

dr hab. inż. Tomasz Chmielniak, prof. nadzw., Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze,
dr hab. inż. Marek Ściążko, prof. nadzw., dr inż. Aleksander Sobolewski, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla, Zabrze

Technologia i efektywność energetyczna zgazowania węgla

Aktualne kierunki rozwoju technologii zgazowania węgla są związane przede wszystkim z wytwarzaniem energii elektrycznej oraz gazu procesowego na potrzeby syntezy chemicznej. Szczególnie atrakcyjne wydaje się zastosowanie zgazowania w tzw. układach poligeneracyjnych, łączących wytwarzanie energii elektrycznej oraz produktów chemicznych z węgla, głównie paliw płynnych silnikowych, metanolu lub wodoru [1, 2].

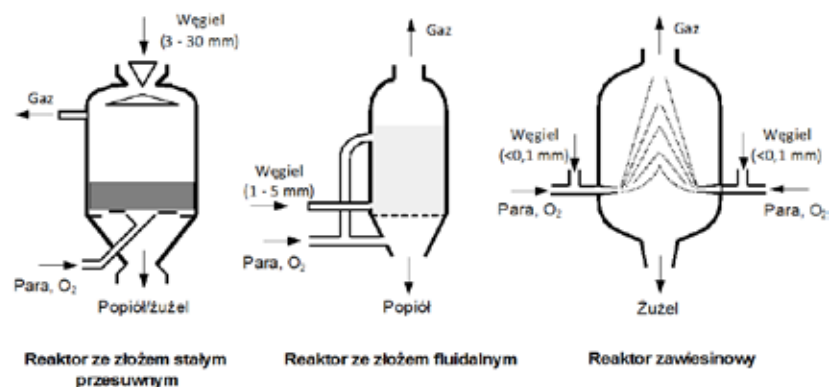
Do głównych sił napędowych rozwoju technologii zgazowania należą:

- Globalna nierównowaga dostępu do zasobów gazu ziemnego i ropy naftowej oraz związane z tym polityczne napięcia.
- Koniunkturalnie niestabilne w niektórych krajach ceny paliw kopalnych, w tym gazu ziemnego i ropy naftowej, a szczególnie stale rosnąca dysproporcja pomiędzy cenami węgla, a cenami gazu i ropy.
- Mniejsze globalne zasoby gazu i ropy naftowej, i w konsekwencji prognozowane szybsze wyczerpywanie się tych surowców.
- Substytucja importowanego gazu ziemnego dla produkcji chemicznej, co wpływa na wzrost bezpieczeństwa energetycznego krajów posiadających zasoby węgla.
- Ochrona środowiska, specyfika procesu pozwala na separację substancji szkodliwych, w tym CO₂, przy wysokich sprawnościach i relatywnie niskich kosztach, w szczególności ma to istotne znaczenie w rozwoju tzw. energetyki zero-emisyjnej.

■ Reaktory zgazowania

Konstrukcje reaktorów zgazowania można podzielić na trzy zasadnicze typy w zależności od struktury przepływu paliwa w strefie reakcyjnej [3] (rys. 1): reaktory zawieszinowe (*entrained flow*), reaktory ze złożem fluidalnym (*fluidised bed*), reaktory ze złożem zwartym przesuwającym (*moving bed*). Rozwój współczesnych technologii zgazowania związany jest przede wszystkim z intensyfikacją procesu, i z tego powodu za rozwojowe uważane są reaktory

fluidalne i zawieszinowe (dyspersyjne) (tab. 1), pozwalające na uzyskanie wysokich współczynników wymiany ciepła i masy oraz zminimalizowanie z wartości substancji smołowych w otrzymanym gazie procesowym. Zśród technologii zgazowania w reaktorze fluidalnym i zawieszinowym zdecydowanie ten drugi jest konstrukcją lepiej rozwiniętą i zweryfikowaną w skali komercyjnej. Stanowi ona podstawę praktycznie wszystkich nowoczesnych wielkoskalowych układów produkcyjnych zintegrowanych ze zgazowaniem węgla, w tym układów



Rys. 1. Procesowe rozwiązania reaktorów zgazowania [3]

Tab. 1. Zestawienie i podstawowa charakterystyka wybranych, oferowanych rynkowo zawieszinowych układów zgazowania

Technologia	SCGP	SFG	MHPS	GE
Dedykowane Paliwo	<ul style="list-style-type: none"> • Węgiel kamienny • Węgiel brunatny • Odpady petroch. • Biomasa 			<ul style="list-style-type: none"> • Węgiel kamienny • Odpady petroch.
Sposób doprowadzania węgla	Pył węglowy	Pył węglowy	Pył węglowy	Zawiesina wodno-węglowa
Maks. zużycie węgla	3200 t/d	3000-36001 t/d	1700 t/d	2200 t/d
Czynnik nośny	Azot /CO ₂	Azot /CO ₂	Azot	Woda 40%
Czynnik zgazowujący	Tlen + para wodna	Tlen + para wodna	Powietrze	Tlen
Temperatura i ciśnienie zgazowania	1400-1600°C, 4 MPa	1400-1800°C, 4 - 5 MPa	1450°C, 3 MPa	1300-1500°C, 3-7 MPa
Stopień konwersji węgla	>99%	>98%	>99%	>98%
Sposób schładzania gazu surowego	<ul style="list-style-type: none"> • Recykl gazu oraz wymiennik konwekcyjny lub • Bezpośrednie chłodzenie wodą (Quench) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bezpośrednie chłodzenie wodą (Quench) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wtrysk paliwa do gazu surowego i wymiennik wysokotemperaturowy 	<ul style="list-style-type: none"> • Wymiennik radiacyjny lub • Bezpośrednie chłodzenie wodą (Quench)
Kierunek zastosowania gazu syntezowego	<ul style="list-style-type: none"> • Energia elektryczna • Produkty chemiczne 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia elektryczna • Produkty chemiczne 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia elektryczna 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia elektryczna • Produkty chemiczne
Zakres oferty	<ul style="list-style-type: none"> • Wyspa zgazowania • Oczyszczanie gazu (odsiarczanie-własna technologia, odzysk siarki) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wyspa zgazowania • Turbina gazowa 	<ul style="list-style-type: none"> • Wyspa zgazowania • Pełny układ IGCC 	<ul style="list-style-type: none"> • Wyspa zgazowania • Turbina gazowa

1 - reaktor o wydajności 3600 t/d w fazie rozwoju.

produkcji energii IGCC (*Integrated Gasification Combine Cycle*).

■ Stan rozwoju technologii zgazowania

Dynamiczny rozwój technologii zgazowania został zapoczątkowany w drugiej połowie XX w., a kolejne wyraźne przyspieszenie rozwoju nastąpiło w latach 2009-2010, co było związane z inwestycjami w Chinach. Potwierdzają to publikowane dane dotyczące okresu 2013-2010, w którym nastąpił 48% wzrost produkcji gazu procesowego [4]. Przy uwzględnieniu zdolności produkcyjnych instalacji budowanych i planowanych, wzrost produkcji w odniesieniu do danych z 2010 r. wyniósł odpowiednio 137% i 256% [4]. W tab. 2 przedstawiono zestawienie liczby reaktorów zgazowania dla kolejnych aktualizacji baz danych dotyczących przemysłowych układów zgazowania na świecie [4].

Analiza obecnego stanu rozwoju przemysłowych układów zgazowania prowadzi do następujących stwierdzeń [4]:

- Zwiększa się wydajność produkcyjna nowo powstających i planowanych instalacji zgazowania. Oprócz wzrostu wydajności jednostkowej reaktorów obecnie budowane i planowane instalacje osiągają swoje zdolności produkcyjne przez integrację reaktorów zgazowania.
- Najbardziej intensywny rozwój technologii zgazowania występuje w regionie Azji i Australii. Oprócz Chin, na uwagę zasługuje dynamiczny rozwój technologii w Indiach, Malezji, Japonii i Korei Południowej.
- Głównym produktem w obecnie pracujących i planowanych instalacjach zgazowania są substancje chemiczne. Ocenia się, że 25% światowej produkcji amoniaku i 30% światowej produkcji metanolu wytwarzane jest przy wyko-

rzystaniu procesów zgazowania. Renesans przeżywa również koncepcja produkcji Syntetycznego Gazu Ziemnego (SNG).

- Nie potwierdziły się przewidywania z 2010 r. dotyczące rozwoju instalacji IGCC w USA, gdzie pojawienie się dostępnych złóż gazu łupkowego zmieniło radykalnie uwarunkowania rynkowe.
- Obecnie liderem w zakresie rozwoju układów produkcji energii wydaje się Japonia (NEDO, MHPS - Mitsubishi Hitachi Power Systems, Osaki Cool Gen Corporation), gdzie intensywnie rozwijana jest technologia IGCC, również przy uwzględnieniu opcji separacji CO₂ oraz koncepcji integracji układu z ogniwami paliwowymi.
- Węgiel dominuje, jako surowiec do procesów zgazowania.
- Oprócz technologicznych liderów rynku, takich jak Shell, GE/Texaco, Lurgi, ECUST U-GAS, MHPS, po-

Tab. 2. Zestawienie instalacji i reaktorów zgazowania, lata 1999-2013 [4]

Rok aktualizacji	Układy istniejące, instalacje / reaktory zgazowania	Układy budowane, instalacje / reaktory zgazowania	Układy planowane, instalacje / reaktory zgazowania	Układy istniejące, GWth	Układy budowane, GWth	Układy planowane, GWth
1999	128/366	b.d.	33/48	42,7	b.d.	18,2
2001	131/409	b.d.	32/59	43,3	b.d.	24,5
2004	117/385	b.d.	38/66	43,0	b.d.	25,3
2007	144/427	b.d.	10/34	56,2	b.d.	36,5
2010	192/405	11/17	37/76	70,8	10,9	40,4
2013	234/618	61/202	98/550	104,7	63,4	84,0

jawily się nowe, opracowane m.in. w Chinach i Japonii technologie (CECO - Changzheng Engineering, MCSG - Northwest Research, SEDIN, EAGLE).

■ Układy IGCC

Koncepcja zastosowania technologii zgazowania węgla najlepiej uwiadcza się w zintegrowanym układzie gazowo-parowym (IGCC), polegającym na zgazowaniu węgla do paliwa gazowego, które po oczyszczeniu spalane jest w turbinie gazowej. Ciepło odpadowych spalin wykorzystywane jest do generacji pary napędzającej turbinę parową. Najważniejsze elementy tego układu to układ separacji powietrza (ASU - Air Separation Unit), wyspy zgazowania, instalacja schładzania

i oczyszczania gazu, turbina gazowa i turbina parowa z kotłem odzysknicowym (HRSG - Heat Recovery Steam Generator). Produktami ubocznymi systemu IGCC są żużel oraz siarka lub kwas siarkowy. Przykładowy schemat blokowy układu IGCC w przedstawiono na rys. 2. Przykładami układów IGCC pracujących komercyjnie są instalacje Duke Energy (580 MWe, GE) czy starsze układy: Wabash River (262 MWe, U-GAS/CB&I), Tampa Electric (250 MWe, GE) oraz Nakoso (250 MWe, MHPs).

Do podstawowych zalet takiego rozwiązania należą:

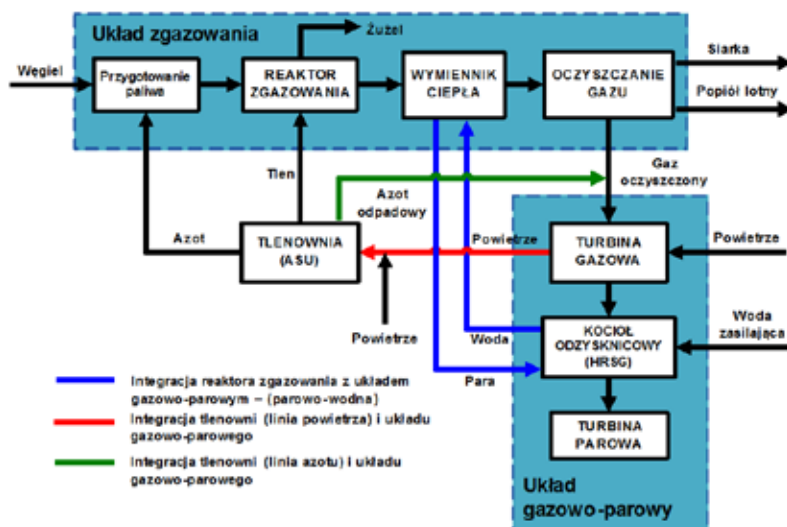
- wysoka sprawność generacji energii elektrycznej;
- wysoka elastyczność ze względu na paliwo (m.in. różnorodne sortymenty węgla);

- pozostałości po rafinacji ropy oraz biomasa z możliwością automatycznego przełączenia się na olej lub gaz ziemny;
- niezwykle niskie poziomy emisji substancji szkodliwych do środowiska.

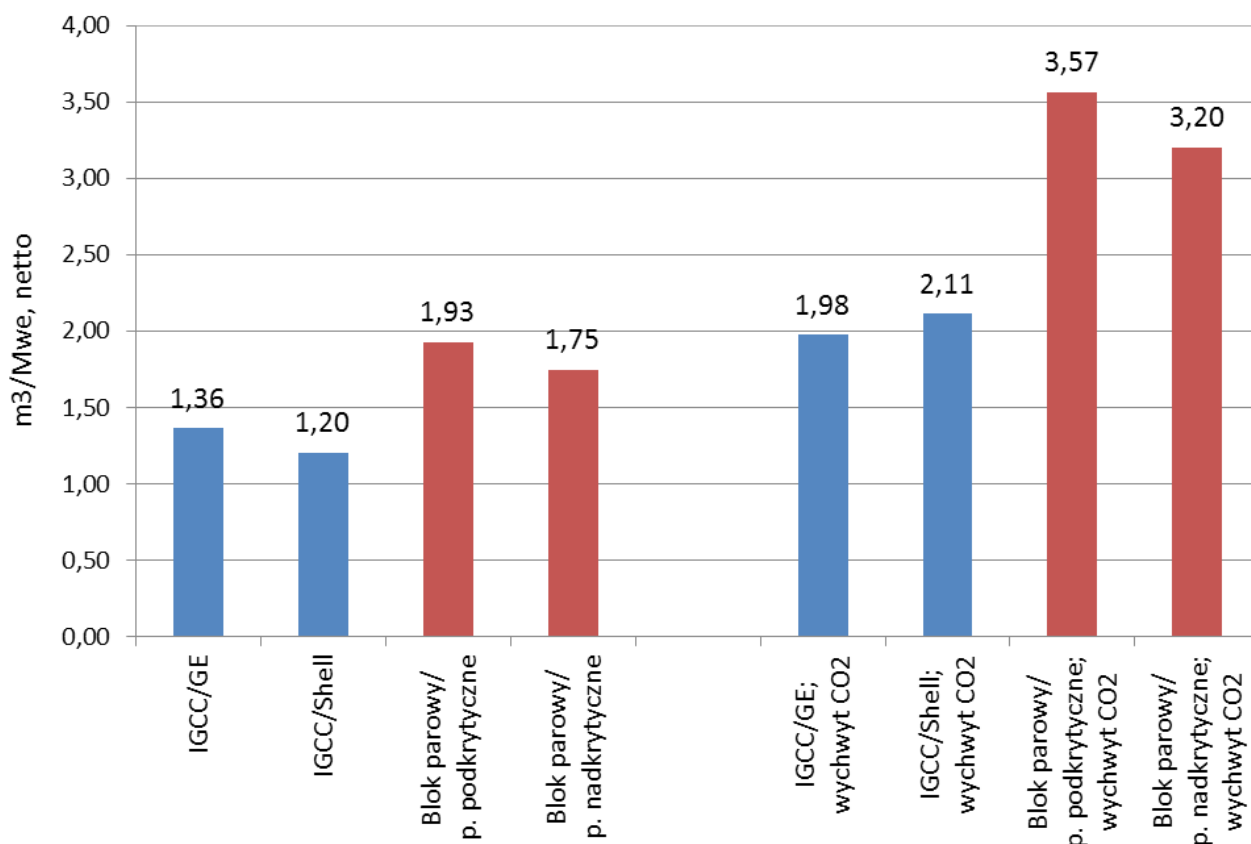
Szczególnie istotny wydaje się potencjał technologii w zakresie minimalizacji oddziaływania technologii na środowisko naturalne, w tym możliwość usuwania CO₂, przy mniejszych stratach sprawności wytwarzania energii elektrycznej (niż w przypadku klasycznych technologii spalania). Dotyczy to również usuwania rtęci. Dodatkowo w przypadku układów IGCC możliwe jest istotne (20-40%) obniżenie zużycia wody w stosunku do układów tradycyjnych (rys. 3).

Obecnie funkcjonujące układy IGCC charakteryzują się sprawnością netto produkcji energii elektrycznej na poziomie 42%, przy wysokiej sprawności brutto na poziomie 50% (bez wychwytu CO₂). Główną przyczyną tak wyraźnego spadku sprawności jest wysoka energochłonność procesu, związana przede wszystkim z produkcją tlenu w układach separacji kriogenicznej. Zużycie energii na potrzeby produkcji tlenu stanowi, aż 80% potrzeb własnych układów IGCC (rys. 4). Dlatego jednym z podstawowych kierunków poprawy ogólnej sprawności instalacji IGCC jest rozwój nowych technologii produkcji tlenu oraz wykorzystywanie w procesie zgazowania mieszanek powietrzno-tlenowych.

Należy podkreślić, że w przypadku technologii IGCC istnieje duży poten-



Rys. 2. Schemat układu zgazowania węgla zintegrowanego z układem gazowo-parowym [5]



Rys. 3. Względne zużycie wody w układach produkcji energii [6]

cjał rozwojowy związany z możliwością poprawy sprawności, a wynikający m.in. z możliwości obniżenia energochłonności procesu (produkcja tlenu) oraz z rozwoju technologii zgazowania i turbin gazowych. Możliwości poprawy sprawności układu IGCC przedstawiono w tab. 3. Jako wartość odniesienia przyjęto sprawność referencyjną układu przy zastosowaniu wychwyłtu CO₂.

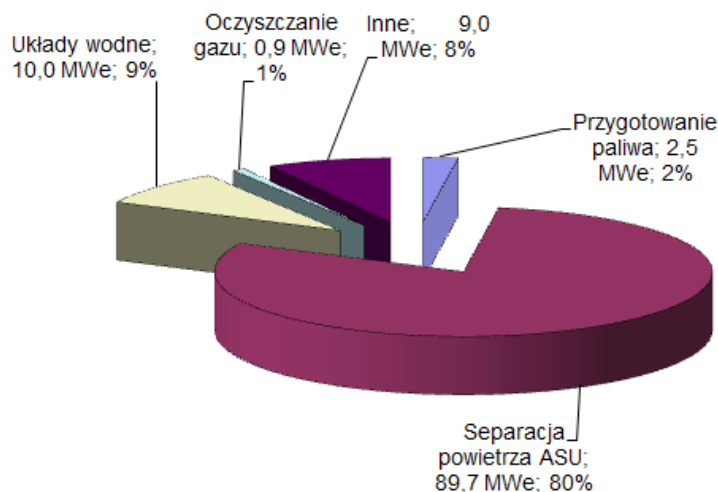
Przedstawione nowe technologie mogące przyczynić się do wyraźnego wzrostu sprawności rozwijane są m.in. w ramach koordynowanych przez amerykański Departament Energii programach B+R i dotyczących technologii zgazowania.

W krótkiej perspektywie czasowej, duże zainteresowanie w zakresie rozwoju technologii IGCC, budzą nowe inwestycje realizowane w Japonii i ba-

zużące na technologii MHPS. W rozwiązaniu proponowanym przez MHPS proces zgazowania realizowany jest w reaktorze zawieszonym (dyspersyjnym) z suchym doprowadzeniem paliwa. Czynnikiem zgazującym jest powietrze, co powoduje, że zdecydowanie maleje zużycie własnej energii elektrycznej i w konsekwencji rośnie sprawność generacji. Reaktor podzielony jest na dwie strefy, do których oddzielnie dozwany jest węgiel: strefę spalania, gdzie wytwarzane jest ciepło dla endotermicznych reakcji zgazowania zachodzących w drugiej strefie zgazowania. Reaktor jest zintegrowany z wysokotemperaturowym wymiennikiem ciepła (produkcja pary). Technologia MHPS dedykowana jest do produkcji energii elektrycznej w układach IGCC. W chwili obecnej po pozytywnych wynikach uzyskanych w układzie demonstracyj-

nym Nakoso planowana jest budowa dwóch układów IGCC klasy 500 MWe (480 MWe netto) w Japonii o gwarantowanej sprawności netto 48%. Powodzenie tej inwestycji zarówno z punktu widzenia sprawności procesu, jak i jego ekonomiki produkcji, może przyczynić się do rozpowszechnienia technologii, również w naszym kraju.

Przełom w postrzeganiu technologii zgazowania, jako elementu układu produkcji energii może dokonać się poprzez demonstrację w skali przemysłowej układów zgazowania węgla z ogniwami paliwowymi. Układ taki pozwala ograniczyć emisję CO₂ do poziomu 550 g/kWh. Zaawansowane prace w tym zakresie realizowane są m.in. w Japonii przy wykorzystaniu nowej technologii zgazowania w reaktorze dyspersyjnym EAGLE [8]. Prace w tym obszarze koordynowane są



Rys. 4. Zużycie energii elektrycznej na potrzeby własne z podziałem na główne węzły technologiczne. Układ IGCC, moc brutto 748 MWe. Technologia zgazowania Shell (bez wychwytu CO₂) [6]

przez NEDO (*New Energy and Industrial Technology Development Organization*). Perspektywę czasową rozwoju technologii przedstawia rys. 5.

■ Podsumowanie

Stosunkowo tani i długoterminowy dostęp do węgla jest podstawą bezpie-

czeństwa energetycznego i surowcowego dla przemysłu chemicznego. Wykryzysanie węgla dla potrzeb przemysłu chemicznego można rozdzielić na dwa główne kierunki:

- Produkcja wodoru, dla przemysłu nawozów azotowych;
- Zgazowanie poligeneracyjne, wiążące wytwarzanie energii elektrycznej z produkcją chemiczną ukierunkowaną na wodor, metanol, olefiny, paliwa silnikowe, względnie substytut gazu ziemnego.

Kierunki te są przedmiotem zainteresowania Grupy Azoty SA.

W przypadku energetyki wymagania środowiskowe dotyczące emisji pyłu, NO_x, SO_x, rozszerzają się na emisję rtęci oraz ditlenku węgla. Jednocześnie coraz droższym składnikiem kosztów operacyjnych staje się woda technologiczna. Z tego powodu technologia zgazowania, oferująca zarówno mniejsze zużycie wody jak i łatwiejszą oraz tańszą eliminację zanieczyszczeń, jest bardzo atrakcyjna. Dodatkowo nowe rozwią-

Tab. 3. Potencjał nowych technologii dla poprawy sprawności i obniżenia kosztów produkcji w układach IGCC. Układ IGCC z wychwytem CO₂ [7]

Technologia/działanie	Sprawność (% HHV)	Przyrost sprawności* (pkt. %)	Całkowite koszty instalacji** (USD/kW)	Przyrost całkowitych kosztów instalacji** (USD/kW)	Koszt energii (cent/kWh)	Przyrost* kosztu energii (cent/kWh)
Referencyjny IGCC	30,4	0	2 718	0	11,48	0
Turbina klasy „F”	31,7	1,3	2 472	- 246	10,64	- 0,84
Sucha pompa paliwa (dozowanie)	32,5	0,8	2 465	- 7	10,54	- 0,10
Współczynnik wykorzystania mocy 85%	32,5	0,0	2 465	0	10,14	- 0,40
Gorące oczyszczanie gazów/Selexol	33,3	0,8	2 425	- 40	10,00	- 0,14
Gorące oczyszczanie gazów/membrana wodorowa	36,2	2,9	2 047	- 378	8,80	- 1,20
Zaawansowana turbina wodorowa, poziom 1	38,0	1,8	1 855	- 192	8,14	- 0,66
Membrana jonowa - produkcja O ₂	38,3	0,3	1 724	- 131	7,74	- 0,40
Zaawansowana turbina wodorowa, poziom 2	40,0	1,7	1 683	- 41	7,61	- 0,13
Współczynnik wykorzystania mocy 90%	40,0	0,0	1 683	0	7,36	- 0,25
Razem		+9,6 pkt. % (+32%)		- 1 035(- 38%)		- 4,12 (- 36%)
Zgazowanie węgla zintegrowane z ogniwami paliwowymi	56,3	+26% pkt. % +85%	1 759	- 959 (- 35%)	- 959 (- 35%)	- 4,03 (- 35%)

* - wzrost w stosunku do poprzedniej konfiguracji, ** - Całkowite koszty instalacji odnoszą się do 2007 r. (styczeń)

zania oferowane na rynku gwarantują bardzo wysokie sprawności wytwarzania energii elektrycznej, a w przyszłości osiągnięcie emisji CO₂ na poziomie 550 g/kWh. W chwili obecnej zainteresowana wdrożeniem układu IGCC na rynku krajowym jest ENEA SA.

Czynnikami decydującym o rozwoju technologii IGCC będą aspekty finansowe, w tym koszty wdrożenia i niezawodność działania. Rozwój technologii IGCC na przykładzie doświadczeń Japonii wskazuje, na jej ogromny potencjał, poczynając od rozwiązań już dostępnych komercyjnie, a kończąc na wysoko-sprawnych układach wykorzystujących ogniwa paliwowe.

□

Literatura:

1. Chmielniak T., Sciazko M.: *Co-gasification of biomass and coal for methanol syn-*

thesis. Applied Energy, Vol. 74, 2003, p. 393-403.

2. Sciazko M., Chmielniak T.: *Cost Estimates of Coal Gasification for Chemicals and Motor Fuels, [in:] Yongseung Yun (ed.): Gasification for Practical Applications, Intech (2012). DOI: 10.5772/48556, http://www.intechopen.com/books/gasification-for-practical-applications/cost-estimates-of-coal-gasification-for-chemicals-and-motor-fuels.*

3. Chmielniak T.: *Badania symulacyjne technologii wytwarzania wodoru w aspekcie emisji CO₂ w cyklu - wydobywanie, transport i przetwórstwo węgla, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014, ISBN 978-83-7880-143.*

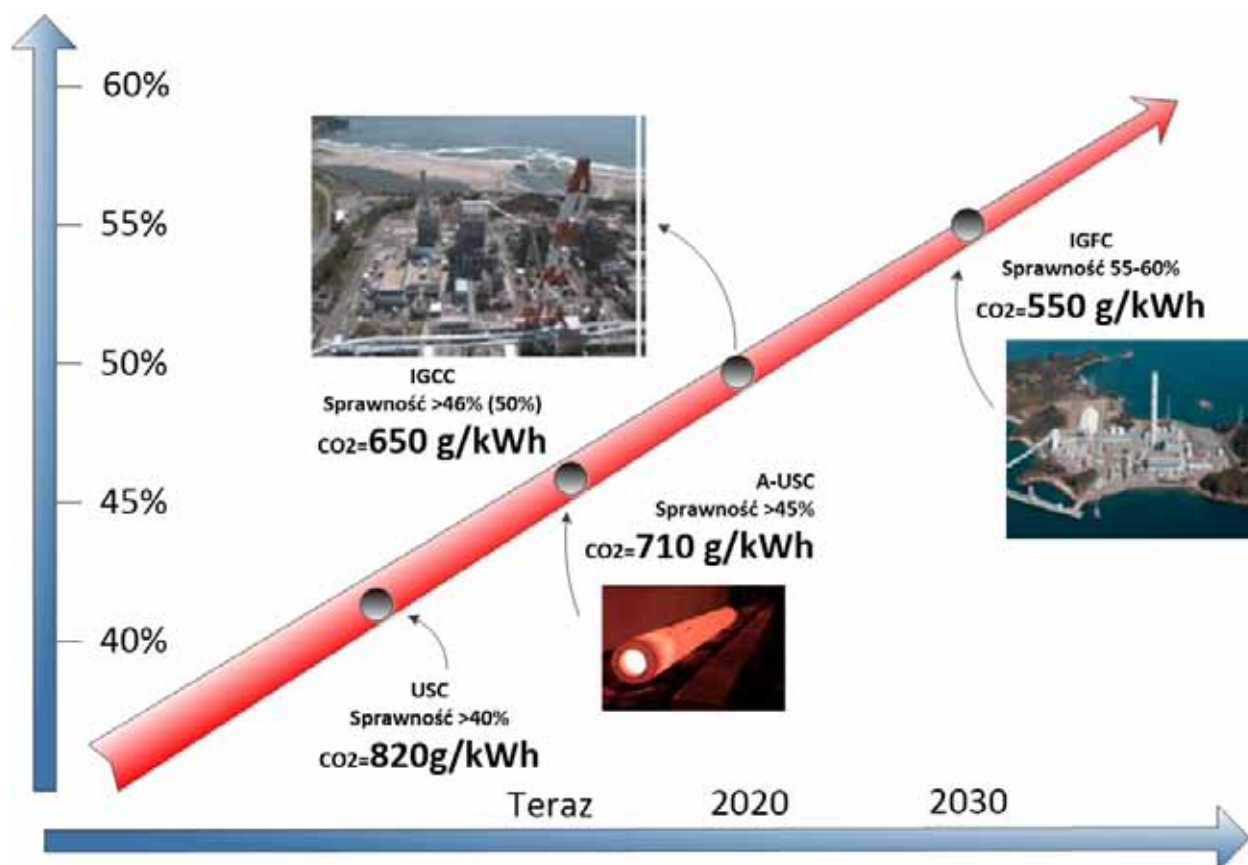
4. Higman C.: *State of the Gasification Industry - the Updated Worldwide Gasification Database. Gasification Technology Conference, Colorado Springs, 2013.*

5. 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.*

6. *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity, Revision 2, November 2010; DOE/NETL-2010/1397.*

7. *Current and Future Technologies for Gasification-Based Power Generation, Volume 2: A Pathway Study Focused on Carbon Capture Advanced Power Systems R&D Using Bituminous Coal, October 7, 2010; DOE/NETL-2009/1389.*

8. Hiroshi SANO: *NEDO's Clean Coal Technology Development for reduction of CO₂ emissions; NEDO, 12. 6. 2016.*



Rys. 5. Perspektywa czasowa rozwoju technologii zgazowania węgla dla zastosowań w energetyce [8]