

Wojciech Nowak, Jarosław Krzywański

Badania suchego odsiarczania i odazotowania spalin w binarnej cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej

Wpływ tlenków siarki i azotu na otoczenie jest wielokierunkowy. Dwutlenek azotu odpowiedzialny jest m.in. za powstawanie tzw. smogu fotochemicznego [1], którego istotą jest rozpad cząsteczek NO_2 pod wpływem fotonów. Innym zjawiskiem związanym z obecnością tlenków azotu jest zanik warstwy ozonowej w wyniku reakcji tlenków azotu z ozonem. Szkodliwy wpływ tlenków azotu na środowisko uwidacznia się także w erozyjnym oddziaływaniu na skały zawierające węglan wapnia. Rozpuszczone w wodzie deszczowej tlenki azotu powodują powstanie kwasu, który reagując z węglanem wapnia zawartym w materiale skały, np. w lepiszczu, tworzy kwas węglowy. W wyniku reakcji kwasu węglowego z węglanem wapnia powstaje wodorowęglan wapnia, który – jako bardzo dobrze rozpuszczalny w wodzie – zostaje wyniesiony na powierzchnię kamienia, gdzie osadza się w postaci węglanu wapnia. Reakcje te należą do reakcji erozji mineralnych składników kamienia. Konsekwencje tych zjawisk są ogólnie znane.

Dwutlenek siarki bardzo łatwo adsorbuje się na drobnych cząstkach pyłu unoszącego się w powietrzu [2]. W obecności wilgoci cząstki pyłów katalizują procesy utleniania SO_2 do SO_3 , który łączy się natychmiast z wodą, tworząc kwas siarkowy. Pyły, z zaadsorbowanym na ich powierzchni kwasem, opadając zwiększają stężenie kwasu w dolnych warstwach atmosfery. Gdy wilgoć odparuje, pyły te, mające z reguły średnicę około $2\ \mu\text{m}$, łatwo dostają się do układu oddechowego. Kwas siarkowy zaadsorbowany na powierzchni cząstek pyłów jest łatwo rozpuszczalny w płynie płucnym, a jeśli jego stężenie jest wystarczająco duże, niszczy tkankę układu oddechowego [2].

Oprócz kwasu siarkowego bardzo szkodliwe są również objętne siarczany. Woda zawierająca jony SO_4^{2-} działa szkodliwie na skały zawierające węglan wapnia (np. lepiszcze), rozpuszczając go, a następnie – odparowując – pozostawia w warstwie powierzchniowej kamienia osad siarczanów. Krystaliczny dwuwodny siarczan wapnia ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) zajmuje objętość dwukrotnie większą niż odpowiadająca jej ilość CaCO_3 . Powstały w ten sposób gips rozsada kamień osłabiony w wyniku procesów rozpuszczania wapnia. Ma to szczególne znaczenie w przypadku lepiszczy. Należy również zwrócić uwagę na zjawisko krystalizacji soli rozpuszczonych (m.in. siarczanów) w wodzie zalegającej pory skał, gdyż jest ono źródłem dodatkowych naprężeń.

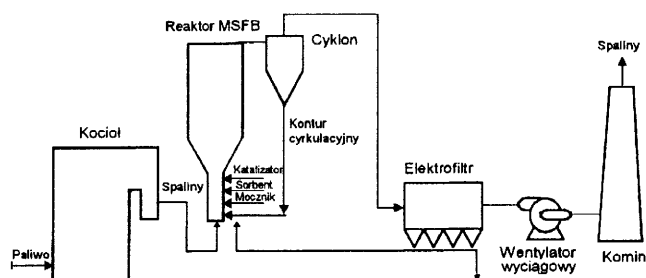
Przedstawione przykłady szkodliwego oddziaływania tlenków siarki i azotu na środowisko stały się inspiracją do opracowania wielu metod ograniczenia ich emisji. Wśród nich coraz większą popularnością cieszą się technologie

jednoczesnego odsiarczania i odazotowania spalin. Ich podstawową zaletą jest jednoczesna realizacja dwóch różnych procesów, tj. odsiarczania i odazotowania w jednym układzie. Bliższe omówienie metod jednoczesnego odsiarczania i odazotowania spalin zawarto we wcześniejszej pracy autorów [3].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań procesu odsiarczania i odazotowania spalin w binarnej cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej.

Koncepcja procesu

Koncepcję odsiarczania i odazotowania spalin w warstwie fluidalnej typu MSFB (*Multi-Solid Fluidized Bed*) obrazuje rysunek 1.



Rys. 1. Koncepcja jednoczesnego odsiarczania i odazotowania spalin w binarnej cyrkulacyjnej warstwie fluidalnej

Pochodzące z kotła spaliny, zawierające znaczne stężenia tlenków siarki i azotu, kierowane są do reaktora MSFB, w którym warstwę gęstą tworzą ziarna mocznika, który jest źródłem amoniaku uwalnianego się w temperaturze powyżej $100\ ^\circ\text{C}$. Warstwę cyrkulującą stanowią drobne ziarna sorbentu oraz katalizatora. W proponowanym układzie są nimi odpowiednio wodorotlenek wapnia oraz tlenek miedzi. W cyklonie zachodzi odseparowanie spalin od drobnych ziaren, które – poprzez kontur cyrkulacyjny – kierowane są powtórnie do kolumny. Dalsze odseparowanie ziaren od spalin zachodzi w elektrofiltrze, z którego oczyszczone spaliny kierowane są do kominu.

MSFB stanowi warstwę cyrkulacyjną, mającą w swej dolnej części fazę gęstą, złożoną głównie z ziaren o średnicach wielokrotnie przewyższających średnice ziaren materiału cyrkulującego w konturze cyrkulacyjnym. Ziarna warstwy gęstej w proponowanym układzie stanowią ziarna mocznika o uziarnieniu $1+3\ \text{mm}$. Ich rolą jest m.in. zwiększenie czasu przetrzymania w komorze reakcyjnej zarówno spalin, jak i drobnych ziaren sorbentu i katalizatora. Ma to bardzo ważne znaczenie w wypadku procesu jednoczesnego odsiarczania i odazotowania spalin, gdyż warunki mieszania są tu szczególnie istotne dla skuteczności obu procesów.

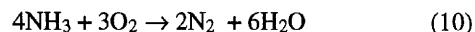
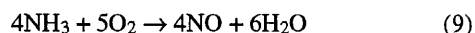
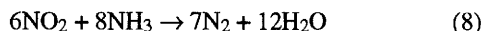
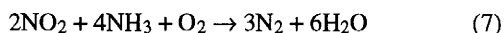
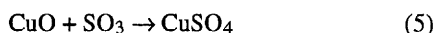
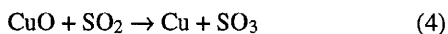
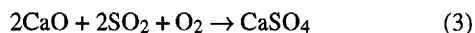
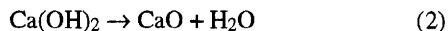
Wykorzystanie w proponowanym układzie ziaren mocznika, jako ziaren fazy gęstej, podyktowane było względami ekonomicznymi, z uwagi na jego stosunkowo niską cenę i dostępność na polskim rynku. Na możliwość zastosowania mocznika zwrócono już uwagę w pracach [4,5], gdzie podkreślono pozytywne aspekty takiego rozwiązania.

Z uwagi na temperaturę procesu, około 400 °C, wykorzystany mocznik ulega rozkładowi i sublimacji do amoniaku, stanowiącego czynnik aktywny w procesie SCR (*Selective Catalytic Reduction*) tlenków azotu [6], według reakcji:



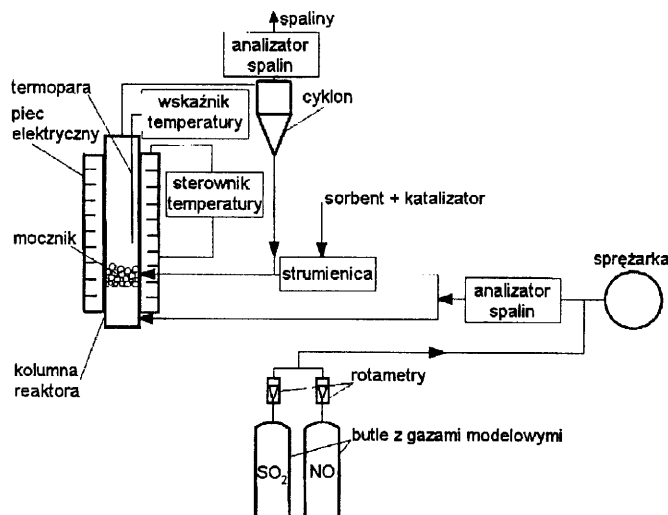
W procesie jednoczesnego odsiarczania i odazotowania wykorzystano CuO i Ca(OH)₂. Pierwszy związek stanowił katalizator przy odazotowaniu spalin, natomiast wodorotlenek wapnia użyty został w charakterze sorbentu tlenków siarki. O zaletach wynikających z wykorzystania wodorotlenku wapnia do procesów odsiarczania spalin świadczą wnioski zawarte w pracach [7,8].

Zachodzące w kolumnie podstawowe reakcje są następujące [1,7,9,10]:



Aparatura i stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2. Badania prowadzono wykorzystując do tego celu modelową mieszaninę dwutlenku siarki, tlenku azotu oraz powietrza, co umożliwiło uzyskanie szerokich zakresów zmienności



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do jednoczesnego odsiarczania i odazotowania spalin

stężeń SO₂ i NO w spalinach, dochodzących do 2000 ppm. Cyrkulujący w układzie materiał sypki tworzyły wodorotlenek wapnia i tlenek miedzi. Warstwę gęstą, zlokalizowaną w dolnej części kolumny, tworzyły ziarna mocznika. Kolumnę stanowiła rura o średnicy 0,04 m i wysokości 0,6 m, której umieszczenie pionowo w piecu pozwoliło na uzyskanie w jej wnętrzu temperatury dochodzącej do 500 °C dla każdej z wykorzystywanych w pomiarach wartości strumienia gazu. Cyrkulujący w układzie materiał sypki był oddzielany od gazu w cyklonie i zwracany do układu. Regulacji strumienia materiału sypkiego dokonywano przy użyciu podajnika wi-bracyjnego oraz strumienicy. Pomiar temperatury prowadzono przy użyciu termopar, natomiast pomiar strumienia gazu fluidyzującego realizowany był za pomocą rotametrów wy-skalowanych osobno dla każdego z użytych gazów.

Materiały i metodyka badawcza

Badania prowadzone były w celu ustalenia zależności skuteczności odsiarczania i odazotowania spalin od temperatury procesu, prędkości gazu fluidyzującego, stężeń tlenków siarki i azotu w spalinach oraz stosunków Ca/S i mocznik/NO. O wyborze stosunku mocznik/NO zdecydowało wykorzystanie w badaniach ziaren mocznika w charakterze warstwy gęstej. Katalizator i sorbent doprowadzano do układu przy pomocy strumienicy.

Stosunek molowy Ca/S wyznaczono ze stosunku molowego sorbent/SO₂:

$$\text{Ca/S} = \frac{\dot{m}_{\text{sorbent}} V_{\text{mol}}(\text{SO}_2)}{M_{\text{mol}}(\text{sorbent}) C_{\text{SO}_2} \dot{V}_{\text{gaz}}} \quad (11)$$

gdzie:

$\dot{m}_{\text{sorbent}}$ – strumień sorbentu, kg/s

$V_{\text{mol}}(\text{SO}_2)$ – objętość 1 mola SO₂, Nm³SO₂/mol

$M_{\text{mol}}(\text{sorbent})$ – masa 1 mola sorbentu, kg/mol

C_{SO_2} – stężenie SO₂ w spalinach, Nm³SO₂/Nm³

$\dot{V}_{\text{gaz}}$ – strumień spalin, Nm³/s

Stosunek mocznik/NO wyznaczono z zależności:

$$\text{mocznik/NO} = M_{\text{mocznik}}/C_{\text{NO}} \quad (12)$$

gdzie:

M_{mocznik} – masa mocznika w układzie, kg

C_{NO} – stężenie NO w spalinach na wlocie do kolumny, Nm³NO/Nm³

Stosunek ten, w porównaniu ze stosunkiem z równania (11), ma nieco inny charakter i wyraża masę użytego mocznika odniesioną do stężenia NO w spalinach.

Skuteczność odsiarczania spalin (%) wyznaczono ze wzoru:

$$X_{\text{SO}_2} = (C_{\text{SO}_2} - C_{\text{I SO}_2})/C_{\text{SO}_2} \quad (13)$$

gdzie:

C_{SO_2} – stężenie SO₂ w spalinach na wlocie do kolumny, Nm³SO₂/Nm³

$C_{\text{I SO}_2}$ – stężenie SO₂ w spalinach za cyklonem, Nm³SO₂/Nm³

Skuteczność odazotowania spalin (%) wyznaczono ze wzoru:

$$X_{\text{NO}} = (C_{\text{NO}} - C_{\text{I NO}})/C_{\text{NO}} \quad (14)$$

gdzie:

C_{NO} – stężenie NO w spalinach na wlocie do kolumny, Nm³NO/Nm³

$C_{\text{I NO}}$ – stężenie NO w spalinach za cyklonem, Nm³NO/Nm³

Charakterystykę użytych materiałów przedstawiono w tabeli 1.

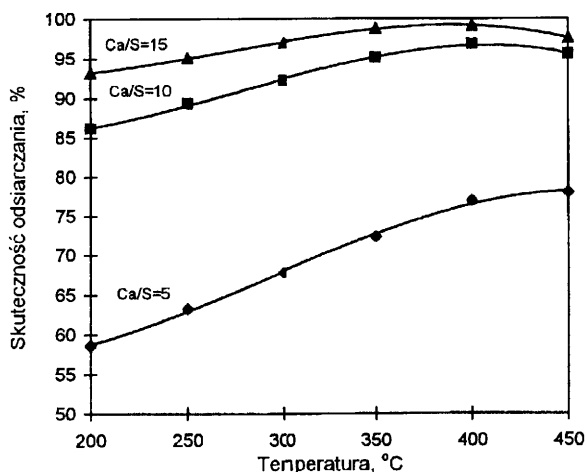
Tabela 1. Charakterystyka stosowanych materiałów

Rodzaj materiału	Gęstość kg/m ³	Średnica Sautera μm
Wodorotlenek wapnia (Ca(OH) ₂)	550	25,2
Tlenek miedzi (CuO)	2300	32,1
Mocznik ((NH ₂) ₂ CO)	730	1210

Wyniki badań

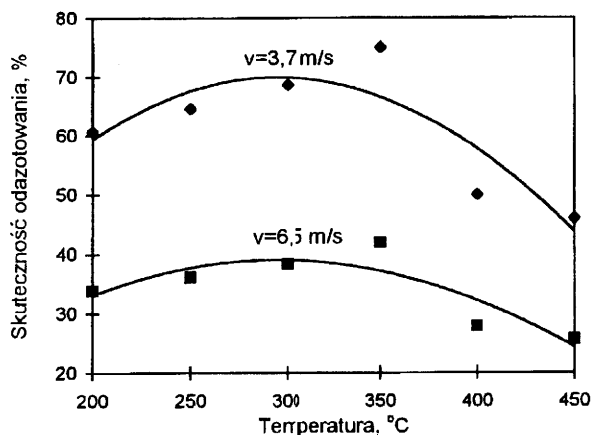
Wpływ temperatury

Skuteczność odsiarczania spalin od temperatury procesu rosła wraz ze wzrostem temperatury w zakresie do 400°C i spadała powyżej tej temperatury (rys.3). Spadek ten tłumaczyć można tworzeniem się na powierzchni ziaren sorbentu warstwy CaSO₄, utrudniającej dyfuzję gazów [10]. Skuteczność odsiarczania spalin osiągała maksimum w temperaturze około 400°C. Z analizy przedstawionych krzywych wynika, iż jednakowe przyrosty stosunku Ca/S powodowały różne zmiany skuteczności odsiarczania spalin. Dla wyższych wartości Ca/S przyrosty skuteczności były znacznie niższe niż przyrosty odpowiadające niższym wartościom wskaźnika Ca/S.



Rys. 3. Zależność skuteczności odsiarczania spalin od temperatury procesu ($v=6,5$ m/s, $C_{\text{SO}_2}=130$ ppm, $C_{\text{NO}}=100$ ppm, mocznik/NO=1)

Podobnie jak w wypadku odsiarczania, skuteczność odazotowania spalin rosła wraz ze wzrostem temperatury procesu w zakresie do 300 °C, natomiast dalszy przyrost temperatury powodował jednak jej spadek (rys.4).

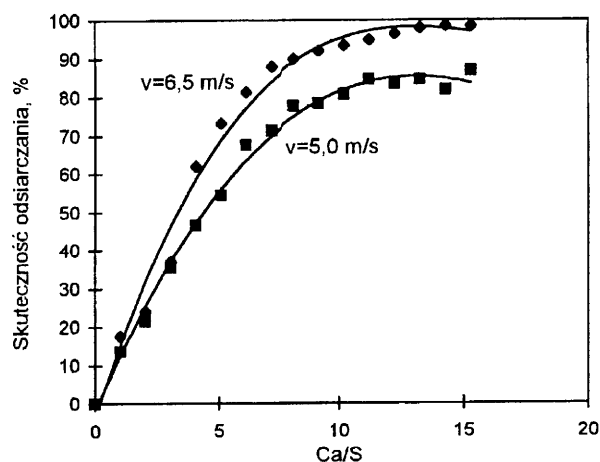


Rys. 4. Zależność skuteczności odazotowania spalin od temperatury procesu ($C_{\text{SO}_2}=50$ ppm, $C_{\text{NO}}=1600$ ppm, mocznik/NO=1,85, Ca/S=3, $m_{\text{CuO}}=1,25\text{e}-3$ kg/s)

Porównanie obu wykresów uwidacznia różnicę w ich wykukłości obrazującej dynamikę zmian skuteczności odazotowania spalin w funkcji temperatury procesu. Dla wyższej prędkości gazu (6,5 m/s) widać wyraźne spłaszczenie analizowanej zależności aniżeli dla niższej prędkości (3,7 m/s). Osiągane przy tym poziomy skuteczności odazotowania spalin dla prędkości 3,7 m/s były niższe, co należy tłumaczyć wywiewaniem katalizatora z układu, zachodzącym dla wyższych prędkości, a co za tym idzie – krótszym czasem kontaktu materiału sypkiego ze spalinami. Podobne wyniki uzyskano w pracy [11], w której zastosowano wodorotlenek wapnia jako sorbent oraz siarczan żelaza ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) w charakterze katalizatora.

Wpływ stosunku Ca/S

Skuteczność odsiarczania spalin rosła wraz ze wzrostem stosunku Ca/S (rys.5), co można tłumaczyć większą ilością sorbentu w układzie, a więc większą zdolnością medium dwufazowego do wiązania tlenków siarki ze spalin. Z analizy pochodnej linii trendu wynika, że szybkość przyrostu skuteczności odsiarczania spalin malała wraz ze wzrostem stosunku Ca/S. Dla wysokich wartości tego stosunku następowało jakby nasycenie się układu, które wyrażało się jego mniejszą wrażliwością na dalszy wzrost tego parametru.



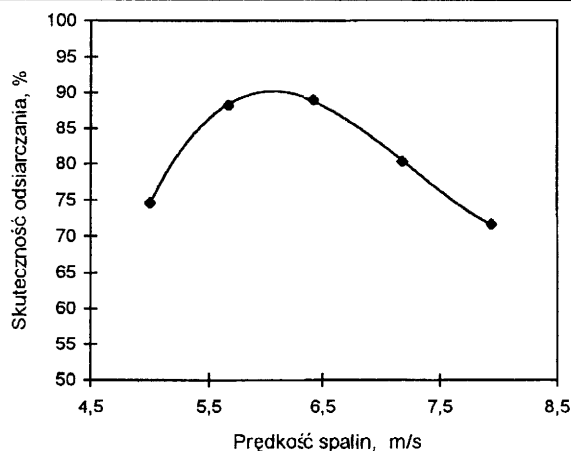
Rys. 5. Zależność skuteczności odsiarczania spalin od stosunku Ca/S ($t=300$ °C, $C_{\text{SO}_2}=130$ ppm, $C_{\text{NO}}=100$ ppm, mocznik/NO=1)

Analiza wartości pochodnej linii trendu wykazała zróżnicowanie dynamiki zmian skuteczności odsiarczania spalin dla badanych prędkości gazu. Takie zachowanie się układu może być tłumaczone lepszymi warunkami mieszania występującymi w układzie przy wyższych prędkości gazu.

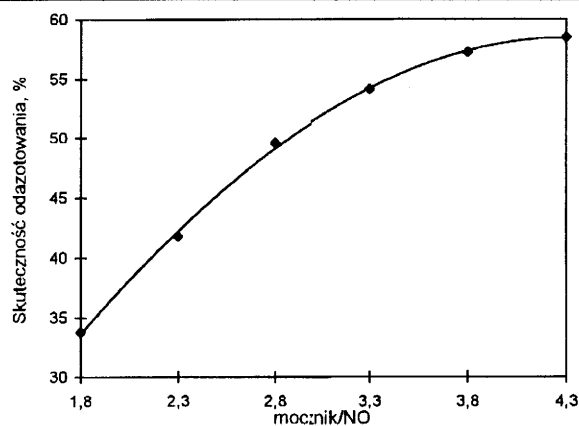
Wpływ prędkości spalin

Skuteczność odsiarczania spalin początkowo rosła wraz ze wzrostem prędkości spalin, osiągając maksimum dla prędkości około 6 m/s, co było spowodowane poprawą warunków mieszania przy wyższych prędkościach gazu fluidyzującego (rys.6). Dla wyższych prędkości spalin zachodziło unoszenie z układu materiału sypkiego, co – z uwagi na krótszy czas kontaktu spalin z sorbentem – objawiało się spadkiem skuteczności odsiarczania.

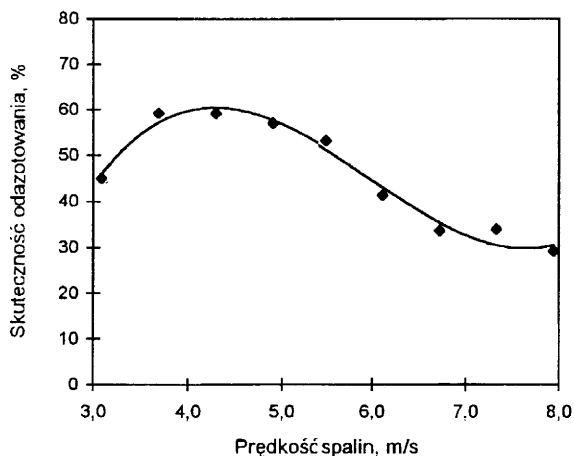
Prędkość spalin, przy której skuteczność odsiarczania osiągała maksimum, można uważać za prędkość optymalną dla rozkładu ziarnowego zastosowanych materiałów oraz parametrów przepływowych układu. Zaobserwowany charakter zmian był podobny jak w wypadku odazotowania spalin (rys.7).



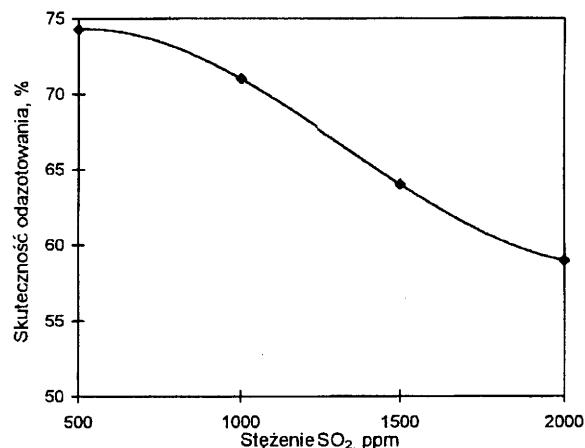
Rys. 6. Zależność skuteczności odsiarczania od prędkości spalin ($t=300^{\circ}\text{C}$, $\text{Ca/S}=8$, $\text{C}_{\text{SO}_2}=130\text{ ppm}$, $\text{C}_{\text{NO}}=100\text{ ppm}$, $\text{mocznik/NO}=1$)



Rys. 8. Zależność skuteczności odazotowania spalin od stosunku mocznik/NO ($v=6,5\text{ m/s}$, $t=390^{\circ}\text{C}$, $\text{Ca/S}=3$, $\text{C}_{\text{SO}_2}=50\text{ ppm}$, $\text{C}_{\text{NO}}=1600\text{ ppm}$, $m_{\text{CuO}}=1,25\text{e-}3\text{ kg/s}$)



Rys. 7. Zależność skuteczności odazotowania od prędkości spalin ($t=390^{\circ}\text{C}$, $\text{Ca/S}=3$, $\text{C}_{\text{SO}_2}=50\text{ ppm}$, $\text{C}_{\text{NO}}=1600\text{ ppm}$, $\text{mocznik/NO}=1,85$, $m_{\text{CuO}}=1,25\text{e-}3\text{ kg/s}$)



Rys. 9. Zależność skuteczności odazotowania od stężenia dwutlenku siarki w spalinach ($v=3,7\text{ m/s}$, $t=350^{\circ}\text{C}$, $\text{Ca/S}=3$, $\text{C}_{\text{NO}}=1600\text{ ppm}$, $m_{\text{CuO}}=1,25\text{e-}3\text{ kg/s}$)

Z uzyskanych zależności widać, że maksimum skuteczności odazotowania spalin przypadało w zakresie niższych prędkości, niż miało to miejsce podczas ich odsiarczania. Fakt ten można tłumaczyć skłonnością wodorotlenku wapnia do tworzenia przy niskich prędkościach gazu aglomeratów, które – z uwagi na zmniejszenie powierzchni kontaktu gazu z sorbentem – obniżały skuteczność procesu odsiarczania spalin. Zwiększenie prędkości spalin powodowało skuteczniejsze rozbijanie tych aglomeratów, przyczyniając się do poprawy warunków mieszania.

Wpływ stosunku mocznik/NO i strumienia katalizatora

Stosunek mocznik/NO liczony był na podstawie zależności (12), która określa efektywną masę mocznika przypadającą na jednostkę udziału objętościowego tlenu azotu w spalinach. Zależność skuteczności odazotowania spalin od wartości tego stosunku przedstawiono na rysunku 8.

Wraz ze wzrostem wartości stosunku mocznik/NO skuteczność odazotowania spalin rosła, co można tłumaczyć tym, iż dla wyższych wartości tego stosunku do komory doprowadzana była większa masa mocznika, czyli większa ilość składnika aktywnego w postaci amoniaku.

Wpływ stężenia SO_2

Skuteczność odazotowania gazów zależała od stężenia dwutlenku siarki w spalinach (rys.9). Z uwagi na to, iż zachodzące w układzie reakcje wiązania dwutlenku siarki odgrywają priorytetową rolę [7], skuteczność odazotowania spadała wraz

ze wzrostem stężenia dwutlenku siarki w spalinach, bowiem część wydzielonego amoniaku wchodziła w reakcje z SO_2 . Problem ten, jak widać na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, nie będzie miał istotnego znaczenia dla spalin nieznacznie zasieczonych.

Wnioski

- ♦ Skuteczność odsiarczania spalin osiągała maksimum w temperaturze około 400°C . W temperaturach powyżej 400°C skuteczność spadała, co można tłumaczyć powstawaniem na ziarnach sorbentu warstwy CaSO_4 , utrudniającej dyfuzję gazów.

- ♦ Wraz ze wzrostem wartości stosunków Ca/S oraz mocznik/NO skuteczność odsiarczania i odazotowania spalin rosła. Kształt krzywych aproksymujących wyniki wskazywał na zbliżanie się układu do stanu nasycenia czynnikiem aktywnym, tj. sorbentem oraz mocznikiem, będącym źródłem amoniaku.

- ♦ Wzrost prędkości spalin powodował początkowo wzrost, a potem spadek skuteczności odsiarczania i odazotowania spalin, co można tłumaczyć początkową poprawą warunków mieszania wraz ze wzrostem prędkości gazu fluidyzującego. Przy wyższych prędkościach gazu, dla charakterystyk użytych materiałów oraz parametrów przepływowych stanowiska, zachodziło unoszenie z układu materiału sypkiego, co – z uwagi na krótszy czas kontaktu – objawiało się spadkiem

skuteczności odsiarczania i odazotowania spalin. Prędkości gazu, przy których skuteczność odsiarczania i odazotowania spalin osiągała maksimum, można uważać za optymalne dla rozkładu ziarnowego zastosowanych materiałów oraz parametrów przepływowych układu.

♦ Maksimum skuteczności odazotowania spalin występowało w zakresie niższych prędkości gazu, niż miało to miejsce podczas ich odsiarczania. Można to tłumaczyć skłonnością wodorotlenku wapnia do tworzenia przy niskich prędkościach gazu aglomeratów, które – z uwagi na zmniejszenie powierzchni kontaktu sorbentu z gazem – obniżały skuteczność odsiarczania spalin. Zwiększenie prędkości spalin powodowało skuteczniejsze rozbijanie tych aglomeratów, przyczyniając się do poprawy warunków mieszania.

♦ Skuteczność odazotowania spalin zależała od stężenia dwutlenku siarki w modelowych spalinach, przy czym wraz ze wzrostem jego stężenia skuteczność ta spadała.

LITERATURA

1. G. J. KWANT: The floating gas-solid fluidized bed reactor. Ph.D. thesis, Twente University, Enschede 1994.
2. J. JUDA, S. CHRÓŚCIEL: Ochrona powietrza atmosferycznego. WNT, Warszawa 1974.
3. J. KRZYWAŃSKI, W. NOWAK: Technologie jednoczesnego odsiarczania oraz odazotowania spalin kotłowych. Gospodarka Paliwami i Energią, 1996, nr 9(508), ss. 8–14.
4. J. KUROPKA, M. A. GOSTOMCZYK: Możliwości intensyfikacji odazotowania spalin dla elektrociepłowni. Mat. „II Krajowa Konferencja Energetyczna”, Poznań–Kiekrz 1996, ss. 127–136.
5. M. A. GOSTOMCZYK, C. CIASNOCHA, J. JĘDRUSIK, W. STARNAWSKI: Doświadczenia eksploatacyjne z wdrażania technologii WAWO w EC Wrocław. Mat. 3 symp. „Ograniczanie emisji zanieczyszczeń do atmosfery – POL-EMIS '96”, PZITS, Szklarska Poręba 1996, ss. 79–84.
6. G. KUPRYSZEWSKI: Wstęp do chemii organicznej. PWN, Warszawa 1988.
7. M. TAKESHITA, H. SOUD: FGD performance and experience on coal-fired plants. Journal IEACR, 1993, Vol. 58, pp. 100–115.
8. W. NOWAK, Z. BIS, W. MUSKAŁA, J. ŁASKAWIEC, R. WALKOWIAK, W. KRZYWOSZYŃSKI: Suche odsiarczanie spalin na blokach 8, 9 i 10 w Elektrowni Turów. Mat. „II Krajowa Konferencja Energetyczna”, Poznań–Kiekrz 1996, ss. 143–150.
9. S. KASAOKA, E. SASAOKA, H. IWASAKI: Development of a catalytic process for the low temperature dry type, simultaneous removal of sulfur and nitrogen. International Chemical Engineering, 1994, Vol. 34, No. 3, pp. 431–434.
10. W. KORDYLEWSKI, M. KAŁUŻYŃSKI, Z. MODLIŃSKI: Katalityczne odsiarczanie spalin. Gospodarka Paliwami i Energią, 1993, nr 1, ss. 13–15.
11. J. G. TOHER, G. D. LANOIS, H. SAUER: High efficiency dry flue gas SO_x and combined SO_x/NO_x removal experience with the Lurgi circulating fluid bed dry scrubber – a new, economical retrofit option for U.S. utilities for acid rain remediation. Proc. "SO₂ Control Symposium", Washington 1991, pp. 1–17.

Dry-type Combined SO_x/NO_x Removal from Flue Gas by Passage through a Multi-Solid Fluidized Bed (MSFB) Reactor

The flue gas was passed through an MSFB reactor for simultaneous dry removal of SO_x and NO_x . The dense layer of the bed consisted of coarse urea grains, which acted as a source of ammonia (the activator of the denitrification process). The circulating layer was made of fine CuO particles and fine $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grains, acting as a catalyst and a sorbent, respectively. The efficiencies of removal were related to temperature, Ca/S

ratio, urea/ NO ratio, flue gas velocity, and SO_2 concentration in the flue gas stream. The highest efficiency of SO_x was achieved at 400 °C. When the Ca/S and urea/ NO ratios increased, so did the efficiencies of removal for sulfur dioxide and nitrogen oxides. NO_x removal efficiency reached its maximum at flue gas velocities lower than those for the maximum efficiency of SO_x removal.