

ANALIZA SKUTECZNOŚCI RÓŻNYCH REAGENTÓW W PROCESIE USUWANIA HCL ZE SPALIN W SPALARNI ODPADÓW MEDYCZNYCH METODĄ SUCHĄ

Grzegorz WIELGOSIŃSKI, Alicja ZAWADZKA
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka
ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź
e-mail: wielgos@wipos.p.lodz.pl

STRESZCZENIE

Systemy oczyszczania spalin w instalacjach termicznego przekształcania odpadów ewoluowały na przestrzeni ostatnich 50 lat. Na początku nowego tysiąclecia podjęto działania zmierzające do uproszczenia i tym samym potanienia kosztów budowy systemów oczyszczania spalin dla spalarni odpadów. Postęp, jaki dokonał się we włókiennictwie, pozwolił na szerokie wprowadzenie filtrów tkaninowych pracujących w wysokich temperaturach (140-200°C). Zastosowanie filtrów tkaninowych dało równocześnie możliwość wykorzystania metody suchej usuwania gazów kwaśnych, gdyż zasadnicza część reakcji chemicznych przebiegała na powierzchni filtracyjnej. Obecnie suchy system oczyszczania spalin stał się powszechnie stosowanym w typowych instalacjach oczyszczania spalin z instalacji termicznego przekształcania odpadów. W artykule przedstawiono wyniki badań procesu usuwania chlorowodoru ze strumienia spalin w typowej spalarni odpadów medycznych, wyposażonej w suchy system oczyszczania spalin. Do badań wykorzystano dwa rodzaje reagentów wapniowych (Sorbacal SP oraz Sorbacal SPS firmy Lhoist) oraz reagent sodowy (wodorowęglan sodowy – Neutrec firmy Solvay). Porównano skuteczności usuwania HCl ze strumienia spalin przy podobnych parametrach prowadzenia procesu, a tym samym podobnych parametrach spalin, ale przy różnych szybkościach dozowania reagenta.

1. Wstęp

Termiczne przekształcanie, w tym spalanie, jako metoda unieszkodliwiania zakaźnych odpadów medycznych znane jest od stuleci, a w chwili obecnej jest jedyną metodą, którą dopuszcza ustawa o odpadach. Problem doboru wielkości instalacji do zidentyfikowanych potrzeb został szczegółowo omówiony wcześniej. Wiadomo więc, jak powinno dobierać się wielkość spalarni. Do rozstrzygnięcia pozostaje problem rodzaju technologii oraz wybór odpowiednich rozwiązań w zakresie oczyszczania gazów odlotowych. Dla potrzeb termicznego przekształcania odpadów medycznych buduje się zazwyczaj spalarnie komorowe (dwukomorowe) ze stopniowanym spalaniem, przy różnym nadmiarze (i niedomiarze) czynnika utleniającego, jakim jest powietrze. Zapewniają one zazwyczaj dobre warunki utleniania materii organicznej zawartej w odpadach i pozwalają na w miarę stabilną pracę. Oprócz spalarni komorowych w ostatnich latach do spalania odpadów medycznych bywają również wykorzystywane piece obrotowe, pozwalające na bezpieczną, stabilną i ciągłą pracę instalacji. Oba rozwiązania posiadają swoje wady i zalety, choć wydaje się, że ze względu na występujące mieszanie spalanych odpadów w piecu obrotowym to rozwiązanie jest lepsze od układu komorowego, pozbawionego najczęściej możliwości mieszania. Pozostaje więc problem wyboru systemu oczyszczania spalin.

Z punktu widzenia ochrony środowiska najistotniejszym elementem jest układ oczyszczania spalin oraz powiązany z nim system oczyszczania i regeneracji absorbentów.

System oczyszczania gazów spalinowych w nowoczesnych spalarniach odpadów musi być bardzo wydajny, gdyż wymagany stopień usunięcia zanieczyszczeń niejednokrotnie jest bliski 99,99 %.

Analizując powstające podczas procesu termicznego przekształcania odpadów (przede wszystkim procesu spalania) substancje zanieczyszczające obecne w spalinach należy stwierdzić, że w celu sprostania aktualnym wymogom prawnym w zakresie czystości spalin (rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, stanowiącym implementację zapisów dyrektywy 2000/76/EC [1]) konieczne jest zastosowanie wielostopniowego systemu oczyszczania spalin, który zawierałby następujące elementy:

- odpylanie,
- usuwanie gazów kwaśnych (SO_2 , HCl i HF),
- usuwanie tlenków azotu,
- usuwanie metali ciężkich,
- usuwanie związków organicznych – produktów niepełnego spalania.

Metody ograniczania emisji zanieczyszczeń z procesów technologicznych można generalnie podzielić na dwie grupy – metody pierwotne i metody wtórne. Metody pierwotne to wspomniana już ingerencja w proces technologiczny i stworzenie takich warunków jego przebiegu, by ilość powstających zanieczyszczeń była możliwie najmniejsza. Natomiast metody wtórne – to zastosowanie konkretnych urządzeń i technologii w celu ograniczenia emisji zanieczyszczeń [2].

Doświadczenia eksploatacji wielu spalarni odpadów wskazują jednoznacznie, że w odniesieniu do małych spalarni odpadów, w tym spalarni odpadów medycznych, najlepsze efekty daje zastosowanie następującego systemu oczyszczania spalin: spaliny o temperaturze ponad $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ opuszczające komorę dopalania kierowane są do wymiennika ciepła, gdzie ulegają schłodzeniu do temperatury $250\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$ i dalej kierowane są do schładzacza natryskowego (tzw. „quench”), w którym ulegają schłodzeniu do temperatury $220\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$, jednocześnie ulegając nawilżeniu. Gazy kwaśne ze spalin usuwane są za pomocą metody suchej, polegającej na wtrysku suchego reagenta (np. wodorotlenku lub tlenku wapnia) do kanału spalin. Niekiedy jako reagenta używa się mieszanki związków wapnia z węglem aktywnym, zapewniając jednocześnie adsorpcje niektórych metali ciężkich (np. rtęci) oraz związków organicznych – produktów niepełnego spalania, w tym dioksyn i furanów. Obecność wilgoci w spalinach poprawia znacznie przebieg procesu usuwania gazów kwaśnych. Dalej kierowane są one do filtra tkaninowego, w którym zostaje oddzielony pył oraz produkty reakcji usuwania gazów kwaśnych. Zastosowanie filtra tkaninowego powoduje, że gazy spalinowe mają dłuższy kontakt z reagentem na powierzchni filtracyjnej. W przypadku małych spalarni odpadów, z przyczyn techniczno-konstrukcyjnych najczęściej nie ma możliwości wykorzystania metody niekatalitycznej redukcji tlenków azotu. Stąd też ostatnim elementem systemu oczyszczania spalin powinien być reaktor katalityczny (SCR) z katalizatorem wanadowo-wolframowym, na którym następuje skuteczna redukcja emisji tlenków azotu oraz odchlorowanie i utlenienie dioksyn i furanów, a także rozkład innych produktów niecałkowitego spalania [3].

Chlorowódor oraz chlorki były nieco pomijane w tych rozważaniach, najpewniej z uwagi na mniejsze ich stężenia w spalinach pochodzących z energetycznego spalania paliw. Należy jednak pamiętać, że chlorowódor jest gazem kwaśnym i obok wspomnianych wcześniej SO_2 i NO_x jest odpowiedzialny za kwaśne deszcze występujące coraz częściej w przyrodzie. Ponadto HCl wykazuje silne właściwości korodujące, jest bardzo szkodliwy dla środowiska oraz wpływa niekorzystnie na zdrowie ludzi, dlatego w procesach spalania musi zostać usunięty z gazów spalinowych, zanim zostaną one oddane do atmosfery.

Na przestrzeni ostatnich lat w wielu zakładach przemysłowych zaczęto szukać sposobów na obniżenie emisji chlorowodoru do akceptowalnego poziomu tak, aby zapewnić zgodność z obowiązującym prawem.

Wśród instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych w chwili obecnej w Polsce dominują instalacje wyposażone w suchy system oczyszczania spalin [4], w którym najważniejszym problemem jest skuteczne usunięcie chlorowodoru, występującego w gazach nieoczyszczonych w stężeniach przekraczających 1000 mg/m^3 , do wymaganego przez prawo [1] poziomu poniżej 10 mg/m^3 w warunkach umownych (temperatura 273 K, ciśnienie 1013 hPa, spaliny suche, 11% tlenu). Usunięcie innych gazów kwaśnych, w tym przede wszystkim SO_2 , nie jest tak istotne, gdyż stężenie tego zanieczyszczenia w gazach nieczyszczonych nie przekracza $100\text{-}500 \text{ mg/m}^3$, przy wymaganym poziomie w gazach odlotowych wynoszącym maksimum 50 mg/m^3 w warunkach umownych.

Jako reagent w suchych systemach oczyszczania spalin stosowane są zazwyczaj związki wapnia, znane pod handlową nazwą Sorbacal[®] lub Sorbalit[®]. Alternatywą jest zastosowanie reagenta sodowego znanego pod handlową nazwa Neutrec[®].

2. Zastosowanie reagentów wapniowych

Chlorowodor i dwutlenek siarki są substancjami emitowanymi podczas procesów spalania zarówno paliw kopalnych jak i odpadów (komunalnych, przemysłowych, medycznych). Do kontroli ilości emitowanych związków (HCl , SO_2) stosuje się różne metody i urządzenia. W zakresie reagentów wapniowych pierwsze miejsce zajmuje tlenek wapnia CaO , charakteryzujący się najwyższą reaktywnością. W dalszej kolejności są to: wodorotlenek wapnia Ca(OH)_2 oraz węglan wapnia CaCO_3 , zwany wapniakiem. Maksimum wydajności usuwania HCl czy SO_2 przypada dla temperatury z zakresu $140\text{-}150^\circ\text{C}$. Istotną wadą reagentów wapniowych jest znaczący spadek skuteczności wiązania gazów kwaśnych w zakresie temperatur $160\text{-}240^\circ\text{C}$. Skuteczność usuwania tych zanieczyszczeń zależy również w sposób istotny od względnej wilgotności oczyszczanych gazów. Preparowany tlenek wapnia pod nazwą handlową Sorbacal[®] stosowany jest powszechnie do usuwania zanieczyszczeń w postaci gazów kwaśnych w spalarniach odpadów medycznych, zarówno w Polsce jak i w innych krajach [5].

Proces suchego usuwania HCl i SO_2 z gazów odlotowych za pomocą reagentów wapniowych był w ostatnich 20 latach przedmiotem licznych badań [6-20].

3. Zastosowanie reagentów sodowych

Alternatywą dla reagentów (sorbentów) wapniowych w procesie usuwania HCl i SO_2 jest zastosowanie reagentów sodowych. W suchym systemie spalania odpadów niebezpiecznych wtrysk sorbentu na bazie sodu, jakim może być trona (Na_2CO_3) lub wodorowęglan sodu ($\text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3) następuje bezpośrednio do gorących spalin (temperatura powyżej 135°C). Jego duża powierzchnia właściwa pozwala na szybką reakcję gaz - ciało stałe pomiędzy kwaśnymi gazami (HCl , SO_2 , i SO_3) oraz Na_2CO_3 , tworząc Na_2SO_4 oraz NaCl , zebranych następnie przez elektrofiltr lub filtr tkaninowy [20]. Trona jest drobnoziarnistym proszkiem i może być wstrzyknięty bezpośrednio do kanału gazów spalinowych, natomiast wodorowęglan sodu, ze względu na właściwości higroskopijne należy zmielić bezpośrednio przed wstrzyknięciem. Zaletą reagentów sodowych jest wysoka skuteczność usuwania HCl i SO_2 w szerokim zakresie temperatur – aż do 300°C .

Wodorowęglan sodu od lat używany jest powszechnie do ograniczania emisji HCl i SO_2 z spalarni odpadów komunalnych w Niemczech. Po wstrzyknięciu do strumienia gorących

gazów spalinowych wodorowęglan sodu ulega gwałtownemu rozkładowi termicznemu. Duża porowatość i powierzchnia cząstek mają istotne znaczenie w odniesieniu do neutralizacji kwaśnych emisji, takich jak HCl. Wraz ze wzrostem porowatości cząstek gazy kwaśne chętniej reagują ze świeżą powierzchnią, aby osiągnąć maksymalne oczyszczenie [21].

Proces usuwania HCl z gazów za pomocą stałego reagenta sodowego w postaci zarówno węglanu czy wodorowęglanu był w ostatnich 20 latach również przedmiotem licznych badań [22-28] przy czym literatura nie przynosi jednoznacznego stanowiska w zakresie wyższości reagentów wapniowych nad sodowymi czy odwrotnie.

4. Badania skuteczności usuwania HCl w spalarni odpadów medycznych

Celem pracy było zbadanie wpływu różnych reagentów stałych na skuteczność usuwania chlorowodoru z gazów spalinowych spalarni odpadów medycznych. W badaniach wykorzystano dwa reagenty wapniowe – Sorbacal[®] SP oraz Sorbacal[®] SPS, produkowane przez firmę Lhoist Polska oraz reagent sodowy – Neutrec[®], dostarczony przez firmę Solvay.

Podstawowa różnica pomiędzy badanymi reagentami wapniowymi polega na zwiększonej skuteczności usuwania kwaśnych produktów spalania przez reagent typu SPS, która wynika z zastosowania dodatkowej mieszanki węglpochodnej Minsorb[®]. Ma ona za zadanie usuwanie metali ciężkich, dioksyn i furanów, a jej skuteczność porównywalna jest z najlepszym węglem aktywowanym. Według producenta, Sorbacal[®] SPS posiada znacznie większą skuteczność usuwania tlenków siarki [5]. Podstawowe właściwości obu reagentów wapniowych, w porównaniu ze zwykłym wapnem hydratyzowanym (czasami także stosowanym w procesach usuwania gazów kwaśnych), pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe różnice między zwykłym wapnem hydratyzowanym a reagentami Sorbacal SP oraz Sorbacal SPS

Reagent	Zawartość CaO/Ca(OH) 2	Powierzchnia właściwa	Objętość porów
	%	m ² /g	cm ³ /g
Standardowe wapno hydratyzowane	90-94	10-20	0,07-0,1
Sorbacal SP	> 94	> 40	0,2
Sorbacal SPS	> 93	> 40	0,2

Podstawowe właściwości obu reagentów sodowych – trony (Na₂CO₃) oraz wodorowęglanu sodu (NaHCO₃·2H₂O, NaHCO₃) pokazano w tabeli 2.

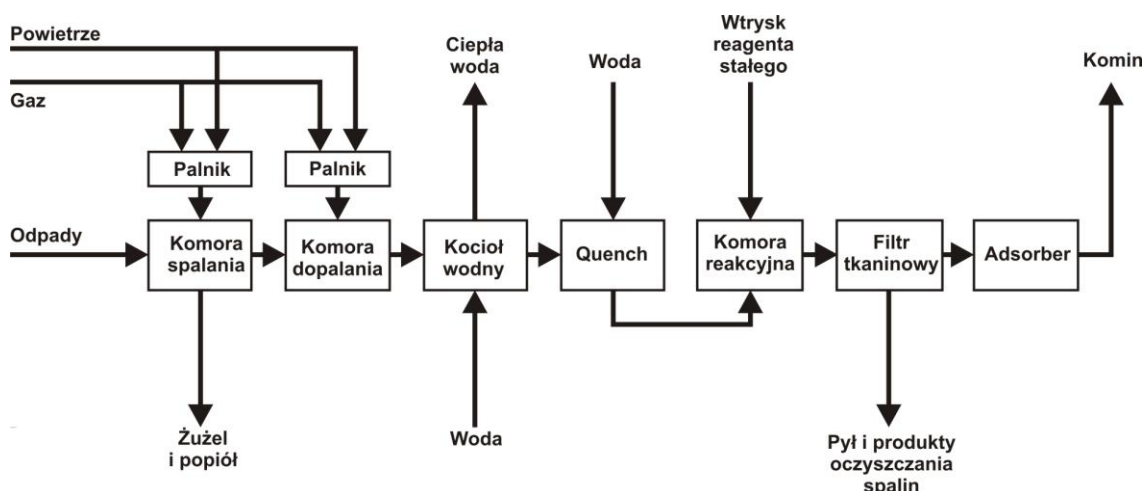
Tabela 2. Podstawowe właściwości reagentów sodowych

Parametr	Trona	Wodorowęglan sodu
Wzór związku	Na ₂ CO ₃ ·	NaHCO ₃ ·2H ₂ O, NaHCO ₃
Średnica (d ₅₀)	30 μm	110 μm
Gęstość nasypowa	784,9 kg/m ³	1089,3 kg/m ³
Stopień usunięcia HCl	> 97%	> 99%

Badania skuteczności usuwania HCl z gazów odlotowych prowadzono w funkcjonującej spalarni odpadów medycznych (instalacji termicznego przekształcania

odpadów) prowadzonej przez F.U.H. „EKO-TOP” Sp. z o. o. z Rzeszowa. Instalacja znajdowała się w Łodzi, przy ul. Mińskiej 2. Jest to spalarnia komorowa wybudowana w 1997 roku i gruntownie zmodernizowana w roku 2007 [29]. Wyposażona jest w suchy system oczyszczania spalin składający się ze schładzacza natryskowego („quench”), układu wtrysku stałego reagenta oraz filtra tkaninowego. Temperatura spalin przed wejściem do schładzacza wynosi ok. 220 °C, w miejscu wtrysku reagenta ok. 160 °C oraz 140-150 °C w filtrze tkaninowym. Wydajność instalacji wynosi ok. 100 kg odpadów medycznych/h, co daje strumień spalin wymagających oczyszczenia ok. 2335 m³/h (1507 m³_n/h). Średnie stężenie HCl na wylocie z kotła (na wlocie do systemu oczyszczania spalin) wynosi ok. 1000 mg/m³.

Uproszczony schemat instalacji przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych EKO-TOP w Łodzi

Pobór prób w spalarni odbywał się przy pomocy dwóch automatycznych aspiratorów zasysających gazy odlotowe równolegle w dwóch określonych punktach instalacji – bezpośrednio przed i za systemem oczyszczania. Poboru próbek dokonano zgodnie z normą PN-EN-1911-2:1998 [30]. Chlorowódz pochłaniany był w 100 ml wody dejonizowanej umieszczonej w płuczce o pojemności 250 ml przez cztery godziny z szybkością aspiracji równą ok. 60 dm³/h. Analizy zawartości chlorowodoru w płuczce dokonano zgodnie z normą PN-EN-1911-3:1998 [31], tj. poprzez miareczkowanie potencjometryczne chlorków azotanem srebra wobec elektrody platynowej. Wykrywalność tej metody wynosi w przybliżeniu od 0,5 mg/dm³ do 1 mg/dm³. Pozwalało to na oznaczanie zawartości chlorowodoru w gazach spalinowych z dokładnością lepszą niż 1 mg/m³ [28].

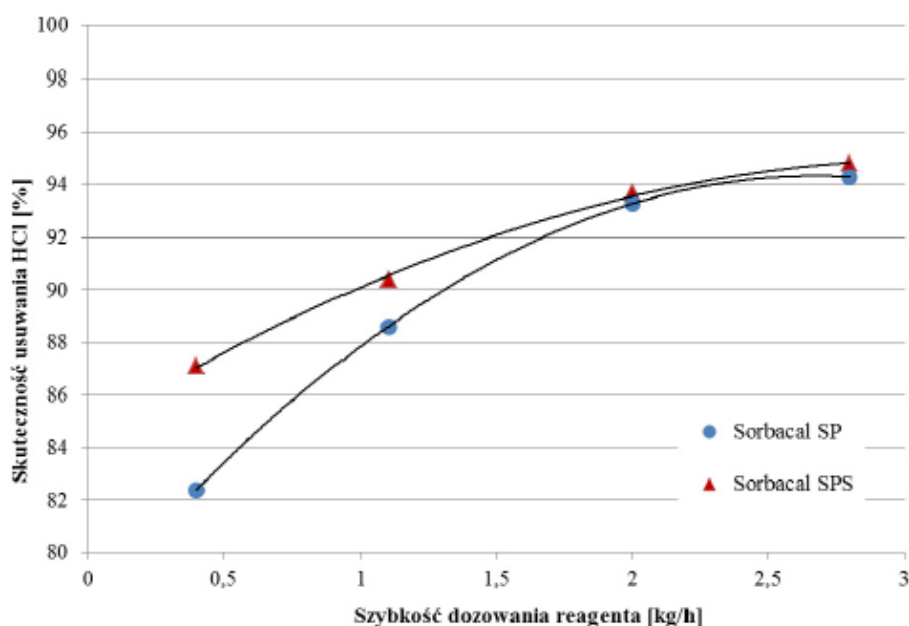
5. Wyniki i wnioski

Porównanie skuteczności usuwania HCl z gazów odlotowych ze spalarni odpadów medycznych przy różnych prędkościach dozowania reagenta pokazano na rys. 2 i 3. Na rys. 2 przedstawiono porównanie skuteczności dwóch reagentów wapniowych – Sorbacalu SP oraz Sorbacalu SPS. Na kolejnym rys. 3 pokazano porównanie skuteczności reagenta wapniowego – Sorbacalu SP oraz reagenta sodowego – Neutrecu.

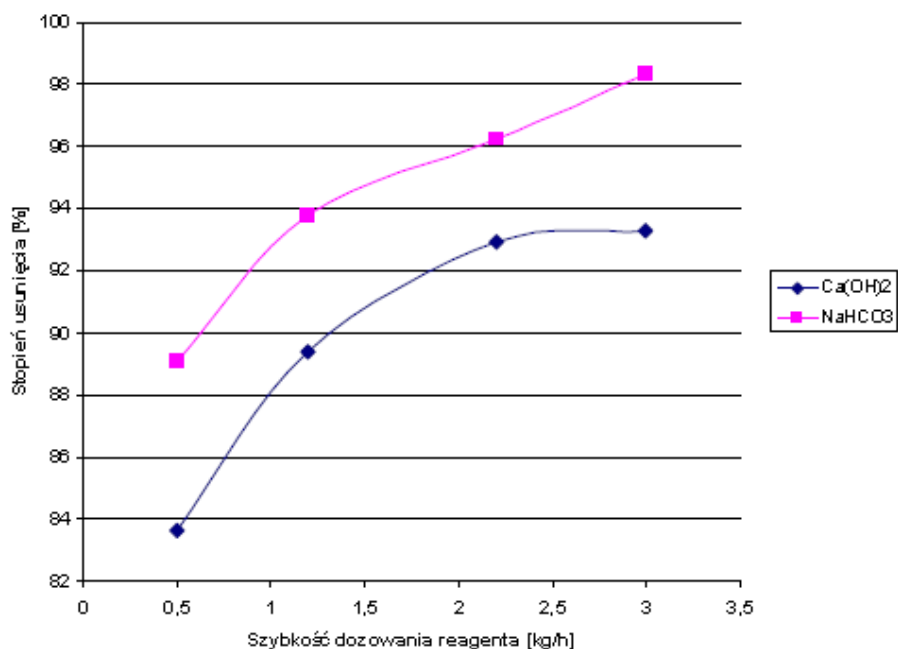
Zgodnie z oczekiwaniami wśród reagentów wapniowych skuteczniejszym okazał się Sorbacal SPS. Jest on jednak droższy od Sorbacalu SP, a niewielka różnica skuteczności

usuwania HCl, szczególnie przy wyższych szybkościach podawania reagenta, powoduje, że stosowanie droższego reagenta (Sorbacalu SPS) wydaje się niecelowe.

Porównanie skuteczności usuwania HCl przy wykorzystaniu reagenta wapniowego – Sorbacalu SP oraz reagenta sodowego – Neutrecu nie jest już tak oczywiste.



Rys. 2. Porównanie skuteczności usuwania HCl z gazów odlotowych ze spalarni odpadów medycznych przy różnych prędkościach dozowania reagenta dla dwóch reagentów wapniowych – Sorbacalu SP oraz Sorbacalu SPS



Rys. 3. Porównanie skuteczności usuwania HCl z gazów odlotowych ze spalarni odpadów medycznych przy różnych prędkościach dozowania reagenta wapniowego – Sorbacalu SP oraz reagenta sodowego – Neutrecu

Różnica 3-4 % utrzymuje się w całym zakresie prędkości dozowania reagentów, a 92-93 % skuteczności usuwania HCl można uzyskać przy dwukrotnie niższym zużyciu reagenta sodowego w stosunku do reagenta wapniowego. Biorąc pod uwagę znacznie wyższą cenę Nueutrecu, może być to mimo wszystko opłacalne. Jedynym istotnym problemem związanym z wykorzystaniem reagentów sodowych jest higroskopijność wodorowęglanu (i zbrylanie się zawilgoconego reagenta), a tym samym konieczność mielenia go bezpośrednio przed użyciem, oraz rozpuszczalność produktów oczyszczania spalin, co pociąga za sobą kłopoty ze składowaniem produktów poreakcyjnych. Tego problemu nie ma przy produktach poreakcyjnych z oczyszczania gazów z wykorzystaniem reagentów wapniowych, które są bardzo słabo rozpuszczalne w wodzie (np. w opadach atmosferycznych). Jak więc widać nie ma reagenta idealnego, każdy z nich ma swoje zalety jak i wady.

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/76/EC z dnia 4 grudnia 2000 roku w sprawie spalania odpadów. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 332/91, 353-374, 10.12.2000
2. Wielgosiński G.: Emissions from waste incineration plants – primary methods for emission reduction. Polityka Energetyczna, 2003, vol. 6, 131-140
3. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration. – European Commission, August 2006
4. Wielgosiński G.: Przegląd instalacji termicznego przekształcania odpadów. Praca wykonana na zlecenie Ministerstwa Środowiska, Warszawa, listopad 2009
5. SORBACAL® - Broszura informacyjna firmy Lhoist, 2008
6. Liu Z.S.: Advanced experimental analysis of the reaction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with HCl and SO_2 during the spray dry scrubbing process. Fuel, 2005, vol. 84, 5–11
7. Stein J., Kind M., Schlünder E-U.: The influence of HCl on SO_2 absorption in the spray dry scrubbing process. Chem. Eng. J., 2002, vol. 86, 17–23
8. Chyang C-S., Han Y-L., Zhong Z-C.: Study of HCl Absorption by CaO at High Temperature. Energ. Fuel., 2009, vol. 23, 3948–3953
9. Liu Z. S., Wey M. Y., Lin C. L.: Reaction characteristics of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, HCl and SO_2 at low temperature in a spray dryer integrated with a fabric filter. J. Hazard. Mater., 2002, vol. B95, 291–304
10. Bausach M., Krammer G., Cunill F.: Reaction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ with HCl in the presence of water vapour at low temperatures., Thermochim. Acta 2004, vol. 421, 217–223
11. Partanen J., Backman P., Backman R., Hupa M.: Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part I: the effects of temperature, gas atmosphere and absorbent quality., Fuel 2005, vol. 84, 1664–1673
12. Partanen J., Backman P., Backman R., Hupa M.: Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part II: importance of calcium hydroxychloride., Fuel 2005, vol. 84, 1674–1684
13. Partanen J., Backman P., Backman R., Hupa M.: Absorption of HCl by limestone in hot flue gases. Part III: simultaneous absorption with SO_2 ., Fuel 2005, vol. 84, 1685–1694
14. Gullett B. K., Jozewicz W., Stefanski L. A.: Reaction Kinetics of Ca-Based Sorbents with HCl., Ind. Eng. Chem. Res., 1992, vol. 31, 2437-2446
15. Fonseca A. M., Orfao J. J., Salcedo R. L.: Dry Scrubbing of Gaseous HCl with Solid Lime in a Cyclone Reactor at Low Temperatures., Ind. Eng. Chem. Res., 2001, vol. 40, 304-313

16. Fonseca A. M., Orfao J. J., Salcedo R. L.: Kinetic Modeling of the Reaction of HCl and Solid Lime at Low Temperatures., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1998, vol. 37, 4570-4576
17. Shemwell B., Levendis Y. A., Simons G. A.: Laboratory study on the high-temperature capture of HCl gas by dry-injection of calcium based sorbents., *Chemosphere* 2001, vol. 42, 758-796
18. Weinell C. E., Jensen P. I., Dam-Johansen K., Livbjerg H.: Hydrogen chloride reaction with lime and limestone: kinetics and sorption capacity., *Ind. Eng. Chem. Res.* 1992, vol. 31, 164-171
19. Doudi M., Walters J. K.: A thermogravimetric study of the reaction of hydrogen chloride gas with calcined limestone: determination of kinetics parameters., *Chem. Eng. J.*, 1991, vol. 47, 1-9
20. Doudi M., Walters J. K., The reaction of HCl gas with calcined commercial limestone particles: the effect of particle size., *Chem. Eng. J.*, 1991, vol. 47, 11-16
21. NEUTREC® - Flue gas cleaning and recycling of residues. - Broszura informacyjna firmy Solvay, 2009
22. Verdone N., De Filippis P.: Reaction kinetics of hydrogen chloride with sodium carbonate., *Chem. Eng. Sci.*, 2006, vol. 61, 7487-7496
23. Verdone N., De Filippis P.: Thermodynamic behavior of sodium and calcium based sorbents in the emission control of waste incinerators., *Chemosphere*, 2004, vol. 54, 975-985
24. Dou B. L., Gao J. S., Sha X. Z.: A study on the reaction kinetics of HCl removal from high-temperature coal gas., *Fuel Process. Technol.*, 2001, vol. 72, 23-33
25. Duo W., Kirkby N. F., Seville J. P. K., Kiel J. H. A., Bos A., Den Uil H.: Kinetics of HCl reactions with calcium and sodium sorbents for IGCC fuel gas cleaning. *Chem. Eng. Sci.*, 1996, vol. 51, 2541-2546
26. Fellows K. T., Pilat M. J.: Hydrochloric acid sorption by dry sodium bicarbonate for incinerator emissions control., *J. Air Waste Manage.*, 1990, vol. 40, 887-893
27. Mocek K., Lippert E., Erdos E.: Reactivity of solid sodium carbonate towards gaseous hydrogen chloride and sulfur dioxide. *Collect. Czech. Chem. C.*, 1983, vol. 48, 3500-3507
28. Kong Y., Davidson H.: Dry sorbent injection of Sodium sorbents for SO₂, HCl and mercury mitigation., *Proceedings of the 18th Annual North American Waste-to-Energy Conference. Floryda (USA)*, maj 2010
29. Wielgosiński G.: Raport o oddziaływaniu na środowisko inwestycji modernizacji instalacji termicznego przekształcania odpadów medycznych w Łodzi przy ul. Mińskiej 2. - Łódź, 2007
30. Polska Norma PN-EN-1911-2:1998 - Emisja ze źródeł stacjonarnych. Metoda manualna oznaczania HCl. Część 2: Absorpcja związków gazowych.
31. Polska Norma PN-EN 1911-3: 1998 - Emisja ze źródeł stacjonarnych. Manualna metoda oznaczania HCl. Część 3: Analiza roztworów absorpcyjnych i obliczanie wyników.

W pracy wykorzystano fragmenty prac dyplomowych magisterskich:

1. Adam Budziewski: Analiza wpływu wybranych parametrów na skuteczność usuwania chlorowodoru z gazów odlotowych spalarni odpadów medycznych.
2. Emilia Maciejewska: Analiza porównawcza skuteczności usuwania chlorowodoru z gazów odlotowych spalarni odpadów medycznych za pomocą różnych sorbentów.

wykonanych pod kierownictwem dr hab. inż. Grzegorza Wielgosińskiego w latach 2010 i 2011 na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej.