11 grudnia 1997 r. <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20052031684>
- [2] Protokół z Kioto https://pl.wikipedia.org/wiki/Protok%C3%B3%C5%82_z_Kioto
- [3] Polska Net-Zero 2050, Mapa drogowa osiągnięcia wspólnych celów polityki klimatycznej dla Polski do 2050 r., Warszawa, czerwiec 2021 r. https://climatecake.ios.edu.pl/wp-content/uploads/2021/07/CAKE_Mapa-drogowa-net-zero-dla-PL.pdf
- [4] Krajowy raport inwentaryzacyjny 2021, Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2019, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021 https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2021_raport_syntetyczny_PL.pdf
- [5] M. Elboujdaini: Hydrogen-Induced Cracking and Sulfide Stress Cracking. W: Uhlrig's Corrosion Handbook. R. Winston Revie (red.). Wiley, 2011, s. 183-194. DOI: 10.1002/9780470872864.ch15. ISBN 978-0-470-08032-0.
- [6] Golec t., Remiszewski K., Świętkowski B., Blesznowski M. Palniki pyłowe na biomase, Energetyka, maj 2007 r. Numer 5 (635) / Rocznik 60
- [7] Kiedrzyńska A. et al. Numerical study of natural gas and low-calorific syngas co-firing in a pilot scale burner. Energy vol. 211 118552 (2020).