

Joanna Hausner*, Barbara Biatecka**

ANALIZA PROCESU WDRAŻANIA CZYSTYCH TECHNOLOGII WĘGLOWYCH W POLSCE

Streszczenie

W artykule podjęto próbę omówienia polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej wraz z oceną procesu wdrażania jej zapisów do ustawodawstwa polskiego. Zaprezentowano także charakterystykę wybranych technologii czystego węgla oraz ocenę ich technologicznej dojrzałości i stopnia wdrożenia w Polsce.

Zauważalne globalne zmiany klimatyczne, efekt cieplarniany oraz ochrona środowiska to jedne z najważniejszych obszarów tematycznych podejmowanych przez Unię Europejską. Rozwój legislacyjny na poziomie strategicznym zakłada ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Planowane jest także zwiększenie udziału źródeł odnawialnych w produkcji energii oraz podwyższenie efektywności zużycia paliw kopalnych. Ukonstytuowaniem tych założeń jest przyjęty przez kraje Unii Europejskiej pakiet klimatyczno-energetyczny „3 × 20%”.

Kluczowe akty prawne w badanym zakresie to pakiet dyrektyw ramowych, m.in.:

- Dyrektywa 2009/29/WE w celu usprawnienia i rozszerzenia wspólnotowego systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, tzw. Dyrektywa ETS,
- Dyrektywa 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, tzw. Dyrektywa OZE,
- Dyrektywa 2006/32/WE w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych, tzw. Dyrektywa ESD,
- Dyrektywa 2004/8/EC w sprawie promowania kogeneracji, tzw. Dyrektywa CHP.

Powyższe dyrektywy stanowią podstawę prawną dla aktów prawnych niższego rzędu wdrażanych w systemach legislacyjnych krajów członkowskich Unii Europejskiej. Celem ostatecznym wprowadzanych stopniowo regulacji jest osiągnięcie założeń pakietu „3 × 20%” do 2020 r., przez wszystkie kraje wchodzące w skład Unii Europejskiej.

Rozwój czystych technologii węglowych skupiony jest na:

- procesach wzbogacania i uszlachetniania węgla,
- procesach zgazowania w technologii naziemnej i podziemnej,
- współspalaniu biomasy z węglem,
- technologiach wychwytywania i składowania CO₂,
- przetwarzaniu węgla w kierunku produkcji paliw płynnych i produkcji wodoru do zasilania ogniw paliwowych.

Wśród wszystkich krajów Unii Europejskiej to Polska posiada największe zasoby węgla kamiennego, który stanowi narodowy surowiec energetyczny. Możemy także pochwalić się ugruntowaną technologicznie i systemowo energetyką opartą na jego zasobach. Argumenty te sprawiają, że Polska ma szansę stać się stimulatorem innowacji technologicznych w tym obszarze, a nawet liderem europejskim w rozwoju czystych technologii węglowych (CTW).

* Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie w zakresie Czystych Technologii Węglowych w Głównym Instytucie Górnictwa

** Główny Instytut Górnictwa

Analysis of the process of implementation of clean coal technologies in Poland

Abstract

In the article, an attempt has been made in order to discuss the climate and energy policy of the European Union accompanied with an assessment of the implementation of its entries to the Polish legislation. The characteristics of the selected clean coal technologies has been presented with the assessment of their technological maturity and the degree of their implementation in Poland.

The perceptible global climate change, the greenhouse effect and the protection of the environment have been stated as some of the most important thematic areas undertaken by the European Union. The legislative development at the strategic level implies the limitation of the greenhouse gas emissions into the atmosphere. It has also been planned to increase the share of renewable sources in the production of energy and the increase of the efficiency of the fossil fuels consumption. The climate-and-energy package adopted by the countries of the European Union has been treated as the legal implementation of these assumptions, it has been called "3 × 20%".

The key legal acts in the field has been prepared as the frame directives, inter alia:

- Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community so called the ETS directive,
- Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, so called the OZE directive,
- Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services, so called the ESD directive,
- Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC, so called. the CHP Directive.

The above mentioned directives provide the legal basis for the inferior legal acts implemented in the legislative systems of the member countries of the European Union. The definitive aim of the gradually introduced regulatory package has been to achieve the assumptions of the "3 × 20%" to 2020, by all countries within the European Union.

The development of the clean coal technology has been focused on:

- processes of coal enrichment and refinement,
- processes of coal gasification in the underground and on-surface technology,
- biomass co-firing with coal,
- CO₂ capture and storage technologies,
- processing of coal towards the production of liquid fuels and the production of hydrogen in order to supply fuel cells.

Among all the countries of the European Union, Poland has the richest deposits of coal, which constitutes the national Polish raw energy material. Poland could also boast a well-established, technologically and systematically, power industry based on coal resources. These arguments have caused that Poland has a chance to become a stimulus for the technological innovation in this area or even the European leader in the development of the clean coal technology (CTA).

1. WPROWADZENIE

Walka z globalnym ociepleniem stanowi jeden z priorytetów polityki klimatycznej Unii Europejskiej. Jako główne przyczyny globalnego ocieplenia klimatu powszechnie uznano:

- natężenie efektu cieplarnianego, wywołane podwyższoną emisją gazów do atmosfery,
- unoszenie się pyłów w powietrzu, powstałych wskutek nadmiernego spalania paliw samochodowych lub materiałów energetycznych.

Unia Europejska podjęła starania zmierzające do przeciwdziałania zjawisku globalnego ocieplenia przez ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz wsparcie budowy niskoemisyjnej gospodarki, opartej na poprawie efektywności energetycznej. Postawiono także na rozwój oraz wykorzystanie odnawialnych i innych niskoemisyjnych źródeł energii. Wyrazem działań podjętych przez Unię Europejską są założenia opracowanego pakietu klimatyczno-energetycznego „3 × 20%”.

Polska, będąc członkiem Unii Europejskiej, zobowiązana jest do wypełnienia założeń pakietu „3 × 20%”. Zapisy unijnych dyrektyw, ich wdrożenie do ustawodawstwa krajowego oraz terminowa realizacja, stanowią duże wyzwanie, szczególnie w kontekście unijnych planów wprowadzania gospodarki niskowęglowej, odchodzącej od węgla kamiennego jako surowca energetycznego. Dominująca rola węgla kamiennego, wykorzystywanego w sposób tradycyjny w krajowej produkcji energii elektrycznej i ciepłej, może być zatem dla Polski bardzo problematyczna. Jednocześnie bogate zasoby węgla kamiennego w porównaniu z innymi krajami członkowskimi sprawiają, że Polska może stanowić katalizator dla rozwoju innowacyjnych technologii energetycznego wykorzystania węgla. Jest to zatem szansa na modernizację sektora energetyki, budowę elektrowni wykorzystujących odnawialne źródła energii oraz szybszy rozwój sieci elektroenergetycznych współpracujących np. z siłowniami OZE. W efekcie, poza restrukturyzacją gospodarki, zmniejszy się oddziaływanie przemysłu na środowisko oraz poprawi efektywność wykorzystania paliw kopalnych.

W związku z powyższym w artykule podjęto próbę omówienia tak istotnych zagadnień, jak:

- polityka klimatyczno-energetyczna Unii Europejskiej wraz z oceną procesu wdrażania jej zapisów do ustawodawstwa polskiego,
- charakterystyka wybranych technologii czystego węgla wraz z oceną ich dojrzałości technologicznej i stopnia wdrożenia w Polsce.

2. POLITYKA KLIMATYCZNA UNII EUROPEJSKIEJ

Pakiet klimatyczno-energetyczny stanowi efekt integracji polityki energetycznej i klimatycznej. Jest to zbiór aktów prawnych (w tym dyrektyw europejskich), zapobiegających zmianom klimatycznym. Opracowany został przez rządy państw członkowskich Unii Europejskiej i przyjęty przez Radę Europy w grudniu 2008 r. Pakiet ma wejść w życie w państwach Unii Europejskiej do końca 2013 r.

Pakiet opiera się na programie „3 × 20%”. Jest to zasada ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 20%, zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych o 20% oraz zwiększenia efektywności energetycznej także o 20%. Państwa członkowskie Unii Europejskiej zobowiązały się do osiągnięcia powyższych celów do 2020 r. Poszczególne elementy pakietu klimatyczno-energetycznego zostały dokładnie opisane w dalszej części artykułu.

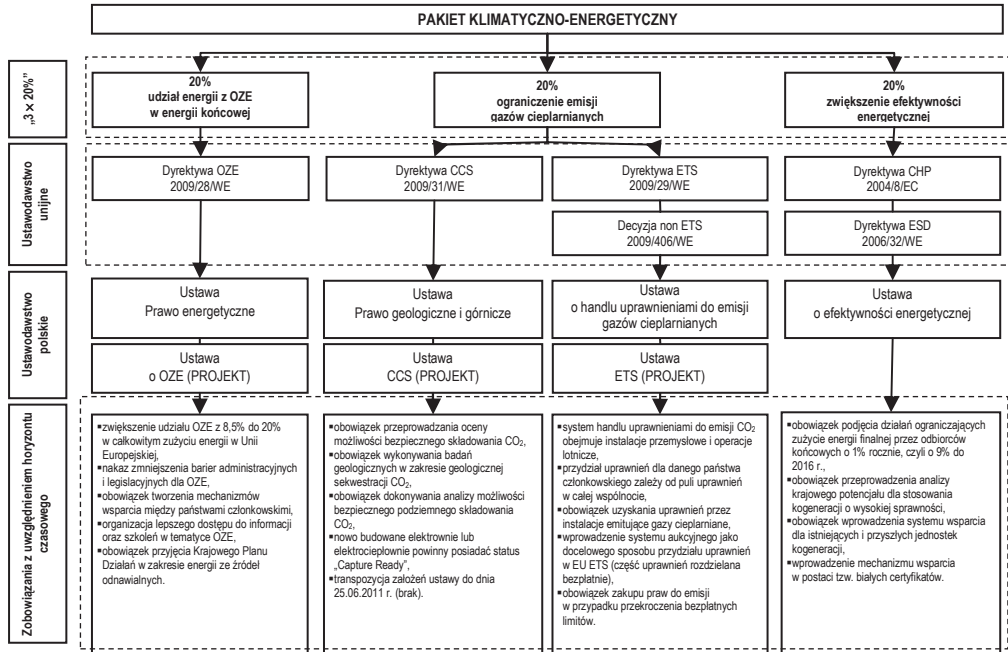
Głównymi narzędziami pakietu są:

- system handlu emisjami (ETS) w obrębie Unii Europejskiej,
- konkretne poziomy redukcji emisji w przypadku państw nieobjętych systemem ETS oraz dotyczące udziału odnawialnych źródeł energii w zużyciu finalnym,

- wsparcie rozwoju technologii umożliwiających składowanie dwutlenku węgla w strukturach geologicznych,
- zestaw instrumentów wsparcia dla przedsięwzięć służących ochronie środowiska i klimatu.

Założenia i instrumenty pakietu klimatyczno-energetycznego zostały przez Polskę zaakceptowane. Obecnie są one wdrażane przez implementację zapisów dyrektyw unijnych do ustawodawstwa krajowego. Ścieżkę wdrażania obrazuje tabela 1.

Tabela 1. Implementacja zobowiązań pakietu klimatyczno-energetycznego do ustawodawstwa polskiego (oprac. własne)



2.1. Redukcja emisji gazów cieplarnianych

Wśród aktów prawnych pakietu klimatyczno-energetycznego znajdują się dwa kluczowe dokumenty, określające ramy prawne zarządzania emisjami gazów cieplarnianych we Wspólnocie. Są to: **Dyrektywa ETS** i **Decyzja non ETS**. Dokumenty te ustanawiają limity emisji dla poszczególnych państw członkowskich oraz różnicują cele redukcji dla sektorów objętych i nieobjętych systemem EU ETS.

EU ETS, czyli **Europejski system handlu emisjami** wprowadzono w 2005 r. Stał się on tym samym międzynarodowym systemem typu *cap-and-trade*, bazującym na handlu zezwoleniami na emisję CO₂ i innych gazów cieplarnianych, realizowanym przez przedsiębiorstwa. W ramach EU ETS ustalona została cena za każdą wyemitowaną tonę węgla, co spowodowało wzrost inwestycji w obrębie technologii niskowę-

głowych. Jednocześnie ustalona liczba dostępnych uprawnień do emisji stworzyła rynek handlu uprawnieniami.

- I. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/29/WE w celu usprawnienia i rozszerzenia wspólnotowego systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, tzw. **Dyrektywa ETS**, wprowadza redukcję emisji gazów cieplarnianych o 21% do 2020 r., w stosunku do poziomu z 2005 r. Dotyczy to sektorów objętych systemem ETS, czyli energetyki i innych sektorów przemysłowych.
- II. Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/406/WE w sprawie wysiłków podjętych przez państwa członkowskie, zmierzających do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych, w celu realizacji do 2020 r. zobowiązań, to tzw. **Decyzja non ETS**. Zakłada ona w latach 2005–2020 redukcję emisji gazów cieplarnianych o 10% na terenie całej Unii Europejskiej, w sektorach nieobjętych systemem EU ETS, m.in. w: transporcie, rolnictwie, handlu oraz usługach. Sumarycznie otrzymuje się zmniejszenie o 14% w porównaniu z 2005 r., co odpowiada zmniejszeniu emisji o 20% w porównaniu z 1990 r.

Kluczem do osiągnięcia zamierzonego celu, tj. 20% redukcji emisji gazów cieplarnianych, jest malejąca każdego roku o 1,74% pula uprawnień do emisji dostępnych w ramach trzeciego okresu rozliczeniowego EU ETS, wyznaczonego na lata 2013–2020.

Przełożeniem Dyrektywy ETS na grunt prawodawstwa polskiego była uchwalona w dniu 28 kwietnia 2011 r. *Ustawa o systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych*. W myśl znowelizowanej ustawy handel uprawnieniami obejmuje nie tylko emisję gazów cieplarnianych z instalacji przemysłowych, ale także z lotniczych, które do tej pory pozostawały wyłączone z systemu. Ponadto każda instalacja emitująca gazy cieplarniane do atmosfery będzie zobligowana do uzyskania uprawnień w tym zakresie. Ustawa daje również prawo do swobodnego rozporządzania uprawnieniami, rejestrowanymi w krajowym rejestrze.

Kierując się niższą od średniej w Unii Europejskiej wielkością PKB przypadającego na jednego mieszkańca, przyznano Polsce możliwość 14% wzrostu emisji w 2020 r., w porównaniu z 2005 r. w sektorach nieobjętych EU ETS. Ponadto nadano Polsce prawo do bezpłatnych uprawnień do emisji CO₂, które z czasem będą redukowane – od 2020 r. także i polskie elektrownie będą zobligowane do zakupu uprawnień do emisji w systemie aukcyjnym.

2.2. Udział energii ze źródeł odnawialnych w energii końcowej

Zwiększenie udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych o 20% jest drugim celem pakietu klimatyczno-energetycznego. Drogę do jego osiągnięcia stanowi przyjęta przez Unię Europejską w kwietniu 2009 r. Dyrektywa 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, tzw. **Dyrektywa OZE**. Zgodnie z założeniami państwa członkowskie zyskały wiążący je prawnie cel w zakresie OZE.

Dyrektywa OZE obliguje do zwiększenia udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych w całkowitym zużyciu energii w krajach Unii Europejskiej do 2020 r.

Zaplanowano zatem wzrost z aktualnego poziomu 8,5 do 20%. Jednocześnie dokument ten wzywa do ochrony lasów przed nadmierną eksploatacją, celem pozyskiwania biomasy. Wskazano także na zrównoważone wykorzystywanie obszarów rolniczych pod kątem uprawy roślin energetycznych, tak aby uniknąć konkurencji między energią odnawialną i rolnictwem.

Zapisy Dyrektywy OZE stwarzają szansę krajom członkowskim na zmniejszenie stopnia uzależnienia od dostaw energii pochodzącej z importu oraz wzrost bezpieczeństwa energetycznego kraju.

W przypadku Polski udział energii pochodzącej z OZE ustalony został na poziomie 15%, przy założeniu wzrostu tego wskaźnika w kolejnych latach. Dodatkowo Polska zobowiązana jest do osiągnięcia w 2020 r. 10% udziału biopaliw na rynku paliw transportowych.

Czas na implementację Dyrektywy OZE do prawodawstwa polskiego minął w grudniu 2010 r. Niestety do tej pory ustawa o odnawialnych źródłach energii nie została przyjęta, tym samym zapisy dyrektywy unijnej pozostają niewdrożone.

2.3. Zwiększenie efektywności energetycznej

Zmniejszenie zużycia energii o 20% w stosunku do poziomu przewidywanego w 2020 r., na skutek zwiększenia efektywności energetycznej, stanowi ważny cel polityki klimatycznej Unii Europejskiej. Mimo że rola wydajności i oszczędności energii była wielokrotnie podkreślana w dokumentach strategicznych Unii Europejskiej, żaden z aktów prawnych wchodzących w skład pakietu klimatyczno-energetycznego nie odnosi się bezpośrednio do niej. Jednocześnie przyjęto szereg wiążących aktów prawnych, regulujących poszczególne segmenty tego sektora. Jako najważniejszy dokument uznano Dyrektywę 2006/32/WE w sprawie efektywności końcowego wykorzystania energii i usług energetycznych, tzw. **Dyrektywę ESD**. Trwają natomiast prace legislacyjne nad nowym dokumentem dotyczącym kwestii efektywności energetycznej, tzw. Dyrektywą ESD II. Ma ona nie tylko połączyć, ale i zastąpić akty obowiązujące w zakresie efektywności energetycznej: Dyrektywę ESD i Dyrektywę 2004/8/EC w sprawie promowania kogeneracji, tzw. Dyrektywę CHP.

Obowiązujące obecnie akty prawne nakładają na kraje członkowskie, w tym na Polskę, obowiązek podjęcia działań ograniczających zużycie energii finalnej przez odbiorców końcowych o 1% rocznie w kolejnych dziewięciu latach jej obowiązywania, począwszy od 1 stycznia 2008 r.

Ustawa o efektywności energetycznej, uchwalona w kwietniu 2011 r., wyznacza krajowy cel, tj. 9% oszczędności energii do 2016 r. Dodatkowo wdraża także mechanizm tzw. białych certyfikatów. Ponadto definiuje środki poprawy efektywności energetycznej oraz wprowadza nowe obowiązki dla administracji publicznej i przedsiębiorstw energetycznych w zakresie racjonalizacji, optymalizacji i kontroli konsumpcji energii. Działania te mają przyczynić się do zwiększenia racjonalności wykorzystania energii.

W związku z powyższymi uwagami można zauważyć, że Unia Europejska ma przed sobą bardzo ambitne plany ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, oszczędzania energii oraz rozwoju odnawialnych źródeł energii. Mimo że pakiet klimatycz-

no-energetyczny nie różnicuje założonych celów pod kątem istotności, największą uwagą w środowisku politycznym i eksperckim cieszy się aspekt redukcji emisji CO₂ do atmosfery. Ponadto zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych oraz wzrost efektywności energetycznej przyczyniają się także do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Na tym tle emisja CO₂ wydaje się być najbardziej problematyczną kwestią omawianą przez członków Unii Europejskiej.

3. CZYSTE TECHNOLOGIE WĘGLOWE

Unijna polityka klimatyczno-energetyczna stanowi dla Polski bardzo poważne wyzwanie. Energetyka naszego kraju uzależniona jest od paliw kopalnych. Wywiązanie się z założeń pakietu „3 × 20%” wymusza zatem konieczność zastosowania nowych rozwiązań technicznych, które umożliwiają redukcję emisji gazów i pyłów do atmosfery. Zastosowanie czystych technologii węglowych, w połączeniu z przekształceniem sektora energetycznego, pozwoli na wykorzystanie węgla do produkcji energii elektrycznej i ciepłej bez powodowania nadmiernych szkód w środowisku naturalnym.

Program „Technologie Czystego Węgla” (ang. *Clean Coal Technology*) oparty jest na czterech procesach:

- oczyszczanie węgla przed spalaniem oraz przygotowanie mieszanek węglowych gwarantujących utrzymanie limitów emisji,
- eliminacja szkodliwych domieszek w trakcie procesu spalania,
- oczyszczanie spalin,
- docelowy proces konwersji węgla.

Żaden z wymienionych procesów nie odgrywa kluczowej roli. Wyłącznie równoległe ich stosowanie może przynieść zadowalające efekty przy niskich nakładach (Blaschke, Góralczyk 2008).

Obecnie termin „czyste technologie węglowe” obejmuje „(...) technologie zaprojektowane w celu poprawy skuteczności wydobywania, przeróbki, przetwarzania oraz utylizacji węgla i zwiększenia akceptowalności tych procesów z punktu widzenia wpływu na środowisko naturalne”¹.

Z grupy technologii czystego węgla wybrano kilka procesów, w celu ich całościowego omówienia; są to:

- wzbogacanie i uszlachetnianie węgla,
- technologie zgazowania węgla,
- współspalanie węgla z biomasa,
- technologie wychwytu i sekwestracji CO₂,
- technologie przeróbki węgla w celu uzyskania paliwa płynnego.

¹ http://www.gig.eu/pl/a562/Definicja_Czystych_Technologii_Weglowych_CTW.html

3.1. Wzbogacanie/uszlachetnianie

Węgiel kamienny wydobywany jest w Polsce metodą głębinową. Uzyskany w wyniku eksploatacji pokładów urobek zawiera, poza różnej wielkości ziarnami węgla, również zanieczyszczenia w postaci skały płonnej, przerostów węglowo-kamiennych i łupków. W takiej postaci urobek nie nadaje się do wykorzystania w celach energetycznych, musi być zatem poddany dalszym procesom przeróbki (Blaschke 2009).

W wyniku procesu wzbogacania z węgla usuwane są zanieczyszczenia, tzn. substancje mineralne, a także substancje szkodliwe i związki siarki. Wzbogacanie ma na celu także przygotowanie odpowiedniej klasy ziarnowej węgla, zgodnie z potrzebami odbiorców.

Na świecie znane i używane są metody uszlachetniania węgla, stosowane jeszcze przed jego spalaniem, redukujące od 80 do 90% całkowitej ilości siarki w węglu. Metody te pozwalają uzyskać bardzo czysty koncentrat węglowy. Niestety w Polsce proces wzbogacania węgla zatrzymał się na jego klasycznym odkamienieniu, ze względu na niskie zainteresowanie odbiorców zakupem węgla o bardzo dobrej jakości. Instalacje działające w Polsce przystosowane są do spalania niewzbogaconego węgla o dobrej jakości, gdyż samo usunięcie skały płonnej pozwala uzyskać produkt o zawartości popiołu w przedziale 8–12%. Głębokie wzbogacenie pozwala otrzymać koncentrat węglowy o zawartości popiołu 4–6%. Obecnie funkcjonujące instalacje nie są przystosowane do spalania węgla o niskiej zawartości popiołu i wysokiej wartości opałowej (Blaschke 2008).

Mimo że wzbogacanie obejmuje procesy o relatywnie niskich kosztach, sam proces jest niewystarczający do dotrzymania limitów emisji przez elektrownie dużej mocy.

3.2. Zgazowanie naziemne i podziemne

Proces zgazowania węgla kamiennego może odbywać się w instalacjach na powierzchni ziemi, a także bezpośrednio w złożu. Technologie naziemnego zgazowania węgla znane są w Polsce od lat, jednakże do tej pory nie znalazły zastosowania jako alternatywa dla konwencjonalnych elektrowni. Z drugiej strony, technologia podziemnego zgazowania węgla znajduje się w fazie badawczej. Prowadzone są eksperymenty mające na celu pozyskanie energii chemicznej z węgla w miejscu jego zalegania. Pomimo to podziemne zgazowanie węgla postrzegane jest jako jedna z perspektywicznych metod wykorzystania tego surowca oraz pozyskania z niego energii chemicznej.

3.2.1. Zgazowanie naziemne

Do podstawowych procesów energochemicznego przetwórstwa węgla należą:

- odgazowanie,
- uwodornienie,
- zgazowanie,
- spalanie.

W niektórych rozwiązaniach technologicznych wymienione procesy wzajemnie się przenikają, przykładowo proces zgazowania węgla w cyklu wytwarzania energii elektrycznej w kombinowanym układzie parowo-gazowym.

Dominującym sposobem wykorzystania węgla jako paliwa energetycznego pozostaje nieustannie jego spalanie oraz wysokotemperaturowa piroliza. Niewiele ponad 1% węgla poddawane jest procesowi zgazowania.

Proces zgazowania prowadzony jest w reaktorach, których konstrukcje, w zależności od przepływu paliwa w strefie reakcyjnej, dzielą się na:

- reaktory ze złożem przesuwным (ang. *moving bed*),
- reaktory ze złożem fluidalnym (ang. *fluidised bed*),
- reaktory dyspersyjne (ang. *entrained bed*), najczęściej wykorzystywane w nowych instalacjach.

Proces zgazowania może być również skojarzony z inną technologią z grupy CTW-CCS, czyli wychwytem, transportem i składowaniem w strukturach geologicznych CO₂ (Strugała, Czernski 2011).

3.2.2. Zgazowanie podziemne

Przeniesienie procesu zgazowania pod ziemię stanowi alternatywę dla naziemnego zgazowania węgla. Technika ta umożliwia eksploatację złóż znajdujących się bardzo głęboko pod ziemią. Jest także praktyczna w sytuacjach, gdy wydobycie węgla z pokładów tradycyjną metodą jest nieekonomiczne bądź niebezpieczne. Podziemne zgazowanie węgla polega na pozyskaniu energii chemicznej węgla w miejscu jego występowania. Energia pozyskiwana jest przez doprowadzenie czynnika zgazowującego (tlenu lub powietrza) i wody do zlokalizowanego pod ziemią pokładu, inicjację procesu gazyfikacji i odbiór produktów już na powierzchni ziemi. Znane są dwa sposoby prowadzenia procesu zgazowania: **metoda szybowa i bezszybowa**.

Cały proces zgazowania węgla odbywa się w tym przypadku pod ziemią. Powstałe w trakcie gazyfikacji popiół i żużel nie wydostają się na powierzchnię, a w rezultacie kwestia zagospodarowania odpadów nie stanowi problemu. Prowadzenie procesu pod ziemią jest jednak znacznie trudniejsze od procesu prowadzonego w reaktorach naziemnych. Warunkują to parametry zmieniające się w czasie oraz struktura geologiczna, w której występuje pokład (Taubman 2011).

3.3. Współspalanie biomasy z węglem

Współspalanie biomasy z węglem uważane jest obecnie za efektywną i opłacalną technologię, wykorzystującą biomasę do produkcji energii elektrycznej.

Udział biomasy w produkcji energii elektrycznej podyktowany jest zobowiązaniem Polski do zwiększenia udziału energii cieplnej i elektrycznej ze źródeł odnawialnych do poziomu 20% w 2020 r. Jednocześnie uzyskanie tak dużego udziału w produkcji energii możliwe jest tylko przez stosowanie współspalania węgla z biomasą w energetyce zawodowej.

Omawiany proces może być realizowany w kilku wariantach technologicznych.

- I. **Bezpośrednie spalanie biomasy** polega na doprowadzeniu do komory paleniskowej strumieni węgla i biomasy. Możliwe jest także zmieszanie biomasy z węglem jeszcze przed układem dozowania i podanie mieszanki do komory paleniskowej kotła przez system nawęglania.
- II. **Spalanie pośrednie biomasy** realizowane jest w dwóch etapach. Pierwszy z nich to spalanie biomasy lub biogazu w tzw. przedpalenisku. Powstałe tam ciepło spalin wykorzystywane jest w komorze spalania lub jako czynnik grzewczy w wymiennikach ciepłowniczych. Drugi etap to zgazowanie biomasy w gazogeneratorze oraz spalanie w palnikach gazowych powstałego w procesie gazu.
- III. Kolejnym wariantem technologicznym jest **współspalanie w układzie równoległym**, którego szczególnym przypadkiem jest układ hybrydowy. W układzie równoległym paliwa konwencjonalne i odnawialne są spalane w osobnych komorach spalania przy zachowaniu indywidualnych dla każdego z paliw wymogów procesu spalania (Golec i in. 2010; Ściążko, Zuwała, Pronobis 2006).

Potwierdzony wynikami licznych prac badawczych pozytywny wpływ na środowisko współspalania biomasy z węglem potwierdza zasadność rozwoju i wdrażania nowych rozwiązań technologicznych. Proces ten może być realizowany w istniejących już instalacjach energetycznych, co z ekonomicznego punktu widzenia oznacza relatywnie niskie koszty produkcji energii elektrycznej i cieplej. Pozwala to na stosowanie węgla jako podstawowego paliwa naszego kraju przy jednoczesnym skutecznym zmniejszaniu jego negatywnego oddziaływania na środowisko.

3.4. Wychwyt i składowanie CO₂

Geologiczna sekwestracja CO₂ to proces technologiczny, polegający na wychwytywaniu emitowanego przez instalacje energetyczne dwutlenku węgla, jego transporcie oraz unieszkodliwieniu, przez zatłoczenie do głębokich formacji geologicznych i bezpieczne składowanie.

3.4.1. Wychwytywanie CO₂

Dwutlenek węgla może być usuwany z procesów energetycznych przed, po lub podczas procesu spalania paliwa w kotle.

Usuwanie CO₂ przed spaleniem, czyli tzw. **pre-combustion**, jest nowym rozwiązaniem, opierającym się na procesie zgazowania węgla w obecności tlenu w warunkach wysokiego ciśnienia. Produktem tego procesu jest gaz syntezowy, zawierający wodór i dwutlenek węgla. Po usunięciu CO₂ otrzymany, bogaty w wodór gaz syntezowy, może zasilać turbinę gazową w układzie IGCC do produkcji energii elektrycznej.

Dwutlenek węgla może być również usuwany w **procesie oxy-spalania**, czyli spalania paliwa w mieszaninie tlenu i dwutlenku węgla. CO₂ ze spalin końcowych zawracany jest do procesu w celu regulowania temperatury spalania w kotle. Powstałe w ten sposób spaliny stanowią mieszaninę głównie dwutlenku węgla i pary wodnej,

która po eliminacji pyłów i SO_2 może zostać skondensowana. W efekcie uzyskuje się strumień gazów spalinowych o wysokiej zawartości CO_2 .

Usuwanie dwutlenku węgla po procesie spalania, czyli tzw. **post-combustion** jest, w przypadku klasycznych elektrowni opalanych węglem, najczęściej spotykaną metodą. Układ technologiczny sprowadza się do dodania wyposażenia bloku energetycznego do zespołu urządzeń pełniących funkcję absorbera i desorbera CO_2 . Obecnie najbardziej rozwinięta technologia opiera się na wychwycie dwutlenku węgla w roztworze amin, a następnie jego wydzieleniu, odwodnieniu, sprężeniu i transporcie w miejsce magazynowania (Ściążko 2010).

3.4.2. Transport CO_2

Kiedy dwutlenek węgla zostanie wychwycony, kolejnym etapem jest jego przetransportowanie w miejsce potencjalnego składowania. Najlepszą formą transportu jest rurociąg. Przesył CO_2 rurociągami o małych średnicach wiąże się ze spadkiem ciśnienia na długości rurociągu. W związku z tym rurociągi doposaża się w odpowiednią liczbę stacji pomp. Z drugiej strony, rurociągi o większych średnicach generują proporcjonalnie większe koszty inwestycyjne (Czyste Technologie... 2010).

3.4.3. Sekwestracja CO_2

Ostatni etap procesu CCS to składowanie lub inne zagospodarowanie dwutlenku węgla. CO_2 może być deponowany w formacjach geologicznych (tzw. sekwestracja geologiczna) różnego typu: wyeksploatowane złoża ropy i gazu ziemnego, nieeksploatowane pokłady węgla lub głębokie solankowe poziomy wodonośne (Czyste Technologie... 2010).

3.5. Paliwa płynne/ogniwa paliwowe

Węgiel kamienny, poza energetycznym wykorzystaniem w procesie spalania czy zgazowania, może stanowić także surowiec do produkcji syntetycznych paliw płynnych i gazowych. Umożliwiają to znane od lat technologie przeróbki węgla na paliwa płynne CTL (ang. *Coal to Liquids*) lub gazowe, które jednak nie znalazły szerszego zastosowania w okresie, kiedy ceny węglowodorów są niskie. Uzyskiwany w procesie zgazowania węgla gaz syntezowy jest podstawowym surowcem, wykorzystywanym do produkcji syntetycznych paliw ciekłych i gazowych. Gaz syntezowy może z powodzeniem zastąpić gaz ziemny lub posłużyć do wytworzenia metanu. Zawarty w syngazie wodór może natomiast pełnić rolę paliwa w tzw. ogniwach paliwowych.

Także dwutlenek węgla może znaleźć technologiczne zastosowanie. Wychwycony w procesie spalania węgla dwutlenek węgla można poddać procesowi sekwestracji geologicznej lub wykorzystać jako surowiec do produkcji paliw płynnych. Innym zastosowaniem dwutlenku węgla jest jego przetworzenie na metan w procesie bio-konwersji. Technologie te znajdują się jednak dopiero we wczesnej fazie rozwoju, bez możliwości ich komercjalizacji w najbliższym czasie (Karcz, Ściążko 2007).

Polska dysponuje znacznymi zasobami węgla kamiennego, który mógłby stanowić podstawę bezpieczeństwa energetycznego całego kraju. Podjęte zobowiązania w zakresie ochrony klimatu i redukcji emisji CO₂ powodują jednak konieczność wdrożenia niskoemisyjnych, nowoczesnych technologii węglowych. Czyste technologie węglowe tworzą grupę technologii energetycznego wykorzystania węgla, bazujących na procesie spalania lub zgazowania. Umożliwiają redukcję emisji dwutlenku węgla przez jego eliminację ze spalin lub dzięki zwiększeniu sprawności energetycznej danej instalacji. Potrzebę wprowadzenia CTW w Polsce rozumieją i popierają niemal wszyscy specjaliści z branży energetycznej.

4. OCENA STOPNIA WDROŻENIA CTW W POLSCE

Kolejnym zagadnieniem wartym uwagi, po dokonaniu analizy sytuacji prawnej, jest sprawdzenie stopnia przygotowania Polski do wdrożenia technologii CTW.

W tym rozdziale zestawiono technologie opisane w tabeli nr 1, dokonując ich oceny pod kątem zalet i wad (dotyczy wybranych technologii) oraz przeprowadzając analizę ich dojrzałości technologicznej. W kilku słowach omówiono także stopień wdrożenia przedmiotowych technologii.

Tabela 2. Ocena technologii, ich dojrzałości i stopnia wdrożenia w Polsce (oprac. własne)

Lp.	Technologia	Zalety	Wady	Dojrzałość technologii	Wdrożenia
1	Wzbogacanie	niskie koszty procesu, usunięcie substancji mineralnej obniżającej kaloryczność węgla, wzrost wartości technologicznej paliwa, mniejsza zawartość popiołu i siarki w węglu	strata energii, niewielkie możliwości rozwoju, brak zainteresowania odbiorców bardzo czystym węglem, brak instalacji wykorzystujących energetycznie bardzo czysty węgiel	dojrzała rynkowo	zaawansowana technologia oraz funkcjonujące od lat zakłady mechanicznej przeróbki i wzbogacania węgla
2	Zgazowanie naziemne	technologia niskoemisyjna, możliwe całkowite usunięcie CO ₂ , możliwość integracji z wychwytem i sekwestracją CO ₂ , produkt: gaz generatorowy o wysokich właściwościach użytkowych, zmniejsza zapotrzebowanie na gaz ziemny, proces dobrze kontrolowany o wysokiej sprawności, możliwość wspólnego zgazowania węgla i biomasy	wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, straty w procesie zgazowania i czyszczenia gazu powodują, że sprawność układu energetycznego netto jest podobna do sprawności instalacji z ciśnieniowym kotłem fluidalnym, tj. ok. 45%	dojrzała technologicznie (ekonomicznie pod pewnymi warunkami)	20 lat badań, trzy zrealizowane projekty badawcze, projekt doświadczalny – instalacja badawcza – reaktor ciśnieniowy z cyrkulującym złożem fluidalnym w Zabrze
	Zgazowanie podziemne	nielimitowane pokłady węgla do gazyfikacji, możliwość gazyfikacji trudno dostępnych, głębokich pokładów węgla, brak konieczności budowy kopalń węgla czy instalacji gazyfikacji, brak odpadów do zagospodarowania, małe straty ciepła do otoczenia, niska emisja zanieczyszczeń i metanu, niskie koszty inwestycyjne i operacyjne, możliwość integracji z technologią CCS	brak możliwości zapewnienia stałych właściwości produkowanego gazu, straty czynnika zgazowującego i produkowanego gazu, potencjalne zanieczyszczenie wód podziemnych, ich zasiarczenie i zasolenie, brak możliwości stosowania w złożach położonych blisko powierzchni, nadkład musi być 100–150-metrowy, groźba wystąpienia zawałów zgazowanych złóż	faza demonstracyjna	zaawansowane badania nad zgazowaniem węgla w złożu, projekt doświadczalny HUGE – prace eksperymentalne w Kopalni Doświadczalnej „Barbara”, HUGE 2 – prace eksperymentalne w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” i kopalni „Staszic”, projekt na złożu z węgla brunatnego w Bełchatowie, realizowany przez Poltegor – Instytut

3	Współspalanie biomasy z węglem	najprostszy i najtańszy sposób zwiększenia produkcji energii elektrycznej z paliw odnawialnych, redukcja emisji CO ₂ , SO ₂ , NO _x oraz zanieczyszczeń organicznych, zwiększenie sprawności energetycznej przetwarzania energii chemicznej węgla, w tym węgla trudno spalającego się, możliwość zastosowania technologii w istniejących kotłach bez względu na moc	wymagana stabilność dostaw biomasy o stałych właściwościach fizykochemicznych (np. wilgoć), konieczność przygotowania ujednorodnionych mieszanek paliwowych do spalania, zachowanie optymalnego udziału biomasy w mieszance paliwowej, przyspieszona korozja elementów grzewczych kotłów, zwiększone ryzyko pożaru lub wybuchu	dojrzała rynkowo	19 elektrowni wyposażonych w bloki opalane biomasą, 47 elektrowni realizujących technologię współspalania biomasy z węglem
4	CCS	możliwość całkowitej eliminacji CO ₂ w procesie spalania węgla, możliwość gwarancji wysokiego poziomu bezpieczeństwa energetycznego kraju, wstępne szacunki składowania CO ₂ – 100 lat, brak zagrożenia wstrząsami sejsmicznymi na terenie Polski, brak zagrożenia rozprzestrzeniania się CO ₂ , redukcja objętości CO ₂ z głębokością	spadek sprawności instalacji o 8–12%, wysokie koszty inwestycyjne infrastruktury transportowej, brak wiedzy na temat wpływu sekwestracji CO ₂ na warstwę wody pitnej i solanek, obniżenie wartości gruntów na terenie objętym koncesją CCS	faza badawcza	10 lat prac badawczych nad technologią CCS, dwa zrealizowane projekty zatłaczania CO ₂ pod ziemię (RECOPOL, MOVECBM), jeden projekt demonstracyjny wychwyty CCS w Polsce – Elektrownia Bełchatów, brak wdrożonych, funkcjonujących instalacji, sekwestracja CO ₂ : Borzęcin, Kaniów, Bełchatów
5	Paliwa płynne	zmniejszenie zależności energetycznej od zewnętrznych dostawców ropy i gazu, dywersyfikacja źródeł zaopatrzenia w energię, lepsze wykorzystanie potencjału wydobywczego kopalń, gospodarcze ożywienie górniczych regionów	wielkość przerobu węgla, ryzyko zakłóceń zaopatrzeniowych, ilość wody potrzebnej do procesu zbliżona do ilości węgla, wymagana instalacja przerobu ubocznych produktów syntezy	dojrzała technologicznie (ekonomicznie pod pewnymi warunkami)	brak wdrożonych, funkcjonujących instalacji

Powyższa tabela potwierdza, że technologie CTW posiadają zróżnicowane właściwości w kontekście uwarunkowań ekologicznych oraz technicznych. Każda z nich posiada zarówno zalety, jak i wady. Widoczny jest zróżnicowany stan dojrzałości technologicznej oraz poziom komercjalizacji i dojrzałości rynkowej. Część analizowanych rozwiązań technologicznych, do których należy wzbogacanie, uszlachetnianie węgla czy współspalanie biomasy z węglem, są już wdrożone i z powodzeniem stosowane. Pozostałe znajdują się jeszcze w fazie zaawansowanych badań lub przygotowywane są dopiero do komercjalizacji.

5. PODSUMOWANIE

Spośród czystych technologii węglowych opisanych w niniejszym artykule największą uwagę literatura i media poświęcają technologii współspalania biomasy z węglem oraz wychwytywaniu i sekwestracji CO₂. Technologie te postrzegane są jako najbardziej perspektywiczne i skuteczne pod względem wypełnienia zobowiązań, jakie nakłada na Polskę przyjęty w 2008 r. przez Unię Europejską pakiet klimatyczno-energetyczny.

Współspalanie biomasy z węglem kamiennym to technologia z powodzeniem realizowana w energetyce zawodowej. Szacuje się, że 45% energii elektrycznej produkowanej z OZE pochodzi właśnie z tego procesu. Każdego roku zwiększa się liczba

elektrowni, które uruchamiają specjalne bloki realizujące współspalanie biomasy z węglem. Mimo że udział biomasy w procesie spalania węgla powoduje konieczność wprowadzenia modyfikacji w kotle, jednak przy zerowym bilansie CO₂ dla biomasy, dodanie jej, nawet w niewielkiej ilości do procesu spalania, pozwala na znaczne wykorzystanie jej potencjału energetycznego. Możliwe jest także obniżenie wzrostu stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Wykorzystując technologię współspalania biomasy z węglem, elektrownie zwiększają szansę na osiągnięcie każdego z celów wyznaczonych przez pakiet „3 × 20%”.

Autorzy pracy uważają jednak, że współspalanie biomasy z węglem powinno być uznane za technologię przejściową. Podstawą barierą do stosowania współspalania na dużą skalę jest niska podaż biomasy o stabilnej jakości. Ponadto w Ministerstwie Gospodarki trwają prace nad projektem nowej ustawy dotyczącej OZE. Zakładałaby ona eliminację procesu współspalania biomasy z węglem, stanowiącego źródło zielonej energii.

CCS jest drugą technologią pozwalającą na obniżenie emisji CO₂ w okresie nałożonym na Polskę przez Unię Europejską. Pomimo licznych zalet i skuteczności, CCS nie została jeszcze wdrożona. Unia Europejska przeznaczyła znaczne środki pieniężne na rozwój technologii CCS w Europie, a instalacja CCS w Bełchatowie jest projektem, który uzyskał dofinansowanie. Wyznaczono już miejsce sekwestracji wychwyconego CO₂, niebawem mają rozpocząć się prace związane z budową rurociągów transportujących dwutlenek węgla. Niestety, na początku 2012 r. pojawiły się niepokojące informacje od samego inwestora, który obawia się dużych kosztów i nierentowności swoich działań.

Zdaniem autorów pracy, kluczową rolę w perspektywie długoterminowej, będzie odgrywać technologia naziemnego zgazowania węgla. Proces ten pozwala na wytworzenie gazu, który po oczyszczeniu może posłużyć do produkcji energii lub paliw. Głównymi kierunkami stosowania technologii zgazowania powinny być zatem układy produkujące czystą energię i paliwa płynne. Przykładem zastosowania powyższej technologii w krajach europejskich jest układ turbin gazowych i parowych zintegrowanych ze zgazowaniem węgla, znany jako IGCC. System IGCC cechuje wysoka sprawność generowania energii elektrycznej, przy niskim poziomie emisji niebezpiecznych składników gazowych i pyłów. Idealnym rozwiązaniem byłoby połączenie IGCC z produkcją paliw płynnych, tworząc jednocześnie układ poligeneracyjny. Liczne zalety stosowania technologii naziemnego zgazowania węgla przekonują, że prace badawcze powinny pójść właśnie w tym kierunku.

Wzbogacanie węgla jest technologią znaną i od lat stosowaną w przemyśle, jednak nie przekładającą się w znaczący sposób na obniżenie emisji dwutlenku węgla. Technologie zgazowania naziemnego i podziemnego mają dużą szansę na zastosowanie, pod warunkiem intensyfikacji badań nad zwiększeniem sprawności procesu, zakończonych wdrożeniem. Realizowane przez elektrownie na dużą skalę współspalanie biomasy z węglem, mimo że perspektywiczne i skutecznie obniżające emisję CO₂ do atmosfery, może wraz z wprowadzeniem nowych regulacji prawnych okazać się przedsięwzięciem ekonomicznie nieefektywnym. Z drugiej strony, technologie CCS, znane na świecie od wielu lat, wymagają udoskonalenia i wdrożenia na terenie nasze-

go kraju, tak aby realny był ich wpływ na redukcję dwutlenku węgla o 20% do 2020 r. Inny proces, czyli produkcja paliw płynnych z węgla, jest technologią w Polsce znaną, jednak przy wciąż konkurencyjnych cenach ropy naftowej, ekonomicznie nieoptyczną.

Podsumowując, część analizowanych rozwiązań technologicznych, do których należy wzbogacanie węgla i współspalanie biomasy z węglem, jest już wdrożona. Pozostałe technologie znajdują się jeszcze w fazie zaawansowanych badań lub na etapie przygotowań do komercjalizacji.

Zdaniem niektórych badaczy posiadanie największych w Europie zasobów węgla kamiennego i wysoki procent „uzależnienia” gospodarki energetycznej od węgla, sprawia, że Polska ma niebывалą szansę stać się liderem technologii niskoemisyjnych. Wspecjalizowanie się w czystych technologiach węglowych powinno umocnić pozycję Polski w nowo kształtującym się globalnym porządku. Warunkiem jest jednak zdecydowane opowiedzenie się za czystymi technologiami węglowymi. Niezwykle istotne jest, aby znaleźć tzw. złoty środek między wykorzystaniem węgla na potrzeby produkcji energii elektrycznej i ciepłej, a osiąganiem celów związanych z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Literatura

1. Blaschke W. (2008): Technologie czystego węgla rozpoczynają się od jego wzbogacania. *Polityka Energetyczna* T. 11, z. 2.
2. Blaschke W. (2009): Przeróbka węgla kamiennego – wzbogacanie grawitacyjne. Kraków. IGSMiE PAN.
3. Blaschke W., Góralczyk S. (2008): Czyste technologie węglowe – problem odpadów. *Ekologia Przemysłowa* nr 3.
4. Czyste Technologie Węglowe. Załącznik nr 2 do Zielonej Księgi Narodowego Programu Redukcji Emisji Gazów Ciężkich (2010). Warszawa, Społeczna Rada Narodowego Programu Redukcji Emisji.
5. Definicja czystych technologii węglowych (CTW). Katowice, Główny Instytut Górnictwa (http://www.gig.eu/pl/a562/Definicja_Czystych_Technologii_Węglowych_CTW.html).
6. Golec T., Lewtak R., Świątkowski B., Glot B. (2010): Współspalanie biomasy z węglem. *Czysta Energia* nr 9.
7. Karcz A., Ściążko M. (2007): Energochemiczne przetwórstwo węgla do paliw ciekłych. *Wiadomości Górnicze* nr 2.
8. Strugała A., Czernski G. (2011): Co jeszcze z węgla? *Chemia Przemysłowa* nr 6.
9. Ściążko M. (2010): Technologia wychwytywania i geologicznego składowania dwutlenku węgla (CCS) sposobem na złagodzenie zmian klimatycznych. W: *Technologie wychwytywania dwutlenku węgla*. Warszawa, PKPP Lewiatan.
10. Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M. (2006): Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. *Energetyka i Ekologia* nr 3 (621).
11. Taubman J. (2011): *Węgiel i alternatywne źródła energii. Prognoza na przyszłość*. Warszawa, Wydaw. Naukowe PWN.