

Zbigniew BIS\*, Tomasz CZAKIERT\*\*

## Fluidalne spalanie węgla w atmosferze wzbogaconej tlenem

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono podstawowe założenia procesu spalania paliw w warstwie fluidalnej w atmosferze wzbogaconej tlenem. Dokonano oceny wpływu tego procesu na zmiany sprawności wytwarzania energii elektrycznej, podkreślając negatywne i pozytywne aspekty tej technologii. Przedstawiono zasadnicze wyniki laboratoryjnych badań tego procesu w stanowisku z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, poświęcone analizie emisji związków siarki i azotu. Wykazano, że wzrost stężenia tlenu poprawia warunki konwersji siarki do  $\text{SO}_2$ , natomiast znacząco obniża konwersję azotu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** spalanie węgla w atmosferze wzbogaconej tlenem, konwersja siarki i azotu

### Wprowadzenie

Powszechnie wiadomo, że emisja gazów cieplarnianych z procesów przetwarzania energii może być zredukowana poprzez użycie alternatywnych źródeł energii tj. energia jądrowa oraz odnawialne źródła energii (OZE). Spodziewamy się, że rola OZE będzie wzrastać, jednakże dzisiejsze doświadczenia pokazują, że perspektywa osiągnięcia przez nie

---

\* Dr hab. inż. Prof. PCz — Katedra Inżynierii Energii, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa; e-mail: zbis@is.pcz.czyst.pl

\*\* Dr inż. — Katedra Ogrzewnictwa Wentylacji i Ochrony Atmosfery, Wydział Inżynierii i Ochrony Środowiska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Euegniusz MOKRZYCKI

znacznego udziału w globalnej produkcji energii jest jeszcze odległa, a do tego czasu konieczne będzie utrzymywanie produkcji z paliw konwencjonalnych.

Ostatnia dekada pokazała, że rola węgla jako źródła energii jest niekwestionowana i zauważa się wyraźny renesans zainteresowania jego efektywnym i przyjaznym środowisku wykorzystaniem [1, 4], jak również zabezpieczeniem stabilności dostaw i cen. Wszystko wskazuje na to, że węgiel będzie utrzymywał ważną pozycję w produkcji energii w dającej się przewidzieć przyszłości.

Negatywny wpływ gazów cieplarnianych na zmiany globalnego klimatu są dziś na tyle wiadome, że rządy coraz większej liczby państw są zgodne co do konieczności podejmowania zorganizowanych działań w kierunku ograniczenia ich emisji. Szczególnie ważnym będzie podjęcie zorganizowanych działań dla ograniczenia emisji tych gazów w przypadku realizacji „scenariusza węglowego”.

Redukcja emisji gazów cieplarnianych z elektrowni opalanych węglem może być realizowana poprzez:

- ✧ podwyższenie sprawności produkcji energii elektrycznej [7],
- ✧ wdrożenie układów kombinowanych lub IGCC,
- ✧ zastąpienie paliw węglowodorowych OZE,
- ✧ wychwytywanie i deponowanie CO<sub>2</sub> produkowanego w konwencjonalnych elektrowniach.

OZE, np. biomasa mogą być użyte do bezpośredniego zastąpienia węgla lub ropy naftowej w procesach spalania lecz niestety nie są dostępne w ilościach wystarczających dla znaczącego zastąpienia w chwili obecnej w Polsce ponad 90% energii generowanej z węgla.

Wśród koncepcji prowadzących do ograniczenia emisji dwutlenku węgla wymienia się również coraz częściej separację CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych i jego późniejsze składowanie bądź wtórne wykorzystanie [2, 3, 5], zmierzając teoretycznie do tzw. „zerowej emisji” dwutlenku węgla. Realizacja tej koncepcji opiera się o realizację spalania paliw konwencjonalnych w kotłach energetycznych w atmosferze wzbogacanej tlenem aż do czystego tlenu włącznie. W efekcie uzyskiwane są spaliny o podwyższonej koncentracji CO<sub>2</sub>, co znacząco ułatwia i obniża koszty jego separacji. Liderzy firm kotłowych — Foster Wheeler oraz Ahlstrom [8], prowadzą bardzo intensywne badania nad opracowaniem konstrukcji kotła realizującego koncepcję „oxy — combustion”. Technologia ta może być realizowana zarówno w kotłach pyłowych jak i fluidalnych. Niniejszy referat zawiera podstawowe analizy oraz wyniki badań realizowanych w tym zakresie w Politechnice Częstochowskiej.

## Ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> a sprawność procesu konwersji energii

Podstawowe pytanie jakie pojawia się w oczywisty sposób na wstępie, dotyczy kosztów. Kalkulacja kosztów towarzyszących wdrażaniu techniki spalania paliw stałych w atmosferze

wzbogaconej tlenem jest złożona ze względu na mnogość czynników jakie powinny być brane pod uwagę [6]. Do najważniejszych spośród kosztów eksploatacyjnych zaliczyć należy koszt produkcji tlenu, koszt ewentualnego oczyszczania gazów spalinowych, koszt transportu oraz składowania pozyskanego dwutlenku węgla. Kalkulacja ta zmieni się jednak istotnie po wprowadzeniu opłat od emisji CO<sub>2</sub>. Ponadto, w przypadku wykorzystania pozyskanego CO<sub>2</sub> w technologiach *Enhanced Oil Recovery* czy *Enhanced Coal Bed Methane* wyżej wymienione koszty mogą zostać przynajmniej częściowo zmniejszone bądź wręcz całkowicie zniwelowane w efekcie obniżenia kosztów wydobycia ropy naftowej czy gazu ziemnego [4].

Z uwagi na bardzo duży postęp jaki obserwuje się w ostatnich latach w dziedzinie separacji gazów, jednoznaczne ustalenie ceny wytwarzania tlenu lub separacji oraz deponowania CO<sub>2</sub>, mających główny udział w całkowitych kosztach eksploatacyjnych, jest trudne do określenia, a ponadto zależy istotnie od stężenia tlenu w wyjściowym produkcie lub dwutlenku węgla w wejściowych spalinach oraz zastosowanej metody separacji. Aktualny stan rozwoju technologii rozdzielania gazów, pozwala na oszacowanie zapotrzebowania energii do produkcji tlenu oraz separacji dwutlenku węgla, które wyrażone odpowiednio w kW·h/kg O<sub>2</sub> oraz kW·h/kg O<sub>2</sub> zestawiono w tabelach 1 i 2 [6].

TABELA 1. Jednostkowe zapotrzebowanie energii do produkcji tlenu oraz względne obniżenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej

TABLE 1. Specific energy use for oxygen production and relative decrease of power production efficiency

| Metoda separacji (zawartość O <sub>2</sub> )                   | [kW·h/kg O <sub>2</sub> ] | $\eta_{el}^{O_2} / \eta_{el}$ |
|--|---------------------------|-------------------------------|
| Kriogeniczna (50% O <sub>2</sub> )                             | 0,400                     | 0,405                         |
| Kriogeniczna (>99% O <sub>2</sub> )                            | 1,100                     | -0,734                        |
| PSA ( <i>Pressure Swing Adsorption</i> ) (90% O <sub>2</sub> ) | 0,550                     | 0,160                         |
| Membranowa (37,5% O <sub>2</sub> )                             | 0,210                     | 0,714                         |
| Membranowa (44% O <sub>2</sub> )                               | 0,300                     | 0,567                         |

TABELA 2. Zapotrzebowanie energii do separacji CO<sub>2</sub> oraz względne obniżenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej

TABLE 2. Energy consumption for CO<sub>2</sub> separation and relative decrease of power production efficiency

| Metoda separacji    | [kW·h/kg CO <sub>2</sub> ] | $\eta_{el}^{CO_2} / \eta_{el}$ |
|---------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Absorpcja fizyczna  | 0,05—0,11                  | 0,919—0,821                    |
| Absorpcja chemiczna | 0,3—0,8                    | 0,512—(-0,302)                 |
| Adsorpcja           | 0,7                        | -0,139                         |

Uwzględniając te wskaźniki można dokonać oszacowania względnego obniżenia sprawności wytwarzania energii elektrycznej w dwu następujących, skrajnych przypadkach:

- ✧ spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem bez konieczności separacji CO<sub>2</sub> ze spalin,
- ✧ spalania w powietrzu atmosferycznym z separacją CO<sub>2</sub> ze spalin.

Sposób takiego oszacowania przedstawiono poniżej.

Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni kondensacyjnej można wyrazić następująco:

$$\eta_{el} = \eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G \quad (1)$$

Uwzględniając wskaźniki jednostkowego zużycie energii na pozyskanie tlenu, z tabeli 1, zależność (1) przyjmie postać:

$$\eta_{el}^{O_2} = \eta_K^{O_2} \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G - 3600 \cdot a^{O_2} \cdot e_{O_2} \quad (2)$$

Wykorzystując zależności (1) i (2), względne obniżenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej w przypadku spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem będzie wynosiło:

$$\frac{\eta_{el}^{O_2}}{\eta_{el}} = \frac{\eta_K^{O_2} \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G - 3600 \cdot a^{O_2} \cdot e_{O_2}}{\eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G} = \frac{\eta_K^{O_2}}{\eta_K} - \frac{3600 \cdot a^{O_2} \cdot e_{O_2}}{\eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G} \quad (3)$$

gdzie:  $a^{O_2} = \frac{m'_{O_2}}{W_d}$  — współczynnik proporcjonalności charakteryzujący zapotrzebowanie tlenu do spalania paliwa o określonym  $W_d$ .

W podobny sposób można otrzymać zależność wyrażającą względne obniżenie sprawności wytwarzania energii elektrycznej w drugim z wymienionych wyżej przypadków w postaci:

$$\frac{\eta_{el}^{CO_2}}{\eta_{el}} = \frac{\eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G - 3600 \cdot a^{CO_2} \cdot e_{CO_2}}{\eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G} = 1 - \frac{3600 \cdot a^{CO_2} \cdot e_{CO_2}}{\eta_K \cdot \eta_R \cdot \eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_G} \quad (4)$$

gdzie:  $a^{CO_2} = \frac{m''_{CO_2}}{W_d}$  — współczynnik proporcjonalności charakteryzujący ilość dwutlenku węgla powstałego ze spalania paliwa o określonym  $W_d$ .

Obliczone wartości względnego obniżenia sprawności zestawiono odpowiednio w tabelach 1 i 2. Wartości ujemne pojawiające się w ostatnich kolumnach obu tabel oznaczają konieczność dostarczania energii elektrycznej z zewnątrz, a więc całkowicie nieopłacalny proces.

Należy podkreślić, że nadrzędnym celem techniki spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem jest uzyskanie podwyższonej koncentracji dwutlenku węgla w spalinach. Dlatego też, z ekonomicznego punktu widzenia proces pozyskiwania tlenu musi być realizowany z większą sprawnością, tj. przy mniejszych nakładach energii i niższych kosztach od procesu separacji CO<sub>2</sub> ze spalin kotłowych. Należy zwrócić uwagę także na inne pozytywne fakty wynikające z realizacji spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem, a mianowicie:

- ✧ wzrost sprawności kotła w wyniku obniżenia strat niecałkowitego i niepełnego spalania oraz zmniejszenia strat wylotowej,
- ✧ możliwość zastosowania tańszych i jakościowo gorszych paliw (o niskiej wartości opałowej, podwyższonej zawartości wilgoci itp.) w efekcie podwyższenia teoretycznej temperatury spalania.

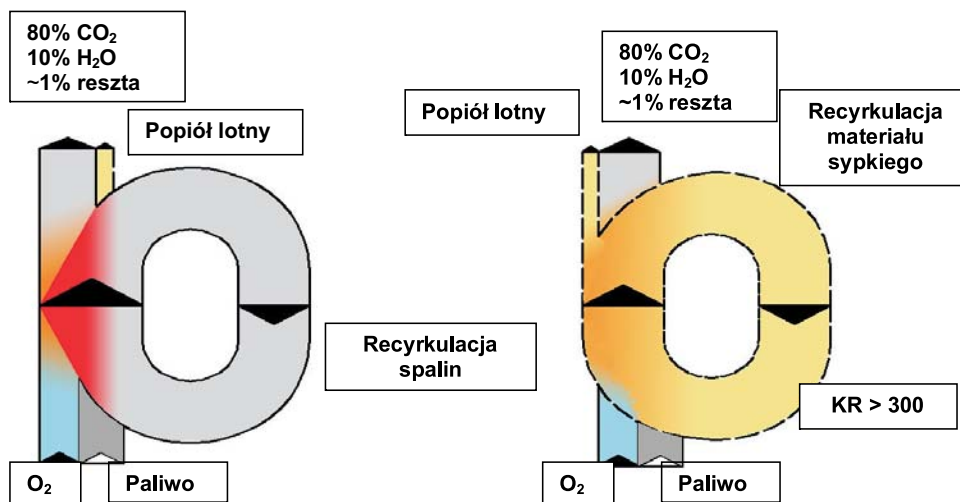
Należy także mieć na uwadze, że zastosowanie znanych obecnie metod separacji CO<sub>2</sub> ze spalin jest w wielu wypadkach nieopłacalne bądź wręcz niemożliwe. Czynnikiem determinującym może okazać się tu wymagana temperatura gazów spalinowych, czy konieczność wstępnego usuwania zanieczyszczeń, znacznie poniżej dopuszczalnego poziomu emisji danego składnika (procesy absorpcji). Barięra stać może się również zbyt duże zapotrzebowanie, ze względu na bardzo duże przepływy gazu z jakimi mamy do czynienia w przypadku kotłów energetycznych dużej mocy.

Wyniki obliczeń, zestawione w tabelach 1 i 2, podkreślają wyraźnie skalę i zakres problematyki koniecznej do rozwiązania w zakresie ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> ze spalania paliw stałych.

## Realizacja technologii „oxy – combustion” w kotłach fluidalnych

Aktualnie rozważane są dwie zasadnicze koncepcje realizacji procesu spalania paliw stałych w atmosferze wzbogaconej tlenem. Obie oparte są o klasyczne już dziś technologie spalania w kotłach pyłowych oraz fluidalnych. Zakłada się, że podstawowym sposobem regulacji temperatury w kotłach pyłowych będzie recyrkulacja spalin, która także pozwoli na „zagęszczenie” CO<sub>2</sub> w spalinach. Proces ten schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Techniczna realizacja recyrkulacji spalin na tak dużą skalę, jaka wynika z warunków realizacji tej technologii spalania, będzie stanowiła poważne wyzwanie techniczne, ze względu na konieczność ich oczyszczania z zanieczyszczeń stałych i gazowych oraz schładzania (wykraplanie wody). Problemy te mogą być rozwiązane w zdecydowanie prostszy sposób w warunkach kotła fluidalnego, gdzie kłopotliwa recyrkulacja spalin może być zastąpiona recyrkulacją materiału sypkiego [8]. Schematycznie pokazano to na rysunku 1.

Recyrkulacja materiału sypkiego jest procesem opanowanym i z powodzeniem stosowanym w kotłach cyrkulacyjnych [6]. Konstrukcja kotła fluidalnego przewidzianego do

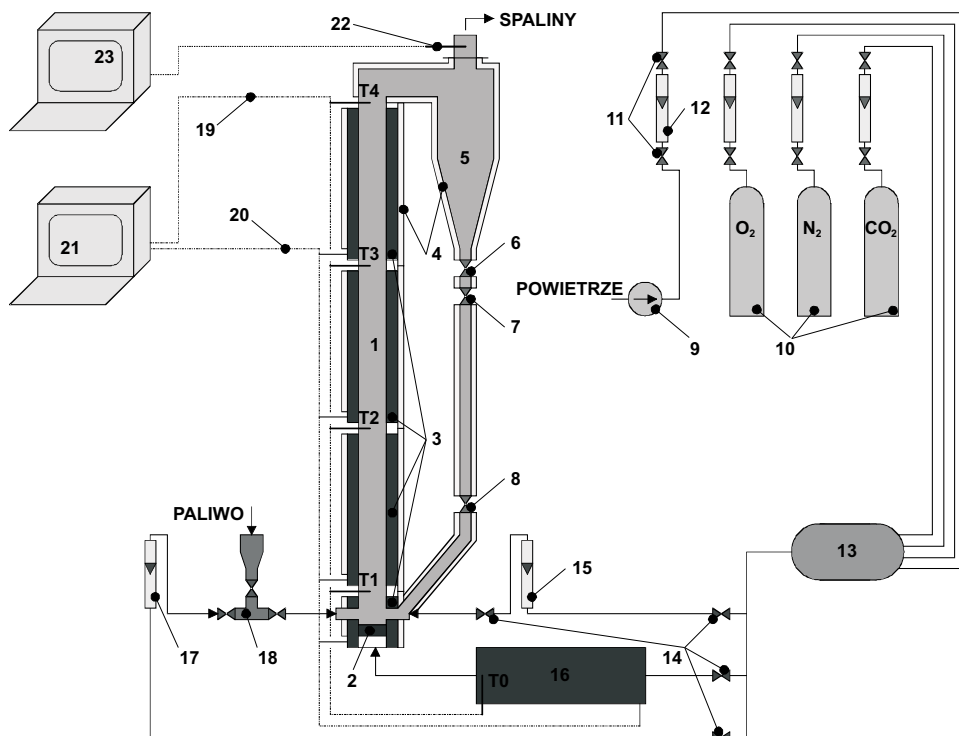


Rys. 1. Schematyczne porównanie realizacji spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem z wykorzystaniem recykulacji spalin oraz cyrkulacji materiału inertnego

Fig. 1. Comparison of oxy-combustion process with flue gas – or solids recirculation

realizacji nowej technologii spalania, winna zapewniać możliwość realizacji wysokiej krotności recykulacji materiału sypkiego, dochodzącej do  $KR = 300$  (rys.1) [6]. Poza tym technologia fluidalnego spalania paliw stałych udowodniła, że w pełni zasługuje na miano –*Clean Coal Technologies*, wobec tego należy żywić uzasadnione nadzieje na utrzymanie tego statusu także w warunkach podwyższonej koncentracji tlenu.

W Politechnice Częstochowskiej od dawna prowadzone są szeroko zakrojone badania nad wdrażaniem technologii fluidalnego spalania paliw stałych w energetyce. Dlatego też od chwili pojawienia się koncepcji spalania paliw w atmosferze wzbogaconej tlenem, rozpoczęto badania tego procesu. Analizie poddano szereg zagadnień związanych z realizacją tego procesu. Jako podstawowe zagadnienie przyjęto rozpoznanie problematyki emisji zanieczyszczeń gazowych podczas spalania węgla brunatnego w warunkach cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, realizowanej w atmosferze wzbogaconej tlenem. Badania prowadzono na laboratoryjnym stanowisku z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, którego schemat widoczny jest na rysunku 2, stosując dwa warianty zasilania substratami gazowymi o zmiennym stężeniu tlenu. W pierwszym przypadku stosowano mieszaniny  $O_2$  i  $CO_2$  w drugim przypadku w miejsce  $CO_2$  stosowano azot. Szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz warunków realizacji badań oraz opracowania wyników zawiera praca [6].



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne z cyrkulacyjną warstwą fluidalną  
 1 — komora paleniskowa, 2 — ruszt, 3 — grzałki, 4 — izolacja termiczna, 5 — cyklon, 6 — zawór zasypowy,  
 7 — zawór spustowy, 8 — zawór regulacyjny, 9 — sprężarka, 10 — butle z gazem, 11(14) — zawory  
 odcinające, 12(15,17) — rotometr, 13 — mieszalnik, 16 — podgrzewacz pierwotny, 18 — podajnik paliwa,  
 19 — układ pomiaru temperatury, 20 — układ zasilania systemu grzania, 21 — układ sterowania systemu  
 grzania, 22 — sonda, 23 — analizator spalin, T0-T4 — termoelementy

Fig. 2. Sketch of the experimental setup  
 1 — combustion chamber, 2 — gas distributor, 3 — heaters, 4 — thermal insulation, 5 — cyclone, 6 — valve,  
 7 — discharge valve, 8 — control valve, 9 — compressor, 10 — gas cylinders, 11 & 14 — shut down valves,  
 12, 15 & 17 — rotameters, 13 — mixing chamber, 16 — gas preheater, 17 — fuel feeder, 19 — temperature  
 measurement unit, 20 & 21 — heating section control system, 22 & 23 — gas measurement device,  
 T0-T4 — thermocouples

## Emisja siarki i azotu podczas spalania węgla brunatnego w atmosferze wzbogaconej tlenem

W tabeli 3 przedstawiono podstawowe parametry paliwa stosowanego w badaniach. W badaniach zwracano uwagę na rozdział paliwa na części lotne i pozostałość koksową, szczególnie w odniesieniu do zawartości siarki i azotu. Wyniki pomiarów zawartości węgla,

siarki oraz azotu w częściach lotnych oraz pozostałości koksowej zawiera tabeli 4. Taki rozdział pozwolił ustalić jaka część siarki i azotu zawartych w częściach lotnych (siarka i azot „gazowy”) oraz w pozostałości koksowej ulega konwersji w trakcie realizacji procesu spalania w atmosferze wzbogaconej tlenem. Jako stopień konwersji paliwa przyjęto stopień konwersji węgla, określane w oparciu o bilans węgla w spalinach [6].

TABELA 3. Analiza techniczna i elementarna paliwa (węgiel brunatny)

TABLE 3. Ultimate and proximate analysis of lignite

| Średnica ziarna [mm] | Wartość opałowa [kJ/kg] | Anal. techniczna [%, stan suchy] |              |        | Analiza elementarna [%, daf] |      |      |      |       |
|----------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|--------|------------------------------|------|------|------|-------|
|                      |                         | pozostałość koksowa              | części lotne | popiół | C                            | H    | S    | N    | O     |
| 0–1 200              | 11 953                  | 37,58                            | 36,36        | 26,06  | 71,95                        | 8,48 | 0,74 | 0,45 | 18,38 |

TABELA 4. Rozdział węgla, siarki i azotu w węglu brunatnym

TABLE 4. Partitioning of carbon, sulfur and nitrogen of the lignite fuel

| Wyszczególnienie    | Węgiel [%] | Siarka [%] | Azot [%] |
|---------------------|------------|------------|----------|
| Części lotne        | 37         | 60         | 55       |
| Pozostałość koksowa | 63         | 40         | 45       |

## Konwersja siarki

Za podstawę do analizy stopnia konwersji siarki w czasie, zdefiniowanego równaniami od (5)–(8),

$$X_S = \frac{n_S''}{n_S'} \quad (5)$$

gdzie:

$$n_S'' = \frac{\dot{V}_{SP}^N \cdot \tau}{22,41} \cdot \overline{[SO_2]} \quad [kmol] \quad (6)$$

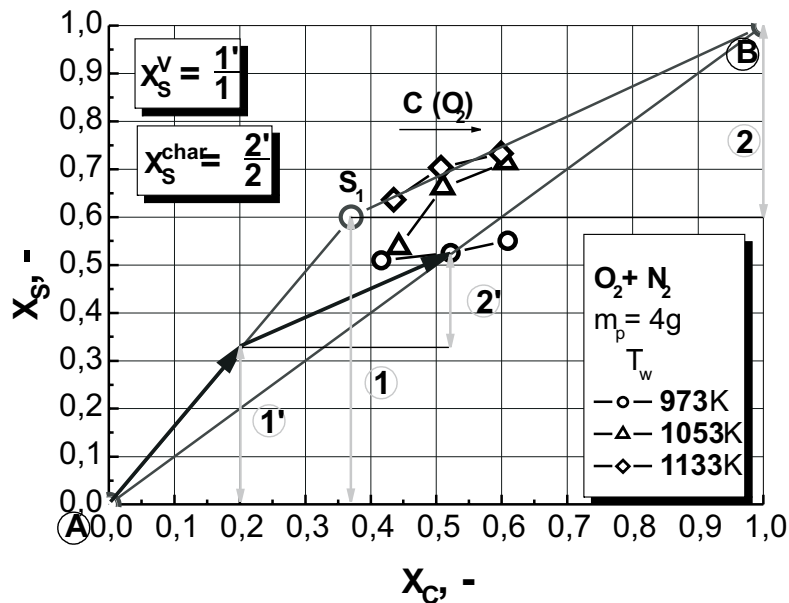
$$n_S' = m_P \cdot \frac{s}{32} \quad [kmol] \quad (7)$$



$$[\overline{SO_2}] = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\tau} [SO_2(\tau)] d\tau \quad (8)$$

przyjęto zależność stopnia konwersji siarki od stopnia konwersji węgla, graficznie przedstawioną w tak zwanym „trójkącie konwersji A–S1–B” [6]. Linia A–S1–B jest miejscem geometrycznym punktów wyrażających stopień konwersji siarki proporcjonalny do stopnia wypalenia paliwa. Każde położenie punktu poniżej linii A–S1–B oznacza niepełną konwersję, położenie punktu powyżej linii A–S1–B oznacza błąd pomiaru. Na rys. 3. pokazano wzorcową zależność, pokazującą dodatkowo sposób określania stopnia konwersji siarki zawartej w częściach lotnych o raz pozostałości koksowej. Podstawą tworzenia linii A–S1–B są dane zawarte w tabeli 4. W podobny sposób uzyskiwano zależności stopnia konwersji azotu.

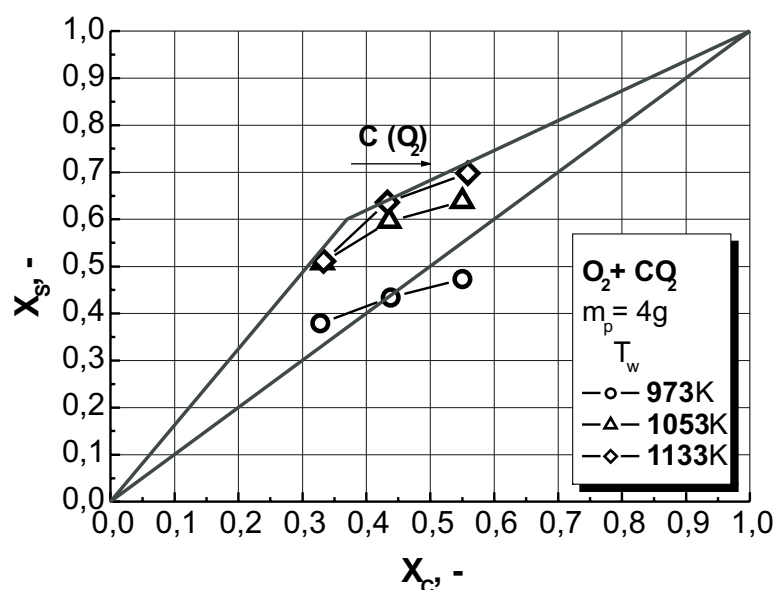
Wartości stopnia konwersji siarki określone dla spalania w mieszankach na bazie  $N_2$  o różnym stężeniu tlenu oraz przy różnych temperaturach reaktora przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Stopień konwersji siarki (mieszanka  $O_2+N_2$ )

Fig. 3. Sulfur conversion ( $O_2+N_2$  gas mixture)

Rysunek 4 z kolei dotyczy mieszanek  $O_2+CO_2$ . Położenie punktów pomiarowych na obu rysunkach wskazuje, że w większości przypadków są one zawarte w konturze trójkąta o wierzchołkach A–S1–B. Pole to, w przypadku zastosowanego w badaniach węgla brunatnego o większościowym udziale siarki w częściach lotnych, stanowi tu obszar możliwych stopni konwersji siarki paliwowej.



Rys. 4. Stopień konwersji siarki (mieszanka  $O_2 + CO_2$ )

Fig. 4. Sulfur conversion ( $O_2 + CO_2$  gas mixture)

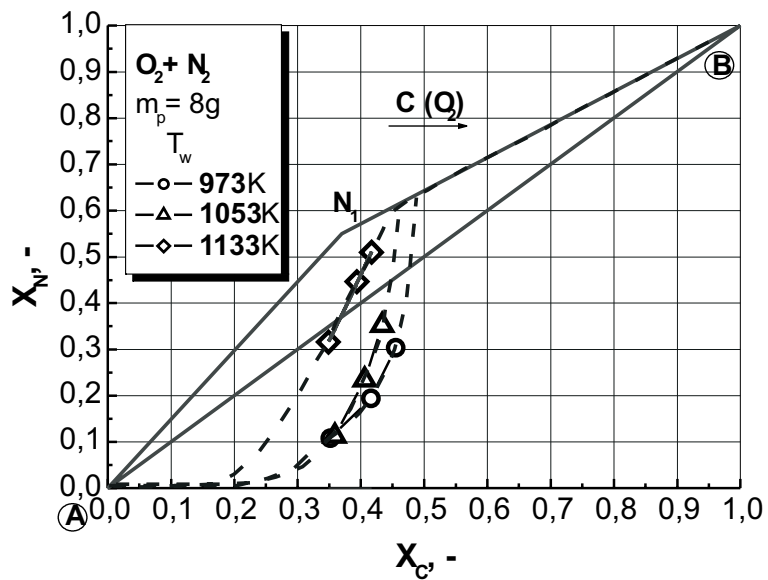
Stopień konwersji wzrasta ze wzrostem temperatury i stężenia tlenu w substratach, które zarówno dla mieszanek  $O_2 + N_2$ , jak i dla mieszanek  $O_2 + CO_2$  wynosiły odpowiednio 21, 40 i 60%. W temperaturze 1133 K (860°C), typowej dla spalania w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej, praktycznie niezależnie od rodzaju mieszanki oraz stężenia tlenu, konwersja siarki była zawsze pełna i proporcjonalna do stopnia konwersji paliwa. Oznacza to, że w przypadku spalania w warstwie fluidalnej paliw nie zawierających siarki pirytowej, zawsze mamy do czynienia z pełną konwersją siarki.

Rozmieszczenie punktów pomiarowych na rysunku 3 wskazuje również, że wzrost udziału tlenu w doprowadzanej do procesu spalania mieszance gazowej poprawia warunki konwersji siarki pierwiastkowej do  $SO_2$  w temperaturze niżej — 1053 K.

## Konwersja azotu

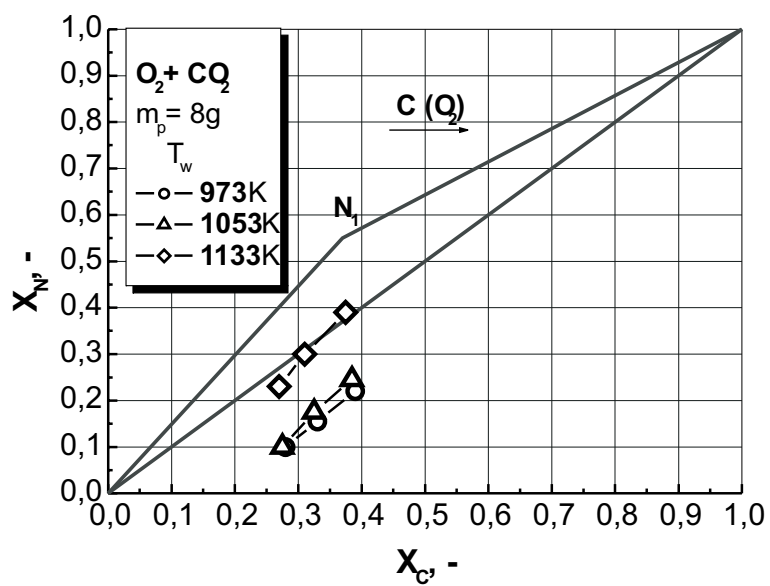
Wykorzystując metodykę zastosowaną przy analizie emisji siarki (zależności (5) do (8) oraz rysunki 3 i 4) dokonano analizy stopnia konwersji kolejnego składnika paliwa jakim jest azot, oznaczonego jako  $X_N$ .

Wartości  $X_N$  w funkcji  $X_C$  przy zmiennym stężeniu tlenu oraz przy różnych temperaturach przedstawiono na rysunkach 5 (mieszanka  $O_2 + N_2$ ) i 6 (mieszanka  $O_2 + CO_2$ ). Trudno tu nie zauważyć wyraźnej różnicy w położeniu punktów pomiarowych, porównując je do uprzednio analizowanego stopnia konwersji siarki. Nie bez znaczenia jest tu fakt, że



Rys. 5. Stopień konwersji azotu (mieszanka  $O_2 + N_2$ )

Fig. 5. Nitrogen conversion ( $O_2 + N_2$  gas mixture)



Rys. 6. Stopień konwersji azotu (mieszanka  $O_2 + CO_2$ )

Fig. 6. Nitrogen conversion ( $O_2 + CO_2$  gas mixture)

obszar znajdujący się ponad górnym konturem trójkąta jest wolny od punktów pomiarowych. Oznacza to, że nie ma jednoznacznych przesłanek co do tego by stwierdzić

obecność występowania termicznego mechanizmu formowania tlenków azotu. Należy zauważyć tu także, że punkty opisujące konwersję azotu odległe są również od linii A–N1–B, pełniącej w tym przypadku funkcję linii pełnej konwersji azotu. Praktycznie wszystkie punkty pomiarowe zlokalizowane są tu poniżej dolnej krawędzi trójkąta. Takie zachowanie wskazuje na częściową konwersję azotu, szczególnie w okresie wychodzenia części lotnych z ziaren paliwa i ich spalania. Wynikać to może z tego, że w pierwszej fazie odgazowania wychodzące części lotne zawierają znikome ilości związków azotu bądź nie zawierają ich wcale, a większość, bądź całość N–paliwowego wychodzi z odgazowującego paliwa dopiero w drugiej fazie procesu.

Taką ewentualność reprezentują sobą wykreślone na rysunku 5 przerywaną linią, prawdopodobne przebiegi procesu konwersji azotu paliwowego do  $\text{NO}_x$ . Opóźnienie to powoduje także nałożenie się okresu konwersji azotu paliwowego na okres spalania pozostałości koksowej w którym rozgrzany do wysokiej temperatury koks redukuje  $\text{NO}_x$  do  $\text{N}_2$ , a powstały tlen wykorzystywany jest do spalania.

Podobnie jak dla analizowanego wcześniej stopnia konwersji siarki tak i w przypadku azotu łatwo dostrzec jakościowe podobieństwo przebiegu procesu konwersji azotu paliwowego w mieszankach na bazie azotu i  $\text{CO}_2$  (rysunki 5 i 6), a rozbieżności ilościowe wynikają tu głównie ze stopnia wypalenia paliwa w danych warunkach.

## Wnioski

Realizacja spalania węgla brunatnego w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej w atmosferze wzbogaconej tlenem pozwala na osiągnięcie:

1. Wyższego stopnia konwersji węgla w miarę wzrostu koncentracji tlenu w komorze paleniskowej i praktycznie nie zmienia się przy zmianach temperatury pracy reaktora.
2. Wyższego stopnia konwersji węgla pierwiastkowego podczas spalania w mieszance  $\text{O}_2+\text{N}_2$  niż w mieszance  $\text{O}_2+\text{CO}_2$  przy jednakowym udziale tlenu i tej samej temperaturze reaktora.
3. Wyższego stopnia konwersji siarki zawartej w paliwie.
4. Znacznego ograniczenia stopnia konwersji azotu paliwowego do  $\text{NO}_x$ .

## Oznaczenia

|            |   |   |
|------------|---|---|
| $d^{O_2}$  | — | współczynnik proporcjonalności charakteryzujący zapotrzebowanie tlenu do spalania paliwa [ $\text{kg}_{\text{O}_2} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ]          |
| $d^{CO_2}$ | — | współczynnik proporcjonalności charakteryzujący ilość $\text{CO}_2$ powstałego ze spalania paliwa [ $\text{kg}_{\text{O}_2} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ] |
| $e_{O_2}$  | — | jednostkowe zapotrzebowanie energii do produkcji tlenu [ $\text{kWh} \cdot \text{kg}_{\text{O}_2}^{-1}$ ]   |

|                     |   |   |
|---------------------|---|---|
| $e_{CO_2}$          | — | jednostkowe zapotrzebowanie energii do separacji CO <sub>2</sub> [kWh · kg <sub>O<sub>2</sub></sub> <sup>-1</sup> ] |
| $m_p$               | — | masa próbki [kg]  |
| $n_S^c$             | — | ilość siarki w próbce paliwa [kmol]   |
| $n_S^g$             | — | ilość siarki w spalinach [kmol]   |
| $s$                 | — | udział siarki w paliwie [kg <sub>S</sub> /kg <sub>P</sub> ]   |
| $t$                 | — | czas [s]  |
| $\dot{V}_{SP}^N$    | — | strumień objętości spalin [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> ]  |
| $X_S$               | — | stopień konwersji siarki  |
| $[\overline{SO_2}]$ | — | średnie stężenie SO <sub>2</sub> w spalinach [kmol <sub>SO<sub>2</sub></sub> · kmol <sub>SP</sub> <sup>-1</sup> ]   |
| $\eta_{el}$         | — | sprawność wytwarzania energii elektrycznej  |
| $\eta_G$            | — | sprawność generatora  |
| $\eta_K$            | — | sprawność kotła   |
| $\eta_M$            | — | sprawność mechaniczna   |
| $\eta_R$            | — | sprawność rurociągu   |
| $\eta_T$            | — | sprawność termiczna   |
| $\tau$              | — | czas procesu spalania [s]   |

## Literatura

- [1] BIS Z., 2003 — Polska energetyka przed nowymi wyzwaniami ekologicznymi. Materiały Konferencji „Proekologiczne osiągnięcia w nauce i technice”, Toruń.
- [2] BISIO G., BOSIO A., RUBATTO G., 2002 — Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air, *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, p. 2589—2600.
- [3] BISIO G., BOSIO A., 200 — Oxygen enrichment of combustion air. Proc. of the ECOS 2000 Conference — From Thermo-Economics to Sustainability, Enschede, Holland, p. 379–390.
- [4] BLASCHKE W., 2005 — Perspektywy węgla w gospodarce świata i Polski — szanse polskiego węgla w Unii Europejskiej. *Polityka Energetyczna*, IGSMiE PAN, Kraków, 13—34.
- [5] BUHRE B.J.P., ELLIOTT L.K., SHENG C.D., GUPTA R.P., WALL T.F., 2005 — Oxy — fuel combustion technology for coal — fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science* 31, p. 283—307.
- [6] CZAKIERT T., 2004 — Emisje zanieczyszczeń gazowych w procesie spalania węgla brunatnego w cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej w atmosferze wzbogaconej tlenem. Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.
- [7] GOLDISH S.J., FAN Z., SIPPU O., BOSE A.C., 2006 — Integration of Ultra-Supercritical OUT and CFB Boiler Technologies. Proc. of 19<sup>th</sup> FBC Conference, Vienna.
- [8] SAASTAMOINEN J., TOURUNEN A., PIKKARAINEN T., HASA H., MIETTINEN J., HYPPANEN T., MYOHANEN K., 2006 — Fluidized Bed Combustion in High Concentration of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. Proc. of 19<sup>th</sup> FBC Conference, Vienna.

Zbigniew BIS, Tomasz CZAKIERT

## Oxy-fuel fluidized bed combustion

### Abstract

The paper includes basic information concerning the combustion of solid fuels in fluidized bed boilers at oxygen-enriched atmosphere. Some basic calculations of the process efficiency were conducted, and some lab-scale experimental results of the emission of nitrogen and sulfur at various oxygen concentration and composition of the gaseous substrates were given.

KEY WORDS: Oxy – combustion, sulfur and nitrogen conversion