

MAREK ŚCIAŻKO*

Nowe szanse technologii węglowych

Słowa kluczowe

Węgiel, technologie, zgazowanie

Streszczenie

Ocenia się, że w drugiej połowie XXI wieku nastąpi zasadnicza zmiana w światowej strukturze zużycia paliw pierwotnych. Zasoby ropy naftowej będą na wyczerpaniu, a dostęp do gazu ziemnego znacznie ograniczony. Nieunikniony będzie w związku z tym powrót do szerokiego wykorzystania najbardziej zasobnego na świecie surowca energetycznego, jakim jest węgiel, który odzyskuje także swoją pozycję jako surowiec chemiczny. Główne wyzwanie związane z rozwojem tzw. „czystych” technologii węglowych wynika z potrzeby radykalnego zmniejszenia emisji dwutlenku węgla w energetyce i z coraz droższej ropy naftowej. Z powodu wymuszonego postępu technologicznego powstają nowoczesne układy zgazowania, które stają się atrakcyjne dla wytwarzania gazu syntezowego dla chemii pozwalającego wytwarzać m.in. wodór, metanol i paliwa ciekłe. Przedsięwzięcia te mają ciągle jednak charakter innowacyjny i z tego powodu oczekuje się dużego wsparcia badawczego dla przyspieszenia ich rozwoju.

Wprowadzenie

Ocenia się, że w drugiej połowie XXI wieku nastąpi zasadnicza zmiana w światowej strukturze zużycia paliw pierwotnych. Zasoby ropy naftowej będą na wyczerpaniu, a dostęp do gazu ziemnego znacznie ograniczony. Wyczerpywanie się naturalnych zasobów paliw węglowodorowych może zostać znacznie przyspieszone w wyniku intensywnego wzrostu zapotrzebowania na nośniki energii pierwotnej, w szczególności w Chinach i Indiach. Nieunikniony będzie w związku z tym powrót do szerokiego wykorzystania najbardziej

* Dr inż., Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze.

zasobnego na świecie surowca energetycznego, jakim jest węgiel, który z powrotem staje się także atrakcyjnym surowcem chemicznym. Przy aktualnym jego zapotrzebowaniu wielkość zasobów węgla wystarcza na 200–300 lat, a dodatkową jego zaletą jest w miarę równomierne występowanie w świecie. Powstaje w związku z tym konieczność przystąpienia już dzisiaj do wypracowania nowych, bardziej racjonalnych i wysokosprawnych technologii jego wykorzystania. Główne wyzwanie związane jest z jednej strony z potrzebą radykalnego zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne procesów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, z drugiej zaś z substytucją czystych produktów chemicznych otrzymywanych obecnie w głównej mierze z gazu ziemnego (wodór, metanol) i ropy naftowej (paliwa ciekłe silnikowe).

W energetyce węglowej postępuje zdecydowanie zjawisko „chemizacji” tradycyjnych procesów energetycznych poprzez dodanie do dotychczas opracowanych metod usuwania substancji zanieczyszczających środowisko takich jak: związki siarki i azotu (SO_2 i NO_x) oraz pyły także układów usuwających dwutlenek węgla. Należy oczekiwać, że nie jest to koniec i nadal wywierana będzie presja na dalszą redukcję emisji, przy czym zwraca się uwagę na coraz to inne zanieczyszczenia występujące w mikro- i nano-koncentracjach (np. metale ciężkie, rtęć, dioksydy).

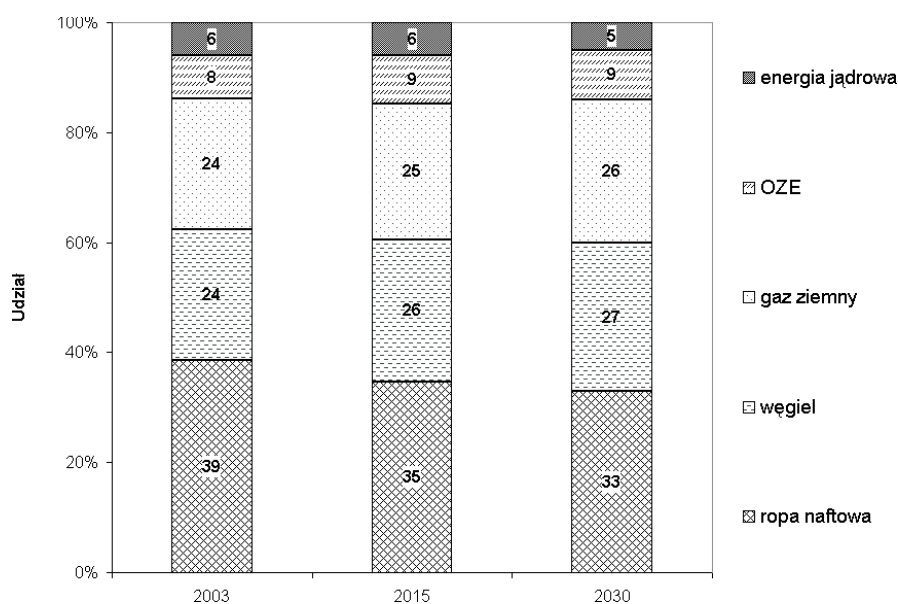
W perspektywie wieloletniej rozwój i wdrażanie zaawansowanych technologii energetycznych, a zwłaszcza rozwijanie wysokosprawnych, niskoemisyjnych i „czystych” technologii wykorzystania węgla, ukierunkowanych na efektywne i maksymalne wykorzystanie energii chemicznej tego paliwa wymaga integracji zadań przemysłu związanego z górnictwem, energetyką oraz chemią. W tym nowym podejściu zmierzającym do stworzenia w perspektywie 50 lat gospodarki „wodorowej” wytwarzanie energii elektrycznej w dużych źródłach winno także dawać możliwość zaopatrywania odbiorców rozproszonych w paliwa zawierające zakumulowaną „czystą” energię chemiczną dla zastosowań lokalnych. W takim przypadku możliwe będzie wytwarzanie energii elektrycznej z dużą sprawnością w ogniwach paliwowych unikając strat związanych z liniami przesyłowymi.

Coraz częściej podstawą procesową zaawansowanych technologii wykorzystania węgla staje się zgazowanie głównie z powodu potencjalnie mniejszych kosztów usuwania dwutlenku węgla w porównaniu do klasycznych układów energetycznych opartych o bezpośrednie spalanie węgla. W konsekwencji stwarza to wyjątkową sytuację dla rozwoju tej technologii, osiągnięcie jej wysokiej dyspozycyjności oraz wielkoskalowego zastosowania. Często też w przypadku zgazowania systemy wytwarzające „czystą” energię są integrowane z wytwarzaniem produktów chemicznych i mówi się wtedy o tzw. „energopleksach” lub „poligeneracji”. Wiąże one wytwarzanie energii elektrycznej oraz produktów chemicznych z węgla, głównie paliw płynnych silnikowych, metanolu lub wodoru. Można zatem przyjąć, że kreatorem rozwoju procesów chemicznego wykorzystania węgla staje się w dużym stopniu energetyka, którą cechuje ciągła dążność do maksymalizacji ogólnej sprawności przetwarzania energii pierwotnej.

1. Dostępność paliw kopalnych i sytuacja energetyczna świata

Według raportów Departamentu Energii (USA) (International... 2006) i Komisji Europejskiej (World... 2006) światowe zużycie energii wzrośnie o 71 % w okresie 2003–2030. Paliwa kopalne nadal będą dominujące, a wśród nich węgiel jako podstawowy surowiec dla energetyki i coraz częściej w krajach o dużych jego zasobach, jak np. Chiny i Indie, jako surowiec chemiczny.

Przewiduje się, że światowe zużycie węgla wzrośnie z 5,440 mln ton w 2003 do 7,792 mln ton w 2015, przy średnim tempie 3,0%. Osłabienie tempa wzrostu nastąpi po 2015 r. do 2% rocznie osiągając poziom 10,561 mln ton w 2030 r. Węgiel wydobyty w 2003 r. w 67% stosowany jest w energetyce, a 30% w przemyśle. W skali światowej zużycie węgla w przemyśle wzrośnie głównie za sprawą Chin i ma to związek głównie z rozwojem przemysłu stalowniczego i gazu syntezowego dla chemii. Prognozę zużycia węgla w świecie przedstawiono na rysunku 1.



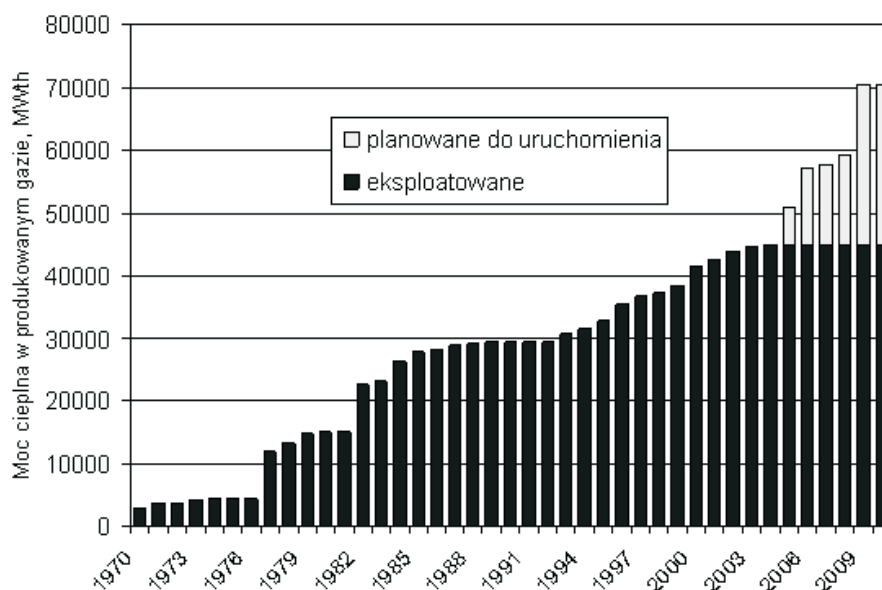
Rys. 1. Prognoza struktury zużywanej energii pierwotnej

Fig. 1. Forecast for primary energy share

2. Zgazowanie podstawą rozwoju współczesnych technologii węglowych

Przegląd światowego stanu rozwoju technologii zgazowania przeprowadzony w roku 2004 przez Childress Associates na zlecenie U.S. Department Energy i National Energy Technology Laboratory (A Current..., Gasification... 2005; Stiegel i in. 2006) pokazuje, że na świecie działa 117 instalacji zgazowania wyposażonych w 385 reaktorów o łącznej mocy

45 001 MW_{th} (entalpia chemiczna w produkowanym gazie). Oznacza to, że w okresie 1980–2004 zanotowano ponad dwukrotny przyrost światowej produkcji gazu pozyskiwanego na tej drodze (z ok. 20 do 45 GW). Kolejny 56% przyrost ma nastąpić przed rokiem 2010 (rys. 2), a tempo to może ulec przyśpieszeniu po wprowadzeniu obowiązku usuwania CO₂.



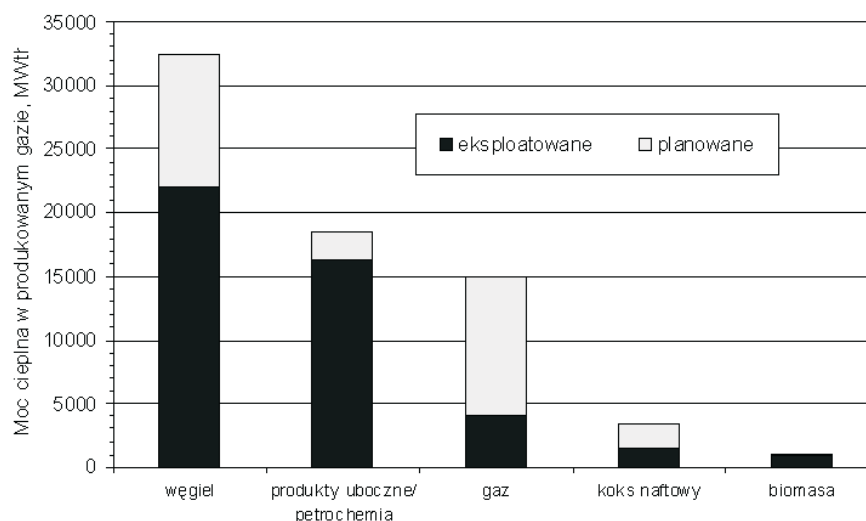
Rys. 2. Światowy rozwój technologii zgazowania paliw (A Current..., Gasification... 2005)

Fig. 2. Development of gasification technology in the world (A Current..., Gasification... 2005)

Największym inwestorem są obecnie Chiny, w których buduje się obecnie 24 instalacje o łącznej wydajności 8478 MW_{th} (A Current..., Gasification... 2005, Stiegel i in. 2006). Układy te służą głównie do produkcji amoniaku, metanolu i energii elektrycznej.

Zasadniczym surowcem wsadowym jest węgiel, który wykorzystywany jest w obecnie pracujących instalacjach zgazowania mających 49% udział w światowej produkcji gazu syntezowego. Kolejne miejsca zajmują uboczne produkty przemysłu petrochemicznego (37%), a pozostałe 14% produkowane jest z różnych odpadowych gazów przemysłowych, koksu naftowego i biomasy. W przypadku instalacji planowanych do uruchomienia (do roku 2010) rola węgla jako podstawowego paliwa zostanie utrzymana. Będzie on wykorzystywany w 30 z 38 budowanych układów (rys. 3).

Gaz procesowy otrzymywany ze zgazowania węgla stosowany jest aktualnie głównie w syntezie Fischer-Tropsch'a i w produkcji syntetycznego gazu ziemnego (SNG) (68% produkcji gazu). Związane jest to przede wszystkim z pracującymi w Republice Afryki Południowej (RPA) zakładami produkcji paliw płynnych, które wykorzystują technologie zgazowania w złożu stałym (Sasol Lurgi) i w zakładzie SNG w Great Plane (USA). Pozostałe



Rys. 3. Sumaryczna wydajność reaktorów zgazowania w zależności od stosowanego paliwa – stan obecny i prognozowany do roku 2010 (Gasification... 2005)

Fig. 3. Total gasification yield in respect of basic fuel used – current and future situation till 2010 (Gasification... 2005)

32% gazu wytwarzanego z węgla wykorzystywane jest do produkcji różnych substancji chemicznych (11 %) oraz paliw gazowych (11%) i energii elektrycznej (10%). W przypadku wdrażanych instalacji generowany gaz służyć będzie głównie do produkcji substancji chemicznych (75%) oraz energii elektrycznej (24%).

Dominującą rolę w produkcji gazu w procesie zgazowania odgrywiają technologie oferowane przez Sasol Lurgi (złóże stałe), GE Energy (Chevron Texaco; reaktory zawieszinowe) oraz Shell (reaktory zawieszinowe), które stanowią obecnie 94% rynku światowego. Do pozostałych 6% należą m.in. technologie: ConocoPhillips E-Gas, Elcogas S.A. Prenflo, Siemens Fuel Gasification Technology GmbH GSP (Future Energy GmbH), Koppers-Totzek, (reaktory zawieszinowe), GTI U-GAS, Low Pressure Winkler, Foster Wheeler CFBG (złóże fluidalne) oraz British Gas Lurgi BGL, Thermoselect (złóże stałe). Obecnie jednak najbardziej intensywnie rozwijanymi technologiami zgazowania węgla są procesy wykorzystujące reaktory zawieszinowe. Znajduje to potwierdzenie w planowanych do roku 2010 wdrożeniach, z których praktyczne wszystkie dotyczą reaktorów tej konstrukcji (Stiegel i in. 2006). Rozpatrując wyłącznie technologie zgazowania węgla w reaktorach dyspersyjnych (technologie o największym potencjale rozwojowym) największy udział w produkcji gazu ma technologia GE Energy/ Texaco (58%) a następnie ConocoPhillips E-Gas (15%), Elcogas S.A. Prenflo (15%) oraz Shell (12%). Wśród przewidzianych do uruchomienia instalacji dominujący udział (69%) posiada technologia Shell. Pozostałe 31% to GE Energy/ Texaco (14%), ConocoPhillips E-Gas (9%) oraz Siemens Fuel Gasification Technology GmbH GSP (7%).

Zestawienie potencjału produkcyjnego reaktorów zawieszinowych z uwzględnieniem jednostek planowanych do wdrożenia do roku 2010 przedstawiono w tabeli 1. Prezentowane dane zestawiono w trzech kategoriach: sumaryczna produkcja gazu, sumaryczna produkcja gazu z węgla oraz produkcja gazu z węgla dla potrzeb przemysłu chemicznego.

TABELA 1

Potencjał produkcyjny reaktorów zgazowania – jednostki eksploatowane i planowane do uruchomienia do roku 2010 (Gasification... 2005)

TABLE 1

Production potential of gasification reactors – units operational and planned to be commissioned before 2010 (Gasification... 2005)

Technologia	Produkcja gazu ogółem			Produkcja gazu/węgiel			Produkcja gazu/węgiel/chemia		
	ilość instalacji	moc cieplna w prod. gazie [MWth]	udział [%]	ilość instalacji	moc cieplna w prod. gazie [MWth]	udział [%]	ilość instalacji	moc cieplna w prod. gazie [MWth]	udział [%]
GE/texaco	70	16 708,2	33,10	16	3 925,8	25,73	6	1 599,5	18,87
Shell	50	30 277,2	59,97	20	8 301,3	54,41	18	6 878,5	81,13
ConocoPhillipsE-Gas	7	1 655,4	3,28	5	1 655,4	10,85	-	-	-
Elcogas S.A. Prenflo	1	587,8	1,16	1	587,8	3,85	-	-	-
Sasol Lurgi	1	196,9	0,39	-	-	-	-	-	-
Siemens/GSP	2	951,4	1,88	1	787,4	5,16	-	-	-
Koppers-Totzek	1	106,4	0,21	-	-	-	-	-	-
Razem	132	50 483,3		43	15 257,7		24	8 478	

3. Energetyczne kierunki rozwoju w aspekcie konieczności usuwania CO₂

Zasadniczo termin „czyste technologie węglowe” powstał w USA, a obecnie został przyjęty przez Unię Europejską. Dotyczy on współcześnie rozwijanych technologii energetycznych, w tym w szczególności posiadających węzeł usuwania CO₂ i z tego powodu określane są one również terminem „technologie zero-emisyjne”. Udział węgla w całkowitej emisji CO₂ wynosi około 40% i dlatego dąży się do znacznego obniżenia tego wskaźnika, o co najmniej 80–90%. Oczywiście jest, że osiągnięcie niższych emisji przy obecnym stanie techniki może zostać uzyskane poprzez aplikację nowych rozwiązań, które niestety spowodują zwiększenie kosztów wytwarzania energii. Energetyczne wykorzystanie węgla można obecnie rozdzielić na dwa główne kierunki, które rozwijają się niezależnie. Są to:

1) zaawansowane spalanie, wykorzystywane głównie w energetyce zawodowej jako technologie pyłowe i fluidalne realizowane pod ciśnieniem atmosferycznym względnie wyższym, a w przyszłości spalanie w tlenie.

2) zgazowanie, w szczególności zintegrowane układy gazowo-parowe (Integrated Gasification Combined Cycle-IGCC) dające możliwości ukierunkowania na produkcję energii elektrycznej i chemicznej skumulowanej w czystych substancjach chemicznych (np. metanol, wodór, paliwa silnikowe).

Pierwszy kierunek jest typowo energetyczny, natomiast drugi związany jest już ze zintegrowaniem energetyki z przetwórstwem chemicznym, co wydaje się być strategią rozwoju „czystych” technologii węglowych na pierwszą połowę XXI w. W dalszej przyszłości należy się spodziewać rozwoju różnego rodzaju układów hybrydowych, łączących elementy znanych technologii. Rozwój takich układów będzie uwarunkowany z jednej strony, koniecznością wdrożenia tanich metod wydzielania i deponowania CO₂, z drugiej zaś poziomem rozwoju ogniw paliwowych, które dają perspektywę uzyskania znaczenie wyższych niż obecnie sprawności wytwarzania energii elektrycznej. „Czyste” technologie wykorzystania węgla dają możliwość łagodzenia wpływu stosowania węgla na środowisko we wszystkich stadiach cyklu jego przetwarzania poczynając od zakładu mechanicznego wzbogacania. Analiza ciągniona kosztów środowiskowych jak i końcowej sprawności wykorzystania energii pierwotnej jest ważnym zagadnieniem odnoszącym się do analizy cyklu życia pozyskanego paliwa i winna być ona wykonywana w przypadku budowania szczegółowych strategii inwestycyjnych.

Punktem wyjścia dla oceny technologii „zero emisyjnych” jest aktualny stan rozwoju technologii czystego spalania węgla, do którego można zaliczyć obecnie spalanie węgla w kotłach pyłowych wytwarzających parę o parametrach podkrytycznych. Dalszy rozwój tego kierunku związany będzie z podnoszeniem zarówno temperatury jak i ciśnienia pary, co wymaga jeszcze lepszych materiałów i konstrukcji. Ocenia się, że sprawność wytworzenia energii elektrycznej może dochodzić do 50% w zaawansowanych technicznie rozwiązaniach.

Biorąc z kolei pod uwagę integrację zgazowania z wytwarzaniem energii elektrycznej i produktów chemicznych uzyskujemy możliwość podniesienia ogólnej sprawności wykorzystania energii pierwotnej przy równoczesnym usunięciu wszystkich niebezpiecznych dla środowiska zanieczyszczeń w trakcie procesu, co odróżnia ten układ od klasycznych technologii spalania, gdzie zabiegi oczyszczania prowadzone są dopiero na wytworzonych spalinach.

Kluczowym problemem rozwoju „czystych” technologii węglowych jest wzrost kosztów wytwarzania energii, co powoduje znaczne obniżenie sprawności. Jednocześnie te dwa czynniki są podstawową siłą wymuszającą postęp techniczny, możliwy do osiągnięcia jedynie w wyniku realizacji potężnych programów badawczo-rozwojowych. W celu przedstawienia skali problemu poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki analiz techniczno-ekonomicznych różnych układów energetycznych oraz porównano je z wybranymi układami poligeneracyjnymi.

3.1. Spalanie węgla w kotłach pyłowych

Analizie porównawczej poddano trzy różne układy spalania węgla w kotłach pyłowych przy parametrach podkrytycznych pary. Pierwszy z nich jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną technologią spalania z uwzględnieniem odsiarczania spalin i palnikami o niskiej emisji tlenków azotu. Jest to wariant odniesienia o mocy elektrycznej 400 MW_{el}. W drugim przypadku wprowadzony jest moduł usuwania CO₂ metodą aminową, natomiast w przypadku trzecim zamiast powietrza do spalania podawany jest tlen, recykulowane są spaliny i usuwany CO₂. Usunięty CO₂ sprężany jest do ciśnienia 10 MPa w celu dalszego składowania. W ostatnich dwóch przypadkach wydajność cieplna kotła była taka sama jak w wariancie pierwszym oraz wytworzono taką samą ilość pary. Zasadniczym powodem znacznego obniżenia sprawności całkowitej układu jest przede wszystkim konieczność upustu części niskociśnieniowej pary dla potrzeb regeneracji cieczy absorbującej i uwolnienia skoncentrowanego strumienia CO₂. Dodatkowo potrzebna jest energia elektryczna na zasilanie pomp, sprężarki CO₂ i zwiększenie mocy wentylatora spalin. W wariancie trzecim zastosowano tlen wydzielony z powietrza metodą kriogeniczną (95% tlenu). W tym układzie część spalin jest zawracana, a reszta w postaci skoncentrowanego strumienia CO₂ zawierającego domieszki pary wodnej i azotu poddana sprężaniu i wyprowadzona z układu. Układ taki wydaje się korzystniejszy od poprzedniego z uwagi na możliwość osiągnięcia wyższej sprawności całkowitej.

TABELA 2

Porównawcze zestawienie układów spalania węgla

TABLE 2

Comparison of different options for coal combustion including carbon dioxide capture

Charakterystyka układu	SPALANIE WĘGLA W KOTŁACH PYŁOWYCH		
	Spalanie węgla + turbina parowa	Spalanie węgla + turbina parowa+ usuwanie CO ₂	Tlenowe spalanie węgla + turbina parowa+ usuwanie CO ₂
Moc netto [MWe]	396,8	283	298,4
Sprawność netto [%]	38,86	27,72	30,5
Koszty inwestycyjne [\$/kWe]	1268	2373	2259
Koszt en. elektr. [\$/MWh]	42,3	76,6	68,8
Emisja NOx [kg/MWh]	2,04	2,87	0,102
Emisja SOx [kg/MWh]	1,56	2,08	1,49
Produkcja CO ₂ [kg/MWh]			
– emisja do atmosfery	918	64	
– usunięta		1224	1166
Koncentracja CO ₂ [% mol.]	13,6	99,7	86,6

3.2. Zintegrowane zgazowanie z cyklem parowo-gazowym

Dla porównawczych obliczeń różnych układów zgazowania przyjęto następujące założenia: zgazowaniu poddawany jest węgiel o wartości opałowej 22 MJ/kg, zastosowano oczyszczanie gazu procesowego na zimno (po ochłodzeniu) jak i na gorąco, wydzielony CO₂ sprężany jest do stanu ciekłego. Skala układu jest podobna do analizowanej wcześniej. Uzyskane rezultaty wskazują, że zintegrowane zgazowanie z cyklem parowo-gazowym pozwala uzyskać wyższe sprawności wytwarzania energii elektrycznej niż w przypadku spalania węgla w kotłach pyłowych, chociaż już obecnie technologie spalania pyłowego przy warunkach nadkrytycznych pary pozwalają zbliżyć się do tych wartości. Istotna różnica natomiast występuje w przypadku usuwania CO₂. Zgazowanie oferuje znacznie korzystniejsze termodynamiczne warunki procesowe wynikające z faktu wydzielania CO₂ z mniejszych strumieni gazu przy tych samych mocach energetycznych.

TABELA 3

Porównawcze zestawienie układów zgazowania węgla

TABLE 3

Comparison of different options for coal gasification

Charakterystyka układu	ZINTEGROWANY UKŁAD PAROWO GAZOWY ZE ZGAZOWANIEM WĘGLA		
	Zgazowanie węgla + „zimne” oczyszczanie gazu	Zgazowanie węgla + „gorące” oczyszczanie gazu	Zgazowanie węgla + „zimne” oczyszczanie gazu + usuwanie CO ₂
Moc netto [MWe]	400,6	400,4	358,6
Sprawność netto [%]	46,7	49,4	40,1
Koszty inwestycyjne [\$/kWe]	1374	1354	1897
Koszt en. elektr. [\$/MWh]	40,9	39,1	54,4
Emisja NOx [kg/MWh]	0,165	0,165	1,185
Emisja SOx [kg/MWh]	0,342	0,04	0,113
Produkcja CO ₂ [kg/MWh]			
– emisja do atmosfery	1517	1431	231
– usunięta			1536

3.3. Zintegrowane zgazowanie z wytwarzaniem energii elektrycznej i produktów chemicznych

Kojarzenie procesów chemicznych i energetycznych możliwe jest aktualnie w oparciu o technologie dojrzałe komercyjnie i realizowane w dużej skali przemysłowej. Wytwarzanie gazu dla zintegrowanych systemów gazowo-parowych w energetyce oraz dla syntez prowadzone jest w oparciu o identyczne procesy. Wytworzony gaz może być następnie wykorzystany wyłącznie dla wytwarzania energii elektrycznej oraz wyłącznie do syntezy. Istnieje również korzystna możliwość równoległej realizacji obu procesów w układzie poligeneracyjnym.

Uznano za interesujące dokonać porównania ekonomiczno-technicznych wskaźników różnych układów generacji energii elektrycznej i syntezy chemicznej, a mianowicie:

- zintegrowanego układu generacji elektryczności opartego na zgazowaniu węgla (IGCC),
- zintegrowanego układu generacji elektryczności opartego na zgazowaniu węgla skojarzonego szeregowo z reaktorem syntezy metanolu i spalaniem nieprzereagowanego gazu w turbinie gazowej.

Analizę porównawczą przeprowadzono dla układów o jednakowej mocy 1000 MW_{ch} określonej ilością energii chemicznej zużywanego węgla, co odpowiada około 400MW_{el} i jest porównywalne z poprzednimi wyliczeniami. Oszacowano bilanse materiałowe i energetyczne analizowanych układów, a obliczone wartości zestawiono w tabeli 4.

Z analizy danych wynika, że skojarzenie produkcji energii elektrycznej z syntezą metanolu prowadzi do istotnej poprawy sprawności przetwarzania energii oraz ogranicza emisję CO₂. Jest to oczywiście związane z większą sprawnością energetyczną syntezy chemicznej oraz wyprowadzeniem części zużytego węgla pierwiastkowego z produktem syntezy. Oszacowanie kosztów inwestycyjnych analizowanych układów wskazuje, że koszt skojarzenia praktycznie nie podwyższa kosztów budowy instalacji zintegrowanego układu

TABELA 4

Wartości bilansowe analizowanych układów generacji energii elektrycznej i syntezy chemicznej

TABLE 4

Comparison of coal gasification for power generation and poligeneration

Wielkość bilansowa	Jedn.	Układ generacji	
		IGCC	Poligeneracja
Zużycie węgla:			
– wilgotny	tys. t/rok	1 130	1 130
– suchy	tys. t/rok	1 085,6	1 085,6
– energia w paliwie	MW _{ch}	1 000	1 000
Zużycie tlenu (94,5%)	tys. t/rok	977,4	977,4
Produkcja siarki	t/rok	10 500	10 500
Ilość gazu syntezowego	t/godz.	125,6	125,6
Produkcja metanolu	tys. t/rok	-	330
Produkcja energii elektrycznej:			
– turbina gazowa	M _{we}	258,6	160,8
– zespół parowy	M _{we}	185,6	115,4
– razem	MW _e	444,2	276,2
Zużycie energii własne	MW _e	47,2	48,6
Produkcja energii elektrycznej netto	MW _e	397,0	227,6
Emisja CO ₂	tys. t/rok	2 648	2 190
Koszty inwestycyjne	\$/kW _{ch}	552	558

generacji energii elektrycznej opartej na zgazowaniu węgla. Wysokie ceny metanolu powodują, że całkowita wartość sprzedaży produkcji wzrasta o 23%, a jednocześnie okres zwrotu nakładów inwestycyjnych ulega skróceniu o 18%.

Charakterystyczny dla inwestycji energetycznych wskaźnik nakładów inwestycyjnych liczony w $\$/kW_e$ nie może zostać bezpośrednio użyty ze względu na fakt akumulacji energii w metanolu jako energii chemicznej, dlatego zastosowano porównawczy wskaźnik odniesiony do jednostki mocy dostarczonej w energii chemicznej węgla.

Wodór może być pozyskany na także drodze zgazowania węgla, oczyszczenia uzyskanego gazu procesowego, konwersji parą wodną zawartego w gazie CO oraz usunięciu z tego gazu składników kwaśnych (CO_2 i H_2S). Uzyskanie wysokiej zawartości wodoru w produkcie końcowym oraz wysokiej jego czystości jest osiągalne na drodze zastosowania procesu PSA jako ostatniej operacji technologicznej. Technologia wytwarzania wodoru może być realizowana na drodze dostępnych aktualnie i komercyjnie stosowanych procesów przemysłowych. Wyniki uproszczonej analizy opłacalności technologii wytwarzania wodoru z węgla, a właściwie z pary wodnej rozkładanej przy pomocy węgla przedstawiona jest w tabeli 5.

TABELA 5

Podstawowe dane dla technologii wytwarzania wodoru z węgla

TABLE 5

Basic data for hydrogen production from coal

Lp.	Strumień technologiczny	Jednostka	Układ bez separacji CO_2	Układ z separacją CO_2
1.	Węgiel w stanie naturalnym (22 MJ/kg)	t/godz.	137,78	137,78
		t/rok	965 556	965 556
		$MW_t (W_d)$	842	842
2.	Wodór (99,5%)	t/godz.	13,025	13,242
		$nm^3/godz.$	144 932	147 346
		t/rok	91 280	92 800
		$mln\ nm^3/rok$	1 015,7	1 032,6
3.	Kwas siarkowy (98%)	$MW_t (W_d)$	432,8	440,0
		t/godz.	3,20	3,20
4.	Wydzielony CO_2 (99%)	t/rok	22 400	22 400
		t/godz.	-	259,7
5.	Energia elektryczna (netto)	t/rok	-	1 820 000
		MW_e	38	12
6.	Sprawność chemiczna wykorzystania paliwa na produkcję wodoru	%	51,4	52,3

Inwestycja wytwarzania wodoru i elektryczności jest efektywna ekonomicznie zarówno w przypadku posiadania odpowiednich uprawnień do emisji dwutlenku węgla jak i w przypadku, kiedy należy nabyć te uprawnienia zakupując prawo emisji CO₂ po cenie 20\$/t. W tym ostatnim przypadku cena wytworzenia wodoru wynosiłaby około 4,2 zł/kg, co jest ceną konkurencyjną do kosztów pozyskania wodoru z gazu ziemnego.

3.4. Problemy badawczo-rozwojowe zgazowania

Spośród metod termochemicznej konwersji węgla decydujące znaczenie w perspektywie średnio i długoterminowej posiadają technologie zgazowania. Wynika to głównie z konieczności stałego wzrostu sprawności produkcji energii, obniżania uciążliwości ekologicznej procesów energetycznych, w tym radykalnego obniżenia emisji CO₂ oraz powrotu do szerokiego wykorzystania węgla, jako surowca dla przetwórstwa chemicznego. Głównymi kierunkami zastosowania zgazowania będą układy produkujące czystą energię oraz produkty chemiczne głównie paliwa płynne, metanol i wodór.

Najbardziej intensywnie rozwijanymi technologiami zgazowania węgla są procesy wykorzystujące reaktory zawieszinowe, a ich rozwój związany jest głównie z podniesieniem sprawności energetycznej procesu, elastyczności ze względu na stosowane paliwo oraz niezawodność działania.

Biorąc pod uwagę skalę czasu i aktualny stan rozwoju można wskazać na następujące etapy wdrażania nowych technologii:

- w perspektywie krótkoterminowej:
 - spalanie w kotłach pyłowych przy parametrach nadkrytycznych i ultra- nadkrytycznych,
 - spalanie w kotłach fluidalnych cyrkulacyjnych przy parametrach podkrytycznych lub nadkrytycznych z ograniczeniem lokalizacyjnym związanym z bliską dostępnością węgla o większej zawartości popiołu (pow. 25%),
 - zgazowanie węgla w zintegrowanych układach parowo-gazowych połączonych z wytwarzaniem metanolu lub wodoru. Obydwa są nośnikami energii chemicznej i mogą być m.in. paliwem dla ogniw paliwowych;
- w perspektywie średnio- i długoterminowej:
 - zgazowanie węgla w celu produkcji wodoru dla przemysłu chemicznego,
 - zgazowanie węgla dla zasilania gazem kombinowanego układu parowo-gazowego z możliwością wydzielania dwutlenku węgla i jego sekwestracją,
 - spalanie węgla bezpośrednio w tlenie w kotłach pyłowych nowej konstrukcji i usuwanie dwutlenku węgla.

Wymienione kierunki dają potencjalnie istotny impuls dla prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w zakresie: optymalizacji procesowej stosowanych rozwiązań, optymalizacji struktur technologicznych, modelowania procesowego i modelowania na poziomie atomowym jeżeli chodzi o reakcje syntezy, nowych metod czyszczenia gazu procesowego i rozdziału różnych gazów (wodór, tlen, dwutlenek węgla), zastosowania nowych mate-

riałów, opracowania nowych technologii katalitycznego zgazowania w warunkach niskich temperatur, opracowania bardziej selektywnych i efektywnych katalizatorów dla syntez chemicznych. Istotnymi stają się również zagadnienia wiążące rozwój jądrowych reaktorów wysokotemperaturowych z procesami konwersji węgla. Wyniki takich prac przysłużyć się mogą niewątpliwie do rozwoju technologicznego i stworzyć pomost dla szerokiego stosowania paliw wodorowych prognozowanych na II połowę XXI w.

LITERATURA

- A Current Perspective on the Gasification Industry — Robust Growth Forecast, Department of Energy USA, National Energy Technology Laboratory (www.netl.doe.gov/coal/gasification/index.html).
- Coca M.T., Elcogas – Integrated gasification combined cycle technology: IGCC. Its actual application in Spain: ELCOGAS. Puertollano, Elcogas S.A., Club Español de la Energía.
- Collot A.G., 2006 – Matching gasification technologies to coal properties. *International Journal of Coal Geology* 65, s. 191–212.
- Communication from the Commission to the Council, The European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European Commission, 2006.
- Gasification Database (7/2005) DOE, NETL
(www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/database/GASIF2004.xls).
- International Energy Outlook, Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, 2006.
- Minchener A.J., 2005 – Coal gasification for advanced power generation. *Fuel* 84, s. 2222–2235.
- Parekh R.D., 1982 – Handbook of gasifiers and gas treatment systems. Prepared for the United States Department of Energy (Contract No. DE-AC01-78ET10159).
- Ratafia-Brown J., Manfredo L., Hoffmann J., Ramezan M., SAIC, 2002 – Major environmental aspects of Gasification-based power generation Technologies. Final Report. Project Prepared for Gasification Technologies Program, National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Stiegel G.J., Der V., Clayton S., 2006 – Gasification Technologies Project Portfolio, U.S. Dept. of Energy, National Energy Technology Laboratory.
- World Energy Technology Outlook — WETO H₂, European Commission, Directorate-General for Research, 2006.

NEW CHANCE FOR COAL TECHNOLOGIES**Key words**

Coal, technology, gasification

Abstract

It is expected that in the second half of XXI century a substantial change will take place in the world structure of primary fuels used. Resources of petroleum will be depleted, and the access to the natural gas will be considerably limited. Therefore return to the wide use of coal for energy production will be unavoidable and moreover coal is going to take back his position in chemical industry. Main challenge related to the development of „clean” coal- technologies arise from the necessity to reduce drastically the emission of carbon dioxide in power production and to substitute crude oil products. As a result of the forced technological progress a modern gasification processes are in use, which attract chemical industry particularly due to possibility to develop competitive technologies for hydrogen, methanol or liquid fuels production. Those undertakings have still an innovative character and from that reason they need extensive involvement of R&D component to become mature technologies.