

Maciej MAZURKIEWICZ\*, Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK\*\*\*\*,  
Eugeniusz MOKRZYCKI\*\*\*\*\*, Zbigniew PIOTROWSKI\*\*, Radosław POMYKAŁA\*\*\*

## Metody separacji i wychwytywania CO<sub>2</sub>

STRESZCZENIE. Sekwestracja ditlenku węgla jako jedna z możliwości ograniczenia jego emisji polega na separacji, wychwyceniu oraz składowaniu lub utylizacji CO<sub>2</sub>. Autorzy starali się krótko przedstawić dwa pierwsze etapy sekwestracji: oddzielanie i wychwytywanie CO<sub>2</sub>. W artykule przedstawiono najważniejsze metody separacji CO<sub>2</sub>, a więc: procesy absorpcji, adsorpcji, metoda rozdzału przy zastosowaniu membran oraz metoda kriogeniczna. Scharakteryzowano również najważniejsze metody wychwytywania CO<sub>2</sub>: wychwytywanie przed spalaniem, wychwytywanie po spalaniu, tlenowe spalanie, wychwytywanie z paliwa oraz zastosowanie ogniwi paliwowych.

SŁOWA KLUCZOWE: ditlenek węgla, separacja CO<sub>2</sub>, wychwytywanie CO<sub>2</sub>

## Wprowadzenie

Ograniczenie antropogenicznej emisji ditlenku węgla mającej znaczący wpływ na występowanie efektu cieplarnianego jest jednym z najważniejszych problemów do rozwiązania w dziedzinie szeroko pojętej ochrony środowiska.

---

\* Prof. dr hab. inż., \*\* Dr inż., \*\*\* Mgr inż., — Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Ekologii Terenów Górniczych, Kraków; e-mail: mazur@agh.edu.pl

\*\*\*\* Dr inż., \*\*\*\*\* Prof. dr hab. inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: aub@min-pan.krakow.pl, mokrzy@min-pan.krakow.pl

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Anna MARZEC

Ditlenek węgla jest emitowany do atmosfery w formie spalin tj. mieszanin z innymi składnikami (głównie  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  oraz cząstkami stałymi) pod ciśnieniem bliskim atmosferycznemu i w podwyższonej temperaturze (Meisen, Shuai 1997).

Istnieje wiele metod oddzielania  $CO_2$  ze spalin. Podstawowymi technologiami, które mogą być stosowane do oddzielania  $CO_2$  ze spalin emitowanych z dużych źródeł przemysłowych są: absorpcja (chemiczna i fizyczna), adsorpcja, separacja membranowa, kriogenika, które krótko scharakteryzowano w niniejszym artykule.

Systemy wychwytywania  $CO_2$  ze spalin zostały podzielone na pięć grup (Göttlicher, Pruszek 1997; Termochemiczne... 2003):

1. Grupa obejmująca procesy separacji  $CO_2$  z paliwa gazowego lub gazu syntezowego przed procesem spalania.
2. Grupa zawierająca procesy, w których paliwo jest spalane w atmosferze tlenu wymieszanego z ponownie wprowadzonym do obiegu  $CO_2$  lub parą wodną.
3. Grupa zawierająca wszystkie rodzaje systemów wytwarzania mocy opartych na spalaniu paliw kopalnych, w których  $CO_2$  jest usuwane ze spalin.
4. Grupa zawierająca procesy w których pierwiastek węgiel jest oddzielany z paliwa przed spalaniem, (np. proces o nazwie Hydrocarb),
5. Grupa procesów do oddzielania  $CO_2$  wykorzystująca ogniwa paliwowe.

## Oddzielanie $CO_2$

### Absorpcja

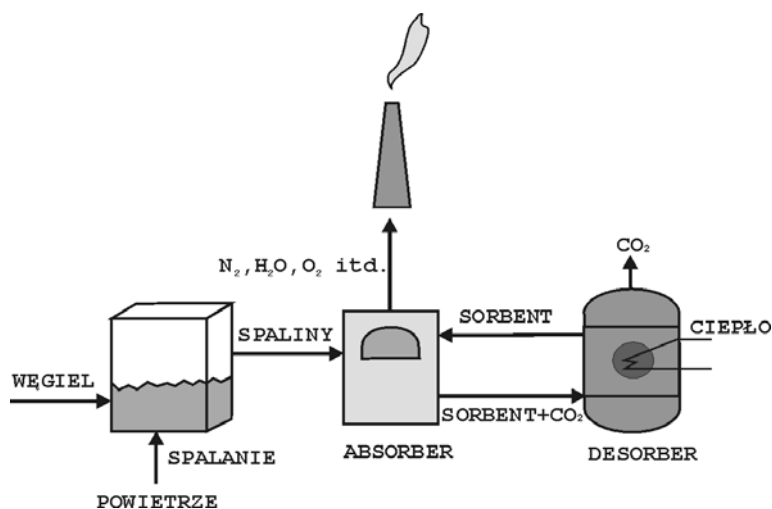
Najczęściej stosowaną metodą oddzielania  $CO_2$  ze spalin jest absorpcja chemiczna. W metodzie tej osiągany jest wysoki stopień usunięcia i wysoka czystość usuwanego  $CO_2$  (Göttlicher, Pruszek 1997). Absorpcja może odbywać się na drodze fizycznej i chemicznej.

Procesy absorpcji fizycznej i chemicznej są szeroko stosowane do wychwytywania ditlenku węgla w petrochemii oraz przemyśle chemicznym.

Proces absorpcji polega na przepuszczaniu schłodzonych i wstępnie oczyszczonych spalin (usuwane jest  $SO_2$ ) przez kolumnę absorpcyjną, gdzie dochodzi do kontaktu z rozpuszczalnikiem, który absorbuje większość  $CO_2$ . Bogaty w  $CO_2$  rozpuszczalnik jest przepuszczany przez desorber gdzie uwalniany jest ditlenek węgla. Następnie  $CO_2$  jest sprężany i oczyszczany (Herzog, Golomb). W wyniku zastosowania metody absorpcji,  $CO_2$  otrzymywane jest w postaci gazu (Carbon... 1992). Schemat separacji ditlenku węgla metodą absorpcji został przedstawiony na rysunku 1.

Zazwyczaj w procesach absorpcji chemicznej stosowane są aminy (monoetyloamina MEA, dietyloamina DEA), wodny roztwór amoniaku lub kwaśnego węglanu potasu.

Proces absorpcji chemicznej wymaga ciepła na regenerację, która zależy od stężenia rozpuszczalnika (Göttlicher, Pruszek 1997). Przy wysokim ciśnieniu chemiczna absorpcja



Rys. 1. Schemat oddzielenia CO<sub>2</sub> z zastosowaniem procesu absorpcji  
 Źródło: Abanades, Moliner 2002

Fig. 1. Scheme of CO<sub>2</sub> separation by using absorption process

wymaga energii w ilości około 0,11 kW·h/kg CO<sub>2</sub> (Shell... 1990), przy niskim ciśnieniu około 0,34 kW·h/kg CO<sub>2</sub> (Smelser i in. 1991).

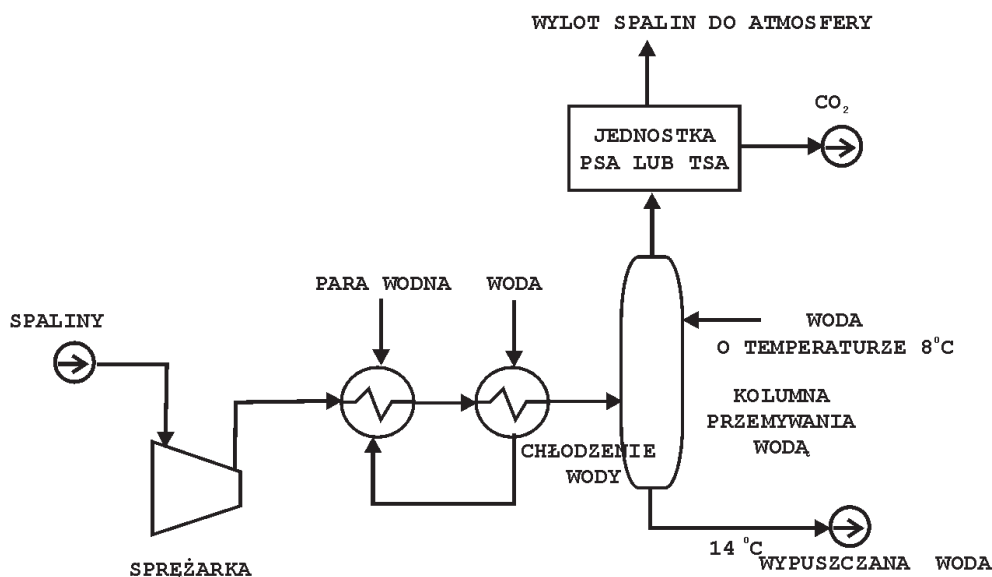
W procesie absorpcji fizycznej, CO<sub>2</sub> może być fizycznie absorbowane przez rozpuszczalnik zgodnie z prawem Henry'ego i regenerowany poprzez redukcję ciśnienia i wzrost temperatury (jednoczesną zmianą obydwu parametrów lub jednego z nich). W przypadku stosowania absorpcji fizycznej stosowane są systemy oparte na technologiach firmowych (opatentowanych): Selexol, Rectisol i inne (Carbon... 1992).

Zapotrzebowanie na energię w procesie absorpcji fizycznej spowodowane jest sprężaniem i pompowaniem rozpuszczalnika i wynosi około 0,03 kW·h na kilogram CO<sub>2</sub> usuniętego z gazu przy wysokim ciśnieniu (Condorelli i in. 1991).

## Adsorpcja

Metoda oddzielenia CO<sub>2</sub> ze strumienia gazów na drodze adsorpcji oparta jest na fizycznym przyciąganiu pomiędzy gazem a ciałami stałymi. Schemat oddzielenia CO<sub>2</sub> metodą adsorpcji przedstawia rysunek 2. Do oddzielenia CO<sub>2</sub> na drodze adsorpcji stosowane są materiały charakteryzujące się dużą powierzchnią właściwą, takie jak: zeolity i węgiel aktywny, korund oraz żel glinowy i krzemionkowy (Thambimuthu i in. 2002).

Proces ten jest cykliczny z dwoma podstawowymi etapami: adsorpcją i odzyskiwaniem CO<sub>2</sub>. W trakcie adsorpcji gaz jest doprowadzany do warstwy stałej, która adsorbuje CO<sub>2</sub> i przepuszcza inne gazy. Po zaadsorbowaniu na warstwie, gaz jest kierowany do innej czystej warstwy adsorbującej, a warstwa wypełniona jest odzyskiwana poprzez usunięcie z niej CO<sub>2</sub>.



Rys. 2. Schemat oddzielania CO<sub>2</sub> z zastosowaniem procesu adsorpcji  
Źródło: Carbon... 1992

Fig. 2. Scheme of CO<sub>2</sub> separation by using adsorption process

Stosowane są trzy rodzaje adsorpcji do oddzielania CO<sub>2</sub> (Thambimuthu i in. 2002):

- ✧ zmiennociśnieniowa (PSA — *Pressure Swing Adsorption*) adsorbent jest regenerowany przez zmniejszanie ciśnienia),
- ✧ zmiennotemperaturowa (TSA — *Temperature Swing Adsorption*) adsorbent jest regenerowany przez podnoszenie jego temperatury,
- ✧ zmiennielektryczna (ESA — *Electric Swing Adsorption*) regeneracja następuje poprzez przepuszczanie niskonapięciowego prądu elektrycznego przez adsorbent.

Zużycie energii przy wychwytywaniu CO<sub>2</sub> metodą adsorpcji wynosi 0,16–0,7 kW·h/kg CO<sub>2</sub> w zależności od koncentracji CO<sub>2</sub> w gazie doprowadzonym (Göttlicher, Pruschek 1997).

## Separacja membranowa

Rozdzielanie gazów na membranach litych polega na różnicach we wzajemnych fizykochemicznych i chemicznych oddziaływaniach pomiędzy składnikami mieszaniny gazów a materiałem membrany. Zjawisko to spowodowane jest różnicą w szybkości przenikania składników gazu przez membranę (Thambimuthu i in. 2002). Jeden ze składników gazu rozpuszcza się w materiale z którego jest membrana i następnie dyfunduje przez membranę na drugą stronę. Membrana dzieli więc spaliny na strumień przenikający i strumień zatrzymany.

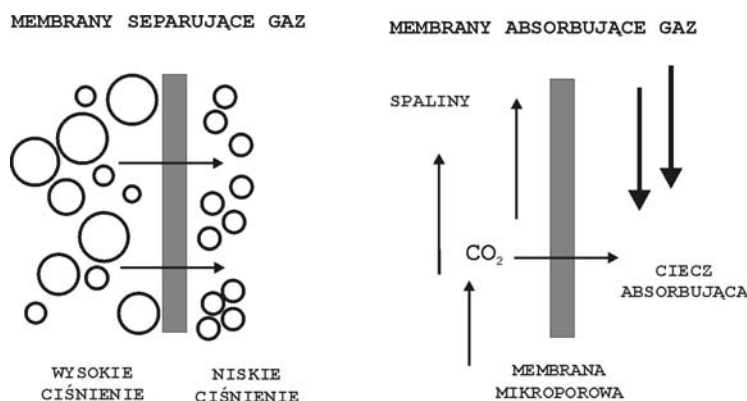
Absorpcyjne membrany gazowe są mikroporowatymi ciałami stałymi, które umożliwiają przeniesienie jednego ze składników gazowych do cieczy absorbującej ten składnik. Oddzielenie jest spowodowane obecnością cieczy absorbującej po jednej stronie membrany, która selektywnie usuwa pewne składniki ze strumienia gazów cyrkulujących po drugiej stronie membrany. CO<sub>2</sub> przenika przez pory membrany i ulega rozpuszczaniu w cieczy absorpcyjnej takiej jak np. monoetyloamina.

Obecnie dostępne są różne typy membran: porowate nieorganiczne, palladowe, polimerowe i wykonane z zeolitów. Ponieważ pojedyncze membrany nie prowadzą do wysokiego stopnia separacji, stosuje się układy wielostopniowe (Carbon... 1992).

W przypadku wychwytywania CO<sub>2</sub> stosowane są dwa rodzaje membran: membrany separujące gaz (ceramiczne i polimerowe) i membrany absorbujące gaz. Schemat ideowy oddzielania CO<sub>2</sub> ze spalin metodą separacji membranowej przedstawiono na rysunku 3.

W wyniku zastosowania membran, CO<sub>2</sub> otrzymywane jest w postaci gazu.

Zużycie energii w tej metodzie wynosi od 0,04 do 0,07 kW·h/kg CO<sub>2</sub> (Göttlicher, Pruszek 1997).



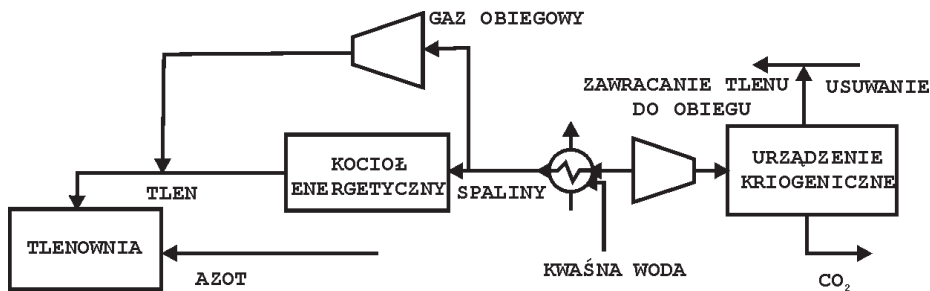
Rys. 3. Schemat oddzielania CO<sub>2</sub> przez membrany  
Źródło: Carbon... 1992

Fig. 3. Scheme of CO<sub>2</sub> separation by using membranes

## Metoda kriogeniczna

Metoda kriogeniczna polega na sprężaniu i schładzaniu gazu do temperatury około -56°C, a następnie wydzielaniu CO<sub>2</sub> w postaci ciekłej (Marzec 2001). Selektywność procesu frakcjonowania kriogenicznego wynika z różnych warunków kondensacji poszczególnych składników spalin (Termochemiczne... 2003).

Zużycie energii w metodzie kriogenicznej w przypadku wydzielania CO<sub>2</sub> ze spalin wynosi około 0,6 do 1 kW·h/kg CO<sub>2</sub> (Golomb i in. 1989). Schemat metody kriogenicznej oddzielania CO<sub>2</sub> przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat ideowy metody kriogenicznej oddzielania CO<sub>2</sub>  
 Źródło: Carbon... 1992

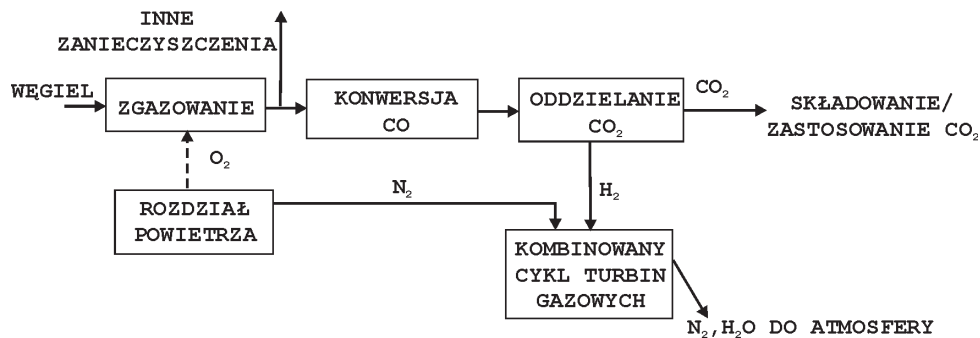
Fig. 4. Scheme of cryogenic method of CO<sub>2</sub> separation

## Wychwytywanie CO<sub>2</sub>

### Wychwytywanie przed spalaniem

Wychwytywanie CO<sub>2</sub> przed spalaniem realizowane jest w przypadku stosowania procesów zgazowania węgla oraz reformingu paliw gazowych i olejowych, umożliwiających konwersję związków węgla w paliwa, których podstawowymi składnikami są CO i H<sub>2</sub> (Termochemiczne... 2003).

Paliwo poddaje się reakcji z niedomiarem powietrza lub z parą wodną, co daje głównie tlenek węgla i wodór. Tlenek węgla reaguje z parą wodną w reaktorze katalitycznym w wyniku tej reakcji powstaje CO<sub>2</sub> i wodór. CO<sub>2</sub> jest oddzielane natomiast wodór jest stosowany jako paliwo w turbinach gazowych (Thambimuthu i in. 2002). Na rysunku 5 przedstawiono schemat ideowy wychwytywania CO<sub>2</sub> przed spalaniem.



Rys. 5. Schemat ideowy wychwytywania CO<sub>2</sub> przed spalaniem  
 Źródło: Bill 2002

Fig. 5. Scheme of precombustion CO<sub>2</sub> capture

W procesach wychwytywania przed spalaniem do separacji CO<sub>2</sub> mogą być wykorzystane metody: absorpcji, adsorpcji, separacji membranowej oraz kriogeniczne (Termochemiczne... 2003).

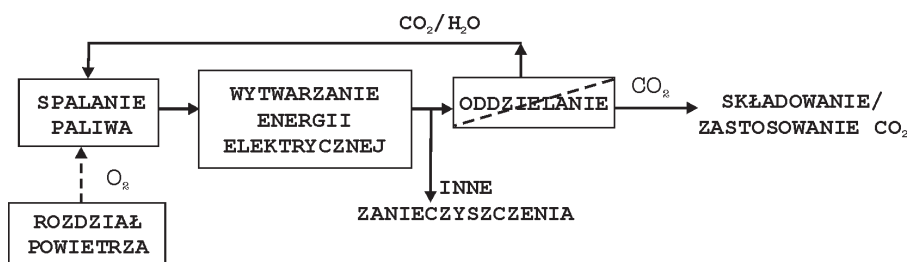
W przypadku wychwytywania CO<sub>2</sub> przed procesem spalania, spadek sprawności układu wynosi 4 do 7,4% dla IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) z konwersją CO przy sprawności usuwania CO<sub>2</sub> wynoszącej 80–90% oraz około 14,5% w przypadku stosowania GTCC (*Gas Turbine Combined Cycle*) z reformowaniem pary wodnej (Göttlicher, Pruszek 1997).

## Tlenowe spalanie węgla

Tlenowe spalanie węgla polega na zastosowaniu powietrza znacznie wzbogaconego w tlen dzięki uprzedniemu usunięciu żelaza azotu.

W technologii tlenowego spalania w celu obniżenia temperatury paleniska oraz zwiększenia koncentracji CO<sub>2</sub> stosuje się recyrkulację części spalin (złożonych głównie z CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>) (Thambimuthu i in. 2002).

Na rysunku 6 przedstawiono schemat ideowy wychwytu CO<sub>2</sub> w procesach tlenowego spalania węgla.



Rys. 6. Schemat ideowy wychwytywania CO<sub>2</sub> z zastosowaniem tlenowego spalania węgla  
Źródło: Bill 2002

Fig. 6. Scheme of CO<sub>2</sub> capture with oxygen coal combustion

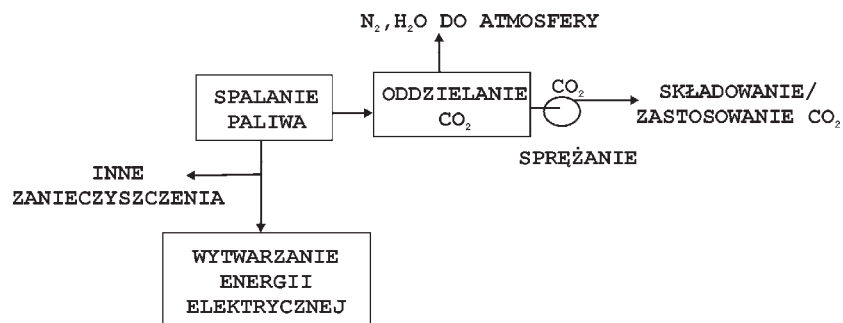
W przypadku stosowania tlenowego spalania węgla spadek sprawności układu wynosi 4,8–8,5% w przypadku układów IGCC, natomiast w przypadku systemów energetycznych spalających gaz ziemny około 6% (Göttlicher, Pruszek 1997).

## Wychwytywanie CO<sub>2</sub> po spalaniu

Technologia wychwytywania CO<sub>2</sub> po spalaniu polega na usuwaniu CO<sub>2</sub> ze spalin. Przebieg procesu wychwytywania nie ma wpływu na procesy spalania paliwa, jednak energia potrzebna do usuwania CO<sub>2</sub> pobierana jest z procesów produkcji energii elektrycznej (Lyngfelt, Leckner 1999).

Pod wieloma względami wychwytywanie CO<sub>2</sub> po spalaniu jest podobne do techniki odsiarczania spalin (FGD— *Flue Gas Desulphurisation*) (Thambimuthu i in. 2002).

Na rysunku 7 przedstawiono schemat ideowy wychwytywania CO<sub>2</sub> po spalaniu.



Rys. 7. Schemat ideowy wychwytywania CO<sub>2</sub> po spalaniu

Źródło: Bill 2002

Fig. 7. Scheme of postcombustion CO<sub>2</sub> capture

Najczęściej stosowaną metodą separacji CO<sub>2</sub> ze spalin, jest wmywanie CO<sub>2</sub> w procesie absorpcji chemicznej przy wykorzystaniu monoetyloaminy (MEA).

Obniżenie sprawności energetycznej przy zastosowaniu wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania wynosi 8–11% w przypadku sprawności usuwania wynoszącej 80–90% dla elektrowni spalających węgiel. W przypadku stosowania paliwa gazowego obniżenie sprawności energetycznej przy zastosowaniu wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania 5,5–11% (Göttlicher, Pruscek 1997).

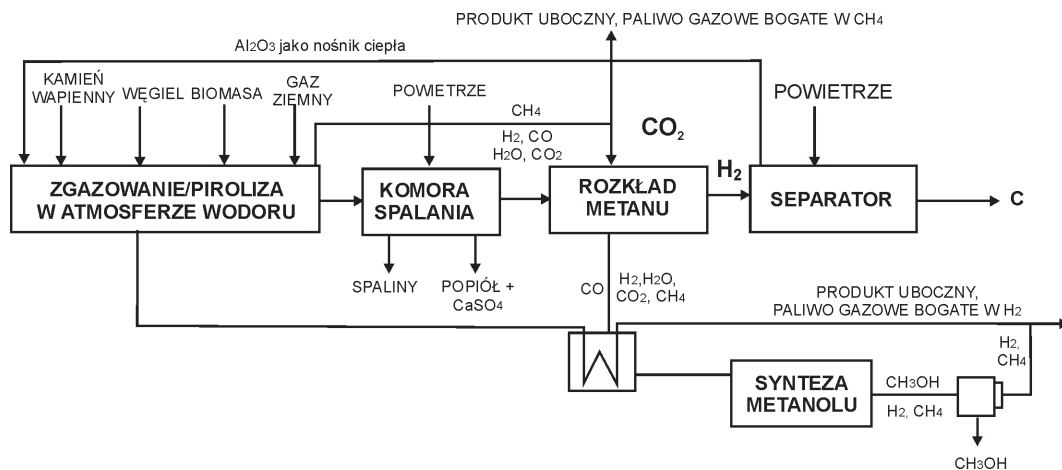
## Wychwytywanie CO<sub>2</sub> z paliwa

Procesy takie jak Hydrocarb mają na celu separację pierwiastka węgla z paliwa (Göttlicher, Pruscek 1997). Proces Hydrocarb polega na zgazowaniu wodorem paliwa wejściowego, rozkładzie metanu oraz syntezie metanolu. Redukcja CO<sub>2</sub> polega na wykorzystaniu procesu Hydrocarb do produkcji paliw czystych (wodór) lub o małej zawartości węgla (metanol) (Termochemiczne... 2003). Największa sprawność konwersji procesu Hydrocarb wynosząca 60,9% osiągnięta jest w przypadku stosowania mieszaniny biomasy i gazu ziemnego (Göttlicher, Pruscek 1997). Schemat procesu Hydrocarb został przedstawiony na rysunku 8.

## Redukcja emisji poprzez zastosowanie ogniwo paliwowych

Przy zastosowaniu ogniwo paliwowych ditlenek węgla może być separowany zarówno z paliwa gazowego jak i spalin, w podobny sposób jak w przypadku procesów spalania. Zaletą ogniwo paliwowych jest to, że gazy odlotowe po stronie paliwa zawierają tylko





Rys. 8. Schemat ideowy procesu Hydrocarb  
 Źródło: Göttlicher, Pruszek 1996; Steinberg, Grohse 1991; Termochemiczne... 2003

Fig. 8. Scheme of Hydrocarb process

nieprzetworzone paliwo, wilgoć i  $\text{CO}_2$  nie są rozrzedzane przez powietrze. (Termochemiczne... 2003).

Ogniwa paliwowe dzielone są na: wysokotemperaturowe (tlenkowe (SOFC — *Solid Oxide Fuel Cells*), na stopionych węglanach (MCFC— *Molten Carbonate Fuel Cells*) oraz niskotemperaturowe (kwasowe (PAFC — *Phosphoric Acid Fuel Cells*), membranowe (PEMFC — *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), alkaliczne (AFC — *Alkaline Fuel Cell*) (Göttlicher, Pruszek 1997; Termochemiczne... 2003).

Ogniwa PAFC, MCFC lub SOFC mogą pracować przy zastosowaniu gazów uzyskanych z paliw kopalnych. Sprawność układu z zastosowaniem PAFC jest niższa niż w przypadku stosowania innych układów kombinowanych. Jednak we wszystkich trzech przypadkach zapotrzebowanie na dodatkową energię wynosi 0,05–0,11  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg CO}_2$ . Zapotrzebowanie to powoduje obniżenie całkowitej sprawności elektrowni około 1,5–4,3% w przypadku spalania węgla i 1,0–2,4% w przypadku elektrowni spalających gaz ziemny (Göttlicher, Pruszek 1997).

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd metod separacji i wychwytywania ditlenku węgla. Zastosowanie procesów oddzielania i wychwytywania  $\text{CO}_2$  w elektrowniach i elektrociepłowniach powoduje zużycie dodatkowej energii i przez to zmniejszenie sprawności energetycznej.

Dodatkowe zużycie energii w poszczególnych metodach oddzielania CO<sub>2</sub> wynosi (Göttlicher, Pruszek 1997):

- ✧ absorpcji chemicznej — przy wysokim ciśnieniu około — 0,11 kW·h/kg CO<sub>2</sub> (Shell... 1990), przy niskim ciśnieniu około 0,34 kW·h/kg CO<sub>2</sub>,
- ✧ absorpcji fizycznej — około 0,03 kW·h/kg CO<sub>2</sub>,
- ✧ adsorpcji — 0,16–0,7 kW·h/kg CO<sub>2</sub> w zależności od koncentracji CO<sub>2</sub> w gazie doprowadzonym,
- ✧ separacji membranowej — od 0,04 do 0,07 kW·h/kg CO<sub>2</sub>,
- ✧ kriogenicznej — około 0,6 do 1 kW·h/kg CO<sub>2</sub>.

Spadek sprawności energetycznej przy zastosowaniu poszczególnych metod wychwytywania wynosi (Göttlicher, Pruszek 1997):

- ✧ przed procesem spalania — 4 do 7,4% dla IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) z konwersją CO przy sprawności usuwania CO<sub>2</sub> wynoszącej 80–90% oraz około 14,5% w przypadku stosowania GTCC (*Gas Turbine Combined Cycle*) z reformowaniem pary wodnej,
- ✧ tlenowe spalanie — 4,8–8,5% w przypadku układów IGCC, natomiast w przypadku systemów energetycznych spalający gaz ziemny około 6%,
- ✧ po procesie spalania — 8–11% w przypadku sprawności usuwania wynoszącej 80–90% dla elektrowni spalających węgiel, 5,5–11% w przypadku stosowania paliwa gazowego,
- ✧ ogniwa paliwowe — 1,5–4,3% w przypadku spalania węgla i 1,0–2,4% w przypadku elektrowni spalających gaz ziemny.

Obecnie prowadzonych jest wiele projektów badawczych mających na celu udoskonalenie i obniżenie kosztów procesów separacji i wychwytywania CO<sub>2</sub>, wśród których należy wymienić projekty finansowane przez UE takie jak: GRACE, NGCAS, ENCAP.

Artykuł przygotowano w ramach projektu badawczego MNiI nr 4T12A03027

## Literatura

- [1] ABANADES J.C., MOLINER R., 2002 — Technoeconomic characterization of CO<sub>2</sub> sequestration technologies. European Commission. Joint Research Centre. Report EUR 20 391 EN.
- [2] BILL A., 2002 — Overview of techniques and approaches to CO<sub>2</sub> capture. [www.natural-resources.org](http://www.natural-resources.org)
- [3] Carbon dioxide capture from power station. IEA Technical Report. 1992. [www.ieagreen.org.uk](http://www.ieagreen.org.uk)
- [4] CONDORELLI P., SMELSER S.C., Mc CLEARY G.J., BOORAS G.S., STUART R.J., 1991 — Engineering and economic evaluation of CO<sub>2</sub> removal from fossil-fuel-fired power plants. Vol. 2: Coal Gasification Combined-Cycle Power Plants. EPRI IE-7365.
- [5] GOLOMB D., HERZOG H., TESTER J., WHITE D., ZEMBA S., 1989 — Feasibility, modelling and economics of sequestering power plant CO<sub>2</sub> emissions in deep ocean. Massachusetts Institute of Technology, Energy Laboratory, MIT-EL 89-003.

- [6] GÖTTLICHER G., PRUSCHEK R., 1996 — Concept of CO<sub>2</sub> removal from fossil-fuel based power generation systems. Research Program with financial contribution from the European Commission.
- [7] GÖTTLICHER G., PRUSCHEK R., 1997 — Comparison of CO<sub>2</sub> removal systems for fossil-fuelled power plant processes. *Energy Conversion and Management*, vol. 38, p. S73–S78.
- [8] HERZOG H., GOLOMB D. — Carbon capture and storage from fossil fuel use. [www.nrcan-rncan.gc.ca](http://www.nrcan-rncan.gc.ca)
- [9] LYNGFELT A., LECKNER B., 1999 — Technologies for CO<sub>2</sub> separation. Minisymposium on Carbon and Dioxide Capture and Storage. Göteborg.
- [10] MARZEC A., 2001 — Nadmierna emisja dwutlenku węgla towarzysząca spalaniu kopalnych surowców energetycznych i możliwości jej redukcji. Materiały XV Konferencji z cyklu: Zagadnienia surowców energetycznych w gospodarce krajowej, pt. „Stan obecny kompleksu paliwowo-energetycznego Polski i pożądane kierunki jego rozwoju w latach 2002–2030”, Zakopane, 14–17 października 2001 r. Sympozja i Konferencje nr 52. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 235–244.
- [11] MEISEN A., SHUAI X., 1997 — Research and development issues in CO<sub>2</sub> capture. *Energy Conversion and Management*, vol. 38, p. S37–S42.
- [12] Shell International Petroleum Maatschappij and Koninklijke/Shell Exploart en Productie Laboratorium, 1990 Carbon dioxide disposal from coal based combined cycle power station in depleted gas fields in Netherlands. Publikatiereeks Lucht nr 91, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Air Directorate, Leidschenhan.
- [13] SMELSER S.C., STOCK R.M., Mc CLEARY, BOORAS G.S., STUART R.J., 1991 — Engineering and economic evaluation o CO<sub>2</sub> removal from fossil-fuel-fired power plants. Vol. 1: Pulverized Coal-Fired Power Plants. EPRI IE-7365.
- [14] STEINBERG M., GROHSE E., 1991 — A feasibility study for the coprocessing of fossil fuels with biomass by Hydrocarb process. Research report EPA-600/7-91-007.
- [15] Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Praca zbiorowa pod red. M. Ściążko i H. Zielińskiego. Wyd. IChPW i IGSMiE, Zabrze-Kraków, 2003.
- [16] THAMBIMUTHU K. i in., 2002 — CO<sub>2</sub> capture and reuse. Proceedings of IPPC Workshop Carbon Capture and Storage. Regina.

Maciej MAZURKIEWICZ, Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK, Eugeniusz MOKRZYCKI,  
Zbigniew PIOTROWSKI, Radosław POMYKAŁA

## Methods for CO<sub>2</sub> separation and capture

### Abstract

Carbon dioxide's separation as one of methods of its emissions mitigation is based on CO<sub>2</sub> separation, capture and storage or utilization. Authors tried to describe shortly two first stages

of sequestration: CO<sub>2</sub> separation and capture. The article presents the most important methods of CO<sub>2</sub> separation and these are: adsorption process, absorption processes, separation by using membranes and cryogenic process. The most important methods of CO<sub>2</sub> capture were characterized: pre-combustion capture, postcombustion capture, oxyfuel combustion, capture from fuel and using fuel cells.

KEY WORDS: carbon dioxide, CO<sub>2</sub> separation, CO<sub>2</sub> capture