

*Jan Iciek\*, Krzysztof Ziemiński\*, Alicja Zawadzka\*\*, Monika Kowalska\**

## ALTERNATYWNE METODY POZYSKIWANIA ENERGII Z WĘGLA BRUNATNEGO

---

### 1. Wprowadzenie

Współcześnie, większość światowej energii pozyskiwana jest z surowców nieodnawialnych. W Polsce energię elektryczną oraz ciepłą otrzymuje się głównie w wyniku spalania węgla kamiennego i brunatnego. Uzyskuje się tą drogą 97% energii cieplnej (średnia światowa to 63%). Ponad 35% krajowej energii elektrycznej wytwarzana jest z węgla brunatnego [1].

Złóża węgla brunatnego eksploatowane są w Polsce wyłącznie metodą odkrywkową. Metoda ta powoduje liczne zagrożenia spowodowane działalnością górnictwem. Do najważniejszych zaliczyć można przekształcenie powierzchni terenu w obrębie odkrywki, zmiany hydrologiczne i hydrogeologiczne związane z odwadnianiem odkrywki, co powoduje m.in.: obniżenie poziomu wód gruntowych, wpływ na wody powierzchniowe, zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego w wyniku emisji pyłu. Obserwuje się również zagrożenia ekologiczne powstające w zakładzie energetycznym, takie jak: zanieczyszczanie powietrza atmosferycznego będące wynikiem emisji pyłu i gazów generowanych podczas spalania węgla, emisję do atmosfery znacznych ilości dwutlenku węgla oraz zanieczyszczanie termiczne wód powierzchniowych. Obecnie najtrudniejszym do rozwiązania problemem jest emisja znacznych ilości CO<sub>2</sub>. Działania podejmowane w kierunku rozwiązania tego problemu to: stosowanie nowoczesnych, niskoemisyjnych technologii spalania węgla (np. spalanie w czystym tlenie), sekwestracja CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach geologicznych [2]. Nie ulega jednak wątpliwości, że w świetle obecnej polityki Unii Europejskiej wymóg bezemisyjnego spalania znacznie podniesie koszty produkcji energii z węgla brunatnego. Rozwijane metod wykorzystania węgla (nie tylko poprzez tradycyjne spalanie) jako surowca do produkcji nośników energii, stwarzają realne szanse na znaczne zwiększenie udziału węgla w bilansie energetycznym.

---

\* Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności, Politechnika Łódzka, Łódź

\*\* Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Polityka energetyczna unii europejskiej zmierza do wykorzystywania w coraz większym stopniu niekonwencjonalnych źródeł energii. Przyjęto, iż do 2010 roku w Unii Europejskiej, energia elektryczna produkowana w sposób przyjazny dla środowiska ma stanowić 22,1% całkowitej ilości wytwarzanej energii. Wiąże się to z jednej strony z bezpieczeństwem energetycznym, z drugiej przyczynia się do poprawy stanu środowiska. Według Światowej Rady Energetycznej, zrównoważony rozwój energetyczny winien uwzględniać nieprzerwaną dyspozycyjności energii o wystarczającej jakości i ilości, dostosowanej do zmieniających się potrzeb, rosnącej dostępności, akceptowalności, czyli jej zgodności z oczekiwaniami społecznymi, zarówno rozwojowymi, środowiskowymi jak też socjalnymi.

Komisja Przemysłu, Badań Naukowych i Energii Parlamentu Europejskiego wzywa do zwiększenia wysiłków w zakresie badań nad nowymi technologiami dotyczącymi wykorzystania biogazu jako biopaliwa. Apeluje się, by biogaz był nie tylko wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej i ciepłej, lecz także by był w miarę istnienia technicznych możliwości wprowadzany do sieci zasilania gazem ziemnym, co pozwoli ograniczyć zależność Europy od importu gazu ziemnego z państw trzecich.

## **2. Metody zgazowania węgla brunatnego**

Polska posiada znaczące zasoby węgla brunatnego szacowane na 14 mld ton w zasobach bilansowych oraz 58 mld ton w złożach perspektywicznych. Obecnie rozpoznanych jest ponad 150 złóż, które mogą stanowić istotne źródło zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju. Węgiel ten występuje w pokładach dolnojurajskich, górnokredowych i trzeciorzędowych zarówno w Polsce centralnej i zachodniej, przede wszystkim na terenie województw: dolnośląskiego, kujawsko-pomorskiego, lubuskiego, łódzkiego i wielkopolskiego. Ze względu na zasoby geologiczne, złoża węgla brunatnego można podzielić na: małe — do 150 mln Mg, średnie — od 150 do 300 mln Mg i duże — powyżej 300 mln Mg [3].

Stan zasobów węgla brunatnego w Polsce umożliwia nie tylko jego bezpośrednie spalanie, ale stwarza korzystne warunki do produkcji alternatywnych nośników energii. Małe złoża mogą mieć znaczenie gospodarcze w skali lokalnej. Konieczność tworzenia lokalnych struktur energetycznych wynika również z zaleceń UE [Dyrektywa, 2001/77/EC]. Apeluje się w niej do podjęcia intensywnych działań dotyczących prowadzenia badań i wdrażania nowych technologii pozyskiwania energii. Z uwagi na stosunkowo niską wartość energetyczną węgla brunatnego (od 7,5 do 21 tys. MJ/kg), jego znaczne uwodnienie i małą zwięzłość, opłacalna jest jedynie odkrywkowa eksploatacja złóż i spalanie węgla w pobliskich elektrowniach. Tam gdzie nie będzie możliwe czy opłacalne wydobywanie węgla brunatnego tradycyjną metodą odkrywkową, atrakcyjną (alternatywą) może okazać się jego podziemne zgazowanie.

Doskonalenie tych technologii pozwolić może na zwiększanie udziału gazu na rynku surowcowym, a co za tym idzie zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Podziemna gazyfikacja węgla obejmuje zasadniczo dwie technologie, UCG (*Underground Coal Gasification*) oraz biogazyfikację.

Pierwsza z nich polega na konwersji węgla do gazu syntezowego z wykorzystaniem czynnika zgazowującego, którym najczęściej jest tlen oraz para wodna. W podwyższonej temperaturze następuje rozkład substancji organicznej z wytworzeniem mieszaniny gazów składających się głównie z:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  oraz  $CH_4$  [4].

Instalacja firmy Linc Energy w Chinchilla, Queensland (Australia) jest postrzegana jako rozwiązanie, które odniosło największy sukces w gazyfikacji węgla metodą UCG. Proces podziemnej gazyfikacji węgla okazał się technicznie opłacalny. Wykazał on wysoką efektywność i funkcjonalność w dostarczaniu gazu o stabilnej jakości i ilości, a koszt gazu wytwarzanego w tym procesie jest porównywalny (przy przeliczeniu na jednostkę energii) z bardzo niskim kosztem węgla na rynku australijskim. Ponadto projekt podziemnej gazyfikacji węgla w Chinchilla pokazał, że może być ona prowadzona bez niekontrolowanego oddziaływania na wody podziemne. W instalacji tej osiągnięto wydajność gazu wynoszącą  $80\,000\text{ Nm}^3/\text{godz.}$  lub 675 ton węgla dziennie. Podczas pierwszej próby w Rocky Mountain w USA osiągnięto maksymalną szybkość gazyfikacji rzędu 200 ton węgla dziennie. Próba w Chinchilla zapewniła dostępność produkcji gazu przez ponad 30 miesięcy, przy czym wykorzystano 95% złoża węglowego o średniej głębokości 140 m. Nie zarejestrowano żadnych zanieczyszczeń wód podziemnych ani zapadania terenu. Nie zaobserwowano również oddziaływań na środowisko podczas kontrolowanego procesu wygaszania.



**Rys. 1.** Powierzchni podziemnego gazyfikatora w Chinchilla  
(za: Ergo Exergy technologies Ltd)

Biogazyfikacja to innowacyjna technologia podziemnego przetwarzania węgla brunatnego w gaz za pomocą specyficznych grup mikroorganizmów [5].

Na większą skalę — poza skalą laboratoryjną — proces biogazyfikacji węgla nie jest jeszcze przetestowany. Przyczyną tego może być fakt, że biogazyfikacja jest zjawiskiem trudnym, wymagającym współdziałania szeregu mikroorganizmów i ściśle określonych warunków. Okazało się, że zawarte w węglu brunatnym ligniny czy węgiel podbitumiczny mogą wpływać hamująco na przebieg fermentacji metanowej.

Firma Arctech Inc. z USA, dowiodła, że jest w stanie osiągnąć dobre wydajności procesu biogazyfikacji węgla poprzez dobór odpowiednich mikroorganizmów i warunków procesu. Poza produkcją gazu, doskonale wykorzystuje także półprodukty procesu do produkcji nawozów. Do rozkładu węgla brunatnego wykorzystano mikroflorę wyizolowaną z jelit termitów.

W chwili obecnej prowadzi się również badania dotyczące fermentacji produktów gazyfikacji węgla do metanu. Z 4 mmoli wodoru uzyskano w procesie fermentacji metanowej, prowadzonej przez bakterie przygotowane i wyizolowane przez firmę komercyjną, 2,5 g metanu [6].

W procesie powierzchniowej gazyfikacji wykorzystuje się oprócz bakterii również grzyby pleśniowe posiadające uzdolnienia do enzymatycznego rozkładu materii organicznej będącej składnikiem węgla brunatnego (tab. 1). W drugim etapie prowadzi się proces fermentacji anaerobowej.

TABELA 1

**Przykładowe mikroorganizmy posiadające uzdolnienia do biokonwersji węgla [7]**

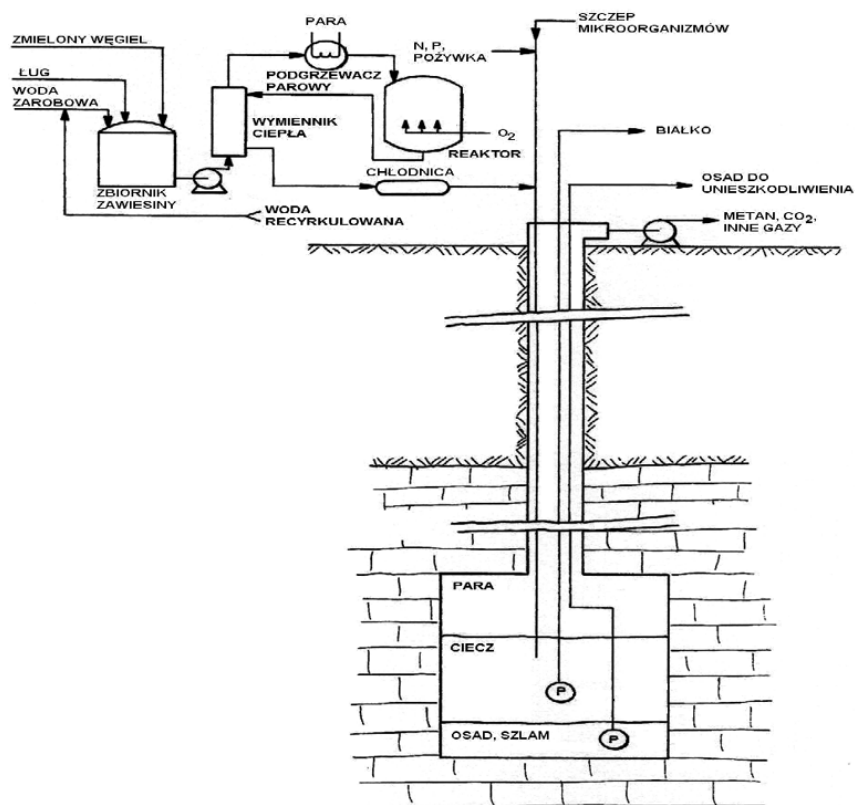
Królestwo	Klasa	Typ węgla
Grzyby	(Basidiomycetes) <i>Coriolus versicolor</i> <i>Phanerochaete chrysosporium</i> <i>Poria placenta</i> <i>Piptoporus betulinus</i> <i>Coprinus sclerotigenis</i>	wysoki lub niski stopień uwęglenia lignit, węgiel brunatny, węgiel bitumiczny
	Deuteromycetes <i>Trichoderma atroviride</i> <i>Fusarium oxysporum</i> <i>Aspergillus sp.</i>	niski stopień uwęglenia głównie lignit, węgiel brunatny i węgiel sub-bitumiczny
	<i>Saccharomycetes</i> <i>Candida sp.</i>	niski stopień uwęglenia lignit i węgiel sub-bitumiczny
Bakterie	Actinomycetales <i>Streptomyces badius</i> <i>Streptomyces setonii</i>	niski stopień uwęglenia lignit i węgiel sub-bitumiczny
	<i>Firmicutes</i> <i>Bacillus sp.</i>	niski stopień uwęglenia lignit i węgiel sub-bitumiczny
	<i>Proteobacteria</i> <i>Pseudomonas sp.</i>	

Metoda biogazyfikacji *in situ* ma dwie podstawowe korzyści. Wykorzystywanie w procesie biogazyfikacji węgla brunatnego o wysokiej wilgotności oraz możliwość zastosowania procesu dla młodych i nie w pełni dojrzałych węgli, które mają bliższą strukturę do pierwotnych składników organicznych niż do węgla wysokokalorycznego.

Węgiel brunatny występujący w Polsce zalega młodsze formacje geologiczne, głównie trzeciorzęd. Dominują tu niskouwęglone humusowe ortolignity, należące do nadlitolotopów atrytowego i ksylitowo-atrytowego, zwane też węglami ziemistymi i ksylitowo-ziemistymi. Węgły brunatne-bitumiczne i ksylitowe występują w mniejszej ilości, rzędu kilku procent.

Ich głównymi składnikami są wielocząsteczkowe struktury aromatyczne i grupy funkcyjne zawierające tlen [8]. Polskie węgiel brunatne są bogate w kwasy tłuszczowe, które mogą być źródłem materii organicznej [9]. Do najważniejszych związków chemicznych węgla brunatnego zalicza się: węglowodany i związki pokrewne ( $C_n(H_2O)_m$ ), ligniny i ligniany oraz związki azotowe, tłuszczowe i woski.

Amerykański patent (nr 4845034) opisuje sposób prowadzenia podziemnej biogazyfikacji (rys. 2) [10].



Rys. 2. Schemat podziemnej biogazyfikacji węgla

Proces składa się ze wstępnej hydrolizy zasadowej węgla prowadzonej w temperaturze powyżej 150°C. Jej celem jest stworzenie łatwo przyswajalnego substratu będącego pożywką dla mikroorganizmów. Po korekcie pH do wartości 6,5÷8,8 i schłodzeniu do temperatury 60°C pożywka kierowana jest do odwiertu. W wyniku mikrobiologicznych przemian uzyskuje się biogaz i szlam mogący stanowić nawóz oraz białko. Autorzy nie podają jednak danych o wydajności procesu.

Biogazyfikacja jest kilkuetapowym procesem rozkładu złożonej, węglowej matrycy organicznej. Proces ten polega na upłynnieniu i hydrolizie związków nierozpuszczalnych oraz zgazowaniu powstałych produktów pośrednich. Towarzyszy temu częściowe lub całkowite zmineralizowanie substancji organicznej. Cechą charakterystyczną fermentacji metanowej jest jej fazowość. Wyróżnia się cztery etapy procesu, prowadzone przez odmienne grupy bakterii, które muszą ze sobą ściśle współpracować [11].

W pierwszym etapie polimeryczne związki organiczne ulegają hydrolizie. Drugi etap fermentacji to acidogeneza (faza kwasowa), podczas której pod wpływem bakterii beztlenowych powstają proste kwasy organiczne i alkohole. Procesowi temu towarzyszy wydzielanie dwutlenku węgla i wodoru. W trzeciej fazie kwasy organiczne oraz alkohole przekształcane są do kwasu octowego, dwutlenku węgla i wodoru. Faza ta nosi nazwę octanogenezy (faza octanowa) lub acetogenezy. Reakcje acidogenezy jak i acetogenezy mogą zachodzić swobodnie jeżeli powstający w tych reakcjach wodór będzie usuwany ze środowiska. Usuwanie wodoru odbywa się dzięki bakteriom metanowym, które w czwartej fazie, wykorzystują wodór i dwutlenek węgla do syntezy metanu. Metan może powstawać także bezpośrednio z kwasu octowego. Z badań wynika, że około 70% metanu powstaje w czasie fermentacji metanowej z kwasu octowego a około 30% z wodoru i dwutlenku węgla. Kluczowym etapem procesu fermentacji metanowej jest faza aktywności bakterii metanogennych. Bakterie te decydują o ilości, jakości i szybkości wydzielania biogazu. Charakteryzują się one dużą wrażliwością nie tylko na substancje toksyczne, które mogą być wprowadzane z substratem, ale również na związki chemiczne mogące powstawać w wyniku biochemicznych przemian w poszczególnych fazach procesu.

Skład biogazu jest zmienny i kształtuje się następująco: metan (CH<sub>4</sub>) 50÷75%, dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>) 25÷50%, woda (H<sub>2</sub>O) 2÷7%, siarkowodór (H<sub>2</sub>S) 0,1÷6%, azot (N<sub>2</sub>) 0÷2%, wodór (H<sub>2</sub>) 0÷1%, tlen 0÷1%, składniki śladowe 0÷1%.

Średnia wydajność procesu fermentacji metanowej wynosi ok. 0,24 m<sup>3</sup> metanu z kg suchej masy organicznej. 1 m<sup>3</sup> biogazu o wartości opałowej 26 MJ/ m<sup>3</sup>, może zastąpić 0,77 m<sup>3</sup> gazu ziemnego o kaloryczności 33,5 MJ, 1,1 kg węgla kamiennego o kaloryczności 23,4 MJ, czy też 2 kg drewna opałowego o kaloryczności 13,3 MJ.

Otrzymywany biogaz może być wykorzystany w różnych dziedzinach gospodarki głównie w procesach technologicznych, jaki i do celów energetycznych między innymi do:

- produkcji energii cieplnej w kotłach gazowych oraz produkcję energii cieplnej i elektrycznej w jednostkach skojarzonych (z 1 m<sup>3</sup> biogazu — w skojarzonym wytwarzaniu energii uzyskuje się 2,1 kWh energii elektrycznej i 2,9 kWh ciepła);
- produkcji energii elektrycznej w silnikach iskrowych lub turbinowych;

- zastosowania powstałego gazu jako paliwa w silnikach samochodowych;
- zastosowania gazu w różnych procesach technologicznych np. przy produkcji metanolu.

### 3. Podsumowanie

Coraz lepsza znajomość mikrobiologicznych, biochemicznych i termodynamicznych podstaw fermentacji metanowej owocuje zwiększeniem wydajności procesu oraz znacznym rozszerzeniem wykorzystywanych substratów organicznych. Obok tradycyjnych substratów (ścieki przemysłu spożywczego, papierniczego), coraz częściej prowadzi się beztlenową biodegradację fenoli, substancji powierzchniowo czynnych, a nawet produktów petrochemicznych. Aktualnie jedynie nienasycone węglowodory, i niektóre tworzywa sztuczne nie ulegają w ogóle lub bardzo powoli biodegradacji w warunkach beztlenowych.

Uważa się, że w przyszłości klasyczne wydobywanie i spalanie węgla zostanie częściowo wyeliminowane na rzecz niekonwencjonalnych technologii przetwarzania węgla bezpośrednio w złożu, takich jak podziemne zgazowanie (produkcja gazu syntezowego) czy też uwodornienie mikrobiologiczne (produkcja metanu). Co prawda procesy biogazyfikacji znajdują się obecnie dopiero w fazie badań, tym niemniej budowa instalacji pilotowych na starannie wybranych złożach wydaje się już dziś wysoce uzasadniona.

#### LITERATURA

- [1] Nowak J, Kudelko J.: Zagospodarowanie złóż węgla brunatnego w aspekcie zastosowania technologii wytwarzania innych nośników energii. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*. 2008, z. 4, s. 259–271
- [2] Bednarczyk J.: Rozwój technologii podziemnego zgazowania węgla i perspektywy jej przemysłowego wdrożenia. *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2007, z. 2, 87–104
- [3] Nowak J.: Strategiczne kierunki rozwoju technologii górniczych węgla brunatnego. *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2007, z. 2, 489–500
- [4] Creedy D.P., Garner K., Holloway S., Jones N., Ren T.X.: Review Of Underground Coal Gasification Technological Advancements Report 2001. No. COAL R211 British Geological Survey Nottingham University
- [5] Faukousa R.M., and Hofrichter M.: Biotechnology and microbiology of coal degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1999, 52, 25–40
- [6] Wise D.L., Cooney C.L., Augenstein D.C.: Anaerobic fermentation of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and CO to methane. *Biotechnology and Bioengineering*. 2008, 20, 8, 1153–1172
- [7] Johnson E.R., Klasson K.T., Basu R., Volkwein J.C., Clausen E.C., Gaddy J.L.: Microbial conversion of high-rank coals to methane. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1994, 5, 329–338
- [8] Schmierr H., Kopsel R.: Macromolecular structure of brown coal in relationship to the degradability by microorganisms, *Fuel Processing Technology*. 1997, 52, 109–14
- [9] Fabiańska M.: GC-MS investigation of distribution of fatty acids in selected Polish brown coals, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2004, 72, 241–244
- [10] William M., Menger, Ernest E., Kern K., Allen O.C., Karkalits D.L.: Patent number: 4845034. Houston Industries Incorporated. 1986
- [11] Deppenmeier U, Müller V, Gottschalk G Pathways of energy conservation in methanogenic archaea. *Arch Microbiol*. 1996, 165, 148–163
- [12] Karakashev D., Batstone D.J., and Angelidaki I.: Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. *Applied and Environmental Microbiology*. 2005, 71, 331–338