

Alina Rejman-Burzyńska, Eugeniusz Jędrzyk*, Jerzy Świądrowski**

EKONOMICZNE I EKOLOGICZNE ASPEKTY PRZETWÓRSTWA WĘGLA NA PALIWA PŁYNNNE

1. Wprowadzenie

Według aktualnego rozpoznania geologicznego, światowe rezerwy paliw kopalnych składają się w około 64% z węgla brunatnego i kamiennego, około 19% ropy naftowej i około 17% gazu [1]. Równocześnie, o ile zasoby i wydobycie węgla są w miarę równomiernie rozłożone w różnych częściach kuli ziemskiej, o tyle zasoby i wydobycie ropy i gazu koncentruje się w krajach niestabilnych politycznie. Około 70% tych surowców znajduje się i jest wydobywane w środkowej Azji i krajach byłego ZSRR.

Równocześnie paliwa płynne stanowią istotny element gospodarki energetycznej świata, a w niektórych gałęziach (np. transporcie) ich rola jest dominująca. Jest to wynikiem ich cech charakterystycznych, jak łatwość i bezpieczeństwo transportu i magazynowania oraz stosunkowo niska emisja zanieczyszczeń do środowiska podczas ich wykorzystania. Zastosowanie alternatywnych sposobów napędu samochodów, np. energii słonecznej, ogniw paliwowych jest w fazie badań i nie należy się spodziewać ich zastosowania w skali masowej w najbliższej przyszłości.

W świetle powyższego, w większości projektów typu „foresight” opracowanych w różnych krajach, które dotyczą zagadnień bezpieczeństwa energetycznego, ujmowane jest wytwarzanie paliw płynnych z węgla jako etap pośredni pomiędzy paliwami z ropy i alternatywnymi do paliw kopalnych źródłami energii. Prognozy te mają oparcie w dotychczasowych doświadczeniach uzyskanych przede wszystkim w Niemczech w okresie II wojny światowej i RPA w okresie późniejszym, gdzie paliwa płynne produkowane były lub są z węgla w skali przemysłowej. Silnym wsparciem dla przemysłowego wdrożenia technologii upłynniania węgla jest również uruchomienie na przełomie 2008/2009 r. instalacji w Chinach o zdolności produkcyjnej około 1 mln t paliw płynnych / rok [2].

* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Uważa się, że jedyną barierą w chwili obecnej uniemożliwiającą powszechne wykorzystanie węgla do produkcji paliw płynnych jest bariera ekonomiczna wynikająca głównie z relacji cen węgla i ropy naftowej na rynkach światowych.

2. Mechanizm transformacji węgla pierwiastkowego zawartego w węglu do produktów ciekłych

Podstawowym celem przetwarzania węgla do paliw płynnych jest zwiększenie stosunku wagowego wodoru/węgiel (H/C) z około 0,8 w surowcu do około 2,0 w produkcie. Mechanizm przetwarzania węgla pierwiastkowego zawartego w surowcu — kopalinie węglowej polega na dodawaniu lub przestawianiu wodoru w szkieletcie węglowym i można go opisać w uproszczeniu czterema teoretycznymi reakcjami. Reakcje te są przedstawione w tabeli 1. Pozostałe reakcje konwersji węglowodorów, takie jak alkilacja, polimeryzacja itp. nie zmieniają stosunku wodoru do węgla H/C w uzyskanych produktach.

TABELA 1
Reakcje dla zmiany stosunku H/C [3]

Lp.	Wyszczególnienie	Przykłady procesów
1.	Prosta karbonizacja $CH_a \rightarrow CH_b + C$	gdzie $b > a$: koksowanie, kraking katalityczny
2.	Bezpośrednie uwodornienie węglowodorów $CH_a \pm d H \rightarrow CH_b$	gdzie $b > a$; hydrokraking, uwodornienie gdzie $a > b$; reforming, odwodornienie
3.	Bezpośrednie uwodornienie węgla $C + d H \rightarrow CH_d$	metanizacja czystego węgla
4.	Reakcja syntezy $CO + (2+y) H \rightarrow CH_y + H_2O$	Fischer Tropsch, metanizacja

Wszystkie wymienione w tabeli 1 reakcje oprócz pierwszej wymagają dostarczenia wodoru. Różne sposoby otrzymywania wodoru przedstawiono w tabeli 2. Wytwarzanie wodoru w wyniku dehydrogenacji bogatych w wodór materiałów zaliczona jest w tabeli 1 do pozycji 2.

Biorąc pod uwagę wyżej przedstawione reakcje i ich kombinacje złożone z opcji zmiany stosunku H/C z opcjami produkcji wodoru można zidentyfikować różnorodne procesy wytwarzania pożądaných węglowodorów. Każdy taki proces charakteryzuje się właściwą sobie efektywnością konwersji węgla zawartego w surowcu do produktu końcowego oraz emisją ditlenku węgla do atmosfery, co stanowi stratę węgla pierwiastkowego. Procesy różnią się także zapotrzebowaniem na tlen. I tak np. proces Fischer-Tropscha (4 w tab. 1) ma najwyższe zapotrzebowanie na tlen, a proces bezpośredniego upłynniania (2 w tab. 1) ma najmniejsze zapotrzebowanie.

TABELA 2

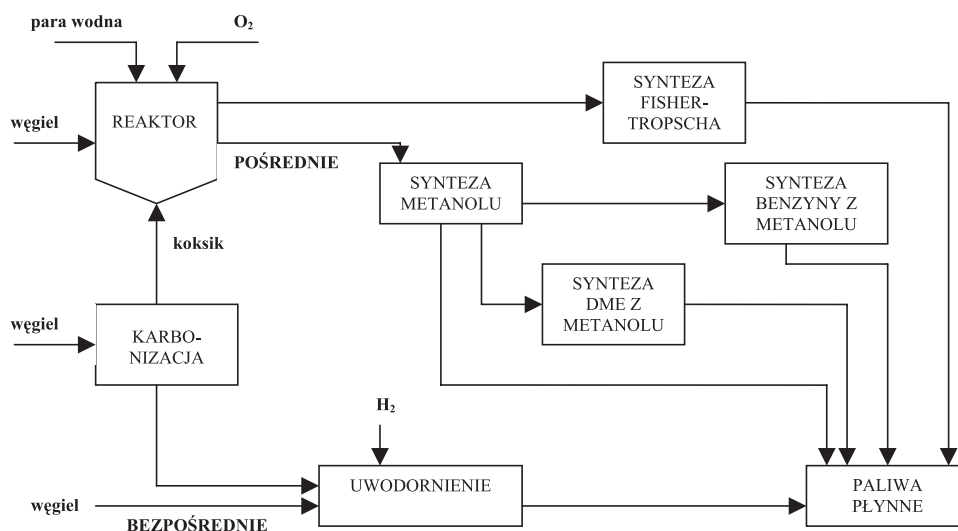
Metody produkcji wodoru [3]

Lp.	Wyszczególnienie	Charakterystyka cieplna reakcji
1.	Reforming parowy $C + H_2O \rightarrow CO + 2 H$	wysoce endotermiczna
2.	Konwersja tlenku węgla $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + 2 H$	słabo egzotermiczna
3.	Elektroliza wody $H_2O \rightarrow 2 H + O$ (z możliwością częściowego spalania $C + O \rightarrow CO$)	wysoce endotermiczna
4.	Chemiczny rozpad wody $H_2O \rightarrow 2 H + O$	wymaga dostarczenia dużej ilości energii do reakcji

Na podstawie wnikliwej analizy teoretycznej można dobrać najkorzystniejsze kombinacje procesów i zbudować różne modele technologiczne procesu upłynniania węgla.

3. Dobór modułów procesowych dla upłynniania węgla [4]

Ogólny schemat wytwarzania paliw płynnych z węgla przedstawiający podstawowe opcje procesowe, a mianowicie dwie pośrednie poprzez syntezę Fischera-Tropscha i syntezę metanolu oraz bezpośrednią poprzez uwodornienie, pokazuje rysunek 1.

**Rys. 1.** Opcje technologiczne procesów konwersji węgla do paliw płynnych

Opracowanie schematu technologicznego o możliwie wysokiej konwersji węgla a przy tym niskiej emisji ditlenku węgla wymaga doboru takiej drogi transformacji węgla pierwiastkowego zawartego w węglu (kopalinie), która charakteryzowałaby się wysoką efektywności energetyczną całego procesu wytwarzania paliw łącznie z procesami pomocniczymi. Konieczna jest analiza wielu wariantów, składających się z szeregu procesów i operacji jednostkowych (modułów).

Zestawienie najczęściej stosowanych modułów procesowych oraz pięciu przykładowych wariantów schematów technologicznych przedstawiono w tabeli 3. Większość z przedstawionych modułów składa się z wielu operacji jednostkowych, moduły mogą występować również w innych wersjach technologicznych.

Rozpatrywane warianty technologiczne pokazano na poniższych schematach, moduły opisano liczbami porządkowymi zgodnie z zestawieniem zawartym w tabeli 3.

TABELA 3

Zestawienie modułów procesowych i wariantów technologicznych produkcji paliw płynnych z węgla

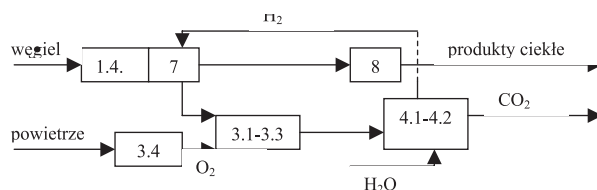
Lp.	Moduły procesowe	1	2	3	4	5
1	Przygotowanie surowca węglowego					
1.1	Mielenie i klasyfikacja węgla		X			X
1.2	Suszenie węgla (węgiel brunatny)		X			
1.3	Przygotowanie zawiesiny wodno-węglowej (zgazowanie metodą strumieniową)		X			
1.4	Przygotowanie zawiesiny węglowo-olejowej do uwodornienia	X		X	X	
2	Karbonizacja węgla i pozostałości z bezpośredniego uwodornienia					
3	Zgazowanie węgla		X	X	X	
3.1	Zgazowanie w złożu stałym (Lurgii)					
3.2	Zgazowanie w złożu fluidalnym (HTW)					
3.3	Zgazowanie w reaktorze strumieniowym (GE Texaco)					
3.4	Tlenownia (wytwarzanie tlenu)	X	X	X	X	
4	Przygotowanie gazu syntezowego					
4.1	Oczyszczanie gazu (Rectisol, Selexol)	X	X	X	X	X
4.2	Konwersja gazu (WGS)	X		X	X	
4.3	Odwrócona konwersja gazu (RWGS)					X

TABELA 3 cd.

Lp.	Moduły procesowe	1	2	3	4	5
5	Synteza paliw płynnych					
5.1	Synteza Fischer-Tropscha		X	X		X
5.2	Synteza metanolu					
5.3	Synteza DME					
6	Wytwarzanie wodoru					
6.1	Reforming parowy węglowodorów				X	
6.2	Częściowe spalanie węgla i pozostałości z bezpośredniego uwodornienia					
6.3	Elektroliza wody					
6.4	Wysokotemperaturowy rozkład wody		X			
6.5	Rozdział gazów z bezpośredniego uwodornienia					X
7	Bezpośrednie uwodornienie węgla	X		X	X	
7.1	Proces jednostopniowy					
7.2	Proces dwustopniowy					
8	Przeróbka ropy węglowej					
8.1	Destylacja	X		X	X	
8.2	Hydrowy rafinacja	X		X	X	
8.3	Hydrokraking	X		X	X	
8.4	Reforming	X		X	X	
8.5	Izomeryzacja	X		X	X	
9	Produkcja energii					
9.1	Spalanie węgla					
9.2	Spalanie pozostałości					
9.3	Spalanie gazów resztkowych					
9.4	Energia jądrowa					X
9.5	IGCC					
9.6	Spalanie węgla w tlenie (Oksy-spalanie)					X

Wariant 1 — Bezpośrednie uwodornienie węgla

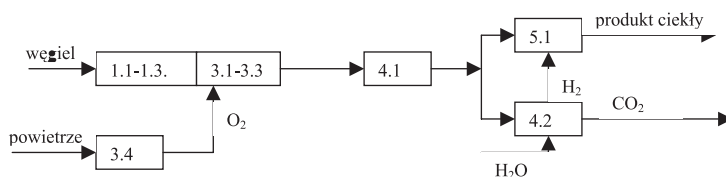
Zawiesina węgla w oleju cyrkulującym uwodorniania jest w procesie jedno lub dwustopniowym. Produkty ciekłe poddawane są obróbce w procesach znanych z przemysłu rafineryjnego, natomiast stała pozostałość jest zgazowywana, a produkty gazowe po oczyszczeniu i konwersji są źródłem wodoru dla uwodornienia węgla w zawieszinie.



Rys. 2. Bezpośrednie uwodornienie węgla

Wariant 2 — Pośredniego upłynniania węgla

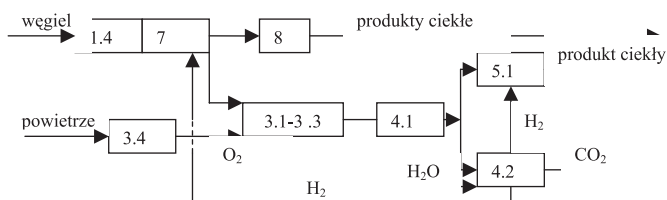
Węgiel jest surowcem do zgazowania tlenem uzyskanym przez rozfrakcjonowanie powietrza, gaz po oczyszczeniu i konwersji stanowi surowiec dla syntezy Fischer-Tropscha, w wyniku której uzyskuje się produkt ciekły.



Rys. 3. Pośredniego upłynniania węgla

Wariant 3 — Zintegrowane bezpośrednie i pośrednie upłynnianie węgla

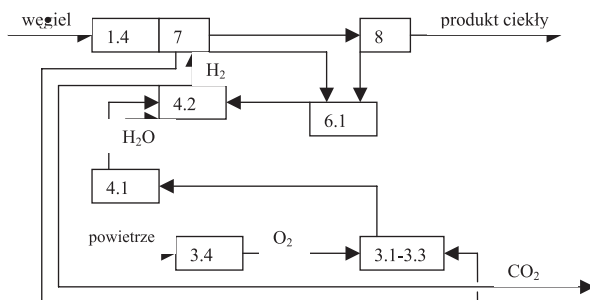
Przez zgazowanie tlenowe pozostałości z bezpośredniego uwodornienia uzyskuje się gaz syntezowy do produkcji paliw ciekłych metodą Fischera-Tropscha, natomiast nadmiar wodoru z instalacji konwersji gazu kierowany jest do instalacji uwodornienia bezpośredniego.



Rys. 4. Zintegrowane bezpośrednie i pośrednie upłynnianie węgla

Wariant 4 — Bezpośrednie uwodornienie węgla skojarzone z przeróbką ropy naftowej

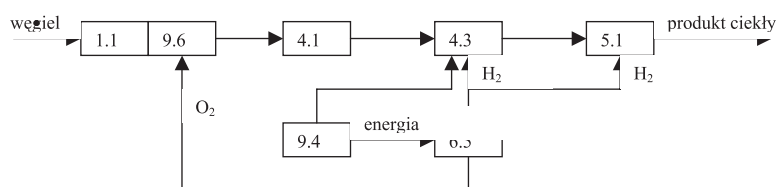
Podstawą procesu jest bezpośrednie uwodornienie węgla w zawiesinie. Źródłem wodoru jest instalacja reformingu węglowodorów lekkich uzyskiwanych z uwodornienia i przeróbki rafineryjnej oraz ze zgazowania pozostałości po uwodornieniu i konwersji gazu.



Rys. 5. Bezpośrednie uwodornienie węgla skojarzone z przeróbką ropy naftowej

Wariant 5 — Synergia jądrowo-węglowa

Węgiel spalany jest w strumieniu tlenu wytworzonego w procesie wysokotemperaturowego rozkładu wody. Energia dla tego procesu oraz konwersji ditlenku węgla w odwróconej reakcji gazu wodnego otrzymywana jest przez wykorzystanie ciepła odpadowego z wysokotemperaturowego reaktora jądrowego. Wodór z wysokotemperaturowego rozkładu wody stosowany jest w instalacji odwróconej konwersji CO₂ oraz do syntezy Fischera-Tropscha.



Rys. 6. Synergia jądrowo-węglowa

4. Aspekty ekonomiczne

Rozpatrywane w podrozdziale 3 warianty upłynniania węgla są złożonymi kompleksami technologicznymi i obejmują zarówno technologie nowe, niesprawdzone jeszcze w długoletniej pracy w skali przemysłowej, jak i szereg obiektów i instalacji powszechnie stosowanych w nowoczesnym przemyśle rafineryjnym i energetycznym. Ocenę nakładów inwestycyjnych zakładu o tak złożonej technologii dokonuje się w oparciu o ustaloną strukturę

zakładu produkcyjnego, dla którego określone zostały wszystkie niezbędne elementy procesu technologicznego. Wymaga to wykonania szczegółowych prac projektowych, które określają: wielkości poszczególnych procesów/installacji, bilans materiałowych surowców i produktów, rozwiązania technologiczne wszystkich węzłów, rozwiązania inżynierskie poszczególnych aparatów i urządzeń, schematy technologiczne z dobranymi układami aparatury kontrolno-pomiarowej, szczegółową specyfikację aparatury i wyposażenia, plan zakładu, rozmieszczenie aparatury i urządzeń, charakterystykę i typ budynków oraz budowli, warunki geologiczne gruntu i lokalizację zakładu.

Znaczne koszty inwestycyjne i operacyjne instalacji przetwórstwa węgla na paliwa ciekłe stwarzają konieczność opracowania narzędzia do analizy i optymalizacji schematu technologicznego i wielkości przerobu tego typu kompleksu technologicznego. W GIG powstaje baza danych dla modułów procesowych — bloków technologicznych, które mogą być wykorzystane do tworzenia schematu technologicznego tego typu kompleksu. Opracowywane są podstawowe charakterystyki techniczno-ekonomiczne obejmujące: koszty inwestycyjne, operacyjne oraz podstawowe dane dla bilansu masowego i energetycznego. Dla optymalizacji programu produkcji i doboru optymalnego schematu technologicznego dla przyjętych kryteriów, np. minimalne koszty operacyjne i inwestycyjne oraz minimalna emisja ditlenku węgla wykorzystuje się zaawansowane metody matematyczne takie jak programowanie liniowe i geometryczne.

Na obecnym etapie prace koncentrują się na tworzeniu bazy modułów procesowych tworzących kompleks technologiczny realizujący wariant 1 upłynniania węgla — bezpośrednie uwodornienie węgla. Istotnym zagadnieniem ekonomiki tego wariantu jest koszt produkcji wodoru. Wykonane przez GIG obliczenia wykazują, że z uwagi na relacje cen węgla i gazu ziemnego korzystniejsze pod względem ekonomicznym jest wytwarzanie wodoru z węgla a nie z gazu ziemnego.

Biorąc pod uwagę jednostkowe koszty inwestycyjne charakteryzując technologie otrzymywania wodoru oparte o reforming surowców węglowodorowych z parą wodną należy zastosować schemat technologiczny oparty o wytwarzanie wodoru z wydzielonych z procesu gazów procesowych i ciężkiej pozostałości. Wyniki obliczeń silnie zależą od relacji pomiędzy cenami gazu ziemnego/węglowodorów, a cenami węgla oraz energii elektrycznej. Duża rozpiętość cen gazu ziemnego i węgla, przy niskich cenach węgla preferuje rozwiązania bardziej kapitałochłonne wykorzystujące węgiel do produkcji wodoru.

W przypadku produkcji energii elektrycznej z węgla najniższe koszty produkcji charakteryzuje technologia oparta o hybrydowy blok energetyczny gazowo-parowy. Analiza ekonomiczna powinna również uwzględnić koszty sekwestracji ditlenku węgla lub opłaty związane z emisją tego gazu.

Model ekonomiczny opracowany dla analizy kompleksu bezpośredniego uwodornienia węgla — wariantu 1, pokazał istotność ekonomii skali. Obliczenia wykorzystujące wyżej wymieniony model wykazują, że minimalna wielkość produkcji paliw ciekłych powinna wynosić 3 miliony ton/rok. Wyniki obliczeń w cenach roku 2006 dla różnej wielkości produkcji i różnej ceny węgla (warianty A–D) przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Ekonomia produkcji paliw płynnych z węgla (dane dla roku 2006) [5]

Wyszczególnienie	Wariant			
	GIG-A	GIG-B	GIG-C	GIG-D
Wielkość instalacji, mln/t paliw na rok	1	1	3	3
Nakłady inwestycyjne, mln USD	2 800	2 300	5 500	5 500
Ilość przerabianego węgla, mln t/rok	6	6	8,4	8,4
Cena węgla, USD/t	55	20	55	20
Wymagana cena sprzedaży paliw syntetycznych z węgla, USD/bbl	110,70	83,50	62,59	50,20
Minimalna cena ropy, która zapewni porównywalne ceny paliw silnikowych produkowanych w rafineriach, USD/bb	92,30	69,55	52,00	41,80

5. Emisja ditlenku węgla

Wytwarzanie paliw płynnych z węgla, podobnie jak inne procesy chemiczne, niosą ze sobą potencjalne zagrożenia dla środowiska naturalnego. Istotnym elementem jest w tym aspekcie emisja ditlenku węgla, której wielkość zależy od sprawności termicznej wybranej opeji.

Przeprowadzone obliczenia dla przetwarzania węgla i ropy naftowej do paliw silnikowych wykazały, że wielkość emisji ditlenku węgla kształtuje się na poziomie przedstawionym w tabeli 5.

TABELA 5

Wielkość emisji ditlenku węgla [6]

Rodzaj procesu	Wielkość emisji Mg CO ₂ /Mg produktu
Uwodornienie bezpośrednie	2,16
Uwodornienie pośrednie	3,32
Karbonizacja	4,66
Rafinacja ropy naftowej	0,32

Kilkakrotnie większa emisja ditlenku węgla nabiera znaczenia w świetle dążeń do redukcji emisji tego gazu jako przyczyny powstawania efektu cieplarnianego.

6. Podsumowanie

Prace GIG nad kierunkiem rozwoju przetwórstwa węgla na paliwa płynne w Polsce wskazują wyraźnie na konieczność integracji przetwórstwa węgla z energetyką.

Tworzona baza danych dla modułów procesowych stanowi dobrą podstawą do zaprojektowania dla kompleksu produkcji paliw płynnych z węgla, schematu technologicznego o możliwie wysokiej konwersji węgla, przy tym niskiej emisji ditlenku węgla oraz nie wysokich kosztach.

Szczegółowo analizowany jest kompleks technologiczny realizujący bezpośrednie uwodornienie węgla. Ekonomia skali wymaga budowy instalacji wytwarzającej 3 mln ton paliw na rok. Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia ekonomiki jest koszt produkcji wodoru.

Przeprowadzony przegląd wariantów produkcji paliw z węgla i produkcji wodoru wskazuje na rozwiązanie, jakim jest integracja przetwórstwa węgla z produkcją energii otrzymywaną w wysokotemperaturowych reaktorach jądrowych. Pozwala ono na obniżenie kosztów produkcji wodoru i obniżenie emisji ditlenku węgla.

LITERATURA

- [1] www.bp.com
- [2] www.chinadaily.com.cn/cndy/2009-01/22/content_7419278.htm
- [3] *Wojciechowski B.W.*: Possibilities for coal liquefaction. *Hydrocarbon Processing*, Vol. 59, No 5
- [4] *Świądrowski J., Jędrzyk E., Rejman-Burzyńska A., Ludwik-Pardała M., Śliwińska A.*: System do techniczno-ekonomicznego modelowania modułów technologicznych tworzących instalację upłynniania węgla. Praca 161 1036 8 232, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2008, niepublikowane
- [5] *Świądrowski J., Stańczyk K., Rejman-Burzyńska A., Jędrzyk E., Ludwik-Pardała M., Kapusta K.*: Techniczno i ekonomiczna ocena możliwości wdrożenia technologii upłynniania węgla w Polsce. Praca 160 1056 6-323, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2000, niepublikowana
- [6] *Sage P., Payne M.*: Coal liquefaction — A Technology Status Review, Raport No COAL R 184 DTI/Pub URN 99/1241