

*Krzysztof Stańczyk\*, Marek Bieniecki\**

## MOŻLIWOŚCI REDUKCJI EMISJI CO<sub>2</sub> I JEJ WPŁYW NA EFEKTYWNOŚĆ I KOSZTY WYTWARZANIA ENERGII Z WĘGLA

---

### 1. Wstęp

Według powszechnej opinii za obserwowane zmiany klimatu odpowiada efekt cieplarniany powodowany wzrostem emisji przede wszystkim dwutlenku węgla powstającego w procesach spalania paliw pierwotnych.

Najistotniejszym źródłem emisji dwutlenku węgla jest energetyka zawodowa oparta na węglu kamiennym i brunatnym. Uwarunkowania prawno-polityczne — Protokół z Kioto; określone wielkości uprawnień do emisji — jak i ekonomiczne — opłaty za emisję, szczególnie poza przydzielonymi uprawnieniami — stwarzają konieczność podjęcia działań na rzecz ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> w celu zmniejszenia, a przynajmniej niezwiększenia stężenia dwutlenku węgla w atmosferze.

Jednym z kierunków działań jest wdrażanie i rozwój technologii energetycznych charakteryzujących się niską, wręcz bliską zeru emisją dwutlenku węgla. W referacie przedstawiono główne kierunki rozwoju tego rodzaju technologii, a także dokonano oszacowania wpływu stosowanych rozwiązań na efektywność energetyczną oraz koszty wytwarzania energii.

### 2. Technologie ograniczające emisję CO<sub>2</sub> do powietrza

#### 2.1. Podwyższanie efektywności energetycznej procesów stosowanych w energetyce zawodowej

Podwyższenie sprawności można zrealizować poprzez zastępowanie paliw stałych paliwem gazowym lub olejem opałowym oraz poprzez wdrożenie nowoczesnych technologii spalania paliw stałych i wytwarzania energii elektrycznej.

---

\* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Koncepcja wzrostu sprawności znajduje powszechne uznanie i akceptację, gdyż dąży do oszczędności paliwa, a jednocześnie opiera się na wykorzystaniu i doskonaleniu znanych i dojrzałych technologii energetycznych.

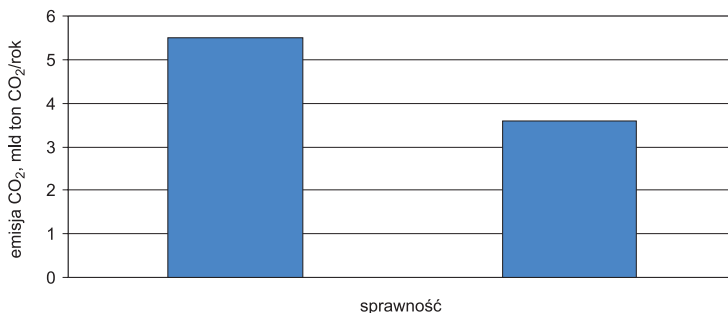
Na przykład obecnie sprawność wytwarzania energii elektrycznej w zależności od nośnika energii i źródła wytwarzania wynosi od 25 do 48%. Jak z tego wynika zwiększenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej w źródłach o niskiej sprawności może doprowadzić do wielkich oszczędności w zużyciu paliwa, a co za tym idzie do znacznej redukcji emisji dwutlenku węgla.

Zwiększenie średniej sprawności wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej może być osiągnięte poprzez wprowadzenie do praktyki przemysłowej nowoczesnych rozwiązań takich jak:

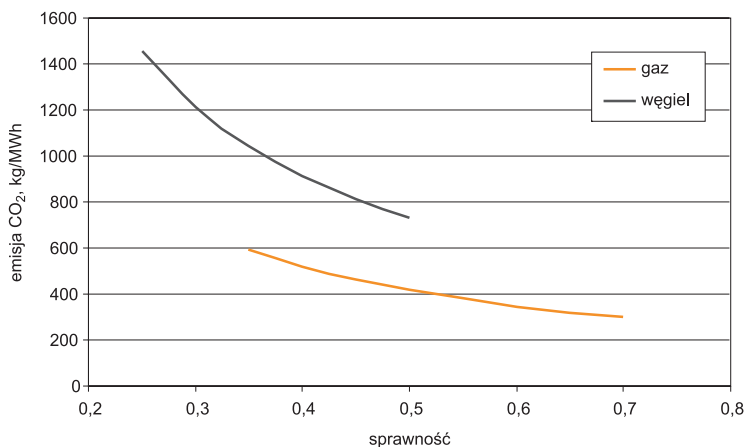
- upowszechnienie bloków pracujących przy parametrach nadkrytycznych (27÷29 Mpa/570÷580°C) pozwalających na uzyskanie sprawności 44÷46% [1];
- zastosowanie bloków pracujących przy ultra-nadkrytycznych parametrach pary (35 MPa/720°C). Są to układy, nad którymi prowadzone są obecnie prace badawcze i prowadzone są projekty demonstracyjne, a celem tych prac jest doprowadzenie do rozwiązania, w którym energię elektryczną będzie się wytwarzało ze sprawnością osiagającą 55%;
- zastosowanie zintegrowanych układów gazowo-parowych, które pozwolą na wzrost sprawności generowania elektryczności do około 48%, a jednocześnie ułatwią wychwytywanie powstającego w spalaniu dwutlenku węgla;
- zastosowanie i upowszechnienie kotłów z paleniskami fluidalnymi atmosferycznymi, to jest technologii już dzisiaj dostępnej i dojrzałej, pozwalającej na generowanie elektryczności ze sprawnością wynoszącą około 45%;
- wprowadzenie spalania w tlenie pozwalającego na znaczne zmniejszenie gabarytów siłowni i uniknięcie konieczności wydzielenia dwutlenku węgla ze strumienia spalin;
- zastosowanie pętli chemicznej, polegające na dostarczeniu tlenu do spalania paliwa poprzez związek chemiczny i pozwalające na uzyskanie stężonego dwutlenku węgla w strumieniu spalin.

Na rysunku 1 pokazano możliwą do osiągnięcia redukcję emisji dwutlenku węgla poprzez zastąpienie nisko efektywnych instalacji spalania węgla kamiennego instalacjami stosującymi już znane czyste technologie węglowe. Jak wynika z rysunku, tym sposobem można ograniczyć emisję CO<sub>2</sub> o około 30% poprzez podniesie sprawności cieplnej wytwarzania energii elektrycznej z 30 do 46%. Przy zastosowaniu najnowocześniejszych układów możliwa jest dalsza redukcja emisji dochodząca nawet do 50%.

Wpływ sprawności cieplnej elektrowni oraz użytego paliwa na ilość emitowanego dwutlenku węgla pokazano na rysunku 2. Na podstawie obliczenia, których wykonany został wykres, przeprowadzono dla układu spalania paliw w powietrzu i aktualnie dominujących technologii wytwarzania energii elektrycznej.



**Rys. 1.** Redukcja emisji dwutlenku węgla spowodowana wzrostem sprawności wytwarzania energii z 30 do 46%



**Rys. 2.** Wpływ rodzaju paliwa przy określonej sprawności na wielkość emisji dwutlenku węgla

## 2.2. Wychwytywanie i bezpieczne składowanie dwutlenku węgla

Wychwytywanie i bezpieczne składowanie dwutlenku węgla jest możliwe pod warunkiem opanowania technologii efektywnego wydzielania tego gazu ze strumienia gazów powstających w procesie spalania. Obecnie realizuje się takie procesy (wychwytywania CO<sub>2</sub>), opierając się na ciągle doskonalonych technikach membranowych i na technikach z użyciem stałych i ciekłych adsorbentów.

Kolejnym problemem jest przesył zaadsorbowanego i wydzielonego dwutlenku węgla, a największym problemem jest trwale i bezpieczne jego składowanie. Inny sposób utylizacji CO<sub>2</sub> może polegać na jego konwersji katalitycznej do użytecznych produktów chemicznych. Tym sposobem można wykorzystać jednak tylko niewielką część dwutlenku węgla powstającego w procesach energetycznego spalania paliw.

We wszystkich operacjach związanych z eliminacją dwutlenku węgla, tj.: separacji, przesyle oraz sekwestracji, następuje utrata części wytworzonej energii, a zatem pełen proces wytwarzania energii z zerową emisją CO<sub>2</sub> będzie miał niższą sprawność niż proces, w którym CO<sub>2</sub> wypuszczane jest do atmosfery.

Eksperti są zgodni, że technologia wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub> (*CO<sub>2</sub> Capture and Storage – CCS*), wraz z poprawą sprawności konwersji energii, stanie się w nieodległej perspektywie czasowej rozwiązaniem pozwalającym ograniczyć na dużą skalę emisję CO<sub>2</sub>, pochodzącego z procesów wytwarzania energii z paliw kopalnych. Pomimo tego, że większość elementów technologicznych jest dostępna, nie zastosowano do tej pory powszechnie technologii CCS z dwóch następujących, podstawowych powodów:

- 1) technologie te charakteryzują się wysokimi, wciąż przewyższającymi potencjalne korzyści rynkowe, kosztami;
- 2) nie wystarczająco określone są ramy prawne działań związanych ze składowaniem CO<sub>2</sub>.

### 3. Główne opcje technologiczne wychwytywania CO<sub>2</sub>

Prace rozwojowe mające na celu opracowanie technologii efektywnego ograniczania emisji dwutlenku węgla prowadzone są w:

- technologiach wychwytywania CO<sub>2</sub> *po procesie spalania*, w których CO<sub>2</sub> jest wychwytywane ze spalin powstających podczas spalania w powietrzu, pierwotnych nośników energii, takich jak węgiel, gaz ziemny i olej opałowy. Takie systemy mogą zostać dobudowane do istniejących elektrowni oraz uwzględnione w nowobudowanych elektrowniach;
- technologiach wychwytywania CO<sub>2</sub> *przed procesem spalania*, w których paliwa stałe przetwarzają się do postaci gazu syntezowego, a następnie paliwo gazowe — gaz syntezowy z węgla lub gaz ziemny — podlegają przetworzeniu w reakcji wymiany, w łatwe do rozdzielenia strumienie CO<sub>2</sub> i wodoru. Wodór może być wówczas wykorzystany do wytwarzania elektryczności lub jako paliwo w ogniach paliwowych, a strumień CO<sub>2</sub> przekształcony do postaci dogodnej do składowania lub sekwestracji;
- technologiach *spalania paliw w atmosferze wzbogacanej tlenem (Oxy-fuel combustion)*, w których w procesie spalania zamiast powietrza stosowany jest tlen. W rezultacie powstają spaliny zawierające głównie H<sub>2</sub>O i dwutlenek węgla, który może być, po skondensowaniu pary wodnej, łatwo wychwycony;
- technologiach współspalania paliw stałych z biomasa, w których ograniczenie emisji dwutlenku węgla polega na zastąpieniu części strumienia energii z paliwa pierwotnego biomasa.

W dalszej części artykułu przedstawiono stan zaawansowania wymienionych głównych opcji technologicznych.

### **3.1. Technologia wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania**

W przypadku tej technologii korzystny jest fakt, że technologia wychwytywania CO<sub>2</sub>, oparta na procesach chemicznej absorpcji, jest już technologią sprawdzoną i dostępną w skali przemysłowej w przemyśle gazowym i naftowym oraz na umiarkowaną skalę w zastosowaniu do spalin. Z uwagi na wieloletnie doświadczenia w tej dziedzinie jest to technologia najbliższa osiągnięcia pełnej, komercyjnej skali przemysłowej, gdyż może zostać dołączona do układów istniejących elektrowni opalanych paliwami kopalnymi.

Aby technologia ta mogła być stosowana w energetyce, konieczne jest około 50-krotne powiększenie skali. Ponieważ ekonomiczna opłacalność wychwytywania CO<sub>2</sub> jest niemożliwa do osiągnięcia przy zastosowaniu istniejących obecnie rozpuszczalników, muszą zostać opracowane nowe, powodujące znaczące zmniejszenie zużycia energii. Dla stosowania tej technologii konieczne jest też obniżenie stężenia innych zanieczyszczeń, to jest tlenu siarki (SO<sub>2</sub>), tlenków azotu (NO<sub>x</sub>) i pyłu, gdyż obecność tych zanieczyszczeń zmniejsza efektywność chemicznego absorbera. Obecnie proces jest optymalizowany poprzez badanie nowych absorberów w celu obniżenia kosztów wychwytywania CO<sub>2</sub>.

### **3.2. Technologie wychwytywania CO<sub>2</sub> przed procesem spalania**

Idea przyświecająca technologii wychwytywania CO<sub>2</sub> przed procesem spalania, polega na usunięciu pierwiastka węgla z gazu ziemnego, ropy naftowej lub węgla przed ich spalaniem, pozostawiając wyłącznie wodór. Tak otrzymany wodór może być użyty jako paliwo w elektrowniach lub ogniwach paliwowych. W praktyce zgazowanie paliw kopalnych jest procesem dobrze znanym i dostępnym w skali przemysłowej od wielu lat, lecz niezbyt szeroko stosowanym dla celów energetycznych. Proces ten to Zgazowanie Węgla Zintegrowane z Cyklem Gazowo-Parowym (IGCC).

Chociaż istnieją już instalacje demonstracyjne IGCC, konieczne są dalsze doświadczenia, które pozwolą na uzyskanie niezawodności eksploatacji tych instalacji. Brak również obecnie na rynku wysokosprawnej turbiny wodorowej, dostosowanej do potrzeb CCS. Podobnie jak w przypadku technologii wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania, i dla tej technologii istnieją realne możliwości powiększenia skali i optymalizacji procesu.

### **3.3. Technologia spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem**

Technologia spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem polega na tym, że z powietrza usuwany jest azot, z zastosowaniem tradycyjnej jednostki separacji powietrza. Paliwo następnie spalane jest w mieszaninie tlenu i CO<sub>2</sub>. Ten ostatni jest recykulowany, aby regulować temperaturę spalania. W wyniku takiego spalania otrzymuje się spaliny składające się głównie z CO<sub>2</sub> i pary wodnej. Spaliny te mogą zostać zagęszczone tak, aby otrzymać strumień silnie stężonego CO<sub>2</sub>.

Spalanie w czystym tlenie, zmieszonym z CO<sub>2</sub>, jest dobrze rozpoznane w małej skali, istnieje także wiele instalacji przemysłowych ze spalaniem w tlenie. Jednakże dla przypadków, gdy paliwem jest węgiel, a procesy mają zachodzić w bardzo dużych instalacjach, spalanie

takie wciąż nie jest dobrze opracowane pod względem charakterystyk promieniowania, tworzenia się zanieczyszczeń, nagromadzania się osadów — czyli doświadczeń wymaganych z punktu widzenia realizacji procesu w pełnej skali. Zastosowanie technologii spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem w układzie parowym wpłynie nieznacznie na sam proces spalania, podczas gdy w przypadku turbiny gazowej wymagane będzie całkowite jej prze-projektowanie.

### **3.4. Ograniczanie emisji CO<sub>2</sub> poprzez współspalanie węgla i biomasy**

W procesach spalania mieszanek węglowych z biomasą mamy do czynienia z dwoma podstawowymi aspektami: efektywności energetycznej układów do spalania tych mieszanek oraz kosztami pozyskania paliwa.

Efektywność energetyczna układów zależy od sprawności kotła (wynikającej z jego charakterystyki) oraz specyfiki procesu spalania mieszanek odmiennego od spalania samej biomasy czy węgla.

Na koszty pozyskania paliwa składają się: koszty zakupu węgla, koszty pozyskania biomasy oraz koszty przygotowania mieszanek paliwowych. Koszty pozyskania składników biomasy zależą w dużym stopniu od uwarunkowań regionalnych. Współspalanie biomasy wymaga przy tym rozwiązania szeregu problemów wiążących się z jej dużą objętością i zawartością wilgoci. Poważnym wyzwaniem ze względu na niebezpieczeństwo podnoszenia się temperatury wewnątrz pryzm składowanej biomasy jest jej magazynowanie i zachodzące w niej reakcje chemiczne. Pomimo tych wad jest to jeden z najbardziej konkurencyjnych ekonomicznie sposobów produkcji użytecznej energii odnawialnej oraz ograniczania emisji CO<sub>2</sub>. Przeprowadzone próby dowodzą, że w przypadku kotłów rusztowych dla współspalania biomasy z węglem kamiennym do około 20% udziału energetycznego biomasy w całkowitym strumieniu energii paliwa podawanego do kotła nie są konieczne zmiany konstrukcyjne w istniejących obiektach, a ponadto:

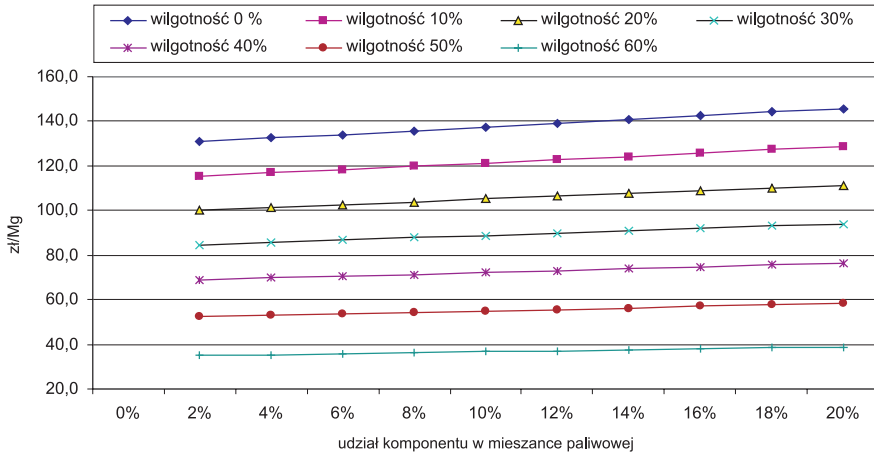
- współspalanie węgla z biomasą nie powoduje istotnej zmiany sprawności cieplnej brutto kotła rusztowego;
- podczas współspalania węgla z biomasą uzyskuje się korzyści ekologiczne, dające się wyrazić w sposób wymierny w złotych.

Do składowych efektów ekonomicznych zaliczyć można:

- zmniejszenie opłat ekologicznych za korzystanie ze środowiska;
- uzyskanie dodatkowych korzyści wynikających z handlu emisjami dwutlenkiem węgla;
- niższe koszty paliwa, pod warunkiem że koszty pozyskania biomasy nie przekraczają wyznaczonej wartości granicznej.

Na rysunku 3 przedstawiono jednostkowe koszty graniczne pozyskania biomasy do współspalania z węglem brunatnym w zależności od zawartości wilgoci i udziału biomasy w mieszance paliwowej.

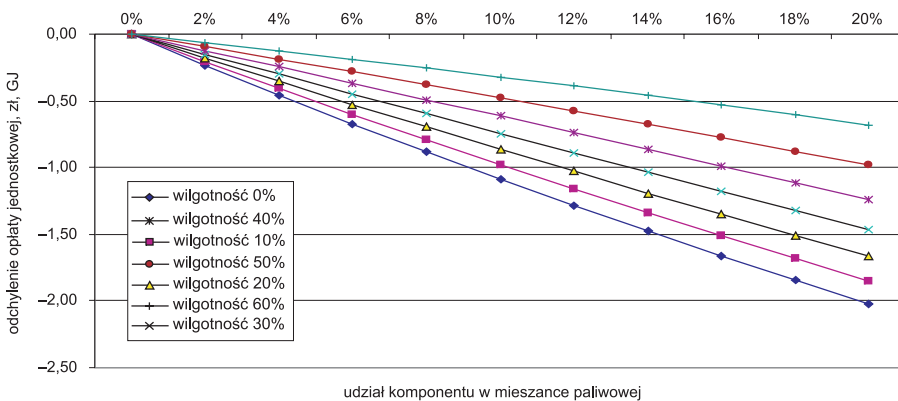
W obliczeniach, na podstawie których wykonano wykres, wykorzystano opracowany w GIG algorytm obliczania efektów współspalania węgla kamiennego z biomasą w kotłach, po stosownej, uwzględniającej skład chemiczny węgla brunatnego i jego koszt pozyskania, modyfikacji.



Rys. 3. Jednostkowe graniczne koszty pozyskania komponentu: słoma

Jak wynika z powyższego rysunku, zastąpienie części strumienia energii z węgla biomasą będzie tym efektywniejsze ekonomicznie, im niższa będzie wilgotność biomasy oraz im wyższy będzie jej udział w mieszance paliwowej.

Rysunek 4 obrazuje korzyści w opłatach środowiskowych w wyniku współspalania słomy w mieszance paliwowej z węglem brunatnym.



Rys. 4. Odchylenie opłaty jednostkowej za emisję zanieczyszczeń dla 1 GJ energii użytkowej — komponent mieszanki paliwowej: słoma

Jak wynika z przedstawionego rysunku współspalanie biomasy z węglem brunatnym powoduje zmniejszenie opłat środowiskowych za emisję zanieczyszczeń pyłowo-gazowych w porównaniu ze spalaniem samego węgla. Efekt ten — odchylenie opłat jednostkowych — będzie tym większy im wyższy będzie udział biomasy w mieszance paliwowej i im niższa będzie wilgotność biomasy.

#### 4. Oszacowanie efektów ekonomicznych i energetycznych ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>

Wdrożenie poszczególnych technologii ograniczających emisję dwutlenku węgla do atmosfery związane jest z wydatkiem energetycznym zmniejszającym sprawność termiczną netto procesu wytwarzania energii oraz koniecznością ponoszenia dodatkowych kosztów budowy odpowiednich instalacji.

Ze wstępnych analiz energetycznych i ekonomicznych omówionych wyżej głównych opcji technologicznych ograniczania emisji dwutlenku węgla wynika, że:

- W procesach wychwytywania CO<sub>2</sub> po procesie spalania oszacowane koszty i wpływ na sprawność energetyczną netto przedstawiają się następująco [11]:
  - Zużycie energii w procesach absorpcji chemicznej dwutlenku węgla w zależności od zastosowanej metody zawiera się w zakresie od 0,3 do 0,11 kWh/kg CO<sub>2</sub> [2] (przy niskim ciśnieniu 0,34 kWh/kg CO<sub>2</sub>, a dla absorpcji przy wysokim ciśnieniu — 0,11 kWh/kg CO<sub>2</sub>).
  - Zapotrzebowanie na energię do procesu absorpcji fizycznej zależy jest od rozpuszczalności absorbowanego składnika i dla dwutlenku węgla zawiera się w granicach od 0,03 do 0,11 kWh/kg CO<sub>2</sub>. Stosowane są trzy rodzaje adsorpcji do oddzielania CO<sub>2</sub> i związane z tym sposoby regeneracji adsorbenta:
    - zmiennociśnieniowa PSA (*Pressure Swing Adsorption*) adsorbent jest regenerowany przez zmniejszenie ciśnienia,
    - zmiennotemperaturowa TSA (*Temperature Swing Adsorption*) adsorbent jest regenerowany przez podnoszenie jego temperatury,
    - zmiennoelektryczna ESA (*Electric Swing Adsorption*) regeneracja adsorbenta następuje poprzez przepuszczanie niskonapięciowego prądu elektrycznego.
  - Zużycie energii w procesach absorpcji fizycznej zależy między innymi od zastosowanego procesu, koncentracji CO<sub>2</sub> w gazie doprowadzonym oraz sprawności procesu. Dla instalacji PSA o sprawności procesu 60% i przy przepuszczaniu gazu o zawartości dwutlenku węgla 28÷32% zużycie energii waha się w granicy 0,16÷0,18 kWh/kg CO<sub>2</sub>. Dla wysokosprawnego oczyszczania gazu zużycie energii osiąga wartość 0,7 kWh/kg CO<sub>2</sub>.
  - Zużycie energii w przypadku separacji membranowej waha się w zależności od konfiguracji układów membranowych w granicach 0,04÷0,07 kWh/kg CO<sub>2</sub>.

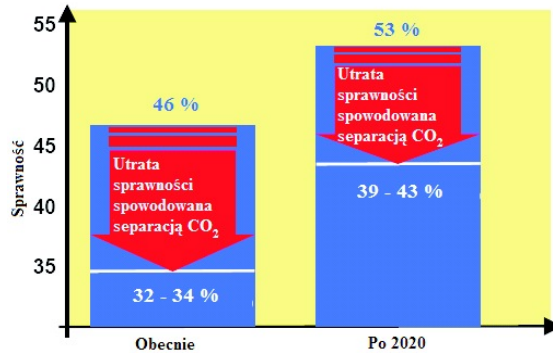


- Metoda kriogeniczna polega na sprężaniu i schładzaniu gazu do odpowiedniej temperatury, a następnie wydzieleniu separowanego składnika w postaci ciekłej. Selektowność procesu wynika z różnych warunków kondensacji poszczególnych składników gazu ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ). W przypadku procesów kriogenicznej separacji  $CO_2$  zużycie energii wynosi  $0,04 \pm 0,1$  kWh/kg  $CO_2$  dla oczyszczania sprężonego gazu syntezowego pochodzącego z zgazowania węgla i  $0,6 \pm 1,0$  kWh/kg  $CO_2$  dla oczyszczania gazów spalinowych. Najniższym zużyciem energii na separację  $CO_2$  charakteryzuje się metoda absorpcji fizycznej (ok.  $0,03$  kWh/kg  $CO_2$ ) oraz separacja membranowa ( $0,04 \pm 0,07$  kWh/kg  $CO_2$ ).
- Przy ograniczaniu emisji  $CO_2$  w procesach jego wychwytywania przed wytworzeniem energii elektrycznej i/lub ciepła sprawność netto układu dla separacji  $CO_2$  przed procesem spalania dla układu z konwersją  $CO$  z gazu surowego, obniża się o około  $6 \pm 8\%$  dla dwutlenku węgla otrzymanego w stanie ciekłym, a o  $4 \pm 5\%$  dla dwutlenku węgla w stanie gazowym. W przypadku, gdy konwersja  $CO_2$  następuje z oczyszczonego gazu, sprawność netto całego układu energetycznego obniża się o  $7 \pm 10\%$  dla ciekłego  $CO_2$  i o  $4 \pm 7\%$  dla  $CO_2$  gazowego. Procesy bez konwersji  $CO$  do  $CO_2$  powinien zapewnić redukcję dwutlenku węgla na poziomie  $90\%$  przy spadku sprawności netto układu o  $6\%$ .
- Procesy spalania paliw w atmosferze tlenu z recyrkulacją  $CO_2$ . Na skalę przemysłową procesy zgazowania węgla odbywają się z reguły w atmosferze tlenu albo powietrza z dodatkiem pary wodnej. Dwutlenek węgla ze spalin jest po części zawracany do turbiny gazowej. Spaliny przed sprężarką gazową wymagają ochłodzenia w celu zmniejszenia jej obciążenia. Spadek sprawności układu IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*) ze zgazowaniem w atmosferze tlenu i z recyrkulacją spalin przy sprawności separacji na poziomie  $97 \pm 100\%$  wynosi  $3,5 \pm 9\%$  dla  $CO_2$  w stanie ciekłym.
- Współspalanie węgla z biomasą. Najefektywniejszym energetycznie i ekonomicznie procesem ograniczanie emisji  $CO_2$  jest współspalanie węgla z biomasą. Jak już to wcześniej przedstawiono udział biomasy do około  $20\%$  energii wprowadzanej do procesu nie wymaga zmian w konstrukcji kotłów oraz nie powoduje znaczącego obniżenia ich sprawności cieplnej. Jednak współspalanie biomasy z węglem nie daje pożądanych wielkości ograniczenia emisji  $CO_2$ , szczególnie w świetle ustanowionych w UE wymagań w tym zakresie.

We wszystkich etapach ograniczania emisji dwutlenku węgla, to jest separacji, przesyłu oraz sekwestracji, następuje utrata części wytworzonej energii, a zatem pełen proces wytwarzania energii z zerową emisją  $CO_2$  będzie miał niższą sprawność niż proces, w którym  $CO_2$  wypuszczane jest do atmosfery. Ta utrata sprawności pokazana jest na rysunku 5.

Spadek sprawności energetycznej wytwarzania energii elektrycznej (rys. 5) w wyniku zastosowania technologii ograniczających emisję dwutlenku węgla w najnowocześniejszych układach będzie kompensowany ich wysoką sprawnością cieplną. Sumaryczna sprawność nowoczesnej elektrowni wykorzystującej najnowsze osiągnięcia czystych technologii wę-

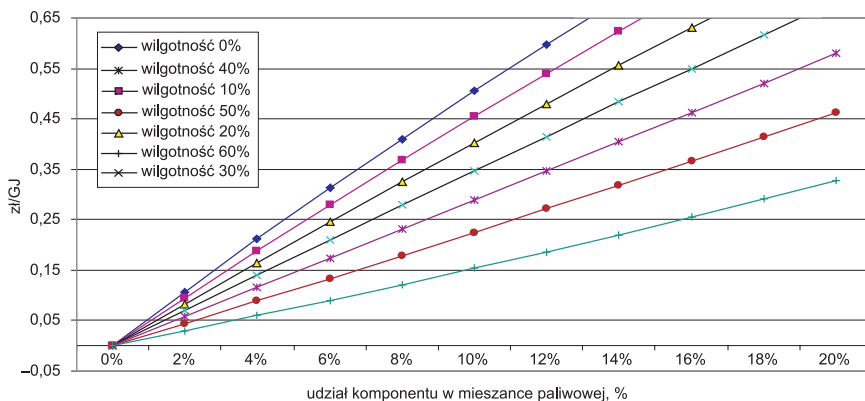
głowych może wynosić po roku 2020 nawet 39÷43%, co jest wartością znacząco wyższą niż sprawność dzisiejszych, powodujących emisję dwutlenku węgla do otoczenia, technologii wytwarzania energii elektrycznej.



Rys. 5. Utrata sprawności wytwarzania energii elektrycznej spowodowana separacją i utylizacją dwutlenku węgla

## 5. Wpływ handlu uprawnieniami do emisji na efektywność ekonomiczną procesów wychwytywania i magazynowania CO<sub>2</sub>

W wyniku uzyskania nadmiaru uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> przy zastosowaniu technologii wychwytywania i sekwestracji CO<sub>2</sub> właściciele instalacji będą mogli sprzedać wolne uprawnienia na rynku. Aktualne ceny uprawnień nie są zbyt atrakcyjne, gdyż kształtują się na poziomie około 1 euro/Mg CO<sub>2</sub>. Na rysunku 6 przedstawiono wpływ pozyskania środków ze sprzedaży uprawnień na jednostkę energii użytkowej przy współspalaniu słomy z węglem brunatnym.



Rys. 6. Korzyści z handlu emisją CO<sub>2</sub> dla ceny spot liczone na 1 GJ energii użytkowej — komponent mieszanki paliwowej: słoma

W przedstawionym, dotyczącym współpalania biomasy z węglem, wykresie uzyskane korzyści z udziału w handlu emisjami są w oczywisty sposób tym wyższe, im więcej i im mniej wilgotnej biomasy będziemy dodawać do węgla.

W technologiach ograniczających emisję CO<sub>2</sub> korzyści te będą wyższe niż w procesach współpalania. Efekt ten będzie zwiększał się w miarę ograniczania ilości uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>.

## 6. Podsumowanie

Pilne rozpowszechnienie technologii CCS — wychwytywania i składowania dwutlenku węgla — ma kluczowe znaczenie, jeżeli chcemy przeciwdziałać katastrofalnym, szybkim zblizającym się konsekwencjom zmiany klimatu. Choć technologie wychwytywania CO<sub>2</sub> są szeroko znane, a w niektórych przypadkach dobrze opanowane, żadna z nich nie jest jeszcze w pełni gotowa do wdrożenia w skali przemysłowej.

Przy wykorzystaniu zdobyczy nauki możemy bazując na paliwie węglowym zbudować takie układy generowania elektryczności, w których będzie ona wytwarzana z wyższą niż dotychczas sprawnością, a jednocześnie nie będzie powodowała emisji dwutlenku węgla.

Aktualnie realizowanych jest wiele projektów badawczych, a duże firmy energetyczne zapowiedziały realizację w niedalekiej przyszłości przemysłowych obiektów komercyjnych.

Najistotniejszymi problemami technologicznymi, które muszą być rozwiązane, aby z węgla dało się produkować energię w sposób bezemisyjny, są efektywne ekonomicznie i energetycznie technologie separacji, magazynowania i utylizacji dwutlenku węgla.

Mechanizm handlu emisjami jest istotnym wsparciem dla konkretnych realizacji inwestycji w zero- i niskoemisyjne technologie wytwarzania energii elektrycznej.

### LITERATURA

- [1] *Staćzyk K., Bialecka B., Nowak D.*: Analiza możliwości realizacji układu zero-emisyjnej elektrowni węglowej poprzez zgazowanie i sekwestrację dwutlenku węgla. Praca statutowa Głównego Instytutu Górniczo-energetycznego, 2006
- [2] *Kotwicz J., Janusz K.*: Sposoby redukcji emisji CO<sub>2</sub> z procesów energetycznych. Rynek Energii, 1/2007
- [3] *Staćzyk K., Świądrowski J.*: Czyste technologie węglowe. Mega-Industry, nr 4, 2006, 14–16
- [4] *Staćzyk K.*: Handel gazami cieplarnianymi szansą dla metanu kopalnianego. Mega-Industry, nr 4, 2005, 17–19
- [5] *Mazurkiewicz M., Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Piotrowski Z., Pomykala R.*: Metody separacji i wychwytywania CO<sub>2</sub>. Polityka energetyczna, t. 8, zeszyt specjalny, 2005, 527–538
- [6] *Herzog H., Golomb D.*: Carbon capture and storage from fossil fuel. Encyclopedia of Energy, 2004
- [7] Carbon dioxide capture from power station. IEA Technical Report, 1992
- [8] *Kruczek H., Rączka P.*: Produkcja energii z paliw kopalnych z zerową emisją CO<sub>2</sub>. Materiały X Międzynarodowej Konferencji Kotłowej. Szczyrk — Orle Gniazdo, 17–20 października 2006
- [9] Carbon Dioxide Capture and Storage. IPCC Special Report. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005
- [10] *Scheffknecht G., Maier J., Berger R., Thowarth H.*: An overview on CO<sub>2</sub> — capture technologies and current R&D activities AT IVD Stuttgart. [W:] Materiały X Międzynarodowej Konferencji Kotłowej. Szczyrk — Orle Gniazdo, 17–20 października 2006

- [11] *Chmielniak T.J., Chmielniak T.*: Separacja CO<sub>2</sub> z procesów energetycznego przetwórstwa paliw. Rozdział 11 z pracy zbiorowej pod redakcją Ścieżko M., Zieliński H.: termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Wydawnictwo IChPW i Sigmie PAN, Zabrze – Kraków 2003
- [12] *Stańczyk K., Bieniecki M., Krowiak A.*: Opracowanie metodyki liczenia kosztów produkcji jednostki energii wytwarzanej w kotłach przemysłowych w oparciu o mieszanki paliwowe węgla i biomasy. Praca statutowa GIG, Katowice 2006