

**MARTA KOWALIK, MONIKA ZAJEMSKA, ANNA POSKART,
HENRYK RADOMIAK***

**SPALANIE W POWIETRZU WZBOGACONYM TLENEM JAKO
MOŻLIWOŚĆ OGRANICZENIA EMISJI CO₂**

Streszczenie

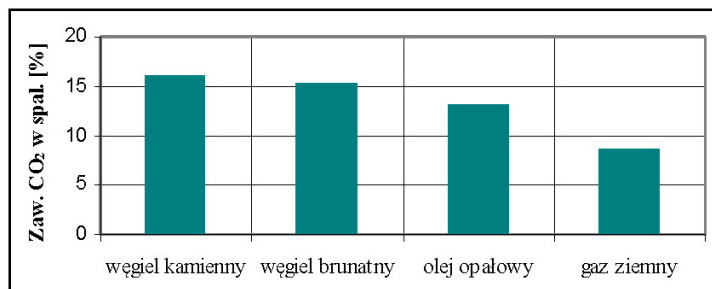
W artykule, opierając się na przeglądzie literatury oraz obliczeniach analitycznych i numerycznych spalania węgla kamiennego, przedstawiono wpływ atmosfery utleniającej na tworzenie się CO₂ w spalinach. Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie i dokonano ich analizy. Przeprowadzona analiza wykazała, że spalanie węgla w powietrzu wzbogaconym tlenem prowadzi do wzrostu koncentracji CO₂ w spalinach, co pozwala na jego ograniczenie w drodze sekwestracji.

Słowa kluczowe: spalanie w powietrzu wzbogaconym tlenem, emisja dwutlenku węgla, węgiel kamienny

WSTĘP

Według światowych danych [IEA 2012], aż 40% energii pochodzi obecnie z węgla. Jest to w skali światowej jedyny surowiec energetyczny, pozwalający na stabilne zaspokojenie potrzeb energetycznych w długim czasie, co wynika z wielkości zasobów, ich rozproszonej lokalizacji oraz w miarę stabilnych, wolno wzrastających cen. Przewiduje się, że w perspektywie najbliższych kilkadziesiąt lat znaczenie węgla jako paliwa w produkcji energii będzie utrzymywać się nadal na wysokim poziomie [Okulski 2010; 2011]. Zasadniczym problemem procesu spalania węgla jest formowanie się zanieczyszczeń, szczególnie tlenków azotu, tlenków siarki, tlenku węgla oraz dwutlenku węgla. Opierając się na analitycznych obliczeniach spalania poszczególnych paliw można stwierdzić, że największa jednostkowa emisja CO₂ pochodzi ze spalania węgla kamiennego oraz węgla brunatnego (rys. 1).

* Politechnika Częstochowska, Zakład Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska

Rys. 1. Jednostkowa emisja CO₂Fig. 1. CO₂ emissions

Dwutlenek węgla emitowany do atmosfery, uznawany jest zdaniem większości specjalistów za gaz odpowiedzialny w dużej mierze za efekt cieplarniany. Biorąc pod uwagę fakt, iż około 80% energii w Polsce pochodzi z procesów spalania węgla emisja CO₂ w najbliższych latach jest nieunikniona [Małopolska i in. 2008].

Od kilku lat problematyka emisji dwutlenku węgla stała się jednym z głównych celów polityki energetycznej Unii Europejskiej. Zgodnie z założeniami pakietu klimatyczno-energetycznego, każdy kraj członkowski został zobligowany do podjęcia działań mających na celu ograniczenie emisji CO₂.

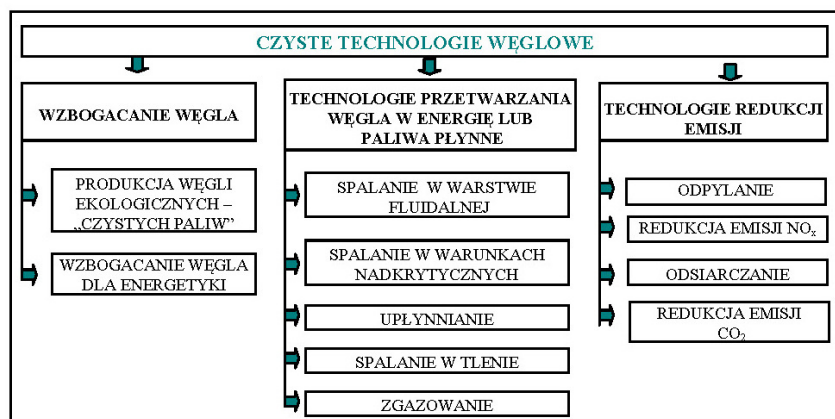
CZYSTE TECHNOLOGIE WĘGLOWE

Współczesne wymagania odnoszące się do dbałości o środowisko naturalne, a szczególnie o racjonalne wykorzystanie zasobów energii pierwotnej oraz ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery, wymuszają potrzebę poszukiwania nowoczesnych rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo energetyczne. Ogromnym wsparciem w realizacji tego przedsięwzięcia było wdrożenie tzw. Czystych Technologii Węglowych (CTW). Przez czyste technologie węglowe należy rozumieć „*technologie zaprojektowane w celu poprawy skuteczności wydobycia, przeróbki, przetwarzania oraz utylizacji węgla i zwiększenia akceptowalności tych procesów z punktu widzenia wpływu na środowisko naturalne*” [KOM 2011; OECD/IEA 1993; Kubica i in. 2007].

Nowoczesne procesy i technologie prowadzące do zmniejszenia negatywnego wpływu spalania węgla mogą zachodzić na każdym z trzech etapów [Lorenz 2010]:

- etap I – przed spalaniem,
- etap II – w trakcie spalania,
- etap III – po spalaniu.

Do tej pory opracowano i wdrożono już wiele różnych technologii i rozwiązań, które można zaliczyć do CTW. Wybrane czyste technologie węglowe przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Czyste technologie węglowe [Lorenz 2010]

Fig. 2. Clean coal technologies [Lorenz 2010]

SPALANIE W POWIETRZU WZBOGACONYM TLENEM

Od kilku lat spośród proponowanych CTW główną uwagę koncentruje na sobie technologia spalania w powietrzu wzbogaconym tlenem, zwana też „technologią spalania w tlenie” lub „oxy- spalaniem”. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż stanowi ona jedno z podstawowych rozwiązań mających na celu ograniczenie emisji dwutlenku węgla [Halawa i in. 2008; Sioshansi 2009].

Spalanie w tlenie stanowi zatem kluczowy element technologii CCS (z języka angielskiego – Carbon Capture and Storage), mającej na celu wychwytywanie, transport i podziemne składowanie CO₂ [Al-Fattah i in. 2011].

Ogólną istotą technologii spalania w powietrzu wzbogaconym tlenem jest podawanie do komory powietrza o stężeniu tlenu powyżej 21%. W wyniku spalania w wysokiej koncentracji O₂ powstające spaliny zawierają głównie CO₂ oraz H₂O. Para wodna ulega kondensacji, a otrzymany strumień gazu o bardzo dużym stężeniu dwutlenku węgla jest gotowy do transportu do miejsca składowania i magazynowania w głębokich formacjach geologicznych na setki i tysiące lat [Nowak i in. 2012].

Publikacje na temat spalania tlenowego wskazują na wiele zalet tego procesu, a mianowicie [Toftgaard i in. 2010, Zheng 2011, Jia in. 2010]:

- uzyskanie wysokiej koncentracji dwutlenku węgla,

- zmniejszenie objętości spalin,
- ograniczenie emisji NO_x w wyniku usunięcia z procesu spalania azotu atmosferycznego,
- ograniczenie emisji SO_x ,
- wzrost sprawności kotła w wyniku obniżenia strat niecałkowitego i niezupełnego spalania,
- zmniejszenie gabarytów kotła, kanałów czy wydajności urządzeń pomocniczych ze względu na zredukowane strumienie gazów,
- obniżenie kosztów inwestycyjno-eksploatacyjnych dla instalacji oczyszczania gazów.

WPŁYW ZAWARTOŚCI TLENU W POWIETRZU NA STĘŻENIE CO_2 W SPALINACH- OBLICZENIA ANALITYCZNE I NUMERYCZNE

Do obliczeń wykorzystano węgiel kamienny o następującym składzie: c-77,1%, h-4,6%, n-1,2%, s-1,1%, o-5,7%, w-2,4%, a-7,9%.

Stężenie dwutlenku węgla w spalinach obliczono za pomocą programu komputerowego opracowanego w Zakładzie Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej. Okno programu obliczeniowego przedstawiono na fot. 1.

Program do obliczeń spalania paliw stałych i ciekłych

Oblicz **龍** Zakończ

wartość stosunku nadmiaru powietrza, alfa

udział tlenu w powietrzu, xO2 [%]

Skład paliwa, [%]		wartość opałowa, Qd [kJ/kg]		Skład spalin suchych, [%]		Skład spalin wilgotnych [%]	
c	<input type="text" value="77,1"/>	Qd	32825,466	[CO2]	22,312141	(CO2)	20,573618
h	<input type="text" value="4,6"/>	Vomin [m ³ /kg]	1,6876369	[O2]	5,1613103	(O2)	4,7591501
s	<input type="text" value="1,1"/>	Vamin [m ³ /kg]	5,6254563	[N2]	72,407175	(N2)	66,765335
n	<input type="text" value="1,2"/>	Varacz [m ³ /kg]	6,7505475	[SO2]	0,11937429	(SO2)	0,11007286
o	<input type="text" value="5,7"/>	V ^o s [m ³ /kg]	7,0921775			(H2O)	7,7918241
w	<input type="text" value="2,4"/>	V ^w ss [m ³ /kg]	6,5395675				

Oblicz ciepło właściwe spalin
 temperatura spalin, tsp [°C]

Oblicz wartość stosunku nadmiaru powietrza

podaj wartość [CO2] z pomiarów [%]

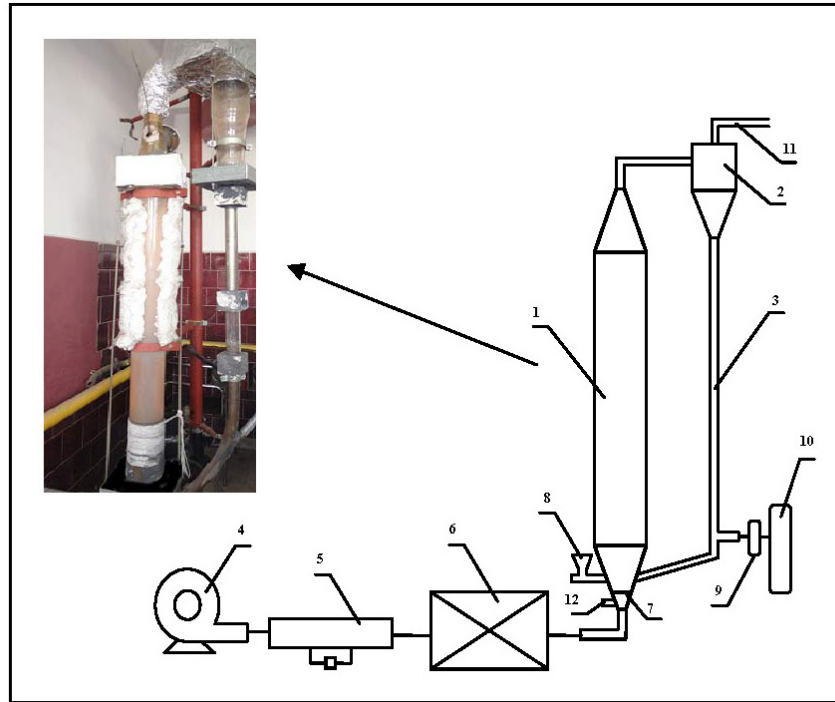
[CO2]max [%]

alfa

ciepło właściwe spalin, csp [kJ/(m³*K)]

Fot. 1. Okno programu do obliczeń temperatury spalania paliw stałych
 Phot.1. The program window of program for determining the combustion temperatures of solids fuels

Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy użyciu programu CHEMKIN dla kolumny fluidyzacyjnej, stanowiącej zasadniczy element stanowiska eksperymentalnego przedstawionego na rys. 3.



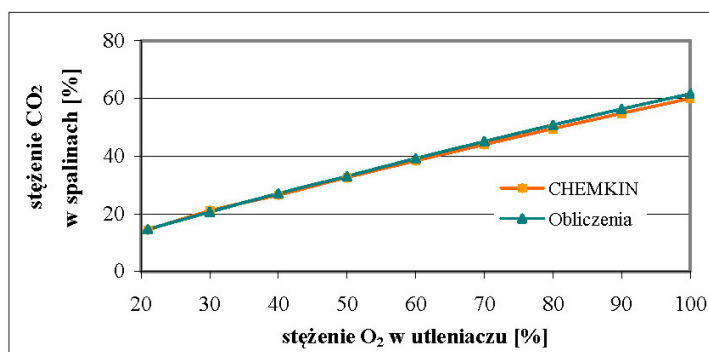
Rys. 3. Schemat stanowiska eksperymentalnego: 1- kolumna fluidyzacyjna, 2- cyklon, 3- układ nawrotu, 4- wentylator, 5- kryza, 6- podgrzewacz, 7- ruszt, 8- podajnik węgla, 9- rotometr, 10- butla z tlenem, 11- wylot spalin, 12- pomiar ciśnienia

Fig. 3. Experimentation post model: 1- fluidization column, 2- cyclone, 3- system recirculate, 4- air fan, 5- measuring orifice plate, 6- air heater, 7- fire grate, 8- feed mechanism of coal, 9- rotameter, 10- oxygen cylinder, 11- flue gas, 12- pressure gauges

Obliczenia numeryczne wykonano dla reaktora idealnego wymieszania przyjmując stosunek nadmiaru powietrza $\lambda=1,25$. W obliczeniach uwzględniono również: zawartość tlenu w utleniaczu w zakresie 21%÷100%, ciśnienie – 1 atm., temperaturę spalania – 1000÷1200K, oraz temperaturę powietrza – 573K.

WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki obliczeń analitycznych oraz numerycznych stężenia CO_2 dla różnych udziałów O_2 w atmosferze gazowej zestawiono na zasadzie analizy porównawczej na rys. 4.



Rys. 4. Stężenie CO_2 w zależności od zawartości O_2 w atmosferze gazowej
 Fig. 4. CO_2 concentration depending on the content of oxygen in the gas atmosphere

Zarówno obliczenia analityczne jak i numeryczne potwierdziły, że udział dwutlenku węgla w spalinach silnie zależy od zawartości tlenu w atmosferze gazowej. Wraz ze wzrostem O_2 w utleniaczu stężenie CO_2 rośnie, osiągając przy 50% wartości tlenu około 33%. Spalanie węgla w atmosferze gazowej o zawartości O_2 równej 90% pozwala na zwiększenie koncentracji dwutlenku węgla o 83% w porównaniu do spalania w powietrzu.

Jak wynika z rys. 4. wyniki obliczeń analitycznych są bardzo zbliżone do wyników obliczeń numerycznych. Maksymalny błąd względny (przy 90% O_2) $\Delta = -1,46\%$, a maksymalny błąd bezwzględny przy tej samej wartości O_2 określono na poziomie $\delta = -2,59\%$. Średni błąd względny wynosił $\Delta = -0,75\%$, natomiast błąd bezwzględny $\delta = -1,54\%$.

WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na określenie wielkości stężenia dwutlenku węgla w spalinach przy zmiennym udziale tlenu w atmosferze gazowej. Z przeprowadzonej analizy wynika, że stężenia dwutlenku węgla silnie zależy od składu chemicznego utleniacza. Spalanie w wysokiej koncentracji tlenu po-

zwala na zwiększenie stężenia CO₂ w spalinach z 16,5% (O₂=21%) do 55% (O₂=90%).

Wzrost koncentracji dwutlenku węgla jest niezwykle istotny z punktu widzenia procesu sekwestracji. Możliwość ograniczania emisji CO₂ do atmosfery poprzez jego wychwytywanie, transport i podziemne składowanie, jest obecnie najbardziej obiecującą technologią wyeliminowania tego produktu ze spalin.

Uzyskane w ramach obliczeń numerycznych wyniki wykazały dużą zbieżność z obliczeniami. Zatem, przyjęty do obliczeń model spalania węgla można uznać za prawidłowy.

LITERATURA

1. AL-FATTAH S.M., BARGHOUTY M.F., BUREAU G., DABBOUSI B.O., FILLACIER S., THIEZ P.L., MCQUALE C., MUNIER G., ROYER-ADNOT J., 2011. Carbon Capture and Storage: Technologies, Policies, Economics, and Implementation Strategies. CRC Press, 1 edition, November 2.
2. HALAWA T., HARASIMOWICZ L., 2008. Elektrownie opalane węglem bez emisji CO₂. Energetyka, Nr 12, ss. 822-832.
3. IEA, 2012. Key World Energy Statistics, International Energy Statistic.
4. JIA L., TAN, T.; ANTHONY E.J., 2010. Emissions of SO₂ and NO_x during Oxy-Fuel CFB Combustion Tests in a Mini-Circulating Fluidized Bed Combustion Reactor. Energy Fuels, 24 (2), pp. 910-915.
5. KOM, 2011. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i komitetu Regionów-Plan działania w zakresie energii do roku 2050, Bruksela, dnia 15.12.2011.
6. KUBICA K., SZLĘK A., WILK R., 2007. Czyste technologie węglowe – badania, rozwój i upowszechnianie wyników, Monografia Instytut Techniki Ciepłej, Gliwice.
7. LORENZ U., 2010. Gospodarka węglem kamiennym energetycznym. Wyd. IGSMiE PAN, ss. 66-75.
8. MAŁOPOLSKA M., ZARĘBSKA K., 2008. Problematyka emisji ditlenku węgla w Polsce. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, T. 24, Z. 3/3, ss. 187-196.
9. NOWAK W., CZAKIER T., 2012. Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytywaniem CO₂. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
10. OECD/IEA, 1993. Clean coal technologies. Option for future, Paris .
11. OLKUSKI T., 2010. Uwarunkowania ekonomiczne i ekologiczne wytwarzania energii elektrycznej w kraju i na świecie. Przegląd Górniczy, Nr 7-8, T. 66, ss. 39-45.

12. OLKUSKI T., 2011. Zasoby węgla kamiennego- najpewniejsze źródło energii. Przegląd górniczy, Nr 7-8, ss. 42-45.
13. SIOSHANSI F.P., 2009. Generating Electricity in a Carbon - Constrained. World, Academic Press, 1 edition, September 30.
14. TOFTEGAARD M.B., BRIX J., JENSEN P.A., GLARBORG P., JENSEN A.D., 2010. Oxy-fuel combustion of solid fuels, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, No. 5, pp. 581-622.
15. ZHENG L., 2011. Oxy-Fuel Combustion for Power Generation and Carbon Dioxide (CO₂) Capture. Woodhead Publishing, May 28.

THE COAL COMBUSTION IN OXYGEN-ENRICHED ATMOSPHERE AS THE WAY TO REDUCE CARBON DIOXIDE EMISSIONS

S u m m a r y

This paper presents the impact of the content of the gas atmosphere on the concentration of carbon dioxide in flue gas based on literature review and numerical and analytical calculations. The obtained results were presented graphically and there was made a comparative analysis. The research results prove that the coal combustion in oxygen-enriched atmosphere leads to CO₂ concentration in flue gas increase, what allows to its reduction by the sequestration.

Key words: combustion in oxygen-enriched atmosphere, carbon dioxide emission, hard coal