

Usuwanie tlenków azotu z gazowych produktów spalania wodorowęglanem sodu

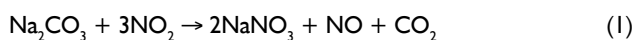
Barbara WALAWSKA – Instytut Nawozów Sztucznych, Oddział Chemii Nieorganicznej „IChN”, Gliwice; Arkadiusz SZYMANEK, Anna PAJDAK – Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Politechnika Częstochowska, Częstochowa; Marzena NOWAK – Instytut Nawozów Sztucznych, Oddział Chemii Nieorganicznej „IChN”, Gliwice

Prosimy cytować jako: CHEMIK 2013, 67, 10, 903–912

Wstęp

Węgiel kamienny stanowi blisko 60% zużycia surowców energetycznych w Polsce. Jak podaje GUS, w 2011 r. zużyto ponad 79 mln t, z czego największa część przypadła na elektrownie i elektrociepłownie [1]. Ze spalaniem węgla wiąże się emisja wielu szkodliwych dla zdrowia i środowiska substancji, których poziom jest regulowany przez Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. Tlenki azotu są, obok dwutlenku siarki, szczególnie niepożądanymi substancjami w gazach odlotowych, dlatego nacisk na obniżenie NO_x jest niemal równie duży, jak na obniżenie dwutlenku siarki. Dla obiektów o nominalnej mocy cieplnej źródła mniejszej niż 50 MW, opalanych węglem kamiennym, standardy emisyjne tlenków azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu wynoszą 400 mg/m^3 [2]. Tak niski poziom emisji wymaga zastosowania dodatkowej instalacji oczyszczającej. Rozwiązaniem jest sucha metoda oczyszczania gazów odlotowych, w której suchy sorbent wprowadzany jest do przewodu odprowadzającego spaliny. W przeciwieństwie do metody mokrej, metoda sucha nie wymaga dużych nakładów ani przebudowy instalacji i jest możliwa do wdrożenia zarówno w nowych jak i w istniejących obiektach. Substancją z powodzeniem wykorzystywaną w tej metodzie jest wodorowęglan sodu, który oprócz usuwania SO_2 , wykazuje zdolność usuwania innych zanieczyszczeń typu kwasowego, np. NO_x .

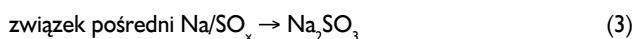
Już w latach 70. ub.w. interesowano się chemizmem reakcji wodorowęglanu sodu w fazie stałej z tlenkami azotu. Pierwsze badania reaktywności NaHCO_3 z NO_x opublikowane zostały przez Knight (1977) [3], który laboratoryjnie przebadał reaktywność zarówno węglanu jak i wodorowęglanu sodu z NO_x w gazach odlotowych. Utrzymywał, że ich reakcja z NO zachodzi tylko w obecności wolnego tlenu, w przeciwieństwie do NO_2 . Wykazał, że węglan sodu reaguje z NO_2 bez udziału tlenu, tworząc azotan (V) sodu:



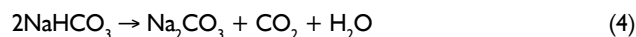
Reakcja ta została zweryfikowana przez Blanda [4], który oprócz reakcji wodorowęglanu sodu z NO_x bez udziału SO_2 , dopuszczał również inną drogę reakcji, tj. przyjął przebieg reakcji wodorowęglanu sodu z tlenkiem azotu (IV) w obecności SO_2 . Wg Blanda, w wyniku tej reakcji, w zależności od temperatury powstaje związek pośredni Na/SO_x . Poniżej 120°C, tj. w temperaturze poniżej rozkładu NaHCO_3 , reakcja biegnie wg schematu (2):



Powstały związek pośredni Na/SO_x może się tu przekształcać do produktu ostatecznego w postaci siarczanu (IV) sodu, zgodnie ze schematem (3):



W temp. powyżej 120°C następuje rozkład NaHCO_3 do węglanu sodu wg reakcji:



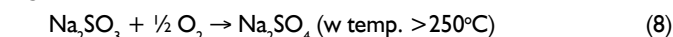
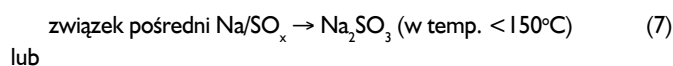
Powstały w tym zakresie temperatur węglan sodu reaguje, wg Blanda, z SO_2 tworząc związek pośredni Na/SO_x :



Związek pośredni Na/SO_x wytworzony w tym etapie, katalizuje heterogenicznie reakcję utleniania tlenku azotu (II) do tlenku azotu (IV):



Związek pośredni Na/SO_x może również ulec przekształceniu w siarczan (IV) sodu lub siarczan (VI) sodu, w zależności od temperatury:



Tlenek azotu (IV) powstały w wyniku reakcji (6) reaguje z węglanem sodu, zgodnie z reakcją (1) przyjętą przez Knighta.

Autorzy [3, 4] utrzymywali, że istnieje zależność tworzenia azotanu (V) sodu, uzyskanego w wyniku aktywacji termicznej wodorowęglanu sodu, od stopnia rozwinięcia powierzchni właściwej. Ilość powstałego azotanu (V) sodu utrzymywała tendencję wzrostową wraz z rozwinięciem powierzchni właściwej, a malała wraz ze wzrostem temperatury.

Badania w skali laboratoryjnej na stanowisku z cyrkulacyjną warstwą fluidalną, przeprowadzone przez Verlaeten i in. [5], wykazały skuteczność wodorowęglanu sodu w usuwaniu tlenków azotu na poziomie 60%, przy jednoczesnym usuwaniu SO_2 na poziomie 90%. Najskuteczniejsze usuwanie tlenków azotu zaobserwowano w zakresie temp. 127–160°C, powyżej którego usuwanie NO_x znacznie się obniża. Tak wysoka skuteczność związana jest rozkładem wodorowęglanu sodu do węglanu sodu, zgodnie z reakcją (4), który, wg wielu autorów [6–10], zachodzi w temp. 67–125°C, w zależności od ciśnienia cząstkowego CO_2 i H_2O . Powstały węglan sodu widocznie zmienia swoją mikrostrukturę na porowatą, a powierzchnia właściwa wzrasta z poniżej 1 m^2/g do nawet 7–10 m^2/g po rozkładzie.

Efektywność sorbentów sodowych w procesie usuwania NO_x z gazowych produktów spalania, podobnie jak przy w procesach suchego odsiarczania [11], można ocenić za pomocą jednego z kryteriów, tj. skuteczności usuwania NO_x w czasie, wyznaczonej jako:

$$\frac{\text{ilość NO}_x \text{ usuwania ze spalin}}{\text{ilość NO}_x \text{ wprowadzana ze spalinami}} \cdot 100\%$$

Na wartość tego kryterium wpływa szereg parametrów związanych zarówno z oczyszczanym gazem, jak i stosowanym sorbentem, takich jak: temperatura, w której zachodzi proces, czas kontaktu sorbentu z oczyszczanym gazem, stężenie NO_x w oczyszczanym gazie, średnica ziaren sorbentu sodowego, jego powierzchnia właściwa.

Dla podwyższenia zdolności sorpcyjnych sorbentu sodowego, przed wprowadzeniem go do przewodu gazowego, stosowana jest aktywacja mechaniczna (głównie mielenie) [12].

Zaprezentowane w artykule wyniki badań laboratoryjnych określają wpływ aktywacji mechanicznej wybranych sorbentów sodowych na efekt usuwania NO_x z gazów modelowych w zależności od temperatury prowadzenia procesu, która wynosiła 300°C i 850°C .

Część eksperymentalna

Materiały

Materiałami wykorzystanymi w badaniach był wodorowęglan sodu w postaci sody oczyszczonej klasy standard oraz półprodukt powstający w procesie wytwarzania węgla sodu metodą Solvay'a – bikarbonat surowy. Wodorowęglan sodu charakteryzował się 99,9% czystością i średnią średnicą ziarnem $126\ \mu\text{m}$, natomiast bikarbonat surowy zawierał 2,75% związków amonowych, głównie w postaci NH_4HCO_3 , a średnia średnica ziaren wynosiła $140\ \mu\text{m}$. Obecność związków amonowych w tym sorbencie powinna korzystnie wpłynąć na proces usuwania NO_x ze spalin.

Metody analityczne i aparatura

Badanie zdolności sorpcyjnych sorbentów sodowych w procesie usuwania tlenków azotu prowadzono w temp. 300 i 850°C , co w sposób przybliżony odpowiada temperaturze w drugim ciągu kotła na wylocie spalin w obiektach energetycznego spalania oraz temperaturze komory spalania w kotłach fluidalnych. Sorbenty sodowe przed badaniem sorpcji poddano aktywacji mechanicznej, polegającej na mieleniu na młynie udarowym. Bikarbonat surowy przed mieleniem był suszony w temp. 50 – 60°C , niepowodującej rozkładu wodorowęglanu sodu i ograniczającej również rozkład związków amonowych. Mielenie udarowe przeprowadzono na młynie typu 160 UPZ firmy Hosokawa-Alpine, gdzie proces mielenia polega na uderzeniach stalowych palców rozmieszczonych na tarczy i na wirującym rotorze. Próbkę po mikronizacji poddano kolejno analizie granulometrycznej na analizatorze laserowym Beckman Coulter LS 13320 z zastosowaniem mokrego modułu pomiarowego, zgodnie z wymaganiami normy ISO [13].

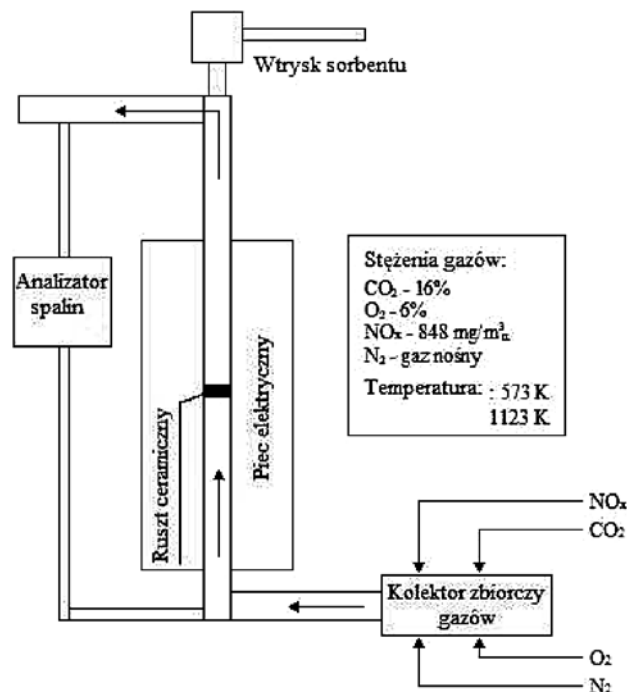
Aktywowane mechanicznie produkty sodowe oraz niemielona soda oczyszczona i bikarbonat surowy poddano następnie analizom powierzchni czynnej, z wykorzystaniem metody Brunauera, Emmeta, Tellera (BET). W celu usunięcia zanieczyszczeń, w tym wilgoci, z badanych sorbentów, odgazowano je w próżni przy użyciu helu. Pomiar powierzchni przeprowadzono na analizatorze powierzchni Gemini VII 2390 typu a, określającym objętość zaadsorbowanego gazu w temp. -196°C w przedziale ciśnień względnych $0,05$ – $0,3$.

Wartość powierzchni właściwej, którą stanowią powierzchnia ciała stałego i porów otwartych (m^2/g) umożliwiła klasyfikację materiału zgodnie z wytycznymi IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Parametr ten wyznaczony został przed i po aktywacji mechanicznej sorbentów oraz po ich rozkładzie termicznym w temp. 250°C .

Wpływ parametrów strukturalnych na zdolności sorpcyjne sorbentów względem NO_x zweryfikowano badaniami laboratoryjnymi na stanowisku do określania zdolności sorpcyjnej w gazach modelowych (Rys. 1).

Część główną stanowiska stanowił piec elektryczny i umieszczona wewnątrz rura kwarcowa, do której doprowadzano gaz modelowy w przepływie $1,2\ \text{m}^3/\text{h}$, zawierający tlenki azotu w stężeniu $848\ \text{mg}/\text{m}^3$ ($500\ \text{ppm}$), tlen (6%), dwutlenek węgla (16%) i azot jako gaz inertny. Badania polegały na aplikacji sorbentów w partiach po $6\ \text{g}$ w strumieniu gazu modelowego. Prowadzono je w dwóch zakresach temperatur w komorze reakcyjnej: 300°C i 850°C . Po wprowadzeniu partii sorbentu do strefy reakcyjnej, analizator rejestrował co sekundę stężenie NO_x w gazie wylotowym, które uśredniano potem do wartości

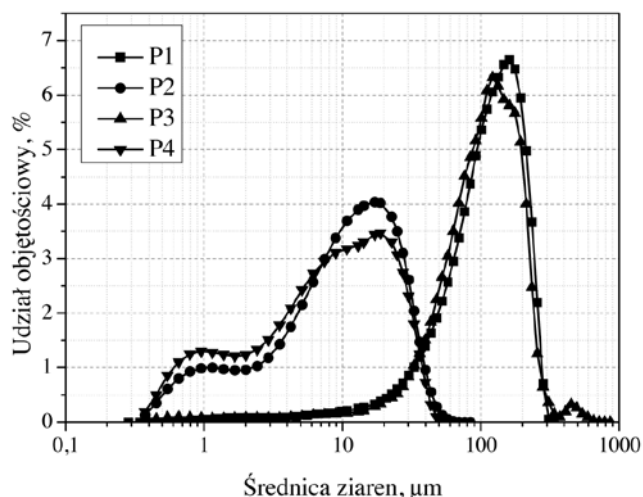
co 10 sekund. Przepływ tlenków azotu kontrolowany był za pomocą systemu regulacji w postaci reduktora sprzężonego z rotametrem oraz masowego regulatora przepływu. Przepływy pozostałych gazów kontrolowano i regulowano za pomocą reduktorów i rotometrów. Stężenia poszczególnych komponentów gazowych mierzono za pomocą analizatora spalin GASMET DX-400, wykorzystującego metodę FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy – Transformata Fouriera w podczerwieni).



Rys. 1. Stanowisko badawcze do określania zdolności sorpcyjnej w gazach modelowych

Wyniki badań

Zastosowane w badaniach sorbenty sodowe charakteryzowały się bardzo zbliżonym rozkładem ziarnowym (Rys. 2), co potwierdza wyznaczona średnia średnica ziarna i powierzchnia właściwa (Tab. 1).



Rys. 2. Rozkład ziarnowy próbek sody oczyszczonej i bikarbonatu surowego przed i po mieleniu

W wyniku zastosowania aktywacji mechanicznej, unimodalny rozkład granulometryczny mielonych sorbentów przesunął się w kierunku drobniejszych ziaren. Średnie ziarno mielonych sorbentów obniżyło się z $126\ \mu\text{m}$ do $13,2\ \mu\text{m}$ dla sody oczyszczonej i z $123,4\ \mu\text{m}$ do $11,5\ \mu\text{m}$ dla wysuszonego bikarbonatu surowego. Przeprowadzone analizy granulometryczne oraz pomiary po-

wierzchni właściwej BET, wykazały niewielką zależność pomiędzy wielkością ziaren a mierzoną powierzchnią właściwą materiału. Aktywacja mechaniczna nieznacznie wpłynęła na wzrost powierzchni. Znaczny wzrost powierzchni właściwej badanych sorbentów możliwy był do uzyskania przy zastosowaniu aktywacji termicznej, która wykorzystywana jest w przemysłowych procesach oczyszczania spalin sorbentami sodowymi. Właściwości strukturalne badanych sorbentów zaprezentowano w Tabelcy I.

Tabelca I

Właściwości strukturalne badanych sorbentów

Numer próbki	Materiał	Średnia średnica ziaren, μm	Powierzchnia właściwa, m^2/g	
			Bez aktywacji termicznej	Aktywacja termiczna w 300°C
P1	Soda oczyszczona niemieleniona	126,0	0,07	3,99
P2	Soda oczyszczona aktywowana udarowo	13,2	0,73	5,97
P3	Bikarbonat surowy niemieleny	123,4	0,34	5,87
P4	Bikarbonant surowy aktywowany udarowo	11,5	1,02	7,31

Wpływ aktywacji termicznej na powierzchnię właściwą sorbentów sodowych badano w temp. 300°C . Z przeprowadzonych badań własnych [14] i doniesień literaturowych [15] wynika, że powyżej tej temperatury następuje spiekanie i zasklepanie porów powstałych w wyniku rozkładu wodorowęglanu sodu, a w temp. powyżej 450°C – powrót do pierwotnej powierzchni właściwej. Zastosowanie aktywacji termicznej w temp. 300°C wpłynęło na wzrost powierzchni właściwej sorbentów (Tab. 1). Największe rozwinięcie powierzchni uzyskano dla bikarbonatu surowego poddanego aktywacji mechanicznej, którego powierzchnia właściwa wzrosła z $1,02 \text{ m}^2/\text{g}$ do $7,31 \text{ m}^2/\text{g}$.

Sorbenty, bez i po aktywacji mechanicznej, stosowano w badaniach skuteczności usuwania tlenków azotu z gazów modelowych, zgodnie z Tabelcą 2, stosując metodykę opisaną wcześniej.

Tabelca 2

Próbki sorbentów wykorzystane do badań

Numer próbki	Temperatura procesu	Materiał
P1	a	Soda oczyszczona niemieleniona
	b	
P2	a	Soda oczyszczona aktywowana udarowo
	b	
P3	a	Bikarbonat surowy niemieleny
	b	
P4	a	Bikarbonant surowy aktywowany udarowo
	b	

Po zaaplikowaniu próbki sorbentu w strumień gazu modelowego następował gwałtowny, krótkotrwały spadek stężenia NO_x , które wracało do poziomu wyjściowego po czasie od 200 do przeszło 600 s, w zależności od rodzaju zastosowanego sorbentu.

Do oceny efektywności usuwania tlenków azotu przez sorbenty sodowe wykorzystywano dwa kryteria, cząstkową skuteczność oraz

całkowitą sprawność procesu usuwania NO_x . Cząstkową skuteczność usuwania NO_x w danym przedziale czasu trwania eksperymentu wyznaczano wg równania:

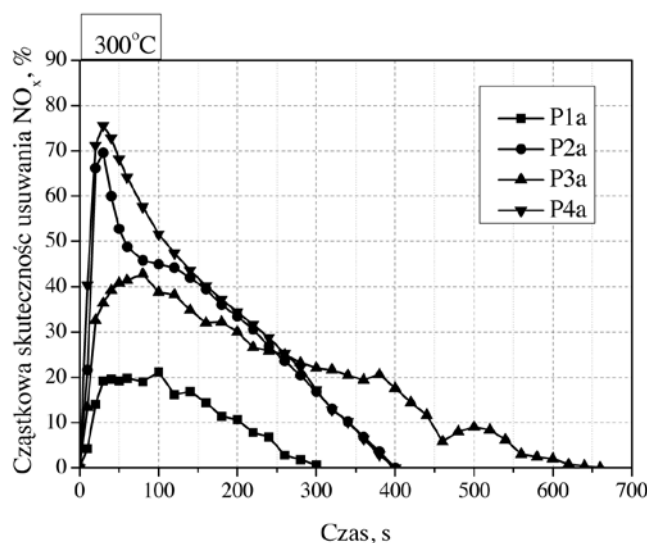
$$\varphi(t) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

C_0 – stężenie NO_x wlotowe, ppm NO_x

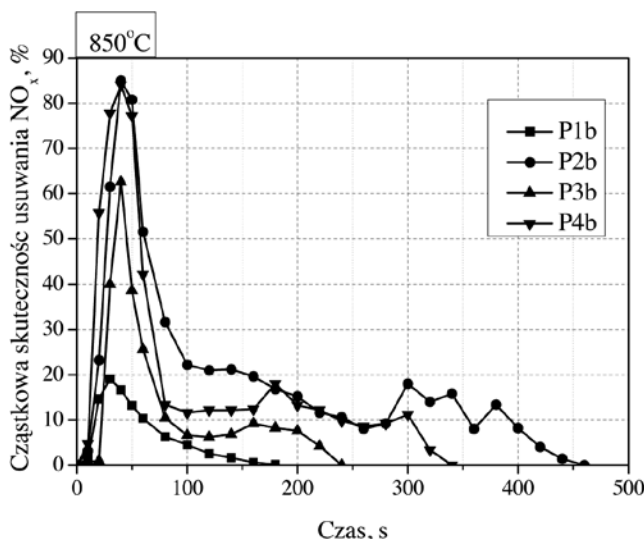
C_t – stężenie NO_x wylotowe po czasie t, ppm NO_x

W temp. procesu równej 300°C już w pierwszych sekundach trwania eksperymentu obserwowano efekt usuwania tlenków azotu, szczególnie w przypadku sorbentów po aktywacji mechanicznej (Rys. 3). Dla tych sorbentów uzyskano również najwyższą cząstkową sprawność usuwania NO_x , ok. 75% w przypadku bikarbonatu surowego oraz blisko 70% dla sody oczyszczonej. Dla sorbentów niemielenych efekt usuwania NO_x był dużo słabszy, blisko 43% dla niemielenego bikarbonatu surowego, a tylko ok. 21% podczas zastosowania niemielenionej sody oczyszczonej.



Rys. 3. Cząstkowa skuteczność usuwania NO_x w temp. 300°C

Lepszy efekt usunięcia NO_x dla sorbentów mielonych uzyskano prowadząc proces w temp. 850°C (Rys. 4). Analogicznie do badań w 300°C , najwyższą maksymalną cząstkową skuteczność usuwania NO_x osiągnięto dla mielonych sorbentów, która w 40 s trwania eksperymentu wynosiła 84–85%. Tu również niemielenone produkty sodowe uzyskały dużo niższą skuteczność w porównaniu z materiałami po mikronizacji.



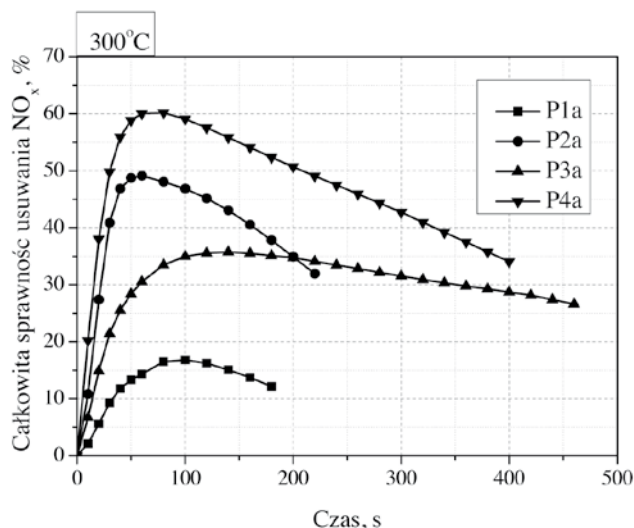
Rys. 4. Cząstkowa skuteczność usuwania NO_x w temp. 850°C

Uzyskane wyniki pomiaru stężenia NO_x posłużyły również do określenia całkowitej skuteczności usuwania NO_x z gazu modelowego, która definiowana była jako stosunek ilości moli NO_x usuwanych z gazu do ilości moli NO_x wprowadzanych, i wyznaczana z równania:

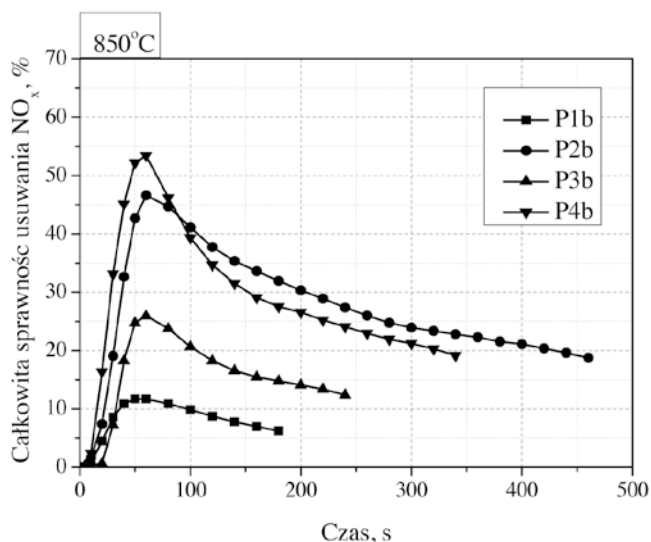
$$\varphi = \frac{\int_0^t (c_0 - c_t) dt}{c_0} \cdot 100\% \quad (10)$$

gdzie: t – czas reakcji, s

Całkowita sprawność usuwania NO_x , to suma cząstkowej skuteczności, określająca efekt sorpcji od początku do określonego czasu prowadzenia procesu. Dla sorpcji prowadzonej w temp. 300°C najwyższą całkowitą skuteczność usuwania tlenków azotu uzyskały sorbenty po mikronizacji, przy czym najlepszy wynik zaobserwowano dla bikarbonatu surowego, którego maksymalna wartość wyniosła przeszło 60%, a dla sody oczyszczonej ok. 49% (Rys. 5). Mielone sorbenty również reagowały szybciej od sorbentów niemielonych, co może być wynikiem lepszego kontaktu mniejszych ziaren z NO_x w strumieniu gazu modelowego. Po uzyskaniu maksymalnych wartości, ich skuteczność usuwania NO_x szybko jednak malała, co prawdopodobnie może wynikać z częściowego porywania drobno zmielonego materiału przez strumień gazu. Dla sorbentów bez aktywacji mechanicznej, najwyższą skuteczność usuwania NO_x uzyskano dopiero po 100–140 s i była ona dużo niższa. Dla bikarbonatu surowego wynosiła blisko 36%, a dla sody oczyszczonej tylko 17%.



Rys. 5. Całkowita sprawność usuwania NO_x w temp. 300°C



Rys. 6. Całkowita sprawność usuwania NO_x w temp. 850°C

W temp. 850°C całkowita skuteczność usuwania NO_x dla wszystkich sorbentów była niższa od wartości uzyskanych w 300°C (Rys. 6). Wynika to z mniejszej dynamiki procesu; ziarna reagowały z lekkim opóźnieniem, dlatego uzyskały mniejszy przyrost skuteczności. Maksymalne skuteczności zostały osiągnięte po ok. 60 s i najwyższą wartość zaobserwowano dla sorbentów po mieleniu i wyniosła ona od 53% dla bikarbonatu surowego do 47% dla sody oczyszczonej. Sorbenty bez mielenia wykazały dużo niższe wartości, rzędu 12–26%.

W Tabelicy 3 zestawiono wyliczone wartości omawianych kryteriów, wyznaczonych dla całkowitych czasów przebiegu procesu sorpcji wraz z parametrami mogącymi mieć wpływ na te wartości dla wszystkich badanych sorbentów.

Tabelica 3

Zestawienie wyników badań sorpcji NO_x

Material	Numer próbki	Temperatura, $^\circ\text{C}$	Czas reakcji, s	Maksymalna skuteczność usuwania NO_x , %	Całkowita sprawność usuwania NO_x , %
Soda oczyszczona niemielona	P1a	300	310	21,2	11,8
	P1b	850	180	21,6	6,2
Soda oczyszczona aktywowana udarowo	P2a	300	400	69,6	31,9
	P2b	850	460	85,0	18,8
Bikarbonat surowy niemielony	P3a	300	650	42,8	20,1
	P3b	850	240	62,6	12,4
Bikarbonat surowy aktywowany udarowo	P4a	300	400	75,6	34,0
	P4b	850	340	84,0	19,1

Podane wyniki sugerują, że mielone sorbenty sodowe, zarówno w temp. 300°C jak i 850°C , wykazują wyższą zdolność usuwania tlenków azotu od sorbentów niepoddawanych aktywacji mechanicznej. Oprócz uziarnienia, również temperatura jest czynnikiem mającym wpływ na sprawność procesu. Wraz ze wzrostem temperatury, zwiększyła się maksymalna skuteczność usuwania NO_x przez sorbenty; tylko niemielona soda oczyszczona nie wykazała takich tendencji. Dużo lepszym sorbentem w usuwaniu NO_x , w porównaniu do sody oczyszczonej, okazał się wysuszony bikarbonat surowy, zarówno przed jak i po mikronizacji.

Całkowita skuteczność usuwania tlenków azotu związana jest z czasem działania sorbentu, który mierzony był od momentu wprowadzenia próbki w strumień gazu modelowego do powrotu mierzonego stężenia NO_x do wartości początkowej. Uzyskane wyniki dla wszystkich sorbentów wskazują na gwałtowną, lecz krótkotrwałą, reaktywność względem NO_x . Lepsze i bardziej dynamiczne efekty obserwowano w przypadku sorbentów po aktywacji mechanicznej, reakcja następowała tu już po ok. 60 s. Prowadząc sorpcję w temp. 300°C uzyskiwano w większości przypadków nieco dłuższe czasy reakcji sorbentów, nawet do 650 s, które spowodowane były wolniejszym powrotem badanego gazu do stężenia początkowego. Podwyższenie temperatury procesu do 850°C znacznie skróciło czas sorpcji.

Najwyższą maksymalną skuteczność, oraz całkowitą sprawność usuwania NO_x , zaobserwowano dla mielonego bikarbonatu surowego, a najkrótsze czasy działania oraz najstabszą reaktywność przy użyciu sody oczyszczonej niemielonej, dla której całkowita skuteczność usuwania tlenków azotu była najniższa ze wszystkich badanych sorbentów sodowych.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania usuwania tlenków azotu z gazów modelowych sorbentami sodowymi wskazują na ich krótkotrwałe działanie, niezależnie od rodzaju ani zastosowanej temperatury sorpcji. Czas sorpcji, tj. czas po którym od zaaplikowania sorbentu stężenie NO_x w gazie wylotowym wracało do poziomu pierwotnego, dla badanych sorbentów mieścił się w przedziale 240–650 s. Największy spadek stężenia tlenków azotu pojawiał się po ok. 30–50 s i był, w przeciwieństwie do osiągniętego poziomu usunięcia NO_x , niezależny od rodzaju sorbentu ani temperatury procesu. Najwyższy poziom usunięcia NO_x (84–85%) uzyskiwano przy zastosowaniu sorbentów po aktywacji mechanicznej, tj. sody oczyszczonej i bikarbonatu surowego, w temp. sorpcji 850°C. Dla tych sorbentów, po gwałtownym spadku, następował szybki wzrost stężenia NO_x . Nieco gorszy efekt otrzymano dla temp. 300°C, gdzie stosując te same sorbenty, osiągnięto poziom 70% i 75%, jednak w tej temperaturze widoczny jest dłuższy czas działania sorbentów. Najgorszy rezultat otrzymano przy zastosowaniu sody oczyszczonej bez aktywacji mechanicznej, zarówno w 300°C jak i 850°C, gdzie osiągnięty maksymalny poziom usunięcia NO_x , to tylko ok. 21%.

Otrzymane rezultaty badań wskazują, że wysoka zdolność usuwania tlenków azotu przez sorbenty sodowe wynika głównie z zastosowanej aktywacji mechanicznej. Przy wykorzystaniu sorbentów bez aktywacji mechanicznej nie osiągnęto tak wysokiego poziomu usunięcia tlenków azotu. Forma, w jakiej występuje zastosowany wodorowęglan sodu, tj. sody oczyszczonej czy bikarbonatu surowego, ma znacznie mniejszy wpływ na przebieg procesu.

Praca wykonana była w ramach projektu rozwojowego nr NR05000910 „Modyfikowany wodorowęglan sodu w procesach suchego oczyszczania gazów odlotowych z różnego rodzaju instalacji przemysłowych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego.

Literatura

- Główny Urząd Statystyczny: *Zużycie paliw i nośników energii w 2011 r.* Warszawa, 2012, ISSN: 1733–6503.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji. *Dziennik Ustaw* Nr 95, 5619, poz. 558.
- Knight J.H.: *The Use of Nahcolite for Removal of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides from Flue Gas.* The Superior Oil Company Report, Oil Shale Department, 1977.
- Bland V.V.: *Evaluation of Dry Sodium Sorbent Utilization in Combustion Gas SO_x/NO_x Reduction.* EPRI GS-6850. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, May 1990.
- Verlaeten J., DeSoete G.G., Ninane L., Blondel J.M.: *Combined SO₂/NO_x Abatement By Sodium Bicarbonate Dry Injection.* EPA/EPRI SO₂ Control Symposium, Washington D.C., Dec. 1991.
- Barrall E.M., Rogers L.B.: *Differential Thermal Analysis of the Decomposition of Sodium Bicarbonate and its Simple Double Salts.* J. Inorg. Nucl. Chem. 1966, 28, 41–51.
- Subramanian K.S., Radha Krishnan T.P., Sundram A.K.: *Thermal Decomposition Kinetics of Sodium Bicarbonate by Differential Thermal Analysis.* J. Thermal Analysis 1972, 4, 89–93.
- Templeton C.C.: *Pressure-Temperature Relationship for Decomposition of Sodium Bicarbonate from 200 to 600°F.* Journal of Chemical and Engineering Data 1978, 23, 1, 7–11.
- Keener T.C., Frazier G.C., Davis W.T.: *Thermal Decomposition of Sodium Bicarbonate.* Chem. Engng. Commun. 1985, 33, 93–105.
- Hu W., Smith J.M., Dogu T., Dogu G.: *Kinetics of Sodium Bicarbonate Decomposition.* A.I.Ch.E. Journal 1986, 32, 1229–1230.
- US7909272, “Milling process”, 2011.
- Kilgallon P.J., Simms N.J., Oakey J.E.: Effectiveness of sodium bicarbonate for acid gas removal from waste incinerator flue gas. CWRM 2007 (oddzielny załącznik CIWM), 8, part 2.
- ISO/DIN13320-1. Particle size analysis. Laser scattering methods. Part 1, General principles.
- Walawska B., Szymanek A., Pajdak A., Nowak M.: Właściwości sorpcyjne wodorowęglanu sodu. *Chemik* 2012, 66, 11, 1169–1176.
- Keener T.C., Davis W.T.: Study of the Reaction of SO₂ with NaHCO₃ and Na₂CO₃. *Journal of the Air Pollution Control Association* 1984, 34:6, 651–654.

Dr inż. Barbara WALAWSKA jest absolwentką Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Śląskiej (1974). Obecnie jest adiunktem w Oddziale Chemii Nieorganicznej „IChN” w Gliwicach Instytutu Nawozów Sztucznych. Zainteresowania: technologia nieorganiczna, ochrona środowiska.

e-mail: Barbara.Walawska@ichn.gliwice.pl, tel. 32 231 30 51–54.

Prof. nzw. dr hab. inż. Arkadiusz SZYMANEK jest absolwentem Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Częstochowskiej (1995). Doktorat w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej (2000). Habilitacja na Energeticko Strateżniczo-Fakulta, Zilinska Universita (2009). Profesor nadzwyczajny na Politechnice Częstochowskiej (2010). Obecnie jest profesorem w Instytucie Zaawansowanych Technologii Energetycznych Wydziału Inżynierii Środowiska i Biotechnologii Politechniki Częstochowskiej. Kilukrotnie wyróżniany nagrodą Rektora Politechniki Częstochowskiej. Jest autorem i współautorem 2 monografii, dwóch skryptów pomocy dydaktycznych, ponad 90-ciu oryginalnych i przeglądowych prac naukowych, publikacji prezentowanych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Zainteresowania naukowe: energetyka.

e-mail: aszymanek@is.pcz.czest.pl, tel. 34 325 09 33.

Mgr inż. Anna PAJDAK jest absolwentką Wydziału Inżynierii i Ochrony Środowiska Politechniki Częstochowskiej (2004). Doktorantka w Instytucie Zaawansowanych Technologii Energetycznych na Wydziale Inżynierii Środowiska i Biotchnologii tej uczelni. Zainteresowania: inżynieria chemiczna.

e-mail: apajdak@fluid.is.pcz.pl

Mgr inż. Marzena NOWAK jest absolwentką Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej (2009). Obecnie jest technologiem w Oddziale Chemii Nieorganicznej „IChN” w Gliwicach Instytutu Nawozów Sztucznych. Zainteresowania: technologia nieorganiczna,

e-mail: marzena.nowak@ichn.gliwice.pl