

PAWEŁ MADEJSKI
SŁAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJAŁ

Wybrane aspekty zgazowania węgla do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych

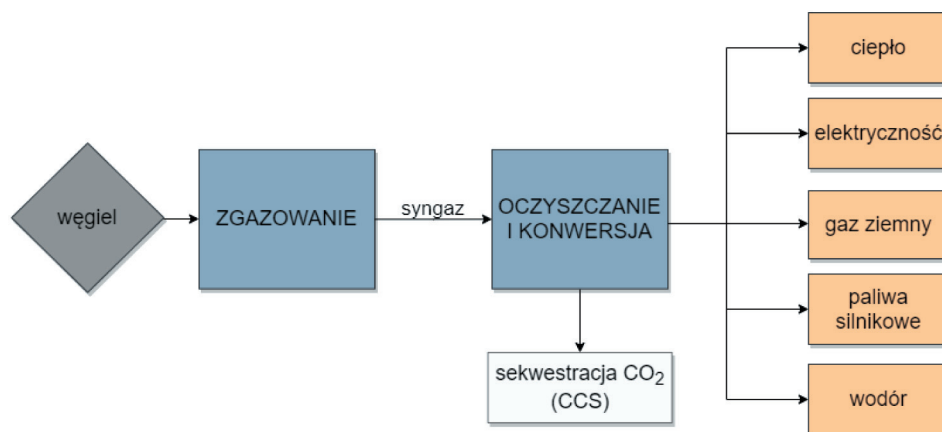
Wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw stałych jest znane i stosowane od wielu lat. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym, wymagającym odpowiedniego przygotowania paliwa, przeprowadzenia procesu spalania, jak również pozbywania spalin szkodliwych substancji emitowanych do środowiska w postaci pyłu oraz zanieczyszczeń gazowych (NO_x, SO_x, CO). Od dekad jako najszlachetniejszą postać paliwa uznaje się postać gazową. Paliwa gazowe mogą być łatwo transportowane na duże odległości, są od razu gotowe do spalania, a skład mieszanki paliwa można dowolnie regulować. Ciągłe dążenie do ograniczenia antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych wiąże się z koniecznością stosowania niskoemisyjnych i zeroemisyjnych technologii wytwarzania energii. W przypadku węgla oznaczać to będzie konieczność odchodzenia od technologii bezpośredniego spalania na rzecz bardziej zaawansowanych układów zasilanych paliwem w postaci gazowej. W artykule przedstawiono przegląd dostępnych technik i technologii zgazowania paliw stałych ukierunkowanych na produkcję paliw gazowych, możliwych do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych. Przedstawione zostały także metody obliczeniowe procesu zgazowania mające umożliwić dobór najlepszej technologii oraz parametrów pracy poszczególnych reaktorów.

Słowa kluczowe: zgazowanie, paliwo gazowe, syngaz, technologie gazowe

1. WPROWADZENIE

Proces zgazowania paliw stałych pochodzenia kopalnego znacząco rozszerza możliwości ich stosowalności, przy jednoczesnym ograniczeniu ich negatywnego wpływu na środowisko [1]. Powstały poprzez rozkład termiczny, w niewielkiej ilości powietrza/tlenu lub pary wodnej, podstawowy produkt zgazowania, tzw. syngaz (gaz syntezowy), może zostać wykorzystany zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w sektorze energetycznym, jak i do produkcji węglowodorów syntetycznych w sektorze petrochemicznym [2]. Tak duży zakres zastosowań jest z jednej strony szansą dla rozwoju tej technologii, a z drugiej zagrożeniem, że otrzymane produkty nie znajdą zastosowania tam, gdzie korzyści z ich wykorzystania

będą największe. Biorąc pod uwagę obecne problemy z dotrzymaniem odpowiedniej czystości powietrza w wielu regionach świata oraz konieczność zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych [3], wciąż właściwe wydaje się zastosowanie syngazu w technologiach energetycznych (rys. 1). Spalanie paliw stałych powoduje względnie większą emisję niż spalanie paliw gazowych (emisja zanieczyszczeń zarówno stałych, jak i gazowych), zwłaszcza w przypadku kotłów małej mocy, które nie są wyposażone w systemy oczyszczania spalin, a w których warunki procesu spalania często znacząco odbiegają od optymalnych [4]. Wiele wskazuje na to, że w późniejszym okresie wykorzystania będzie można spodziewać się większego wykorzystania syngazu również w przemyśle chemicznym [5].



Rys. 1. Syngaz jako uniwersalny surowiec energetyczny

2. TECHNOLOGIE ZGAZOWANIA – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

Technologie zgazowania paliw stałych kategoryzowane są ze względu na rozwiązania konstrukcyjne układu wykorzystanego do procesu zgazowania (w tym samego reaktora) oraz parametry procesu: temperaturę, właściwości materiału wsadowego, czynnik zgazowujący i jego stężenie, ciśnienie. Możliwe do osiągnięcia parametry procesu determinuje wybór układu zgazowania.

Układy zgazowania wyróżnia sposób dostarczania ciepła do procesu (z ogrzewaniem bezpośrednim, z ogrzewaniem pośrednim) oraz ruch substratów w reaktorze. Do podstawowych typów zaliczamy reaktory ze złożem zwartym przesuwным (współprądowe i przeciwprądowe), ze złożem fluidalnym (z warstwą fluidalną pęcherzykową lub cyrkulacyjną), dyspersyjne. Reaktory ze złożem zwartym przesuwным są w literaturze i w dalszej części niniejszej pracy zamiennie określane jako reaktory ze złożem stałym. Schematy typowych reaktorów przedstawiono na rysunku 2.

Typ reaktora determinuje zakres temperatur, w jakich prowadzony jest proces zgazowania, i wpływa na profil temperatury wzdłuż reaktora. Wzrost temperatury zwykle powoduje zwiększenie udziału wodoru i tlenu węgla w produkowanym syngazie, natomiast im wyższe ciśnienie, tym wyższy udział metanu [6]. Podstawowe różnice pomiędzy typami reaktorów zaprezentowano w tabeli 1.

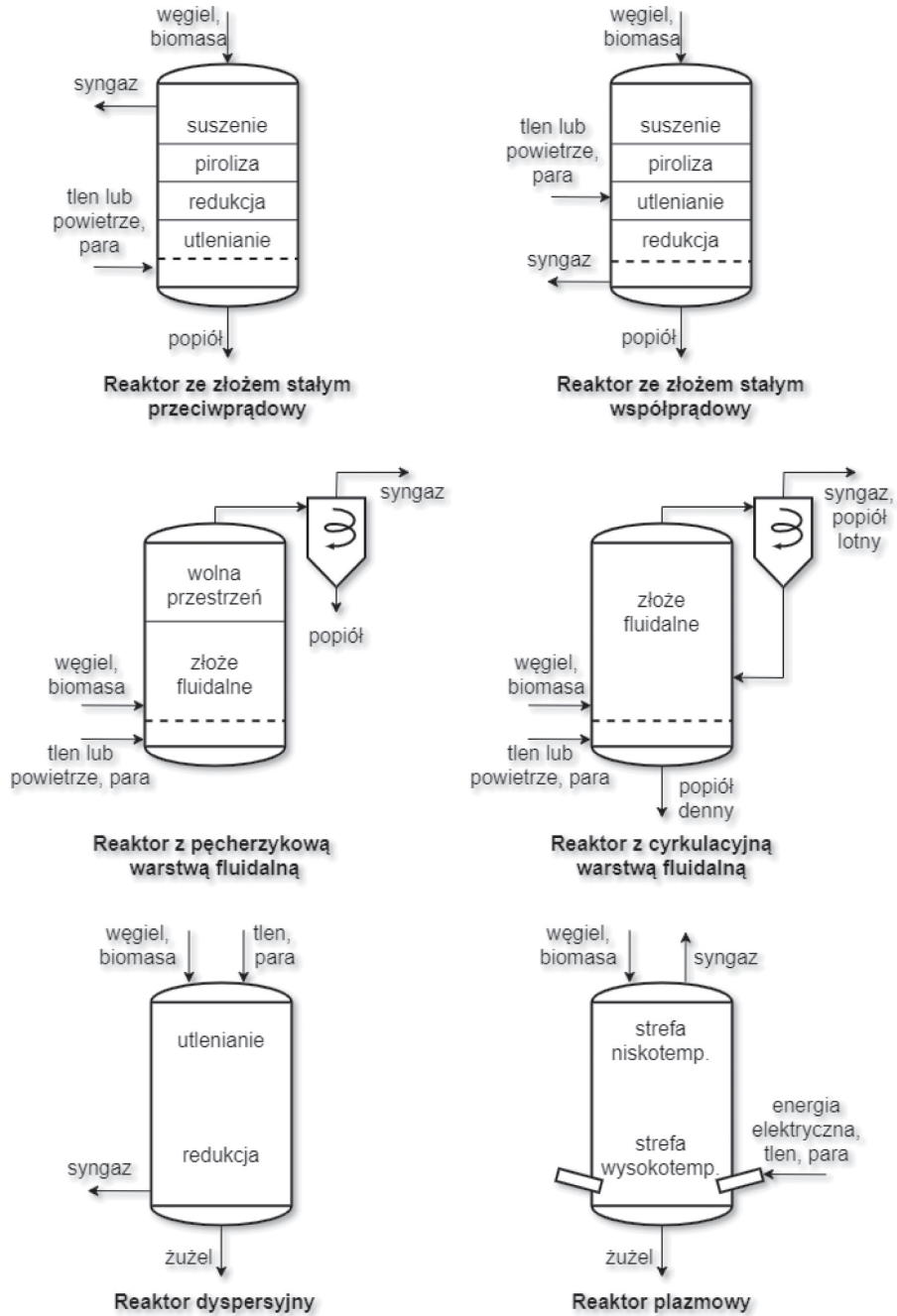
W zastosowaniach komercyjnych wykorzystywane są reaktory o różnej konstrukcji, pracujące przy różnych zestawach stosowanych parametrów procesu – obecnie trudno określić jest wariant optymalny, choć można już wskazać na tendencje rozwojowe. Reaktory ze złożem stałym przeciwprądowe są odpowiednie dla surowców, w których wilgoć stanowi do 50% ich masy. Wsad z dużą zawartością części inertnych, jak np. miał węglowy, osad ściekowy czy też odpady komunalne, które

nie są odpowiednie dla reaktorów ze złożem stałym, były z powodzeniem zgazowane w reaktorach z pęcherzykową warstwą fluidalną. Biomasa drzewna nie jest odpowiednia dla reaktorów strumieniowych, jeżeli wcześniej nie zostanie poddana wstępnemu przygotowaniu w procesach toryfikacji i mielenia [7]. W praktyce stosuje się zawiesiny toryfikatu z bioolejem, a także drewno lub toryfikat zdyspergowany/rozpuszczony w glicerolu, glikolu etylenowym, oleju fenolowym lub biopłynię [8]. Reaktory ze złożem stałym są obecnie coraz rzadziej wykorzystywane, reaktory fluidalne mimo wielu zalet zyskały stosunkowo niewielkie komercyjne zainteresowanie, a aktualnie najczęściej rozwijane i użytkowane są reaktory strumieniowe [9].

2.1. Węgiel

Technologie zgazowania węgla funkcjonują od początków XIX w. Popularność tego surowca jako wsadu do zgazowania jest duża ze względu na stabilność dostaw, stosunkowo stabilne parametry jakościowe i niską cenę. Węgiel komercyjnie zgazowuje się zarówno w gazyfikacjach ze złożem stałym (Lurgi [10] i British Gas Lurgi [11, 12]), jak i w fluidalnych (Great Point Energy [13], Winkler [14], TRIG [15]) oraz dyspersyjnych (GE Energy [16], Texo, Koppers-Tozek, Shell [1]).

W przeszłości gaz syntezowy otrzymywany z węgla był wykorzystywany do różnych celów. Podczas II wojny światowej dominowało przetwarzanie na paliwa transportowe w procesie syntezy Fischer-Tropsch [17], 60–70 lat temu znacząca jego ilość była przetwarzana na wodór do produkcji amoniaku [18], a od około 25 lat zaczęto go intensywnie wykorzystywać w elektrowniach zawodowych z wykorzystaniem technologii opartych na bloku gazowo-parowym ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC, ang. *Integrated Gasification Combined Cycle*) [19].



Rys. 2. Ogólny schemat generatorów gazu syntezowego (opracowanie własne na podstawie [3, 9, 10])

Tabela 1
Porównanie podstawowych typów reaktorów zgazowania [6]

Parametr	Reaktor ze złożem stałym	Reaktor fluidalny	Reaktor strumieniowy
Rozmiar cząstek [mm]	<51	<6	<0,15
Temperatura gazu na wyjściu [°C]	450–600	800–1000	>1260
Temperatura w strefie reakcji [°C]	1090	800–1000	1990
Zapotrzebowanie na czynnik utleniający	niskie	umiarkowane	wysokie
Charakterystyka popiołu	suchy/żużel	suchy	żużel
Wielkość	małe	średnie	duże
Problemy eksploatacyjne	smoły blokujące urządzenia i rurociągi	niski stopień konwersji węgla	chłodzenie surowego gazu
Moc zainstalowana [GW]	18,7 (42%)	0,9 (2%)	25,4 (56%)

2.2. Współzgazowanie z biomasą

Poziom emisji gazów cieplarnianych stał się jednym z wyznaczników stosowalności rozwiązań technologicznych zarówno pod względem ekologicznym, jak i ekonomicznym. Z tego powodu współcześnie rozwijane są głównie technologie zgazowania, które umożliwiają wykorzystanie biomasy, ewentualnie odpadów nienadających się do dalszego przetworzenia. Co do zasady proces zgazowania takich materiałów przebiega w sposób analogiczny jak węgla, jednak różnice w ich budowie i ich niejednorodność stanowią duże wyzwanie techniczne. Oznacza to konieczność modyfikacji konstrukcji reaktorów [20], aby zwiększyć ich elastyczność odnośnie pracy z cząstkami o większym zróżnicowaniu rozmiaru i kształtu, wilgotności, wartości opałowej i zawartości w składzie pierwiastków węgla, wodoru, tlenu, siarki i azotu, a także popiołu i pierwiastków śladowych (które mogą jednak istotnie wpływać na przebieg procesu i jakość otrzymanych produktów) [21]. Biorąc pod uwagę cechy poszczególnych typów reaktorów, do zgazowania biomasy często stosowany jest reaktor fluidalny (HoSt [22], ANDRITZ AG [23], Valmet Corporation [24], Eqtec [25]), ale i w tym przypadku stosowane mogą być inne reaktory: ze złożem stałym (Shangqiu Haiqi Machinery Equipment [26], Chanderpur Works [27], Infinite Energy [28]), dyspersyjny (Siemens AG [29]). Mimo wielu technicznych i logistycznych problemów [30], które niejednokrotnie kończyły się zaprzestaniem eksploatacji zakładów zgazowania biomasy, nadal widoczne jest duże zainteresowanie tymi technologiami [12]. Jest to związane z wyższą efektywnością egzotermiczną zgazowania w porównaniu z procesem spalania [31].

Zmniejszenie ilości problemów eksploatacyjnych typowych dla zgazowania biomasy można osiągnąć poprzez współzgazowanie z węglem [32]. Dostosowanie technologii do zgazowania tych paliw w różnych proporcjach masowych, znacznie ułatwia zarządzanie ciągłością produkcji energii. Poprawia się także efektywność procesu poprzez zapewnienie odpowiednio wysokiej wartości opałowej wsadu.

3. CHEMIZM PROCESU ZGAZOWANIA

Z chemicznego punktu widzenia podczas procesu zgazowania ma miejsce szereg reakcji redoks. W zależności od temperatury procesu, węgiel w formie czy to wstępnie rozłożonych związków organicznych, czy

też w formie rodników ulega utlenieniu przez tzw. czynnik zgazowujący. Czynniki zgazowującymi mogą być tlen, wodór, para wodna lub nawet dwutlenek węgla. W zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego reakcje chemiczne w trakcie zgazowania można zapisać następująco:

- Zgazowanie z użyciem tlenu:



Tlen jako czynnik zgazowujący może być w formie powietrza, jednak z uwagi na powstawanie w wysokiej temperaturze tlenków azotu, do zgazowania lepiej jest użyć czystego tlenu. Reakcja jest egzotermiczna i ze zwiększeniem objętości, a więc przesunięcie równowagi w stronę produktów uzyskuje się w wyniku chłodzenia i zmniejszenia ciśnienia, czyli odbieranie ciepła i usuwanie powstającego CO.

- Zgazowanie z użyciem wodoru:



Tu reakcja jest również egzotermiczna, ale przebiega ze zmniejszeniem objętości, a więc dla przyspieszenia procesu należy odbierać ciepło i podnieść ciśnienie.

- Zgazowanie z użyciem pary wodnej:



Reakcja jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

- Zgazowanie z użyciem dwutlenku węgla:



Reakcja również jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

Oprócz reakcji węgla z czynnikami zgazowującymi w procesie zgazowania, zachodzi szereg reakcji produktów zgazowania. Oto niektóre z nich:



W rzeczywistym procesie zgazowania zachodzi nie jedna reakcja, ale kilka naraz, dlatego sterowanie tymi procesami wymaga dużego nakładu pracy. Realizuje się poprzez kontrolowanie ciśnienia (dostarczanie lub odbieranie reagentów) oraz kontrolę temperatury.

Ponadto jeżeli proces jest prowadzony w bardzo wysokich temperaturach, to w reakcjach mogą uczestniczyć reagenty w formie rodnikowej, gdzie następuje np. rozpad cząsteczek O_2 do tlenu rodnikowego O^* , rozpad cząsteczek H_2O do rodnika O^* i cząsteczki wodoru H_2 lub wprost do dwu rodników wodorowych $2H^*$. Rodniki te są bardzo reaktywne i łatwo wchodzą w reakcje zarówno z węglem, jak i innymi związkami obecnymi w mieszaninie zgazowującej.

Zastosowanie dwutlenku węgla jako czynnika zgazowującego może być bardzo atrakcyjnym sposobem na jego zagospodarowanie – produktem takiego procesu jest gazowy tlenek węgla (CO) stanowiący nośnik energii. Najbardziej perspektywicznym wariantem zgazowania jest wykorzystanie pary wodnej jako czynnika zagazowującego – produktem jest nie tylko palny tlenek węgla, ale i gazowy wodór, który po separacji stanowi pożądaną nośnik energii. Zyskuje on coraz większą popularność ze względu na możliwość jego wykorzystania zarówno w klasycznych silnikach spalinowych, turbinach gazowych, jak i ogniwach paliwowych.

4. METODY OBLICZENIOWE PROCESÓW ZGAZOWANIA

Od dokładności wyników modelowania procesów zgazowania zależy ocena efektywności technicznej, ekonomicznej i ekologicznej, która jest podstawą do podjęcia decyzji o zasadności realizacji przedsięwzięcia mogącego zwiększyć efektywność wykorzystania paliw stałych. W wyniku modelowania wyznaczone są parametry procesu: ilość poszczególnych mediów, skład gazu wynikowego [33]. Modelowanie pozwala ponadto zbadać wpływ składu materiału wsadowego, rodzaju czynnika zgazowującego, a także parametrów procesu zgazowania na otrzymane wyniki [31]. Obliczenia procesu zgazowania są pracochłonne, dlatego realizowane niemal wyłącznie programowo. Ich dalszy rozwój w zakresie dokładności wyników jest wspierany przez tzw. *machine learnig* i wykorzystanie sieci neuronowych [34].

4.1. Inżynierskie metody

Konwersja paliwa stałego w procesie zgazowania może być modelowana wyłącznie z zastosowaniem podejścia równowagowego albo tylko podejścia kine-

tycznego, a także z wykorzystaniem ich obu jednocześnie [35]. Korzystanie z inżynierskich metod obliczeniowych związane jest z koniecznością poczynienia wielu założeń zależnych od wybranej metody. Są one związane z rozkładem temperatur w reaktorze, wymianą ciepła z otoczeniem, szybkością przebiegu poszczególnych reakcji, nieuwzględnianiem powstawania smół, zastąpieniem paliwa węglowego czystym węglem (grafitem), pominięciem wpływu na proces obecnego w surowcu popiołu. Mimo to praktyka pokazała, że stosowanie tych metod prowadzi do wystarczającego dla potrzeb inżynierskich przybliżenia [33].

Modele równowagowe należą do najstarszych, są dobrze udokumentowane i były wielokrotnie stosowane. Wyniki otrzymywane z tych modeli cechuje wysoka zgodność zwłaszcza w analizach zgazowania przebiegającego w wysokich temperaturach ($>850^\circ C$). Wang i in. wykazali, że są one bardzo przydatne zwłaszcza w modelowaniu instalacji IGCC [36]. W jednym z modelowanych przypadków otrzymali zgodność wyników modelowania składu syngazu z wynikami eksperymentu na poziomie powyżej 99% (błąd względny poniżej 1%). Opierając się na tym modelu, zademonstrowali sposób na maksymalizację CGE (ang. *cold gas efficiency*) przez optymalizację temperatury gazyfikacji, ilości dostarczanego tlenu i pary. Uzyskana poprawa CGE wyniosła 10% [37].

Modele kinetyczne pozwalają uzyskać więcej informacji o mechanizmach zgazowania przydatnych do projektowania i rozwoju procesu, ale wymagają większych nakładów obliczeniowych i częściowo oparte są na złożonych empirycznych równaniach kinetycznych [3]. Współcześnie wygodną metodą modelowania jest wykorzystanie oprogramowania Aspen Plus [38–41], w którym nie ma potrzeby określania wielu chemicznych reakcji zachodzących w trakcie zgazowania, ale należy utworzyć schemat blokowy procesu, zdefiniować związki chemiczne, które mogą być w nim obecne, i określić warunki przebiegu procesu (przepływu, temperatury, ciśnienia).

4.2. Modelowanie CFD procesu konwersji paliw stałych

W gazyfikatorze zachodzi szereg wielokierunkowych przemian między substratami i czynnikiem zgazowującym, w których udział mogą brać również produkty zgazowania. Na efekt końcowy procesu znaczący wpływ poza parametrami procesu ma kształt

i wymiary reaktora, które determinują czas i warunki, w jakich przebywają reagenty. Z tego względu inżynierskie metody, które sprawdziły się w zakresie bilansowania masy i energii procesu zgazowania, nie są wystarczające do doskonalenia konstrukcji reaktorów i minimalizacji emisji niepożądanych związków [42]. Poczyniony w ostatnich latach znaczący postęp w zakresie technik modelowania numerycznego i wydajności maszyn obliczeniowych pozwala na modelowanie zachowania się surowców i produktów w modelu przestrzennym reaktora [43, 44]. W modelu można uwzględnić dynamikę płynów, rozmiar i strukturę cząstek surowca, kinetykę reakcji chemicznych, wymianę masy i energii pomiędzy fazą stałą i gazową [45]. W tym zakresie nadal rozwijane są sposoby modelowania, które mają na celu skrócenie czasu obliczeń przy zachowaniu lub poprawie zgodności wyników. Przykładowo Mularski i Modliński wykazali znaczący wpływ przyjętych stałych szybkości reakcji na skład gazu w reaktorze oraz zaproponowali nową procedurę optymalizacji danych wejściowych [46]. Rezultatem modelowania CFD są m.in. rozkłady prędkości, temperatur nieprzereagowanego surowca oraz produktów zgazowania. Dane te pozwalają zaprojektować konkretne rozwiązania reaktorów.

5. STRATEGIE W ZAKRESIE ZGAZOWANIA WĘGLA

Energetyka jest kluczowym elementem gospodarki, gdyż od niej w dużej mierze zależy jej konkurencyjność. Z tego względu jest obecna w politykach i strategiach państw z całego świata, a te z kolei w dużym stopniu determinują możliwość i opłacalność przedsięwzięć w konkretne technologie. Zgazowanie jako możliwość konwersji surowców na użyteczne produkty (w tym paliwa i energię) jest uwzględnione w strategiach wszystkich rozwiniętych państw. Wybrane informacje, prezentujące polityczne nastawienie i odzwierciedlające stan wiedzy, przedstawione zostały w kolejnych podrozdziałach.

5.1. Unia Europejska

Europejski Zielony Ład wraz z Fit for 55 zakłada osiągnięcie redukcji emisji gazów cieplarnianych Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu z rokiem 1990. Pomocą w realizacji tego

celu ma być zwiększone wykorzystanie wodoru. W strategii rozwoju produkcji wodoru wymieniane jest pozyskiwanie wodoru z paliw kopalnych z wychwytem dwutlenku węgla. Według szacunków UE, aby mógł on konkurować z wodorem z paliw kopalnych bez wychwytywania CO₂, niezbędne byłyby ceny emisji dwutlenku węgla w zakresie 55–90 euro za tonę. Poziom ten osiągnięty został już w połowie 2021 roku, a w czasie pisania tego artykułu cena przekraczała jego górną granicę.

5.2. Polska

W dokumencie rządowym „Polityka Energetyczna Polski do roku 2040” zapisano, że światowe efekty prac w ramach działalności badawczo-rozwojowej (B+R) wskazują na istnienie potencjału do niskoemisyjnego lub zeroemisyjnego wykorzystania węgla. W praktyce ma to pozwolić na częściowe dalsze korzystanie z jednostek wytwórczych węglowych. Z tego względu w polityce rekomendowane jest poszukiwanie, badanie i wdrażanie nowych metod wykorzystania i przetwarzania węgla tj. zgazowania, oksydowania i innych czystych technologii węglowych.

Obecnie dyskutowana jest opłacalność technologii bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa IGCC w LW Bogdanka z wykorzystaniem technologii Mitsubishi Hitachi Power Systems o mocy 500 MW_e [47].

5.3. USA

Biuro ds. Paliw Kopalnych Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych wspiera rozwój modułowych technologii zgazowania różnego typu i jakości węgla, a także mieszanek węgla z biomasą i innymi odpadami, nastawionymi na produkcję czystego gazu syntezowego nadającego się do produkcji energii elektrycznej, chemikaliów, wodoru, paliw transportowych i innych produktów w zależności od zapotrzebowania rynku wewnętrznego. W 2021 roku Departament Energii Stanów Zjednoczonych (DOE) wybrał cztery projekty, którym przyznał wsparcie w kwocie 2 milionów dolarów na prace badawczo-rozwojowe (B+R) umożliwiające dopracowanie technologii zgazowania mieszanek węgla z biomasą i odpadami tworzyw sztucznych. Zgodnie z założeniami technologie te nastawione są na produkcję wodoru przy zapewnieniu ujemnego bilansu emisji dwutlenku węgla.

5.4. Japonia

W strategii japońskiej Agencji Energii i Zasobów Naturalnych z lipca 2018 roku („The 5th Strategic Energy Plan”) zapisano m.in., że w celu dalszej redukcji emisji gazów cieplarnianych promowany będzie rozwój i praktyczne zastosowania nowej generacji wysokoefektywnych technologii produkcji energii z węgla, takich jak technologia bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC), a także technologie wykorzystujące ogniwa paliwowe ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGFC). W efekcie w 2021 roku w Iwaki została uruchomiona największa na świecie instalacja IGCC o mocy 525 MW_e, charakteryzująca się sprawnością na poziomie 48%.

5.5. Australia

Zasobna w pokłady węgla Australia w opublikowanej strategii „First Low Emissions Technology Statement – 2020” wskazuje zgazowanie węgla połączone z sekwestracją dwutlenku węgla jako jedną z najtańszych metod produkcji czystego wodoru w perspektywie krótkoterminowej. Z tego względu rząd Australii ma przeznaczyć 50 milionów dolarów na projekty badawczo-rozwojowe (B+R), których celem jest doprowadzenie do komercjalizacji.

6. PODSUMOWANIE

Dyskusja nad celowością i efektywnością zgazowania węgla w dobie dekarbonizacji, dążenia do neutralności klimatycznej i wdrażania coraz to nowych i bardziej rygorystycznych regulacji UE w zakresie ochrony klimatu ma istotne znaczenie. Wymaga jednak opracowania i wdrożenia nadszających za tymi regulacjami zaawansowanych i wyspecjalizowanych technologii zapewniających wysokoefektywną produkcję paliw dla niskoemisyjnego wytwarzania energii.

Węgiel ma duży potencjał do innych zastosowań energochemicznych, których podstawą będą procesy jego konwersji: zgazowanie czy też uwodornienie. Środowisko naukowe stoi przed szeregiem wyzwań, których urealnienie stworzy możliwość opracowania efektywnych, przyjaznych zmianom klimatu technologii XXI wieku w zakresie pozyskiwania energii i su-

rowców z pokładów węgla. Za zgazowaniem węgla przemawia wiele argumentów, m.in.:

- poprawa efektywności niskoemisyjnego wytwarzania energii elektrycznej z węgla kamiennego z dążeniem do wysokosprawnych zeroemisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin,
- zwiększenie niezależności surowcowej w przemyśle petrochemicznym,
- ułatwienie procesu zgazowania biomasy (współzgazowanie).

Przegląd technologii zgazowania paliw stałych wykazał, że dostępne są rozwinięte technologie, które można zastosować do wielu surowców energetycznych. Na właściwości fizykochemiczne otrzymanych produktów znaczący wpływ poza parametrami surowców ma typ reaktora. Determinuje on możliwe do realizacji warunki prowadzenia procesu oraz sposób, w jaki należy przygotować surowiec. Dobór odpowiedniego rozwiązania mocno zależy od zamierzonego sposobu dalszego wykorzystania produktów i możliwości zagospodarowania odpadów, w tym ciepła odpadowego. Właściwe skorelowanie technologii zgazowania z technologią energetycznego wykorzystania produktów jest konieczne z punktu widzenia maksymalizacji całkowitej efektywności energetycznej i przyczynia się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla oraz zanieczyszczeń: smół, pyłów, amoniaku, siarkowodoru, chlorowodoru i in. [48]. Do tego celu można posłużyć się dostępnymi metodami modelowania, które wielokrotnie wykazały dużą zgodność z wynikami eksperymentów. Optymalizacja samej konstrukcji wybranego reaktora zgazowania jest możliwa dzięki ciągle rozwijającym, ale już pozwalającym na osiągnięcie wiarygodnych (zweryfikowanych i zwalidowanych) wyników metodom modelowania numerycznego z zastosowaniem Komputerowej Mechaniki Płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Podziękowania

Badania prowadzące do uzyskania tych wyników otrzymały częściowe dofinansowanie z Funduszy Norweskich 2014–2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Artykuł powstał w ramach projektu: „Elektrownia gazowa o ujemnej emisji CO₂” – NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO2-PP/0009/2019-00 współfinansowanego z programu

„Badania stosowane” w ramach Norweskich Mechanizmów Finansowania 2014–2021 POLNOR CCS 2019 – Rozwój zintegrowanych rozwiązań wychwytywania CO₂ w procesach energetycznych i przemysłowych.

Literatura

- [1] Mishra A., Gautam S., Sharma T.: *Effect of operating parameters on coal gasification*. International Journal of Coal Science & Technology 2018, 5, 2: 113–125.
- [2] Abdoulmoumine N., Adhikari S., Kulkarni A., Chattanathan S.: *A review on biomass gasification syngas cleanup*. Applied Energy 2015, 155: 294–307.
- [3] Tennison I. et al.: *Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England*. The Lancet Planetary Health 2021, 5: 84–92.
- [4] Balmes J.R.: *Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health*. Journal of Allergy and Clinical Immunology 2019, 143, 6: 1979–1987.
- [5] Kwaśniewski K., Kopacz M., Grzesiak P., Kapłań R., Sobczyk E.J.: *Zgazowanie węgla: uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.
- [6] Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T.: *Biopaliwa: Technologie dla zrównoważonego rozwoju*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] You S., Ok Y.S., Tsang D.C. W., Kwon E.E., Wang C.-H.: *Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2018, 48, 22–24: 1165–1213.
- [8] Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J.: *Pre-treatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification*. Fuel Processing Technology 2009, 90, 5: 629–635.
- [9] Chmielniak T., Ściążko M.: *Development state and analysis of available gasification technologies used for solid fuels and wastes. W: Development of coal, biomass and wastes gasification technologies with particular interest in chemical sequestration of CO₂: a monograph*, red. A. Strugała. AKNET, Kraków 2012, 200–208.
- [10] *Lurgi FBDBTM – Fixed Bed Dry Bottom Gasification*. Air Liquide, <https://www.engineering-airliquide.com/lurgi-fbdb-fixed-bed-dry-bottom-gasification> [15.02.2022].
- [11] *Clean Energy and Clean Air in one word: ENVIROTHERM*, 2012. https://enviro.su/assets/uploads/2018/10/Brochure_Envirotherm_Technologies.pdf [15.02.2022].
- [12] Jafri Y., Waldheim L., Lundgren J.: *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass*. IEA Bioenergy, 2020
- [13] Swanson M., Henderson A.: *Fluid-Bed Testing of Greatpoint Energy's Direct Oxygen Injection Catalytic Gasification Process for Synthetic Natural Gas and Hydrogen Coproduction. Year 6 – Activity 1.14 – Development of a National Center for Hydrogen Technology*. Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of Dakota, USA 2012.
- [14] Toporov D., Abraham R.: *Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2015, 115, 7.
- [15] Guan X.: *Particulate control devices in Kemper County IGCC Project*. Energy Reports 2019, 5: 969–978.
- [16] *Lihuayi Again Selects GE's Gasification Technology to Boost Refinery Hydrogen Production*. GE News, <https://www.ge.com/news/press-releases/lihuayi-again-selects-ge-gasification-technology-boost-refinery-hydrogen-production> [15.02.2022].
- [17] Andrews A., Logan J.: *Fischer-Tropsch Fuels from Coal, Natural Gas, and Biomass: Background and Policy*. CRS Report for Congress 2008, USA.
- [18] Breault R.W.: *Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies*. Energies 2010, 3, 2: 216–240.
- [19] Phillips J.N., Booras G.S., Marasigan J.: *The history of integrated gasification combined-cycle power plants*. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017.
- [20] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., Nigam K.D.P.: *Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation*. International Journal of Hydrogen Energy 2020, 45, 41: 21087–21111.
- [21] Dahou T., Defoort F., Khiari B., Labaki M., Dupont C., Jeguirim M.: *Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 135.
- [22] *Fluidized Bed Gasifier Plants. Biowaste Gasification*. HoSt Bioenergy, <https://www.host.nl/en/biomass-gasification> [15.02.2022].
- [23] *ANDRITZ Carbona Bubbling Fluidized Bed (BFB) gasifier*. <https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers> [15.02.2022].
- [24] *Valmet Gasifier for biomass and waste*. <https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/> [15.02.2022].
- [25] *Patented Gasification Technology*. EQTEC Technology, <https://eqtec.com/patented-gasification-technology/> [31.01.2022].
- [26] *Henan Haiqi Environmental Protection Technology Co., Ltd. biomass burner, pellet burner, sawdust burner, biomass gasifier, waste pyrolysis gasification*. <http://www.haiqi-machine.com/> [15.02.2022].
- [27] *Downdraft Biomass Gasifiers and Updraft Biomass Gasifiers*. <https://www.chanderpur.com/biomass-gasifier.php> [15.02.2022].
- [28] *Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel*. <http://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html> [15.02.2022].
- [29] *Gasification Technology Center*. TU Bergakademie Freiberg, <https://tu-freiberg.de/en/iec/evt/networking/gasification-technology-center> [15.02.2022].
- [30] Asadullah M.: *Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 29: 201–215.
- [31] Ptasiński K.J.: *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. John Wiley & Sons, New Jersey 2016.
- [32] Howaniec N.: *Wybrane aspekty współgazowania węgla i biomasy parą wodną*. Karbo 2015, 4: 139–144.
- [33] Kozaczka J.: *Procesy zgazowania: inżynierskie metody obliczeń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.
- [34] An H., Fang X., Liu Z., Li Y.: *Research on a soft-measurement model of gasification temperature based on recurrent neural network*. Clean Energy 2022, 6, 1: 861–868.
- [35] Safarian S., Unnþórsson R., Richter C.: *A review of biomass gasification modelling*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 110: 378–391.
- [36] Wang Y., Wang J., Luo X., Guo S., Lv J., Gao Q.: *Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal*. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, January 2015, 3, 1: 198–210.
- [37] Wang M., Liu G., Hui C.W.: *Optimization of IGCC gasification unit based on the novel simplified equilibrium model*. Clean Technologies and Environmental Policy 2018, 20, 2: 259–269.
- [38] Ptasiński K.J., Hamelinck C., Kerkhof P.J.A.M.: *Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process*. Energy Conversion and Management 2002, 43, 9–12: 1445–1457.
- [39] Cruz P.L., Navas-Anguila Z., Iribarren D., Dufour J.: *Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43, 26: 11688–11695.
- [40] Migliaccio R.: *Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2021, 60, 13: 5034–5047.

- [41] Jia J., Zang G., Paul M.C.: *Energy, exergy, and economic (3E) evaluation of a CCHP system with biomass gasifier, solid oxide fuel cells, micro-gas turbine, and absorption chiller*. International Journal of Energy Research 2021, 45, 10: 15182–15199.
- [42] Singh R.I., Brink A., Hupa M.: *CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification*. Applied Thermal Engineering. 2013, 52: 585–614.
- [43] Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modliński N.: *A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics*. Fuel 2020, 271.
- [44] Madejski P.: *Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method*. Applied Thermal Engineering 2018, 145: 352–363.
- [45] Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T.: *Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification*. Progress in Energy and Combustion Science 2021, 86: 100938.
- [46] Mularski J., Modliński, N.: *Entrained-Flow Coal Gasification Process Simulation with the Emphasis on Empirical Char Conversion Models Optimization Procedure*. Energies 2021, 14, 6: 1729.
- [47] *Stabilny rozwój w niełatwym otoczeniu – raport zintegrowany 2019*, Grupa Kapitałowa Lubelski Węgiel Bogdanka 2020.
- [48] Acharya B.: *Cleaning of Product Gas of Gasification*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 2018: 373–391.

dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI, prof. AGH

dr inż. SŁAWOMIR RÓŻYCKI

dr hab. inż. MARIAN BANAŚ, prof. AGH

dr hab. inż. TADEUSZ PAJĄK, prof. AGH

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

{madejski, srozycki, mbanas, pajak}@agh.edu.pl