ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ENERGETYKA z. 121 Nr kol. 1261

Wojciech NOWAK, Waldemar MUSKAŁA
Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Częstochowska

EKOLOGICZNIE CZYSTE SPALANIE WĘGLA W CYRKULACYJNEJ WARSTWIE FLUIDALNEJ TYPU MSFB

Streszczenie. W pracy przedstawiono materiały z doświadczeń prowadzonych w warstwie fluidalnej typu multisolid (MSFB). Pokazano stanowisko badawcze oraz wybrane wyniki doświadczeń w skali laboratoryjnej. Na zakończenie zaprezentowano dane dotyczące emisji SO_x i NO_x w kotle przemysłowym typu MSFB.

THE PROCESS OF ECOLOGICALLY CLEAN COMBUSTION OF COAL IN THE CIRCULATING FLUIDIZED BED (MSFB)

Summary. The paper is presented as a material which is derived from the experimental studies carried out in a Multi–Solid Fluidized Bed (MSFB). The combustion test stand and the selected results of the experiments are presented. Finally, the emission data from comercial scale MSFB boilers are presented.

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЕ СЖИГАНИЕ УГЛЯ В ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕ ТИПА МСФБ

Резюме. В работе представлено материалы экспериментов, производимых в флюидальном слое типа (МСФБ). Представлено опытную установку и избранные результаты опытов в лабораторном масштабе. В заключении представлено данные касающиеся эмиссии загрязнений полученных в промышленном котле типа МСФБ.

WSTĘP

Jednym z głównych problemów związanych ze spalaniem paliw stałych jest ograniczenie do minimum emisji do atmosfery głównie związków NO_x, SO_2, N_2O, CO itd. przy jednoczesnej produkcji użytecznych odpadów stałych, ta-

kich jak popiół, zużyty sorbent itd. Do „czystych" technologii utylizacji paliw stałych należą atmosferyczne i ciśnieniowe kotły z paleniskami z warstwą fluidalną typu FB i PFB, jak również kotły z paleniskami z warstwą cyrkulacyjną typu CFB i PCFB. Wymienione kotły w zasadzie spełniają wymagania dotyczące ochrony środowiska, jednak względy ruchowe (dopuszczalny zakres zmian obciążenia), jak również ostre wymagania w zakresie dopuszczalnych wielkości ziaren paliwa spalanego w tych kotlach pozwalają przypuszczać, że bardziej atrakcyjna jest tzw. technologia Multi–Solid Fluidized Bed (MSFB), opracowana i zastosowana w Japonii [1 – 4]. Technologia ta, posiadająca zalety cyrkulacyjnej warstwy fluidalnej, pozwala rozszerzyć skład frakcyjny ziaren paliwa podawanego do paleniska, jak również zwiększyć zakres zmian obciążenia kotła. MSFB jest warstwą cyrkulacyjną posiadającą w swej dolnej części fazę gęstą złożoną głównie z kulek ceramicznych o rozmiarach 10 – 15 mm. Kulki te fluidyzowane powietrzem doprowadzonym do komory paleniskowej pod ruszt stanowią stabilizator procesu spalania, zwiększając jednocześnie czas pobytu drobnych ziaren paliwa w komorze paleniskowej. Ponadto faza gęsta sprzyja rozdrabnianiu ziaren węgla wprowadzonych do paleniska, dzięki czemu mogą one sięgać rozmiarów do 50 mm. Schemat ideowy kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną typu MSFB przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku 2 dokonano porównania parametrów pracy kotłów fluidalnych typu FB, CFB i MSFB.

Z porównania tego wynika, że w kotłach typu MSFB istnieje możliwość zmiany obciążenia w granicach 1 : 3, podczas gdy w pozostałych dwu tylko w granicach 1 : 2. Możliwość kontroli warunków spalania oraz tworzenia i destrukcji szkodliwych dla otoczenia gazów NO_x, N_2O i SO_2 pozwala w kotłach MSFB obniżyć ich emisję podczas utylizacji różnych paliw, jak również odpadów przemysłowych i miejskich. Na rysunku 3 przedstawiono zależność między temperaturą panującą w komorze spalania a wydajnością kotła dla dwu rodzajów kotłów: dla kotła typu MSFB z zewnętrznym wymiennikiem ciepła oraz dla kotła typu CFB bez zewnętrznego wymiennika ciepła.

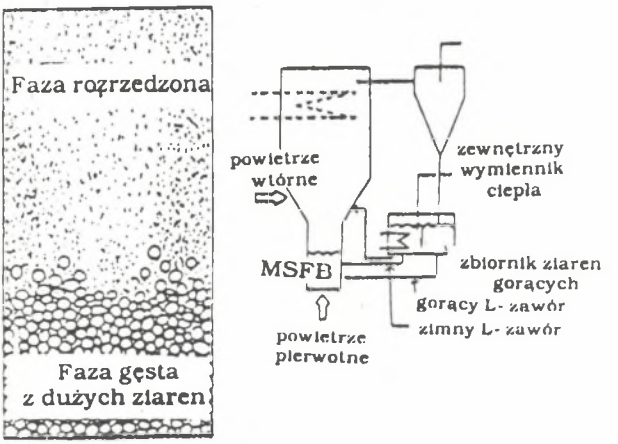
Jak wynika z rysunku 3, temperatura w komorze paleniskowej kotła typu MSFB z zewnętrznym wymiennikiem ciepła może być niezmienna przy obniżeniu jego wydajności do około 35% wydajności nominalnej, czego nie można uzyskać w innych konstrukcjach kotłów fluidalnych. Podstawowe cechy kotłów z paleniskami typu MSFB zestawiono poniżej:

- **utworzenie fazy gęstej w dolnej części komory paleniskowej**
  Zwiększenie czasu pobytu drobnych ziaren paliwa w komorze paleniskowej. Możliwość rozdrobnienia grubych ziaren paliwa. Stabilizacja warunków spalania. Wzrost sprawności spalania. Obniżenie emisji NO_x. Wzrost sprawności odsiarczania. Możliwość spalania różnych rodzajów paliw zawierających dużo wilgoci i popiołu, jak również odpadów komunalnych

Cyrkulujące ziarna : popiół, kamień wapienny,
drobne ziarna węgla
rozmiar ziaren - 300 μm
gęstość ziaren - 2600 kg/m³

Masowy strumień ziaren : 5 - 15 kg/m²·s

Warstwa gęsta : kulki ceramiczne
rozmiar kulek - 10 - 15 mm
gęstość kulek - 3400 kg/m³

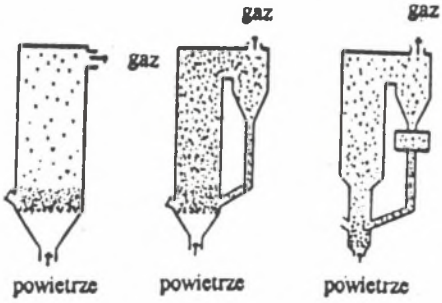


Rys. 1. Koncepcja kotła typu MSFB

Fig. 1. MSFB boiler concept

i przemysłowych. Możliwość utylizacji paliwa o rozmiarach ziaren do 50 mm.

- **wymiana ciepła i proces spalania są oddzielone od siebie**
  Wysokie współczynniki wymiany ciepła w zewnętrznym reaktorze fluidalnym. Zmniejszenie erozji i korozji rur wymienników. Możliwość szybkiego odstawienia i ponownego uruchomienia kotła, jak również szybkiego dostosowania warunków pracy do wymagań (obciążenia). Wymagany jest sprawnie działający układ automatycznej regulacji kotła.
- **kontrola temperatury w komorze poprzez zmianę koncentracji**
  Zapewnienie niezmiennej temperatury komory w szerokim zakresie zmian obciążenia kotła. Duża skuteczność redukcji NO_x dzięki stabilnemu spala-



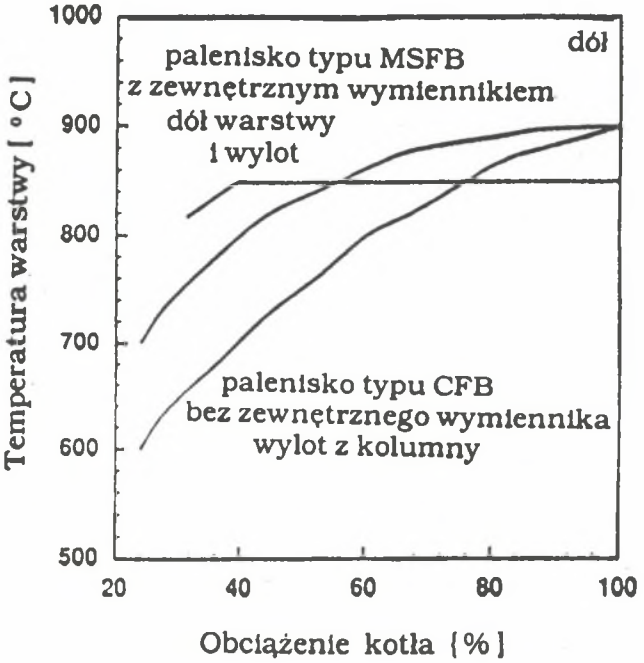
	warstwa pęcherzykowa	warstwa cyrkulacyjna	warstwa typu MSFB
wysokość strefy spalania	3 - 6	9 - 18	9 - 18
Prędkość	2.5	4.5 - 6	5 - 10
Nadmiar powietrza [%]	20 - 25	10 - 20	10 - 20
Stosunek Ca/S	3 : 1	2 : 1	2 : 1
Wielkość ziaren paliwa [mm]	0 - 5	0 - 10	0 - 50
Zmiana obciążenia	2 : 1	2 : 1	3 : 1
Sprawność spalania [%]	90	99	99
Emisja NO_x [ppm]	300 - 400	20 - 100	50 - 100
Emisja SO_x [ppm]	80 - 90	90 <	90 <

Rys. 2. Porównanie warunków pracy kotłów z paleniskami fluidyzacyjnymi

Fig. 2. Comparison of operating conditions between fluidized bed boilers

niu i utrzymywaniu na stosunkowo niskim poziomie temperatury procesu. Obniżenie emisji N_2O do atmosfery.

– **kontrola koncentracji ziaren w komorze poprzez ich recyrkulację** Niezależna od temperatury i zawartości O_2 kontrola koncentracji ziaren. Wysoka sprawność odsiarczania przy zmniejszonym stosunku Ca/S. Przystosowanie do spalania różnych paliw i odpadów.



Rys. 3. Temperatura spalania dla dwu różnych typów palenisk fluidyzacyjnych w funkcji obciążenia kotła

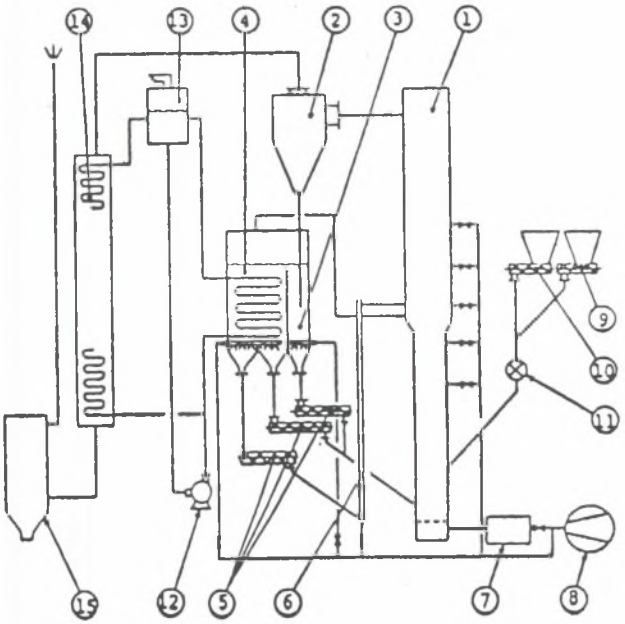
Fig. 3. Combustion temperature for two operating procedurs for boiler load reduction

2. STANOWISKO DOŚWIADCZALNE

Schemat stanowiska doświadczalnego przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 pokazano schemat komory spalania z zaznaczeniem miejsc wprowadzenia sond pomiarowych, jak również punktów wprowadzenia powietrza pierwotnego, powietrza wtórnego oraz paliwa i ziaren recyrkulujących. Rozmieszczenie sond pozwalało dokonywać pomiarów temperatur, ciśnień, koncentracji ziaren, jak również zawartości części palnych i składu granulometrycznego. Ponadto wykonywano badania składu spalin na wylocie z komory. Układ zaopatrzony był w zewnętrzny wymiennik ciepła z pęcherzową warstwą fluidalną. Pod ruszt doprowadzano powietrze pierwotne, którego prędkość w dolnej części komory w trakcie badań była równa 6 – 9 m/s. Doświadczalny kocioł wyposażony był w układ automatycznej regulacji oraz układ zbierania danych. Komora spalania wykonana była w postaci dwu cylindrów; cylindra dolnego (pierwszej sekcji) o średnicy wewnętrznej 0,15 m i długości

1,8 m oraz cylindra górnego (drugiej sekcji) o średnicy wewnętrznej 0,25 m i długości 12,2 m. Wszystkie ściany komory spalania wykonano z materiału żaroodpornego. W komorze spalania utrzymywano ciśnienie zbliżone do atmosferycznego. Powietrze pierwotne wprowadzano do komory od dołu, a powietrze transportujące w punkcie nr 2 na rys. 5, w odległości 0,25 m ponad punktem doprowadzenia paliwa.

Powietrze transportujące recyrkulujące ziarna było doprowadzone stycznie z prędkością około 25 m/s. Ponad strefą doprowadzenia recyrkulujących ziaren wraz z powietrzem transportującym prędkość gazu w komorze spalania była równa około 9 m/s. W miejscu rozszerzania się komory, na wysokości 1,8 m od dystrybutora, prędkość gazu w komorze spadała do około 4 m/s. Po wprowadzeniu powietrza wtórnego, na wysokości 2,05 m, prędkość gazu w komorze spalania wzrastała do około 9 m/s. Temperatura w komorze spalania utrzymywana była na poziomie 750 – 800°C. Stosunkowo niska i stabilna temperatura w komrze paleniskowej sprzyjała niskiej emisji NO_x i SO_2.



2. Cyklon
3. Zbiornik ziaren gorących
4. Zewnętrzny wymiennik ciepła
5. Podajnik ślimakowy
6. Rura wznosząca
7. Palnik rozpałowy
8. Dmuchawa
9. Podajnik paliwa
10. Podajnik kamienia wapiennego
11. Zasuwa kulowa
12. Pompa wodna
13. Separator pary
14. Parownik
15. Filtr tkaninowy

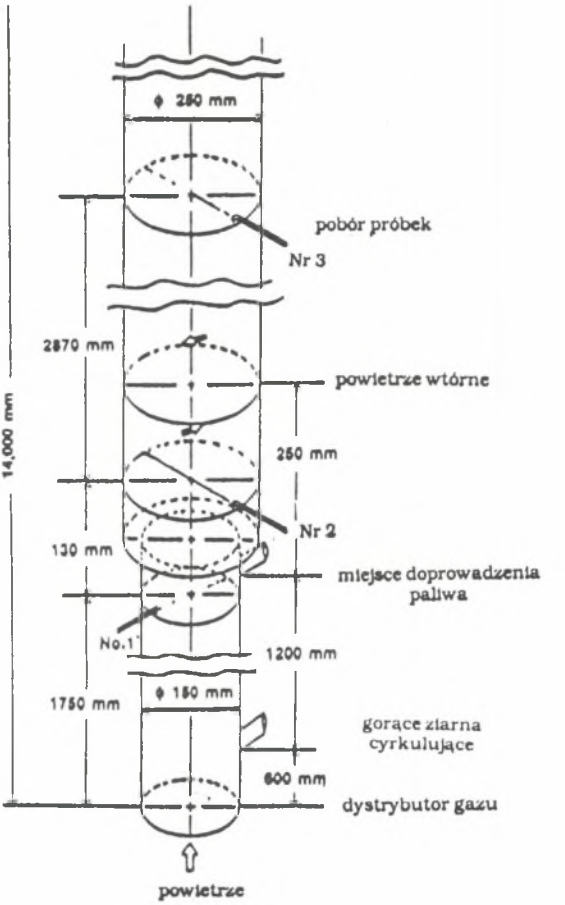
Rys. 4. Schemat pilotowego kotła z paleniskiem cyrkulacyjnym typu MSFB

Fig. 4. The schematic diagram of the pilot – plant MSFB combustor

3. WYNIKI BADAŃ

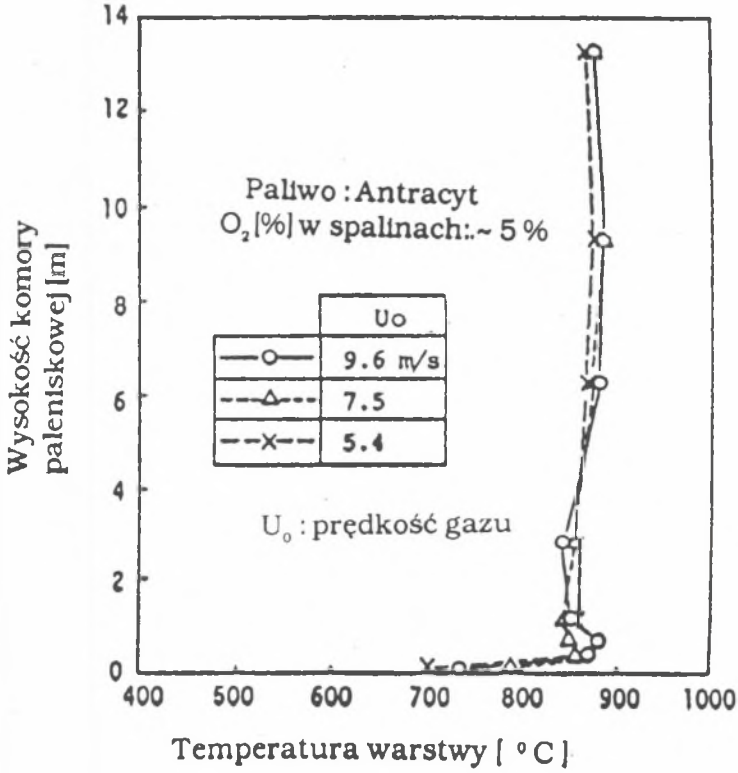
Możliwość recyrkulacji ziaren oraz schładzania części ich strumienia w zewnętrznym reaktorze fluidyzacyjnym, z którego do reaktora spalania można doprowadzać odpowiednie strumienie ziaren gorących i wychłodzonych, pozwala skutecznie regulować temperaturę komory paleniskowej, jak również utrzymywać ją na założonym poziomie. Pozwala to także uzyskać minimalne gradienty temperatur w komorze paleniskowej. Na rysunku 6 przedstawiono typowy rozkład temperatur wzdłuż wysokości komory paleniskowej typu MSFB przy różnych prędkościach gazu.

Tylko w dolnej, przyrusztowej strefie występuje gradient temperatury, podczas gdy w pozostałej części komory paleniskowej temperatura utrzymywana jest na niezmiennym poziomie, niezależnym od prędkości przepływającego gazu. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowy wykres zmian względnego ciśnienia przy różnych prędkościach przepływającego gazu. Wyniki te wskazują na niewielką różnicę spadku ciśnienia przy różnych prędkościach gazu. Wykresy zmian ciśnienia są typowe, jakie uzyskuje się przy przepływie gazu przez kolumnę z warstwę cyrkulacyjną.



Rys. 5. Schemat lokalizacji układu poboru próbek

Fig. 5. The schematic diagram of the location of the sampling probe



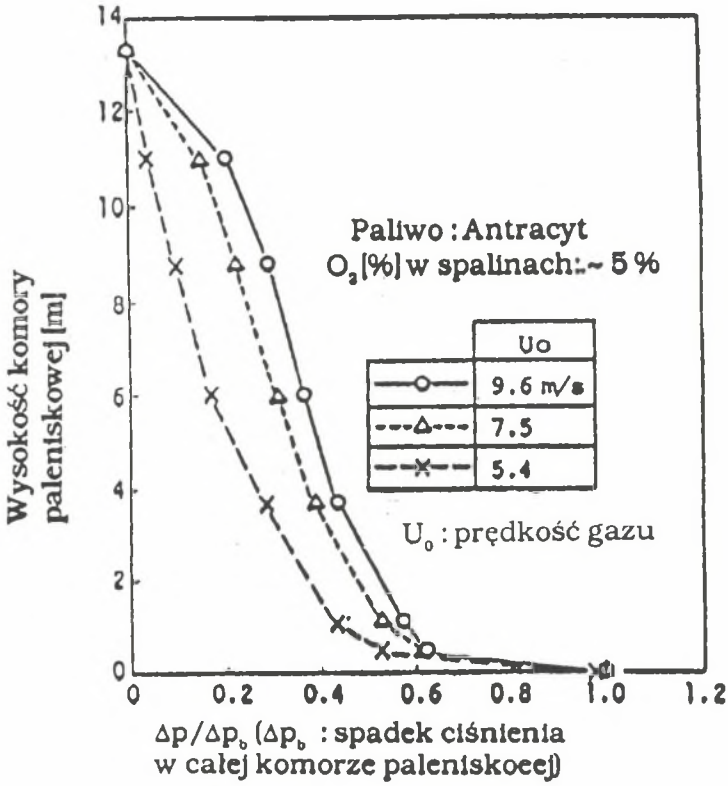
Rys. 6. Rozkład temperatur w komorze paleniskowej

Fig. 6. Temperature distribution im combustor

Przystosowanie paleniska typu MSFB do spalania różnych paliw stawia następujące wymagania:

- przystosowanie do spalania paliw o różnych zawartościach wilgoci (tendencja do zróżnicowania temperatur wzdłuż wysokości komory paleniskowej),
- przystosowanie do spalania przy zmiennych warunkach wymiany ciepła i masy związanych ze zróżnicowaną zawartością popiołu w paliwie,
- przystosowanie do spalania paliw o różnych zawartościach części lotnych oraz bardzo zróżnicowanych wielkościach ziaren spalanego paliwa.

Pierwsze dwa punkty są w kotle typu MSFB spełnione dzięki recyrkulacji gorącego i ochłodzonego strumienia ziaren, wyboru odpowiedniego stosunku tych strumieni oraz stabilizacji procesu spalania spowodowanej istnieniem w dolnej części komory gęstej warstwy kulek ceramicznych o znacznej pojemno-

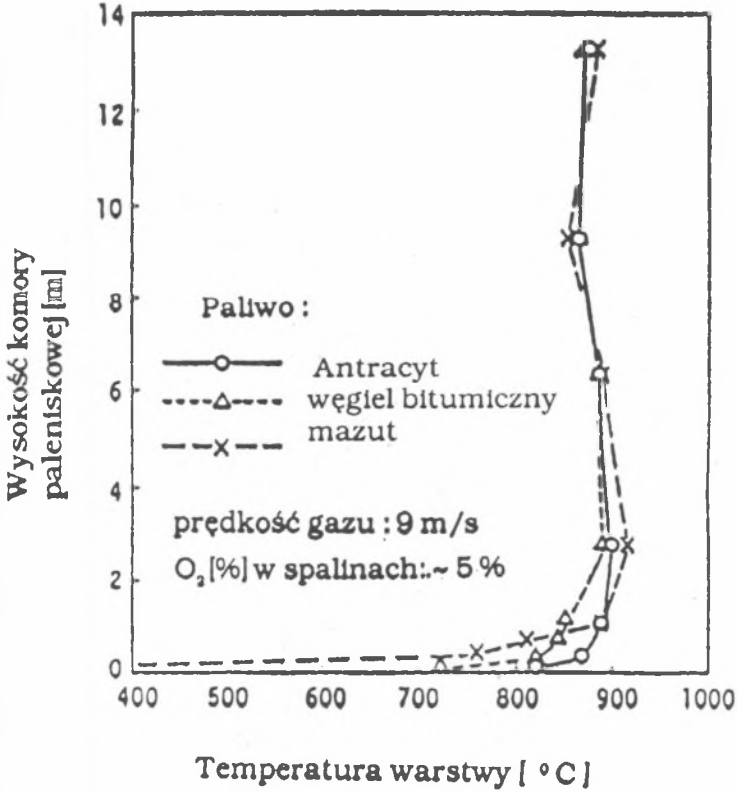


Rys. 7. Rozkład ciśnienia w komorze paleniskowej

Fig. 7. Pressure distribution in combustor

ści cieplnej. Spełnieniu trzeciego wymogu służy rozdział ochłodzonego strumienia recyrkulujących ziaren i doprowadzenie ich na dwu różnych wysokościach komory paleniskowej. Jeden ze strumieni doprowadzony jest do dolnej części komory do gęstej warstwy, drugi natomiast w rozszerzoną przestrzeń komory paleniskowej, w której następuje spadek prędkości gazu. Pozwala to utrzymać temperaturę w komorze na niezmiennym poziomie przy spalaniu różnych paliw, co ma szczególne znaczenie dla obniżenia emisji NO_x. Przykładowy wykres zmian temperatury w komorze paleniskowej przy spalaniu różnych paliw w palenisku typu MSFB przedstawiono na rysunku 8.

Stwierdzono [5], że zmiana temperatury o 10°C powyżej temperatury 850°C w komorze paleniskowej powoduje wzrost stężenia O_2 o około 1%, co prowadzi do wzrostu emisji NO_x. Dlatego niezwykle ważny jest problem utrzymania



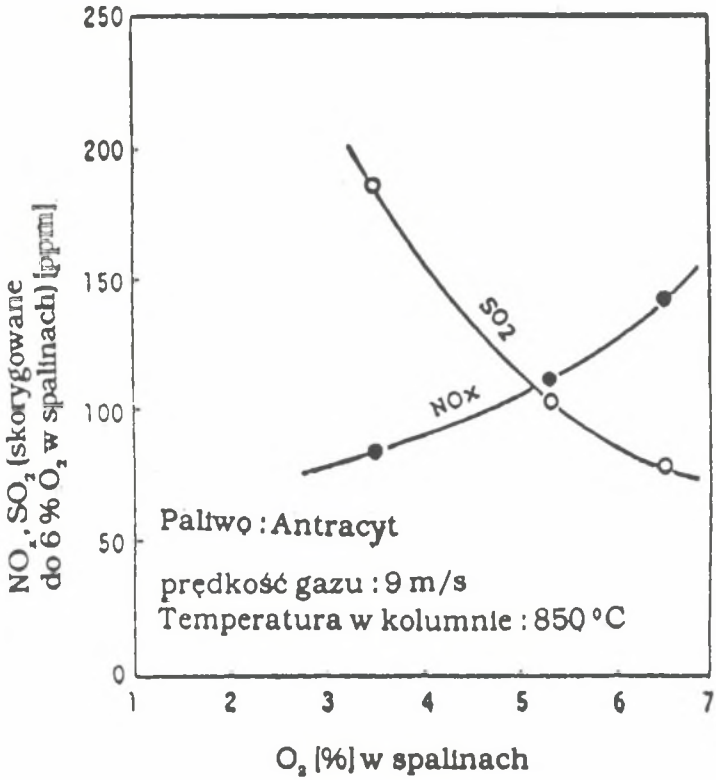
Rys. 8. Rozkład temperatur w komorze paleniskowej dla różnych paliw

Fig. 8. Temperature distribution in combustor for various fuels

zawartości tlenu w komorze paleniskowej na niskim poziomie odpowiednim dla rodzaju spalanego paliwa. Doświadczalną zależność przedstawiającą emisję NO_x oraz SO_2 uzyskaną przy spalaniu antracytu przedstawiono na rysunku 9. Spalanie w pierwszej strefie (w fazie gęstej), z niedomiarem powietrza, ogranicza znacznie tworzenie się NO_x. Emisja NO_x w czasie doświadczeń była niższa od 130 ppm, podczas gdy w kotłach konwencjonalnych sięga ona 200 – 350 ppm. Emisja SO_2 przy stosunku Ca/S = 2,2 była niższa od 200 ppm przy sprawności odsiarczania wynoszącej 92%. Badania emisji SO_2 oraz NO_x prowadzono także na przemysłowym kotle typu MSFB o wydajności 300 t/h pary. Schemat tego kotła pokazano na rysunku 10. Na rysunku 11 przedstawiono dane dotyczące emisji NO_x i SO_2 uzyskane przy spalaniu w tym kotle węgli

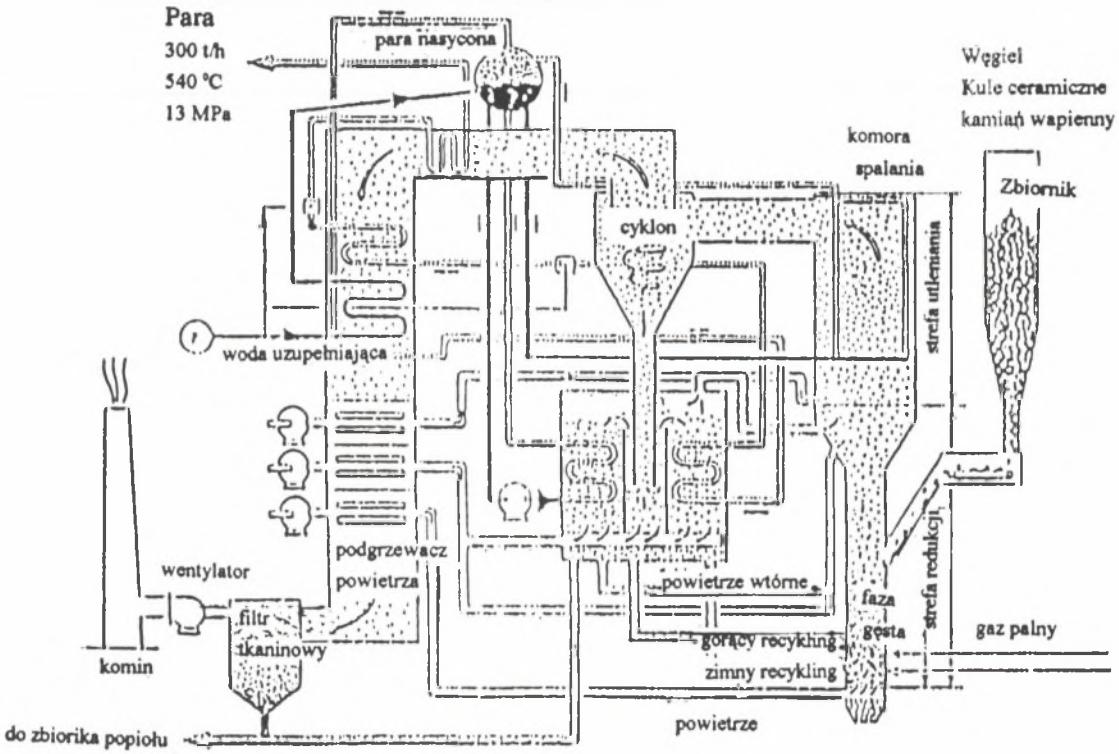
bitumicznych (rys. 11A) oraz wysoko zasiarczonego oleju typu C–oil (rys. 11B.) przy różnych obciążeniach kotła. W kotłach typu MSFB przy obniżeniu wydajności nawet do 35% wydajności nominalnej uzyskuje się emisję NO_x na poziomie nominalnej wydajności kotła (około 50 ppm) przy spalaniu paliw stałych, oraz obniżenie emisji NO_x przy spalaniu paliw płynnych. Przy stosunku Ca/S < 1,5 sprawność odsiarczania jest nieco wyższa od 90%. Dane dotyczące emisji przedstawiono poniżej:

Zanieczyszczenie	paliwo gwarantowane	węgiel bitumiczny	olej opałowy	gaz
NO_x [ppm]	130	50	96	18
SO_2 [ppm]	150	100	100	0
pył [mg/m^3_n]	30	1	2	< 10



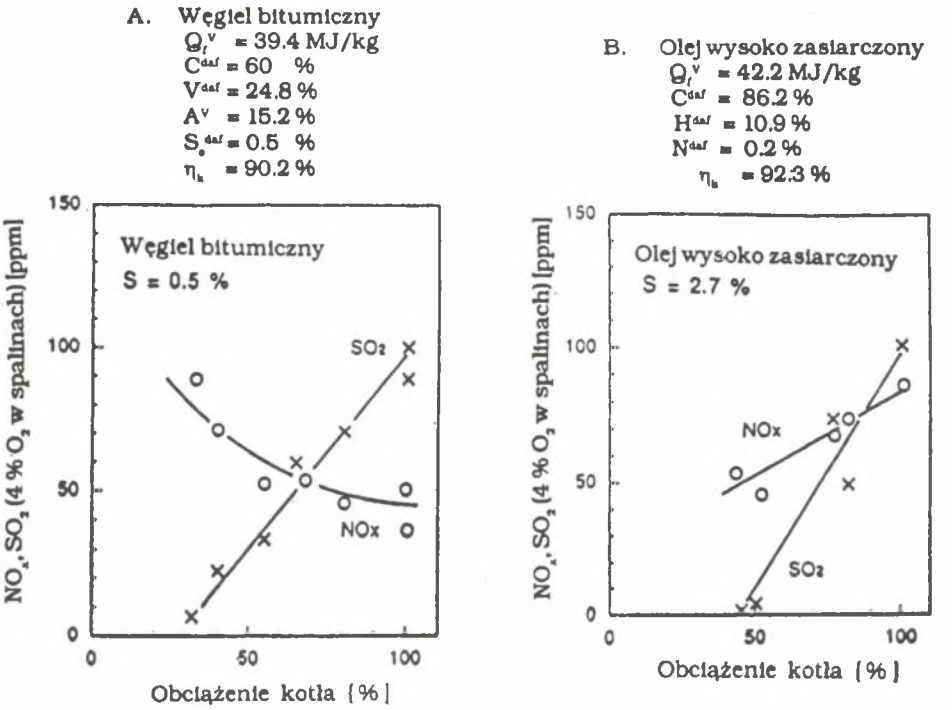
Rys. 9. Zależność między NO_x, SO_2 i O_2

Fig. 9. Correlation between NO_x, SO_2 and O_2



Rys. 10. Schemat kotła z paleniskiem typu MSFB o wydajności pary 300 t/h

Fig. 10. Schematic diagram of the 300 t/h MSFB boiler



Rys. 11. Emisja NO_x i SO_2 w kotle z paleniskiem typu MSFB przy różnych obciążeniach: a – dla węgla bitumicznego, b – dla oleju zasiarczonego

Fig. 11. MSFB boiler load vs NO_x and SO_2 emissions for various fuels: a – for bituminous coal, b – for high sulfur C–oil

PODSUMOWANIE

Opracowanie technologii spalania paliw w kotlach typu MSFB jest wynikiem kompleksowych badań doświadczalnych oraz studiów teoretycznych dotyczących fizycznych i chemicznych własności procesu. Bardzo ważnym zagadnieniem było opanowanie techniki regulacji temperatury oraz gęstości złoża poprzez recyrkulację cząstek. Badania doświadczalne pozwoliły uzyskać dane do projektu i budowy instalacji przemysłowej kotła typu MSFB o wydajności 300 t/h pary. Badania tej instalacji dostarczą danych dotyczących eksploatacji oraz uściślą założenia projektowe. Brak jest teoretycznych opracowań pozwalających modelować spalanie w kotlach typu MSFB. Należy przypuszczać, że ta generacja kotłów pozwoli opanować problemy związane z utylizacją różnych paliw w kotłach energetycznych przy zachowaniu najbardziej ostrych norm dotyczących ochrony środowiska.

LITERATURA

[1] Nowak W., Matsuda M., Kyu Kyu Win, Hatasani M.: Proceedings of the 5th SCEJ Symposium on Circulating Fluidized Beds, Tokyo 1992, s. 93–100.
[2] Werther J., Hartge J.E.U., Krause M., Nowak W. i inni: Circulating Fluidized Bed Technology III, (Basu P., Horio M., Hasatani M. (EDS.)), Pergamon Press, Oxford 1991, s. 589–593.
[3] Kyu Kyu Win, Nowak W., Matsuda H., Hasatani M.: Proceedings of the 6th SCEJ Symposium on Circulating Fluidized Beds, Tokyo 1993, s. 91–98.
[4] Nowak W., Matsuda H., Kyu Kyu Win, Hasatani M.: Proceedings of the 5th SCEJ Symposium on Circulating Fluidized Beds, Tokyo 1992, s. 69–76.
[5] Adams C.K.: Circulating Fluidized Bed Technology II, Pergamon Press, 1988, s. 229–306.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz CHMIELNIAK

Wpłynęło do Redakcji 8.08. 1994 r.

Abstract

The paper is presented as a material, which is derived from the experimental studies carried out in Multi–Solid Fluidized Bed (MSFB). MSFB is a circulating fluidized bed consisting of a circulating dilute phase bed and more stable dense bed of coarse particles. Fine particles circulate while the dense bed of coarse particles (10 – 15 mm in diameter) stabilizes the combustion process nad increases the residence time of fines. The dense bed promotes the breakdown od coarse coal particles enabling us to handle run of mine coal up to 50 mm in size. The MSFB operates at high superfical gas velocities that permit load turn–down more than 3 : 1. The MSFB can operate with very low NO_x, N_2O and SO_2 emisions while utylizing a variety of fuels including industrial and urban wastes. The research has been conducted in a pilot–plant MSFB combustor that stimulates essential features of industrial MSFB boilers. The temperature and pressure distribution along the height of the combustor are presented. The influence and correlation between NO_x, SO_x emited into a athmosphere and O_2, included in flue gas, are presented. Finally, the emission data from commercial scale MSFB boilers are presented. Combustion of solid fuels in a Multi–Solid Fluidized Bed is the result of complex interactions among many physical and chemical processes. Extensive experimental studies on hydrodynamics, combustion and pollutant emission have been conducted both in laboratory scale and commercial units.