

Grzegorz CZERSKI*, Tadeusz DZIOK**, Stanisław PORADA***

Możliwości wykorzystania technologii zgazowania węgla do wytwarzania energii, paliw i produktów chemicznych

STRESZCZENIE. Do podstawowych zalet procesu zgazowania należy zaliczyć wysoką efektywność procesu oraz relatywnie niski negatywny wpływ na środowisko naturalne. Ponadto o atrakcyjności tej technologii świadczy jej elastyczność i możliwość wykorzystania różnych surowców do wytwarzania energii, paliw ciekłych lub gazowych czy stosowania w przemyśle chemicznym. Oprócz tradycyjnego zgazowania prowadzonego w reaktorach naziemnych, możliwa jest również realizacja tego procesu poprzez podziemne zgazowanie węgla. Obecnie w Polsce realizowany jest projekt pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektywnej produkcji paliw i energii”, którego podstawowym celem jest określenie priorytetowych kierunków rozwoju technologii węglowych w tym zgazowania węgla. W artykule skupiono się na najważniejszym elemencie technologii zgazowania tj. reaktorze. Przedstawiono porównanie wybranych, najbardziej dojrzałych reaktorów zgazowania węgla. Omówiono również stan rozwoju zgazowania węgla oraz zagadnienia wykorzystania tej technologii dla potrzeb energetyki, chemii i wytwarzania paliw. Obecnie najczęściej stosowanymi i najlepiej rozwiniętymi są reaktory dyspersyjne. Zdecydowany prym w stosowaniu zgazowania węgla w świecie wiodą Chiny. Najczęściej technologia zgazowania wykorzystywana jest dla potrzeb chemii, następnie kolejno produkcji paliw ciekłych, energii elektrycznej i paliw gazowych, w tym substytutu gazu ziemnego. Wdrożenie technologii zgazowania węgla w Polsce powinno być wspierane przez władze.

SŁOWA KLUCZOWE: zgazowanie węgla, reaktory zgazowania, wytwarzanie energii i paliw, przemysł chemiczny

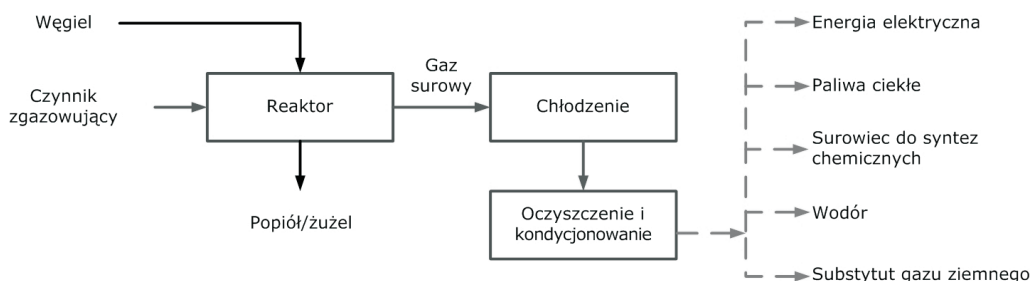
* Dr inż., ** Mgr inż., * Dr – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków;
e-mail: gczerski@agh.edu.pl

Wprowadzenie

Do podstawowych zalet procesu zgazowania należy zaliczyć wysoką efektywność procesu oraz relatywnie niski negatywny wpływ na środowisko naturalne. Ponadto o atrakcyjności tej technologii świadczy jej elastyczność i możliwość wykorzystania różnych surowców do wytwarzania energii, paliw ciekłych lub gazowych czy stosowania w przemyśle chemicznym (Chmielniak i in. 2012). Oprócz tradycyjnego zgazowania prowadzonego w reaktorach naziemnych możliwa jest również realizacja tego procesu poprzez podziemne zgazowanie węgla (Czaja i in. 2013). Obecnie w Polsce realizowany jest projekt pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii”, którego podstawowym celem jest określenie priorytetowych kierunków rozwoju technologii węglowych, co winno umożliwić opracowanie racjonalnej polityki oraz podjęcie strategicznych decyzji dotyczących rozwoju czystych, węglowych technologii energetycznych, dywersyfikacji bazy surowcowej dla przemysłu chemicznego oraz zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego kraju poprzez wykorzystanie produktów powstających w procesach zgazowania węgla (Strugała i in. 2011).

Schemat blokowy technologii zgazowania przedstawiono na rysunku 1. Obejmuje: przygotowanie surowca i mediów zgazowujących, reaktor zgazowania, węzły chłodzenia, oczyszczania oraz kondycjonowania uzyskanego gazu.

W artykule skupiono się na najważniejszym elemencie tj. reaktorze zgazowania, przedstawiono porównanie najbardziej dojrzałych technologii zgazowania węgla, które mogą być wykorzystane w Polsce. Omówiono również stan rozwoju zgazowania węgla oraz zagadnienia wykorzystania tej technologii dla potrzeb energetyki, chemii i wytwarzania paliw.



Rys. 1. Schemat blokowy technologii zgazowania (Porada i in. 2013)

Fig. 1. Block diagram of coal gasification technology (Porada et al. 2013)

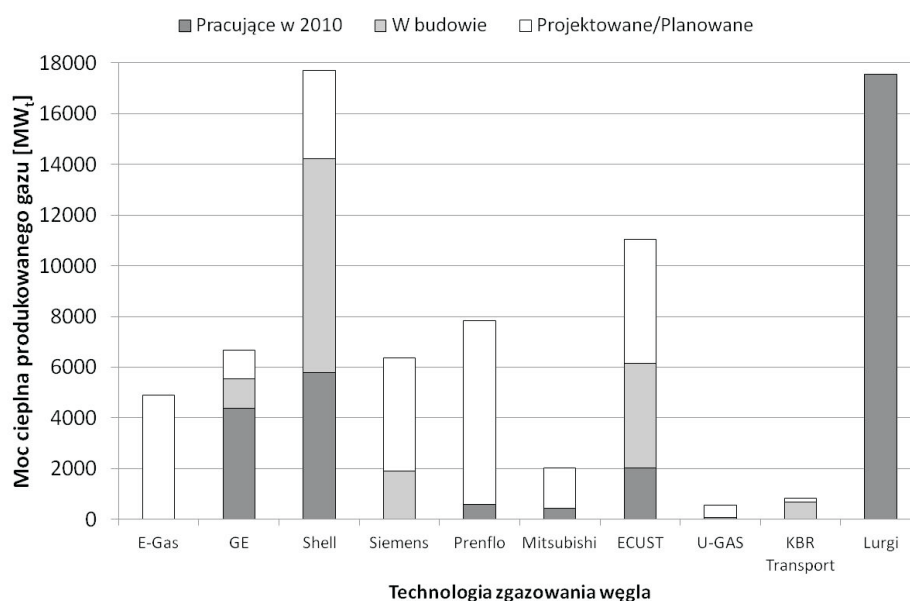
1. Stan rozwoju technologii zgazowania

Według najnowszej bazy danych z 2013 r. w świecie działały 393 instalacje zgazowania wyposażone w 1370 reaktorów o łącznej mocy 104,7 GWth (moc cieplna w produkowanym

gazie), a kolejne instalacje o mocy 147,4 GWth są planowane. Wśród instalacji istniejących, budowanych, jak również planowanych węgiel jest zdecydowanie najczęściej stosowanym surowcem (ok. 80% sumarycznej mocy instalacji zgazowania), a produkcja gazu na potrzeby syntez chemicznych posiada największy udział – ponad 40% (Higman 2013).

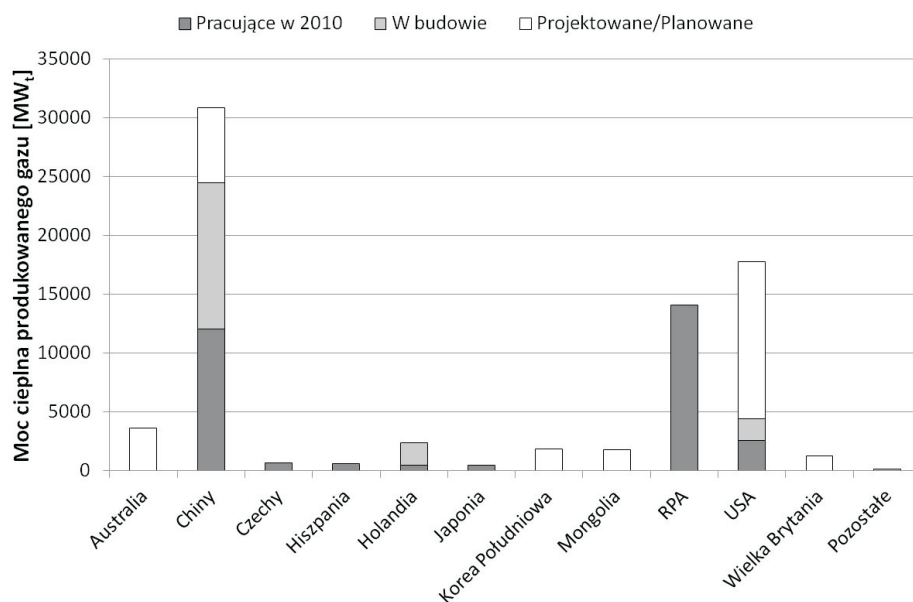
W przypadku zgazowania węgla brak jeszcze szczegółowych danych z roku 2013, stąd w artykule wykorzystano bazę z 2010 r. Na rysunku 2 przedstawiono stan rozwoju poszczególnych technologii zgazowania węgla poprzez zestawienie dla poszczególnych reaktorów zgazowania: instalacji obecnie pracujących, w budowie oraz planowanych. Obserwując obecne tendencje rozwoju technologii zgazowania na świecie, dominujące i najbardziej perspektywiczne są reaktory dyspersyjne i to w ich przypadku można zauważyć największy przyrost zainstalowanej mocy. Znacznie rzadziej stosowaną technologią są reaktory fluidalne, mogą one jednak z powodzeniem być stosowane w energetyce rozproszonej i być wykorzystywane lokalnie. Świadczą o tym lokalnie rozwijane technologie tj.: BHEL – Indie, IDGCC – Australia oraz ICHPW – Polska. W przypadku reaktorów ze złożem przesuwным za pomocą reaktorów Lurgi produkowana jest największa ilość gazu wśród wszystkich technologii zgazowania, lecz technologia ta nie jest obecnie implementowana w nowych instalacjach. Należy jednak zaznaczyć, iż technologia z ciekłym odprowadzeniem żużla BGL rozwija się i jest wdrażana w Chinach.

Warto również przeanalizować, w których krajach istnieją i powstają instalacje zgazowania – rysunek 3. Technologia zgazowania węgla obecna jest w kilkunastu krajach, a zde-



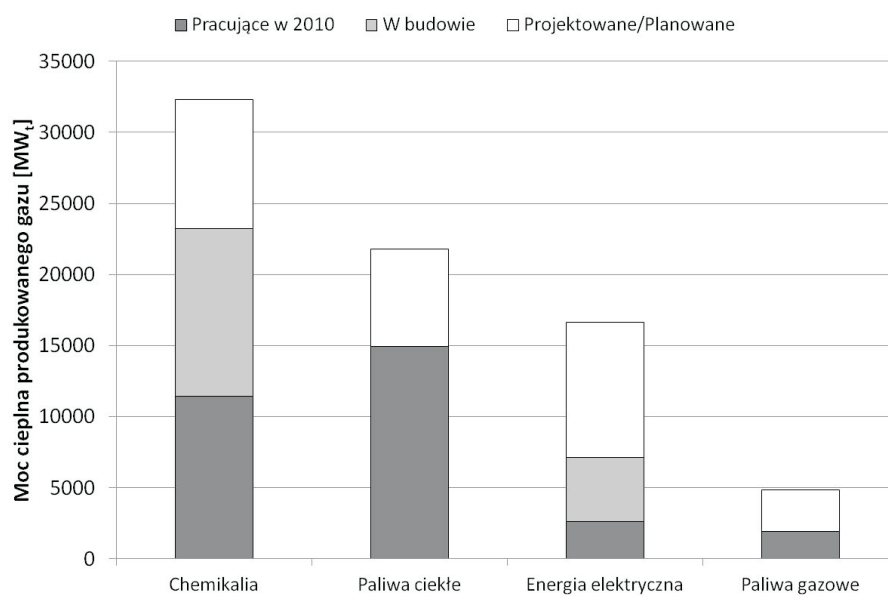
Rys. 2. Stan rozwoju poszczególnych technologii zgazowania węgla na rok 2010
(opracowanie własne na podstawie DOE 2010)

Fig. 2. The state of development of various coal gasification technologies for the year 2010
(own study based on DOE 2010)



Rys. 3. Wdrażanie technologii zgazowania przez poszczególne kraje na rok 2010 (opracowanie własne na podstawie DOE 2010)

Fig. 3. Implementation of gasification technologies by countries for the year 2010 (own study based on DOE 2010)



Rys. 4. Kierunek procesu zgazowania węgla na rok 2010 (opracowanie własne na podstawie DOE 2010)

Fig. 4. Directions of coal gasification process for the year 2010 (own study based on DOE 2010)

cydowanie wiodą Chiny, które stają się potęgą w tym zakresie, znacząco wyprzedzając dotychczasowych liderów, tj. USA i RPA. W Chinach wdrażane są zarówno ich rodzime technologie: ECUST i AFB, ale także technologie zachodnie, takie jak Shell, GE, BGL czy Siemens.

Na rysunku 4 przedstawiono kierunki wykorzystania gazu ze zgazowania węgla. Najczęściej reaktory zgazowania wykorzystywane są dla potrzeb chemii, następnie produkcji paliw ciekłych, kolejno energii elektrycznej i paliw gazowych, w tym substytutu gazu ziemnego.

2. Reaktory zgazowania

Obecnie wykorzystywane są reaktory o bardzo różnych konstrukcjach, istnieje szereg kryteriów ich klasyfikacji, z których najważniejszy jest podział ze względu na rodzaj złoża zgazowywanego węgla (reaktory ze złożem przesuwным, fluidalnym lub dyspersyjnym). Zagadnienia dotyczące klasyfikacji reaktorów zgazowania węgla zostały szczegółowo omówione m.in. w publikacji (Porada i in. 2013).

W chwili obecnej dostępne są dwa reaktory ze złożem przesuwным, tj. Lurgi i British Gas Lurgi (BGL), przy czym technologia BGL jest udoskonaloną wersją tradycyjnego reaktora Lurgi, pracującą przy dużo wyższych temperaturach z odbiorem substancji mineralnej w postaci ciekłego żużla. Ze względu na prostotę konstrukcji, niezawodność i elastyczność obecnie na świecie rozwijane są liczne technologie zgazowania węgla w złożu fluidalnym. Wśród nich znajdują się zarówno technologie oferowane komercyjnie na całym świecie (HTW, KRW, U-Gas, KBR Transport), jak również stosowane lokalnie (BHEL, IDGCC), a także w fazie rozwoju (IChPW). Technologie ze złożem dyspersyjnym są obecnie najczęściej stosowane i najlepiej rozwinięte. Spowodowane jest to przede wszystkim dużą wydajnością reaktorów (do 4000 Mg na dobę), a nowe rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na ciągłe zwiększanie ich skali. Obecnie na rynku dostępne są reaktory: GE Energy (Texaco), Shell, E-Gas, Prenflo, Siemens, Mitsubishi, Clean Coal Technology (CCG Choren), Multi Purpose Gasifier (MPG), ECUST.

W artykule przedstawiono porównanie najbardziej dojrzałych i perspektywicznych reaktorów, które mogą być wykorzystane do zgazowania węgla w polskich warunkach. Wybrano reaktory dyspersyjne: Shell, GE Texaco, Prenflo oraz Siemens i E-Gas a także reaktory fluidalne: KBR Transport oraz U-Gas reprezentujące różne rozwiązania technologiczne dotyczące dozowania paliwa, chłodzenia gazu, konstrukcji reaktorów itp. Technologie te są szeroko stosowane na całym świecie i mogą być wykorzystane zarówno dla potrzeb sektora energetycznego, jak i chemii czy produkcji paliw. Prezentowane tutaj zestawienia opracowano na podstawie szerokiej bazy danych źródeł dotyczących reaktorów zgazowania zebranych przez autorów i zaprezentowanych w (Sprawozdanie 2011; Raport 2013). Wyszpecyfikowanie w artykule wykorzystanych pozycji literaturowych nie jest możliwe ze względu na wymaganą przez redakcję objętość pracy.

TABELA 1. Podstawowe parametry realizacji procesu dla wybranych technologii zgazowania (Sprawozdanie 2011, Raport 2013)

TABLE 1. Basic parameters of the process for selected gasification technologies (Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

Reaktor	Technologia	Shell	GE Texaco	Prenflo	Siemens	E-Gas	KBR Transport	U-Gas
✧ temperatura [°C]		1600	1260–1480	1200–1600	1300–1800	1300–1400 (1000)*	815–1065	840–1100
✧ ciśnienie [MPa]		2,5–4,5	3–7	2,5	2–4	2,9	1,4	0,5–3
✧ zużycie surowca [Mg/h]		112,5	95,8	108,3	83,3	104,2	2,1	13
✧ nominalna produkcja gazu [m³/h]		340 000	184 000	180 000	142 000	180 000	4 400	25 000
✧ wydajność gazu w odniesieniu do paliwa [m³/kg]		2,1	1,9	1,7	1,7	1,7	2,1	1,9
✧ temperatura gazu na wyjściu z reaktora [°C]		1000	730	800	200	1000	795–880	700–1000
Chłodzenie gazu								
✧ ilość stopni chłodzenia gazu		2	2	2	1	2	1	2
✧ I stopień chłodzenia [°C]		1000 ^{a)}	730 ^{e)}	400 ^{e)}	200–220 ^{f)}	1000 ^{g)}		315 ^{d)}
✧ II stopień chłodzenia [°C]		235 ^{b)}	370–425 ^{d)}	235 ^{d)}	–	370 ^{d)}	315–375 ^{h)}	130 ^{b)}
Odpylanie sposób odpylania		filtry ceramiczne	mokry skrubler	filtry ceramiczne	mokry skrubler	cyklon, filtry ceramiczne	cyklony i filtry	cyklony i skrubler
Odbiór żużla/popiołu		kapiel wodna	kapiel wodna	kapiel wodna	kapiel wodna	kapiel wodna	w postaci popiołu	aglomerat popiołu

a) chłodzenia gazu ekranem wodnym i zwracanym gazem

b) chłodnica konwekcyjna wytwarzająca parę wysokociśnieniową i średnociśnieniową

c) wymiennik radiacyjny wytwarzający parę wysokociśnieniową

d) wymiennik konwekcyjny wytwarzający parę wysokociśnieniową

e) kocioł konwekcyjny

f) bezpośrednie chłodzenie wodne

g) dwustopniowe dozowanie węgla

h) wysokosprawny schładzacz gazu

i) wymiennik konwekcyjny wytwarzający parę niskociśnieniową

* Temperatura w drugim stopniu

TABELA 2. Porównanie charakterystyki surowców dla wybranych technologii zgazowania (Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

TABLE 2. Comparison of raw materials characteristics for selected gasification technologies (Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

Technologia	Shell	GE Texaco	Preflo	Siemens	E-Gas	KBR Transport	U-Gas
Paliwo							
✧ stopień rozdrobnienia [mm]	0,1	0,1	0,05	0,04	0,1	0,25–0,40	<6
✧ sposób podawania	suchy		suchy	suchy	zawiesina	suchy	suchy
✧ charakterystyka paliwa							
✧ wartość opałowa [MJ/kg]	16–40	9–14	21–29	18–32	24–25	14–30	12,8–31,6
✧ wilgoć [%]	b.d.	2–27	b.d.	2–20	14–17	7–36	1–41
✧ popiół [%]	1–40	1–11	3–25	1–15	9,5–11,6	6–18	0–41
✧ S [%]	0,5–7	0,1–5	<4	0,5–5	2,1–2,5	0,3–1,6	0,2–4,6
✧ Cl [%]	0,01–0,1	–	<0,5	–	–	–	–
Media zgazowujące	tlen (95%) + para wodna	tlen (95%) + para wodna	tlen (85%) + para wodna	tlen (95%) + para wodna	tlen (95%) + para wodna	tlen (95%) lub powietrze + para wodna	tlen (95%) lub powietrze + para wodna
Dodatki	nie dotyczy	obniżające lepkość zawiesiny	kamień wapienny	nie dotyczy	obniżające lepkość zawiesiny	kamień wapienny	brak

Porównanie najważniejszych parametrów realizacji procesu dla wybranych reaktorów zgazowania przedstawiono w tabeli 1. Parametry te podzielono na grupy dotyczące: reaktora zgazowania, chłodzenia gazu, odpylania oraz odbierania żużla lub popiołu.

Zestawienie charakterystyki surowców wykorzystywanych w analizowanych reaktorach zaprezentowano w tabeli 2. W instalacjach pilotowych i demonstracyjnych wybranych reaktorów prowadzono zgazowanie dla wielu różnych paliw, tj. węgla kamiennych i brunatnych, koksu naftowego a dla niektórych nawet biomasy. Wszystkie reaktory charakteryzują się dużą elastycznością w doborze surowca do zgazowania.

Porównanie składu i kaloryczności gazu uzyskiwanych w analizowanych technologiach przedstawiono w tabeli 3. Dla reaktorów fluidalnych podano uzyskiwany skład gazu przy wykorzystaniu jako czynnika zgazowującego zarówno powietrza, jak i tlenu. W reaktorach zgazowania przy wykorzystaniu jako medium zgazowującego tlenu uzyskuje się gazy o zróżnicowanym składzie a wartość opałowa kształtuje się w przedziale 7,7–12 MJ/Nm³. W przypadku reaktorów dyspersyjnych wykorzystujących dozowanie w zawieszynie wodno-węglowej (GE oraz E-Gas) można zaobserwować znacznie większą zawartość CO₂ w gazie, a także wyższą zawartość wodoru. Z kolei przy stosowaniu suchego dozowania paliwa (Shell, Prenflo, Siemens) uzyskuje się gaz o zwiększonej zawartości azotu w gazie, a także większy udział CO. Ponadto gaz uzyskiwany w dwustopniowym reaktorze E-Gas charakteryzuje się znacznie większą zawartością metanu (pochodzącego z pirolizy w drugim stopniu) w porównaniu do

TABELA 3. Skład gazu oraz jego kaloryczność dla wybranych technologii zgazowania
(Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

TABLE 3. Composition and calorific value of gas for selected gasification technologies
(Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

Składnik	Shell	GE Texaco	Prenflo	Siemens	E-Gas	KBR Transport		U-Gas	
						tlen	pow.	tlen	pow.
CO [%]	61,3	44,1	59,3	64	35,2	36–39	22,0	22,7	20,7
H ₂ [%]	27,6	38,0	21,4	27	33,5	26–28	16,4	26,6	12,1
CO ₂ [%]	2,2	14,7	2,8	3	26,7	14–18	8,2	15,1	6,9
N ₂ [%]	4,1	2,3	14,3	5,1	0,5	0,09	50	1,1	49,0
Ar [%]	0,8	0,9	0,9	0,8	1,2	0,01	0,6	–	–
CH ₄ [%]	0,1	0,05	0,04	0,1	1,8	12–14	1,2	5,4	4,3
H ₂ S [%]	1,15	0,04*	0,83	0,46	0,3	0,08–0,2	0,04	0,72*	0,54*
COS [ppm]	848	–	3100	400	2000	40–100	30	–	–
Ciepło spalania [MJ/Nm ³]	11,6	10,3	10,1	11,1	9,3	12,7	5,3	8,4	5,9
Wartość opałowa [MJ/Nm ³]	11,0	9,6	9,7	10,6	8,5	12,0	4,9	7,7	5,5

* COS + H₂S

pozostałych reaktorów dyspersyjnych. Od reaktorów dyspersyjnych znacznie odbiegają reaktory fluidalne, w których przy zgazowaniu tlenowym uzyskuje się gaz o znacznie większej zawartości metanu (nawet kilkanaście procent). Do celów energetycznych w tych reaktorach stosuje się zgazowanie przy pomocy powietrza, co oczywiście w bardzo istotny sposób wpływa na skład uzyskiwanego gazu i jego kaloryczność.

Zużycie podstawowych mediów i materiałów w wybranych reaktorach przedstawiono w tabeli 4. Dla reaktorów dyspersyjnych zapotrzebowanie na tlen jest zbliżone, natomiast w przypadku reaktorów z suchym dozowaniem paliwa (Shell, Prenflo, Siemens) różne jest zapotrzebowanie na parę do zgazowania oraz azot do transportu paliwa. W przypadku reaktorów zasilanych zawiesiną wodno-węglową (GE Texaco, E-Gas) zużywają one zbliżone ilości wody do jej przygotowania, stosowane są także dodatki obniżające jej lepkość. Oczywiście od reaktorów dyspersyjnych odbiegają reaktory fluidalne, które charakteryzuje się niższym zapotrzebowaniem na tlen, za to wyższym na parę wodną do zgazowania, poza tym istnieje możliwość dodatku do paliwa kamienia wapiennego w celu odsiarczania.

TABELA 4. Zużycie mediów i materiałów dla wybranych technologii zgazowania
(Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

TABLE 4. Consumption of gasification agents and materials for selected gasification technologies
(Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

Medium/materiał	Jedn.	Shell	GE Texaco	Prenflo	Siemens	E-Gas	KBR Transport	U-Gas
Tlen								
✧ czystość	%	95	95	85	95	95	98	95
✧ zapotrzebowanie	kg/kg paliwa	0,74	0,84	0,88	0,75	0,72	0,65–0,75	0,48
Para do zgazowania	kg/kg paliwa	0,03	nie dotyczy	0,09	0,11	nie dotyczy	0,29–0,41	0,25
Azot do transportu paliwa	kg/kg paliwa	0,076	nie dotyczy	0,26	0,25	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy
Kamień wapienny	kg/h	nie dotyczy	nie dotyczy	3,7	nie dotyczy	nie dotyczy	b.d.	nie dotyczy
Woda do zawiesiny	kg/kg paliwa	nie dotyczy	0,6	nie dotyczy	nie dotyczy	0,52	nie dotyczy	nie dotyczy

Zestawienie najważniejszych parametrów dotyczących efektywności energetycznej analizowanych technologii zgazowania przedstawiono w tabeli 5. Uzyskiwane w reaktorach dyspersyjnych stopnie konwersji są bardzo wysokie i zbliżone do siebie. Odbiegają od nich analizowane reaktory fluidalne, jednak dla reaktywnych węgla, zwłaszcza dla KBR Transport osiąga on również wysoki stopień konwersji węgla. Sprawność zimnego gazu jest to ilość energii chemicznej w gazie gorącym w stosunku do ilości energii chemicznej wsadu (z uwzględnieniem energii doprowadzonej do procesu w celu jego prowadzenia).

TABELA 5. Efektywność energetyczna dla wybranych technologii zgazowania
(Sprawozdanie 2011; Raport 2013)

TABLE 5. Energy efficiency for selected gasification technologies
(Sprawozdanie 2011, Raport 2013)

Parametr	Shell	GE Texaco	Prenflo	Siemens	E-Gas	KBR Transport	U-Gas
Stopień konwersji węgla [%]	99,8	99,8	99	99,8	97,5–99,1	87–99	85–95
Sprawność zimnego gazu [%]	80–83	77,0	74	80,1	70	75	69,6

3. Wykorzystanie technologii zgazowania dla potrzeb energetyki, chemii i wytwarzania paliw

Wybór konkretnej technologii zgazowania węgla uzależniony jest od kierunku jego zastosowania. Zastosowanie jednego typu reaktorów będzie bardziej korzystne dla wytwarzania energii elektrycznej, a innych dla potrzeb przemysłu chemicznego (produkcja amoniaku, metanolu) lub produkcji paliw ciekłych i gazowych.

Ważny przy wyborze reaktora jest rodzaj zastosowanego złoża. Obecnie największą wydajnością i elastycznością charakteryzują się reaktory ze złożem dyspersyjnym. W reaktorach tych ze względu na wysokie temperatury pracy możliwe jest stosowanie różnego typu surowca, nawet o niskiej reaktywności, a uzyskiwane w stopnie konwersji są bardzo wysokie, co niewątpliwie jest ich dużą zaletą. Z kolei reaktory fluidalne cechują się wysoką żywotnością i elastycznością pracy, lecz ze względu na niskie temperatury pracy znajdują zastosowanie do utylizacji reaktywnych węgli niskiej jakości o wysokiej zawartości popiołu i wilgoci. Są to też jednostki małej mocy i ich wykorzystanie należy utożsamiać z energetyką rozproszoną. Reaktory ze złożem przesuwным cechuje duża prostota, ale gaz zawiera znaczące ilości smoły, co wymaga jej wydzielenia z gazu i utylizacji. W reaktorach tych istotne są również właściwości węgla, a zwłaszcza jego spiekalność oraz topliwość popiołu.

Jak już wspomniano, obecnie dominują zdecydowanie reaktory dyspersyjne. Nowoczesne konstrukcje tego typu reaktorów, w zależności od ich wykorzystania, mogą być wyposażone w różne systemy chłodzenia gazu i systemy dozowania surowca, które bezpośrednio rzutują na ich zastosowanie dla potrzeb energetyki czy też przemysłu chemicznego. Ze względu na sposób chłodzenia reaktory można podzielić na reaktory z chłodzeniem gazu w wymiennikach z produkcją pary lub reaktory z chłodzeniem gazu bezpośrednim natryskiem wodnym. Pierwszy typ dedykowany jest do wytwarzania energii elektrycznej w układach IGCC. Reaktory tego typu cechuje większa sprawność, ale również wyższe koszty budowy. Drugi typ reaktorów przeznaczony jest do produkcji surowca dla przemysłu chemicznego lub produkcji paliw. Reaktory

z bezpośrednim chłodzeniem posiadają mniejsze gabaryty, a ich koszt jest o około 30% niższy (Radke 2009). Wiodące na rynku zgazowania firmy udostępniają technologie dostosowane zarówno do potrzeb sektora chemicznego, jak i energetyki. W ich ofercie można znaleźć zarówno reaktory z bezpośrednim chłodzeniem natryskiem wodnym, jak również z chłodzeniem w wymiennikach z produkcją pary wodnej.

Ze względu na sposób dozowania reaktory można podzielić na reaktory z dozowaniem węgla w zawieszinie wodnej oraz reaktory z suchym dozowaniem paliwa. Reaktory z suchym dozowaniem wykazują niższe zapotrzebowanie na tlen o 25–30% i mniejszą konsumpcją energii przez tlenownie (ASU). Skutkuje to wyższą sprawnością dla układów IGCC. Nie mniej jednak jest to droższe rozwiązanie wymagające bardziej masywnego osprzętu oraz złożonego systemu zaworów w układzie dozowania paliwa do reaktora. Dozowanie węgla w zawieszinie wodnej jest prostsze, a ponadto umożliwia stosowanie wyższych ciśnień dla reaktora (Kim 2009).

Przed ostatecznym wyborem reaktorów konieczne jest wytypowanie konkretnego węgla do procesu zgazowania i przeprowadzenie jego dokładnych analiz. Z uwagi na fakt, iż na wydajną pracę reaktora i jego wysoką dyspozycyjność mają wpływ właściwości popiołu, duży nacisk położony jest na określenie jego topliwości oraz lepkości ciekłego żużla. Firmy oferujące komercyjne technologie zgazowania posiadają własne centra badawcze, w których poddają kompleksowej analizie paliwo, popiół, a także przeprowadzają próby zgazowania na konkretnym paliwie w skali pilotowej.

W przypadku wyboru reaktora dla energetyki największe znaczenie mają stosowane systemy dozowania surowca i chłodzenia gazu, które wpływają na uzyskiwane sprawności układów IGCC (tab. 6) a rozpiętość pomiędzy poszczególnymi technologiami może się znacząco różnić. Suche dozowanie węgla jest korzystniejszym rozwiązaniem niż stosowanie zawiesiny

TABELA 6. Sprawność układów IGCC dla różnych rozwiązań stosowanych w reaktorach dyspersyjnych (Higman, Brugt 2003)

TABLE 6. Efficiency of IGCC systems for various options used in entrained flow gasifiers (Higman, Brugt 2003)

Sposób dozowania węgla	Sposób chłodzenia	Warunki	Zimna sprawność układu IGCC (dla wartości opałowej)	Technologia
Zawiesina wodna	bezpośredni natrysk wodą	64 bar 1500°C	37,8%	GE
Zawiesina wodna	cyrkulacja gazu	64 bar 1500°C	43,6%	GE, E-Gas
Zawiesina wodna w 320°C	cyrkulacja gazu	64 bar 1500°C	48,8%	GE, E-Gas
Suche dozowanie	cyrkulacja gazu	32 bar 1500°C	50,0%	Shell, Prenflo, Siemens
Suche dozowanie	dwustopniowe dozowania surowca	32 bar 1100/1500°C	50,9%	MHI, Eagle

wodno-węglowej. W przypadku dozowania węgla w zawiesinie wodnej znaczące podniesienie sprawności może być uzyskane dzięki jej wstępnemu podgrzaniu. Równie istotny jak sposób dozowania węgla jest rodzaj zastosowanego chłodzenia gazu. Najwyższą skuteczność można osiągnąć, wykorzystując reaktory z chłodzeniem chemicznym, realizowanym jako dwustopniowe dozowanie paliwa. Z kolei przewagę nad bezpośrednim natryskiem wodnym ma chłodzenie cyrkulującym gazem, czy też chłodzenie w wymiennikach ciepła (Higman i Brugt 2003). Należy zaznaczyć, że sprawność całego układu będzie zależeć od konfiguracji reaktora, chłodzenia, stosowanego surowca oraz czynników zgazowujących.

W przemyśle chemicznym, a także do wytwarzania paliw zastosowanie mogą znaleźć wszystkie typy reaktorów, bez względu na stosowane rozwiązania chłodzenia gazu, czy dozowania węgla. Dla tych potrzeb istotna jest jakość produkowanego gazu oraz pożądany do celów dalszych syntez stosunek H_2/CO , które zależeć będą przede wszystkim od zastosowanego za reaktorem węzła oczyszczania i kondycjonowania gazu. W przypadku wytwarzania substytutu gazu ziemnego konieczne jest również prowadzenie procesu metanizacji. Ważna przy wyborze technologii jest strona ekonomiczna. Wersje reaktorów z chłodzeniem gazu bezpośrednim natryskiem wodnym są rozwiązaniem tańszym, a ich gabaryty są znacznie mniejsze. Również dozowanie węgla w zawiesinie wodnej ze względu na niższe koszty i mniej skomplikowaną budowę wydaje się być rozwiązaniem korzystniejszym. Zastosowanie wymurówki ogniotrwałej również jest rozwiązaniem tańszym w porównaniu do ochrony z warstwą ciekłego żużla, ale niesie ze sobą konieczność jej cyklicznej wymiany. Szczegółowo zagadnienie doboru technologii zgazowania dla potrzeb przemysłu chemicznego przedstawiono w publikacji (Czerski i in. 2014).

Podsumowanie

Z obserwacji dynamicznego rozwoju zgazowania na świecie wynika, że technologia ta będzie wykorzystywana zarówno dla potrzeb przemysłu chemicznego, wytwarzania z węgla energii elektrycznej w układach IGCC, jak również do produkcji paliw. W krajach, w których się rozwija technologia zgazowania, jest ona także wspierana poprzez różne mechanizmy przez rządy zwłaszcza na etapie jej komercjalizacji (Kwaśniewski i in. 2013). Opierając się na doświadczeniach światowych, również w Polsce wdrożenie technologii zgazowania węgla powinno uzyskać istotne wsparcie ze strony rządu.

Praca wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 p.t. Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej, finansowanego ze środków NCBiR na podstawie Umowy nr SP/E/3/7708/10.

Literatura

- [1] CHMIELNIAK i in. 2012 – CHMIELNIAK, T., ŚCIAŻKO, M., SOBOLEWSKI, A., TOMASZEWICZ, G. i POPOWICZ, J. 2012. Zgazowanie węgla przy zastosowaniu CO₂ sposobem na poprawę wskaźników emisyjnych i efektywności procesu. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 4, s. 125–138.
- [2] CZAJA i in. 2013 – CZAJA, P., KLICH, J. i TAJDUŚ, A. 2013. Metoda pozyskiwania pierwotnych nośników energii ze złóż węgla kamiennego na drodze odmetanowania i zgazowania *in situ*. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 83–98.
- [3] CZERSKI i in. 2014 – CZERSKI, G., DZIOK, T., STRUGAŁA, A. i PORADA, S. 2014. Ocena technologii zgazowania węgla pod kątem ich przydatności dla przemysłu chemicznego. *Przemysł Chemiczny* t. 93, nr 8.
- [4] DOE 2010 – Department of Energy USA, National Energy Technology Laboratory, 2010 – World Gasification Database 2010 <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/worlddatabase/DOE> [dostęp: 12.06.2013].
- [5] HIGMAN, C. i van der BRUGT, M. 2003. Gasification – Second edition. Elsevier Science.
- [6] HIGMAN, C. 2013. State of the Gasification Industry – the Updated Worldwide Gasification Database. Gasification Technologies Conference, Colorado Springs, 16th October, 2013.
- [7] KIM, J.H. 2009. Korean IGCC Technology Development Status. Korea Western Power Co., Ltd., APP Peer Review, 7.07.2009. http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/pgttf/event-july-09/igcc_state_in_korea_korea.pdf [dostęp: 29.06.2011].
- [8] KWAŚNIEWSKI i in. 2013 – KWAŚNIEWSKI, K., GRZESIAK, P. i KAPŁAN, R. 2013. Mechanizmy wspierania przedsięwzięć inwestycyjnych zgazowania węgla – przegląd rozwiązań światowych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3 s. 99–113.
- [9] PORADA i in. 2013 – PORADA, S., CZERSKI, G., DZIOK, T. i GRZYWACZ, P. 2013. Technologie zgazowania węgla i ich przydatność dla potrzeb energetyki i chemii. *Przegląd Górniczy* t. 69, nr 2, s. 200–208.
- [10] RADTKE, K. 2009. PRENFLO PSG and PDQ. The 9th European Gasification Conference, Conference 23–25 March 2009, Düsseldorf, Germany.
- [11] Raport 2013 – Raport okresowy końcowy z badań i prac technicznych. Zestawienie i opracowanie danych ekonomiczno-technologicznych dla poszczególnych procesów i operacji jednostkowych zgazowania naziemnego. W ramach realizacji projektu Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej, AGH.
- [12] Sprawozdanie 2011 – Sprawozdanie merytoryczne roczne, 2011. Zestawienie i opracowanie danych ekonomiczno-technologicznych dla poszczególnych procesów i operacji jednostkowych zgazowania naziemnego. W ramach realizacji projektu Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej, AGH.
- [13] STRUGAŁA i in. 2011 – STRUGAŁA, A., CZAPLIKA-KOLARZ, K. i ŚCIAŻKO, M. 2011. Projekty nowych technologii zgazowania węgla powstające w ramach Programu Strategicznego NCBiR. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 2, s. 375–389.

Grzegorz CZERSKI, Tadeusz DZIOK, Stanisław PORADA

Possibilities of implementing coal gasification technology for the production of energy, fuels, and chemical products

Abstract

The basic advantages of the gasification process are the high efficiency of the process and the relatively low negative impact on the environment. Another attractive aspect of this technology is its flexibility – the possibility to use it for the production of energy and liquid and gas fuels applied by the chemical industry. Besides traditional gasifiers operated on the surface, it is also possible to implement this process through underground coal gasification. A project titled “Development of coal gasification technology for highly efficient production of fuels and energy” is currently being carried out in Poland. The primary objective of the project is to determine the priority directions for development of coal technologies, including coal gasification. This article focuses on the most important element of gasification technology, i.e. the gasifier, presenting a comparison of several of the most mature coal gasifiers. The state of development of gasification and the possibility of using this technology for power, chemicals, and fuels production are also described. Currently, entrained flow gasifiers are the most widely used and best-developed. Worldwide, the leader in the use of coal gasification is China. Gasification technology is most often used by the chemical industry, followed by producers of liquid fuels, power generation, and gaseous fuels including SNG. The implementation of coal gasification technology in Poland may be supported by the authorities.

KEY WORDS: coal gasification, gasifiers, energy and fuels production, chemical industry