

Marek ŚCIAŻKO*, Alfred TRAMER*

Zintegrowana karbo-energo-chemia

STRESZCZENIE. Podstawą zaawansowanych technologii wykorzystania węgla jest jego zgazowanie, które obecnie stosowane jest dość powszechnie w chemii oraz ciągle demonstracyjnie w energetyce. Rozważając kierunki rozwoju systemów wytwarzających „czystą” energię obydwie kierunki są często integrowane i rozważa się koncepcję tzw. „energopleksów” wiążących wytwarzanie energii elektrycznej oraz produktów chemicznych z węgla, głównie paliw płynnych silnikowych, metanolu lub wodoru. W pracy scharakteryzowano i przeanalizowano pod względem zmian efektywności energetycznej i ekonomicznej dwa główne kierunki czystych technologii węglowych, które rozwijają się niezależnie. Są to: zaawansowane spalanie, wykorzystywane głównie w energetyce zawodowej jako technologie pyłowe i fluidalne realizowane pod ciśnieniem atmosferycznym względnie wyższym; oraz 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 (metanol, paliwa silnikowe, wodór).

SŁOWA KLUCZOWE: wytwarzanie energii elektrycznej, czyste technologie węglowe, zgazowanie węgla, zintegrowane systemy energetyczne

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

* Dr inż. — Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze; e-mail: office@ichpw.zabrze.pl

Recenzent: dr inż. Urszula LORENZ

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 niektórych krajów azjatyckich takich jak Chiny i Indie [1]. Nieunikniony będzie w związku z tym powrót do szerokiego wykorzystania najbardziej zasobnego na świecie surowca energetycznego, jakim jest węgiel. Przy aktualnym zapotrzebowaniu światowym na surowce energetyczne wielkość zasobów węgla ocenia się na 200–300 lat. Dodatkową zaletą tego surowca jest jego w miarę równomierne występowanie w świecie. Rysuje się w związku z tym konieczność przystąpienia już dzisiaj do wypracowania nowych, bardziej racjonalnych i wydajnych technologii wykorzystania węgla jako surowca energetycznego i chemicznego. Główne wyzwanie związane jest z koniecznością radykalnego zmniejszenia negatywnego oddziaływania na środowisko przyrodnicze procesów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Dotychczas opracowano wiele efektywnych metod usuwania substancji zanieczyszczających środowisko, do których należą głównie związki siarki i azotu (SO_2 i NO_x) oraz pyły. Jednak, mimo poważnych udoskonaleń technologicznych dokonanych w okresie ostatniej dekady, nadal wywierana jest presja na redukcję emisji, przy czym zwraca się uwagę na coraz to inne zanieczyszczenia występujące w mikro- czy nanokoncentracjach (np. metale ciężkie, rtęć, dioksyny) [2, 3].

W przyszłości nastąpi zwiększony nacisk na redukcję emisji dwutlenku węgla (CO_2) związanego z efektem „cieplarnianym”. Prace takie prowadzone są już od wielu lat głównie w USA (program „Clean Coal”) i Japonii [4], a ostatnio efekt stosowania paliw węglowych staje się również przedmiotem zainteresowania Komisji Europejskiej. Z jednej strony uznaje się, że węgiel będzie pełnił rolę istotnego surowca dla zabezpieczenia bezpieczeństwa energetycznego krajów Unii Europejskiej, ale jednocześnie wpływa negatywnie na stan środowiska. Z tego powodu rozważane są zarówno mechanizmy prawne (np. regulacja poziomu emisji CO_2) jak i inicjowane są programy badawczo-wdrożeniowe „czystych” technologii węglowych zabezpieczających przed zwiększeniem emisji do otoczenia.

Tworzenie i implementacja zaawansowanych technologii karbo-energetycznych i karbo-chemicznych, a zwłaszcza rozwijanie wydajnych, niskoemisyjnych i „czystych” technologii wykorzystania węgla, ukierunkowanych na efektywne i maksymalne wykorzystanie energii chemicznej tego paliwa jest procesem wieloletnim i wymaga integracji zadań przemysłu związanego z górnictwem, energetyką jak i chemią. W tym nowym podejściu zmierzającym do stworzenia w perspektywie 50 lat gospodarki „wodorowej” wytwarzanie energii elektrycznej w dużych źródłach winno także dawać możliwość zaopatrzenia odbiorców rozproszonych w paliwa zawierające zakumulowaną „czystą” energię chemiczną dla zastosowań lokalnych. W takim przypadku możliwe będzie wytwarzanie energii elektrycznej z dużą sprawnością w ogniach paliwowych oraz można uniknąć strat związanych z liniami przesyłowymi.

Podstawą zaawansowanych technologii wykorzystania węgla jest jego zgazowanie, które obecnie stosowane jest dość powszechnie w chemii oraz ciągle demonstracyjnie w energetyce. Rozważając kierunki rozwoju systemów wytwarzających „czystą” energię obydwa kierunki są często integrowane i mówi się o tzw. „energopleksach” wiążących wytwarzanie energii elektrycznej oraz produktów chemicznych z węglem, głównie paliw płynnych silni-

kowych, metanolu lub wodoru [4,5]. Można, zatem przyjąć, że kreatorem rozwoju energetycznego wykorzystania węgla jest dążność do maksymalizacji ogólnej sprawności przetwarzania energii pierwotnej. Zainicjowanie odpowiednich programów rozwojowych jest kluczowe dla przyszłościowej roli węgla, w szczególności wymaga to silnego wsparcia ośrodków decyzyjnych definiujących odpowiednie priorytety, zgodnego współdziałania naukowych instytucji branżowych i zaplecza naukowo-badawczego uczelni działających w ramach jasno zarysowanego wieloletniego programu rozwoju, wspieranego bezpośrednio przez wiodące krajowe organizacje gospodarcze, koncerny przemysłowe oraz ośrodki władzy regionalnej.

Kierunki rozwoju czystych technologii węglowych

Środowiskowe wyzwania połączone z troską o przyszłe zabezpieczenie dostaw energii, ożywiło wznowione zainteresowanie rozwojem programów dla technologii „czystego” węgla. W państwach specjalizujących się w produkcji węgla oraz w tych, które głównie wykorzystują węgiel czynione są starania w celu rozważenia możliwości wprowadzenia technologii „czystego” spalania węgla jako technologii pomostowych, prowadzących do układów opartych na technologiach „zero emisyjnych” lub „prawie zero emisyjnych”, które oparte będą zasadniczo na zaawansowanych technologicznie procesach zgazowania.

W celu zidentyfikowania najodpowiedniejszych strategii rozwoju technologicznego i stworzenia uzasadnienia dla podjęcia odpowiednio ukierunkowanych prac badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych niezbędne jest przeprowadzenie porównawczej oceny potencjalnych technologii „czystego” węgla. Porównanie takie i ewentualna ocena musi być związana z oczekiwanymi emisyjnymi, kosztami inwestycyjnymi i kosztami wytworzenia jednostki energii użytecznej.

W obrębie sektora wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o gaz ziemny określono standardy środowiskowe, do których pozostałe technologie winny nawiązywać, w tym również oparte na węglu. Obecne wymagane poziomy emisji pyłów i gazów szkodliwych do atmosfery narzucają energetyce bardzo wysokie standardy. Należy jednak oczekiwać, że staną się one jeszcze bardziej zastrzone w przyszłości, co przedstawiono w tabeli 1 [4].

W przypadku SO_2 , emisja z systemów opalanych gazem ziemnym jest generalnie nieznaczna, stąd poziom uzyskiwany z odpowiedników opalanych węglem będzie wymagać skutecznej jego redukcji. W związku z tym instalacje spalające pył węglowy jak i zintegrowane układy pracujące w skojarzeniu ze zgazowywaniem będą musiały zostać skonfigurowane dla bardzo niskich emisji SO_2 . Z podobną sytuacją mamy do czynienia w przypadku emisji NO_x . Obecnie, zastosowanie selektywnej redukcji katalitycznej w elektrowniach opalanych węglem prowadzi do osiągnięcia poziomu NO_x podobnego do elektrowni opalanych gazem, a systemy oparte na technologii wykorzystującej zintegrowany cykl parowo-gazowy pracujący w skojarzeniu ze zgazowywaniem rzucają nawet lepsze wyniki.

TABELA 1. Oczekiwane stężenia pyłów i gazów szkodliwych w procesach konwersji węgla i wytwarzania energii elektrycznej i ciepła

TABLE 1. Expected concentration of particulates and harmful gases in coal conversion processes

Rodzaj technologii	Emisja SO ₂ [% usunięcia]	Emisja No _x [mg/m ³]	Zanieczyszczenia pyłowe [mg/m ³]
Spalanie pyłu węglowego z odsiarczaniem spalin	90–98	100–200	10–50
Spalanie w cyrkulacyjnym złożu fluidalnym	90–98	200–400	<50
Cykl skojarzony ze zintegrowanym zgazowaniem	98–100	<125	<1
Spalanie pyłu węglowego — cel dla technologii „zero emisyjnej”	95–98	<125	<10
Zintegrowany cykl pracujący w skojarzeniu ze zgazowaniem — cel dla technologii „zero emisyjnej”	99	<25	<1
Cykl skojarzony z układem parowo-gazowym na gaz ziemny	0	30–300	0

Udział węgla w całkowitej emisji CO₂ wynosi 38%, natomiast 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 wzrost kosztów wytwarzania energii. Jednym z bardzo istotnych celów jest osiągnięcie minimalnego poziomu emisji CO₂ przy praktycznie niezmiennych kosztach wytwarzania energii, co jest niebywałym wyzwaniem badawczo-rozwojowym.

W ogólności energetyczne wykorzystanie węgla można obecnie rozdzielić na dwa główne kierunki, które rozwijają się niezależnie. Są to:

- ✧ zaawansowane spalanie, wykorzystywane głównie w energetyce zawodowej jako technologie pyłowe i fluidalne realizowane pod ciśnieniem atmosferycznym względnie wyższym,
- ✧ 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, a z drugiej poziomem rozwoju ogniw paliwowych, które dają perspektywę uzyskania znaczenie wyższych niż obecnie sprawności wytwarzania energii elektrycznej. „Czyste” technologie wy-

korzystania 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 [6].

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 na podkrytyczne parametry pary. 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. Podstawą rozwoju tego typu zintegrowanych układów karbo-energo-chemicznych jest wytwarzanie gazu syntezowego z gazu procesowego otrzymanego w wyniku zgazowania. Gaz syntezowy może być z kolei półproduktem dla:

- ✧ silnikowych paliw płynnych oraz surowców dla przemysłu chemicznego w oparciu o syntezę Fischer-Tropsch’a,
- ✧ metanolu oraz czystego wodoru do syntezy chemicznej oraz perspektywnie dla ogniwi paliwowych.

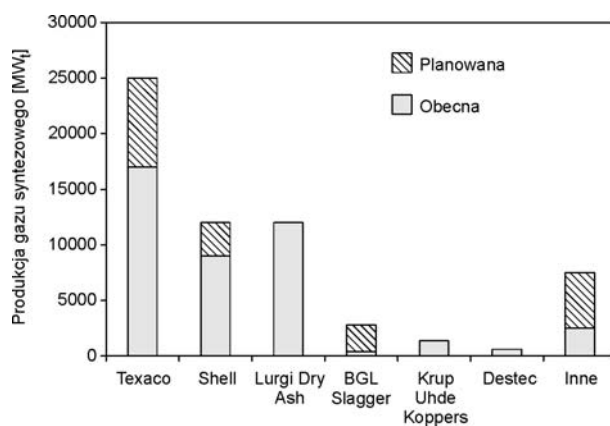
Uzasadnienie dla rozwoju karbo-energo-chemii

W ostatnich latach w światowej technice obserwuje się duże zainteresowanie wdrażaniem technologii zgazowania paliw stałych. W okresie dwudziestolecia 1980–2000 zanotowano dwukrotny przyrost światowej produkcji gazu pozyskiwanego na tej drodze (z około 20 GW do około 40 GW energii chemicznej w gazie). Kolejny dwukrotny przyrost ilości produkowanego gazu ze zgazowania paliw ma nastąpić przed 2010 r. Aktualny rozwój technologii zgazowania związany jest z koniecznością podniesienia efektywności energetycznej wykorzystania paliw oraz z wymogami ekologicznymi stawianymi przed producentami energii. W chwili obecnej działa 128 zakładów zgazowania, które wykorzystują 366 gazogeneratorów różnej konstrukcji (rys. 1) [7].

Najczęściej stosowane są gazogeneratory ze złożem stałym (LURGI) oraz nowsze konstrukcje ze złożem zdyspergowanym (TEXACO, SHELL, Destec). Większość instalacji powstała po 1970 r. i znajduje się w Zachodniej Europie, Ameryce Północnej, Azji i Afryce. Całkowita moc termiczna eksploatowanych reaktorów wynosi 42 000 MW_t i produkują one

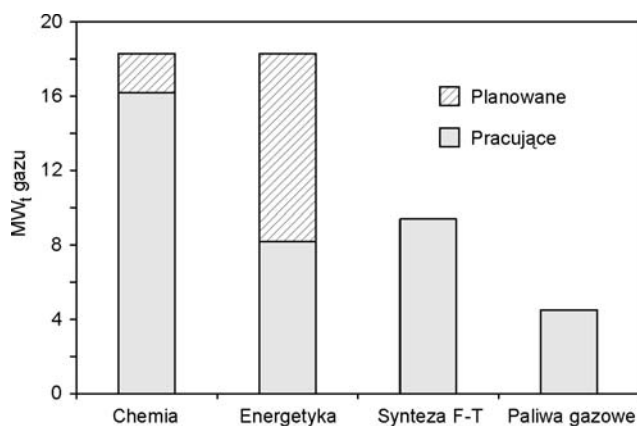
głównie gaz syntezowy z odpadów przemysłu petrochemicznego. Węgiel stosowany jest w największych jednostkach, połączonych z wytwarzaniem energii elektrycznej, których średnia moc wynosi około 500 MW_t. Głównymi kierunkami wykorzystania technologii zgazowania są: chemia i energetyka (rys. 2).

Zaletą technologii zgazowania jest możliwość przerobu różnych surowców stałych i ciekłych, w tym także odpadowych, dla wytworzenia gazu syntezowego. W zaawansowanych technologiach procesy zgazowania prowadzone są pod wysokim ciśnieniem 2–5 MPa i w temperaturach około 1250°C, umożliwiając dokładne oczyszczenie gazu ze związków siarki i azotu oraz wytwarzanie nieaktywnego chemicznie żużla nadającego się bezpośrednio do zagospodarowania przemysłowego. Zasadniczym celem obecnych prac badawczo-rozwojowych jest zmniejszenie kosztów inwestycyjnych instalacji zgazowania, zwiększenie skali i sprawności energetycznej oraz skuteczności odpylania gorących gazów poreakcyjnych.



Rys. 1. Zastosowanie różnych typów gazogeneratorów

Fig. 1. Application of different types of gasifiers

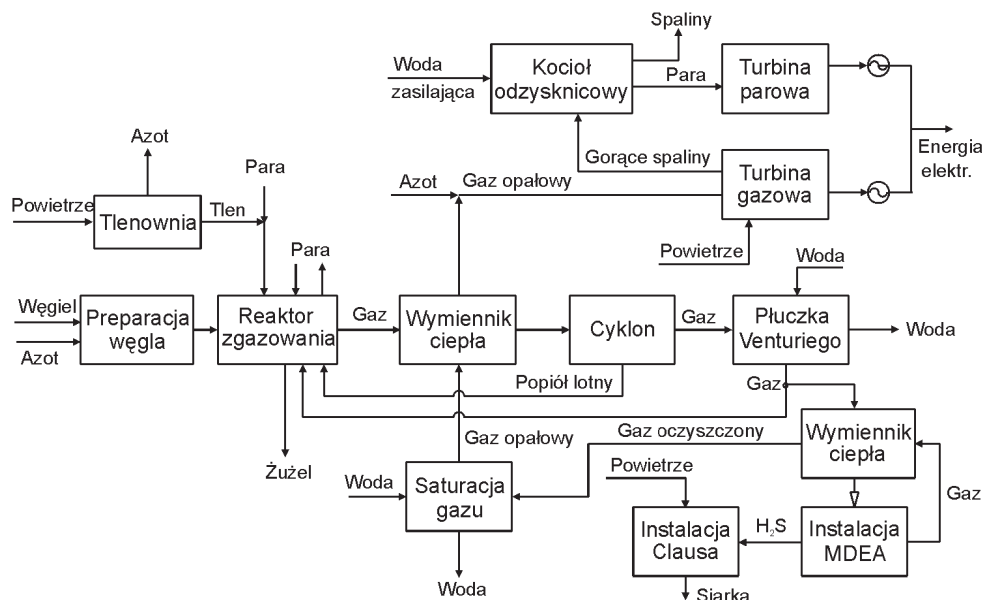


Rys. 2. Główne kierunki zastosowania technologii zgazowania

Fig. 2. Main directions of gasification

Układy gazowo-parowe skojarzone ze zgazowaniem

Zainteresowanie zgazowaniem węgla, połączonym z produkcją energii elektrycznej, związane jest z rozwojem turbin gazowych umożliwiającymi efektywne wykorzystanie średniokalorycznego gazu wytwarzanego w generatorach parowo-tlenowych. Nowoczesne zintegrowane układy gazowo-parowe posiadają możliwość osiągnięcia wysokiej sprawności termodynamicznej przemiany węgla na energię elektryczną oraz charakteryzują się niską emisją zanieczyszczeń do otoczenia ($<10 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$, $<60 \text{ mg NO}_x/\text{m}^3$, $<3 \text{ mg pyłu}/\text{m}^3$) [8]. Najważniejszymi elementami układu są: generator gazu, instalacja schładzania i oczyszczania gazu, turbina gazowa oraz parowa z kotłem odzyskowym. Przykładowy schemat blokowy układu IGCC przedstawiono na rysunku 3. W procesie zgazowania stosowane są różne sortymenty węgla, pozostałości po rafinacji ropy oraz może być użyta biomasa. Sprawność energetyczna instalacji IGCC wynosi około 45% w przypadku zasilania jej węglem niskiej jakości, a przy zastosowaniu wysokiej jakości węgla i nowoczesnych turbin gazowych możliwe jest uzyskiwanie 50%. W latach 1994–1998 uruchomiono 5 demonstracyjnych bloków gazowo-parowych w następujących elektrowniach: DEMKOLEC (Buggenum, Holandia) — 252 MW_e, Wabash River (Indiana, USA) — 252 MW_e, Tampa Electric (Floryda, USA) — 250 MW_e, Puertollano (Hiszpania) — 300 MW_e, Pinon Pine (Nevada, USA) — 100 MW_e. Podstawową charakterystykę instalacji zgazowania węgla dla wybranych układów przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Schemat blokowy układu IGCC według technologii SHELL

Fig. 3. Block diagram of IGCC system acc. to SHELL technology

TABELA 2. Zestawienie porównawcze układów zgazowania węgla stosowanych w systemach IGCC

TABLE 2. Comparison of different coal gasification systems

Wyszczególnienie	Obiekt, kraj			
	Tampa Electric USA	DEMKOLEC Buggenum Holandia	ELCOGAS Puertollano Hiszpania	Sierra Pacific Pinon Pine USA
Generator gazu	TEXACO 1-stopniowy przepływowy	SHELL 1-stopniowy przepływowy	PRENFLO 1-stopniowy przepływowy	KRW fluidalny ciśnieniowy
Węgiel	Pittsburgh nr 8 30 000	Draylon, 26 000	Koks naftowy	Utah
Wart. opał. [kJ/kg]	7,90	12,2	23 100	26 000
Popiół [%]	4,75	9,5	4,1	10
Wilgoć [%]	2,45	1,2	20,9	10
Siarka [%]			3,2	0,45
Zużycie węgla [Mg/d]	2 200	2 000	2 600	880
Sposób doprowadzania węgla	zawiesina wodno-węglowa	suchy pył węglowy	suchy pył węglowy	suchy miał węglowy
Czynnik nośny	woda 40%	azot	azot	gorące powietrze
Czynnik zgazowujący	tlen 95%	tlen 95% + para wodna	tlen 85%	powietrze
Temperatura i ciśnienie zgazowania	maks. 1480°C, 3–4 MPa	maks. 1500°C, 2–3 MPa	maks. 1600°C, 2,5 MPa	980°C, 2 MPa

W realizowanych obecnie energetycznych układach gazowo-parowych, w których gaz ze zgazowania węgla wykorzystywany jest do zasilania turbin gazowych najpoważniejszym problemem jest odpowiednie oczyszczenie gazu przede wszystkim z pyłu, aerozoli węglowodorów (smoły), oraz związków siarki. Okazuje się, że wymagania dotyczące czystości gazu dla turbin gazowych są zbliżone do wymagań, jakie stawiane są dla gazu do syntezy chemicznej. Problem uzyskania odpowiedniej czystości gazu wytworzonego na drodze zgazowania węgla jest zatem tak samo istotnym zagadnieniem w realizacji procesów karbochemicznych jak również zaawansowanych technologii energetycznych.

W dotychczasowych rozwiązaniach przemysłowych dla obu kierunków wykorzystywania gazu stosowane jest nieco inne podejście. Gaz do syntezy chemicznej odpylany jest na ogół w elektrofiltrach, natomiast dla usunięcia pozostałych zanieczyszczeń stosowane jest mycie gazu zimnym metanolem (proces Rektisol), natomiast w zastosowaniach energetycznych do usuwania pyłu oraz aerozoli stosowane są często filtry ceramiczne, a celem

usunięcia związków siarki stosuje się mycie gazu metyloetyloaminami. Niezależnie od sposobu dalszego wykorzystywania gazu ze zgazowania węgla problem jego oczyszczania nadal pozostaje jednym z najbardziej istotnych zagadnień. Poszukuje się nadal nowych, skutecznych i tanich technologii, których zastosowanie poprawi efektywność techniczną i ekonomiczną procesu.

Dla syntezy chemicznej oczyszczony gaz poddawany jest reformowaniu w celu uzyskania w nim wymaganego dla syntezy metanolu lub paliw silnikowych stosunku H_2/CO . W syntezie Fischer-Tropsch'a uzyskuje się przede wszystkim produkty węglowodorowe o różnym składzie. Rodzaj i udział syntezowanych produktów zależy od sposobu realizacji procesu, stosowanych parametrów fizykochemicznych oraz stosunku H_2/CO w gazie syntezowym. W pracującym zakładzie (Sasol-RPA) wykorzystywane są dwa systemy syntezy: Arge oraz Kellogg. Przybliżony skład uzyskiwanych w obu systemach produktów przedstawiono w tabeli 3 [8, 9].

Wytworzone w procesie syntezy produkty są rozdzielane oraz uszlachetniane dla dalszego ich wykorzystania. Istotnym problemem syntezy Fischer-Tropsch'a jest mała selektywność wytwarzanych produktów. Poszukuje się nadal rozwiązań procesowych, w tym modyfikacji katalizatorów umożliwiających selektywne zwiększenie udziału pożądanych składników. Istotnym problemem aktualnej realizacji syntezy Fischer-Tropsch'a jest również wysoka energochłonność technologii. W rozwiązaniach przyszłościowych podwyższenie sprawności energetycznej przetwarzania będzie kluczowym zagadnieniem.

Drugim kierunkiem wykorzystania gazu syntezowego, aktualnie dynamicznie rozwijanym, jest synteza metanolu. Oprócz metody klasycznej istotnym zagadnieniem staje się rozwój reaktorów syntezy opartej jedynie o jednokrotne przejście gazu syntezowego przez reaktor. W ostatnich latach (1995–2002) produkcja metanolu w skali światowej wzrastała średniorocznie o ponad 3% przy jednocześnie przyroście blisko 5% zdolności produkcyjnych jego wytwarzania. Surowcem do syntezy metanolu jest głównie gaz syntezowy uzyskany z gazu ziemnego. Obserwuje się jednak ostatnio wykorzystywanie do tego celu innych surowców, szczególnie pozostałości po destylacji ropy naftowej (koks naftowy, asfalty), ale także coraz częściej węgla [10]. W przeciwieństwie do syntezy Fischer-Tropsch'a synteza metanolu prowadzona jest bardzo selektywnie. Produkt syntezy zawiera 96–98% metanolu, a jego końcowe oczyszczanie jest procesem mniej skomplikowanym.

TABELA 3. Główne produkty syntezy Fischer-Tropsch'a [%]

TABLE 3. Main products of Fischer-Tropsch synthesis [%]

System syntezy / produkty	Arge	Kellogg
Gaz płynny (C3–C4)	5–6	7–8
Benzyny (C5–C11)	33–3	72–74
Oleje	ok. 17	3–4
Gacz	29–30	—
Parafiny	ok. 4	12–13
Alkohole lekkie	—	ok. 1

Wzrost produkcji metanolu wiąże się z jego coraz szerszym wykorzystaniem jako surowca chemicznego, a także paliwa. W skali światowej produkuje się aktualnie około 30 milionów ton metanolu, który w około 35% przetwarza się do formaldehydu, 27% do eteru metylotertbutylowego, 10% do kwasu octowego i jego bezwodnika, a pozostała część do innych produktów takich jak metakrylan metylu, dwumetylotereftalanu, a także do wytwarzania klejów i rozpuszczalników. Interesującym kierunkiem wykorzystania metanolu jest jego przetwarzanie do eteru dwumetylowego, z którego z kolei na drodze oligomeryzacji uzyskuje się ciecz w zakresie wrzenia 150–250°C. W tej postaci eter ten jest doskonałym paliwem dieslowskim. Należy zwrócić uwagę, że przyszłościowo, w miarę rozwoju wykorzystywania ogniw paliwowych metanol może spełniać ważną rolę wyjątkowo bezpiecznego „chemicznego akumulatora wodoru”. Na drodze katalitycznego rozkładu połączonego z konwersją powstałego CO z 1 kg metanolu otrzymać można ponad 2 m³ czystego wodoru.

Analiza porównawcza czystych technologii węglowych

W poniższej analizie wzięto pod uwagę technologie ukierunkowane na wytwarzanie energii elektrycznej oraz porównano je z układami karbo-energo-chemicznymi. Wyniki przedstawione poniżej dla spalania węgla w kotłach pyłowych i zgazowania węgla w układach zintegrowanych z cyklem parowo gazowym zostały zaczerpnięte z raportu końcowego opracowanego przez NETL (USA) [11]. Natomiast przy zastosowaniu takiej samej metodologii przeprowadzono analizę układów karbo-energo-chemicznych, których podstawą jest zgazowanie zintegrowane z wytwarzaniem energii elektrycznej i produktów chemicznych, w szczególności metanolu.

Spalanie węgla w kotłach pyłowych

Poddano analizie porównawczej 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_e. W drugim przypadku wprowadzony jest moduł usuwania CO₂ metodą aminową, natomiast w przypadku trzecim zamiast powietrza do spalania podawany jest tlen, recyrkulowane 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 wariantcie 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 absorbentu i uwolnienia skoncentrowanego strumienia CO₂. Dodatkowo potrzebna jest energia elektryczna na zasilanie pomp, sprężarki CO₂ i zwiększenie mocy wentylatora spalin. W wariantcie trzecim zasto-

TABELA 4. Porównawcze zestawienie układów spalania węgla

TABLE 4. Comparison of coal combustion systems

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 [MW _e]	396,8	283	298,4
Sprawność netto [%]	38,86	27,72	30,5
Koszty inwestycyjne [USD/kWe]	1268	2373	2259
Koszt en. elektr. {USD/MW·h}	42,3	76,6	68,8
Emisja NO _x [kg/MW·h]	2,04	2,87	0,102
Emisja SO _x [kg/MW·h]	1,56	2,08	1,49
Produkcja CO ₂ [kg/MW·h]			
✧ emisja do atmosfery	918	64	
✧ usunięta		1 224	1 166
Koncentracja CO ₂ [% mol.]	13,6	99,7	86,6

sowano tlen wydzielony z powietrza metoda 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.

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.

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 (tab. 5). Chociaż już obecnie technologie spalania pyłowego przy warunkach nadkrytycznych pary pozwalają zbliżyć się do tych wartości [12]. Natomiast istotna różnica 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 elektrycznych.

TABELA 5. Porównawcze zestawienie układów zgazowania węgla

TABLE 5. Comparison of coal gasification systems

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 [MW _e]	400,6	400,4	358,6
Sprawność netto [%]	46,7	49,4	40,1
Koszty inwestycyjne [USD/kWe]	1374	1354	1897
Koszt en. elektr. [USD/MW·h]	40,9	39,1	54,4
Emisja NO _x [kg/MW·h]	0,165	0,165	1,185
Emisja SO _x [kg/MW·h]	0,342	0,04	0,113
Produkcja CO ₂ [kg/MW·h]			
◇ emisja do atmosfery	1 517	1 431	231
◇ usunięta			1 536

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 oraz wyłącznie do syntezy. Istnieje również korzystna możliwość równoległej realizacji obu procesów. Konfiguracja skojarzenia syntezy chemicznej oraz energetyki może być w części syntezy zróżnicowana wytwarzanym produktem (synteza Fischer-Tropsch'a, synteza metanolu, synteza eteru dwumetylowego, lub inne), a także w pewnym zakresie proporcją wykorzystania gazu syntezowego dla celów energetycznych oraz dla syntezy chemicznej.

Równowagi termodynamiczne syntezy chemicznej powodują, że reakcje syntezy nie przebiegają do całkowitego wyczerpania surowców. W technologiach syntezy dla maksymalnego wykorzystania składników gazu stosowane są w związku z tym rozwiązania, w których nieprzereagowany surowiec zawracany jest do reaktora syntezy. Może być to realizowane dwoma sposobami. Pierwszy polega na szeregowym połączeniu kilku reaktorów. Po kolejnym reaktorze z częściowo przereagowanego gazu wydziela się produkt a nieprzereagowaną pozostałość kieruje do reaktora następnego. W sposobie drugim wyko-

rzystywany jest odpowiednio większy reaktor oraz układ cyrkulacji produktów wyprowadzanych z reaktora. W układzie cyrkulacji prowadzona jest separacja wytworzonego produktu, a do reaktora zawracany jest gaz nieprzereagowany. Stopień wykorzystania surowca (a także wydajność produktu) uzależniony jest od ilości połączonych szeregowo reaktorów lub od krotności zawracania surowca w układzie z cyrkulacją. Stopień przereagowania gazu w eksploatowanych instalacjach syntezy wynosi około 96%. Pozostałość nieprzereagowanego gazu — tzw. gaz resztkowy, który zawiera również uboczne produkty syntezy wykorzystywany jest energetycznie, a uzyskana na tej drodze energia elektryczna lub ciepło na ogół zaspokajają potrzeby energetyczne technologii syntezy.

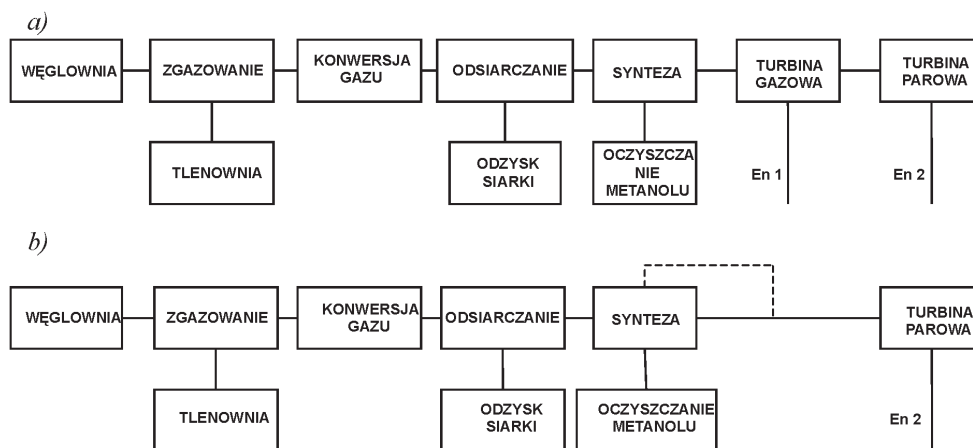
Konieczność budowy w instalacji syntezy reaktorów szeregowych lub reaktorów o dużych gabarytach pracujących w układzie cyrkulacji pociąga za sobą znaczne koszty. Nakłady inwestycyjne na budowę instalacji syntezy z układem cyrkulacyjnym są około trzy razy wyższe od budowy pojedynczego reaktora. Również koszt eksploatacji instalacji z układem cyrkulacji jest około dwa razy wyższy od eksploatacji pojedynczego reaktora. Stosując jednak pojedynczy reaktor (bez układu cyrkulacji) uzyskuje się niewielki stopień przereagowania surowca (gazu syntezowego), który np. dla syntezy metanolu wynosi około 33%, rośnie natomiast udział wytworzonej energii elektrycznej. W końcowym efekcie przeważa jednak wydajność metanolu w układzie z cyrkulacją.

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

- ✧ zintegrowanego układu generacji prądu elektrycznego opartego na zgazowaniu węgla, (rys. 3),
- ✧ zintegrowanego układu generacji prądu elektrycznego opartego na zgazowaniu węgla skojarzonego z pojedynczym reaktorem syntezy (bez cyrkulacji) (rys. 4a),
- ✧ układu syntezy z reaktorem cyrkulacyjnym, oparty na gazie ze zgazowania węgla z energetycznym wykorzystaniem gazu resztkowego (rys. 4b).

Schematy wymienionych układów technologicznych pokazano na rysunku 4. Składają się one w dużej części z identycznych zespołów funkcjonalnych. Skojarzenie zintegrowanego układu generacji energii elektrycznej z syntezą wymaga uzupełnienia prostego układu o zespół konwersji gazu surowego, który pozwala na ustalenie wymaganego stosunku H_2/CO i usunięcie nadmiaru CO_2 oraz zespołu syntezy z pojedynczym reaktorem syntezy bez cyrkulacji wraz z instalacją oczyszczania produktu syntezy. Z kolei w układzie czystej syntezy chemicznej w miejsce pojedynczego reaktora zainstalowany jest reaktor z układem cyrkulacji. Wykorzystywany w tym reaktorze praktycznie cały gaz na potrzeby syntezy eliminuje możliwość eksploatacji turbiny gazowej. W przedstawionych konfiguracjach układ (a) obrazuje optymalne skojarzenie wytwarzania energii elektrycznej i syntezy, natomiast układ (b) jest ukierunkowany zasadniczo na syntezę chemiczną.

Z uwagi na fakt, że aktualnie metanol jest wyjątkowo atrakcyjnym produktem syntezy przyjęto, że w układzie skojarzonym wytwarzany będzie ten produkt. Analizę porównawczą przeprowadzono dla układów o jednakowej mocy $1000 MW_{ch}$ określonej ilością energii chemicznej zużywanego węgla, co odpowiada $400 MW_e$ i jest porównywalne z poprzednimi wyliczeniami (tab. 5). Oszacowano bilanse materiałowe i energetyczne analizowanych układów, a obliczone wartości zestawiono w tabelach 6 i 7.



Rys. 4. Schematy technologiczne układu zgazowania i wytwarzania metanolu z różnymi reaktorami syntezy metanolu

a) reaktor jednokrotnego przejścia gazu, b) reaktor cyrkulacyjny

Fig. 4. Block diagrams of coal gasification integrated with different methanol synthesis reactors
a) one through reactor, b) circulating reactor

TABELA 6. Wartości bilansowe analizowanych układów generacji energii elektrycznej i syntezy

TABLE 6. Results of simulation for power generation and methanol production systems

Wielkość bilansowa	Jedn.	Układ generacji		
		rys.3	rys. 4a	rys. 4b
Zużycie węgla:				
◇ wilgotny	tys. Mg/rok	1 130	1 130	1 130
◇ suchy	tys. Mg/rok	1 085,60	1 085,60	1 085,6
◇ energia w paliwie	MW _{ch}	1 000	1 000	1 000
Zużycie tlenu (94,5%)	tys. Mg/rok	977,4	977,4	977,4
Produkcja siarki	Mg/rok	10 500	10 500	10 500
Ilość gazu syntezowego	Mg/godz.	125,6	125,6	112,5
Produkcja metanolu	tys. Mg/rok	—	330	840
Produkcja energii elektrycznej:				
◇ turbina gazowa	MW _e	258,6	160,8	—
◇ zespół parowy	MW _e	185,6	115,4	115,4
◇ razem	MW _e	444,2	276,2	115,4
Zużycie energii własne	MW _e	47,2	48,6	50,6
Produkcja energii elektrycznej netto	MW _e	397	227,6	64,8
Emisja CO ₂	tys. Mg/rok	2 648	2 190	1 490
Koszty inwestycyjne	USD/kW _{ch}	552	558	518

TABELA 7. Sprawności energetyczne analizowanych układów generacji energii elektrycznej i syntezy chemicznej [%]

TABLE 7. Energy efficiency for power generation and methanol production systems [%]

Sprawność	Układ generacji		
	rys. 3	rys. 4a	rys. 4b
Sprawności cząstkowe:			
↯ energia elektryczna — turbina gazowa	25,87	16,08	—
↯ energia elektryczna — zespół parowy	18,56	11,54	11,54
↯ energia elektryczna — razem	44,43	27,62	11,54
↯ wytwarzania metanolu (en. chem.)	—	22,79	57,68

Z analizy danych wynika, że optymalny układ skojarzenia 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 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 USD/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. Wskaźnik ten po skojarzeniu jest korzystniejszy i ulega obniżeniu o około 10% (tab. 6).

Wnioski

Biorąc pod uwagę, interes krajowy polegający na efektywnym wykorzystaniu dostępnych zasobów węgla kamiennego dla celów energetycznych w perspektywie lat 2030–2040 należy stworzyć zarówno warunki polityczne jak i techniczne dla szerokiej implementacji czystych technologii węglowych. W tym celu konieczne jest podjęcie następujących działań:

1. Opracować spójną politykę energetyczną kraju z polityką wydobywania i zagospodarowania węgla oraz ewentualną konkurencją węgla importowanego.
2. Uwzględnić w planach rozwojowych górnictwa zmieniające się jakościowo zapotrzebowanie na węgiel ze względu na prognozowane stosowanie nowych technologii energetycznych.

3. Stworzyć europejskie lobby na rzecz „czystego węgla”, w szczególności z krajami stosującymi węgiel w energetyce (np. Niemcy) i podjąć działania na rzecz przygotowania do 7 programu ramowego badań i rozwoju.
4. Biorąc pod uwagę, że około 1/3 krajowej zainstalowanej mocy energetycznej winno ulec modernizacji w najbliższym czasie oraz przewidując dalszy wzrost zapotrzebowania na energię po 2010 r. konieczne jest stworzenie oprócz polityki energetycznej kraju także operacyjnego programu implementacji „czystych technologii węglowych”. Plan taki winien obejmować zarówno konieczne działania techniczne po stronie górnictwa jak i energetyki, która będzie musiała spełnić coraz ostrzejsze wymagania ekologiczne.
5. Należy również przeanalizować osiągnięcia amerykańskiego programu „Clean Coal” realizowanego od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku w celu wyboru opcji najkorzystniejszych dla krajowej energetyki.
6. Biorąc pod uwagę obecny stan rozwoju technologicznego wydaje się, że należy promować następujące kierunki:
 - ✧ w perspektywie krótko- i średnioterminowej:
 - ✧ spalanie w kotłach pyłowych przy parametrach nadkrytycznych i ultranadkrytycznych,
 - ✧ spalanie w kotłach fluidalnych cyrkulacyjnych przy parametrach nadkrytycznych z ograniczeniem lokalizacyjnym związanym z bliską dostępnością węgla o większej zawartości popiołu (>20%);
 - ✧ w perspektywie długoterminowej:
 - ✧ zgazowanie węgla w zintegrowanych układach parowo-gazowych połączonych z wytwarzaniem metanolu (obecnie w kraju nie produkuje się metanolu, a zapotrzebowanie jest około 400 tys. rocznie), który może być m.in. paliwem dla ogniw paliwowych,
 - ✧ spalanie węgla bezpośrednio w tlenie w kotłach pyłowych nowej konstrukcji,
 - ✧ technologie pozyskiwania ultra czystego węgla.

Wymienione kierunki rozwoju spalania pozwolą obniżyć emisję ditlenku węgla o około 20% z uwagi na znaczne podniesienie sprawności przetworzenia węgla na energię elektryczną. Natomiast technologie oparte o zgazowanie można zaliczyć do nowej generacji, ponieważ wytwarzają skoncentrowany strumień ditlenku węgla, który może być wydzielony i składowany w zależności od potrzeb. Są to technologie, które pozwolą stworzyć pomost dla paliw wodorowych prognozowanych na II połowę XXI w.

Literatura

- [1] World Energy Outlook 2004. International Energy Agency. Washington, 2004.
- [2] Coal Gasification for Power Generation,
http://www.dti.gov.uk/energy/developpep/chevron_texaco_part2.pdf
- [3] Li ZHENG i in., 2003 — Polygeneration energy system based on coal gasification, Energy for Sustainable Development VII, 4, 57–62.
- [4] Roadmapping Coal’s Future. International Energy Agency, 2005.
- [5] YAMASHITA K., BARRETO L., 2003 — Integrated Energy Systems for the 21st century: Coal Gasification for Co-producing Hydrogen, Elektriciry and Liquid Fuels. Interim Report. International Institute for Applied Systems Analysis. Austria.

- [6] CZAPLINKA K., ŚCIAŻKO M., 2004 — Model ekologicznego i ekonomicznego prognozowania wydobycia i użytkowania czystego węgla. Tom 2. Ekoefektywność technologii czystego spalania węgla. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.
- [7] BELGIORNO i V., in., 2003 — Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management* 23, 1–15.
- [8] ŚCIAŻKO M., ZIELIŃSKI H., 2003 — Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. IGSMiE PAN. Kraków.
- [9] VOSLOO A.C., 2001 — Fischer-Tropsch: a futuristic view. *Fuel Processing Technology* 71, 149–155.
- [10] WILHELM D.J. i in., 2001 — Syngas production for gas-tu-liquids applications: technologies, issues and outlook. *Fuel Processing Technology* 71, 139–148.
- [11] PARSONS E.L., SHELTON W.W., LYONS J.L., 2002 — Advanced Fossil Power Systems Comparison Study. Final Report. Morgentown, WV.
- [12] LARSON E.D., TINGJIN R., 2003 — Synthetic fuel production by indirect coal liquefaction. *Energy for Sustainable Development* VII, 4, 79–102.

Marek ŚCIAŻKO, Alfred TRAMER

Integrated carbo-energy and chemistry

Abstract

Gasification is regarded as a basic process for advanced concepts of future coal conversion technologies. At present the process is widely used in chemical industry mainly for petrochemical by-products conversion but only occasionally for power generation as demonstration plants. Considering different options for clean energy production both directions are integrated to take advantage of synergy effect and so called “energyplexes” are analysed. They combine power generation with chemicals production, namely methanol, liquid fuels or hydrogen. Two main directions of coal conversion technologies were characterised and analysed in respect of thermal efficiency and investment cost. Subcritical coal combustion technology was chosen as a reference plant including two additional cases with carbon dioxide removal and oxygen blown combustion. Those were compared with three cases of gasification systems integrated with combined cycle power generation. Finally two different arrangements of gasification combined with methanol production and power generation were evaluated. It might be concluded that the latter cases open new opportunity for clean and carbon free energy production using coal at relatively high energy efficiency and chipper investment cost. Integrated carbo-energy and chemistry can be regarded as a environmentally sound option for coal based energy generation both for direct grid supplying and indirect dispersed sources feeding using methanol as a chemically clean fuel for fuel cells.

KEY WORDS: power generation, clean coal technology, coal gasification, integrated energy systems