

Grzegorz WIELGOSIŃSKI

Politechnika Łódzka
Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska
Katedra Systemów Inżynierii Środowiska
ul. Wólczańska 175, 90-924 Łódź
tel. +48 42 631-37-95, fax. +48 42 636-81-33
e-mail: wielgos@wipos.p.lodz.pl

OCZYSZCZANIE GAZÓW ODLOTOWYCH Z PROCESU SPALANIA ODPADÓW.

Problem spalania odpadów, w szczególności spalania odpadów komunalnych stał się w ostatnim czasie jednym z częściej dyskutowanych w Polsce zagadnień. Jest też przedmiotem licznych doniesień prasowych, a równocześnie wokół niego narosło wiele mitów i niedomówień. Przeciętny czytelnik polskiej prasy został już wielokrotnie skutecznie przestraszony wizją nieuchronnej śmierci ze względu na ogromną emisję dioksyn ze spalarni. Z drugiej strony podawane są mu liczne cudowne recepty na rozwiązanie problemów gospodarki odpadami bez budowy spalarni i składowisk odpadów - równie piękne i wspaniałe jak nierealne. Spalanie odpadów budzi ogromne kontrowersje oraz emocje społeczne. Jest to jednak skuteczna i powszechnie stosowana w krajach Wspólnoty Europejskiej metoda pozbywania się odpadów. Pozwala ona na zmniejszenie ilości odpadów kierowanych na składowiska (o co najmniej 2/3) oraz na odzysk znacznej ilości energii.

W świetle danych literaturowych z krajów Unii Europejskiej [1] można uznać, że spalanie powoli staje się podstawową metodą usuwania odpadów komunalnych. W niektórych państwach Europy zachodniej wprowadzono ostatnio ustawodawstwo preferujące spalanie jako główny kierunek w gospodarce odpadami komunalnymi. Biorąc pod uwagę, wysoką uciążliwość dla środowiska składowisk odpadów a także kłopoty z pozyskiwaniem nowych terenów pod składowiska odpadów w niektórych krajach Unii Europejskiej (Niemczech, Holandii, Francji Danii) ustalono [2], że po roku 2002 nie wolno będzie deponować na składowiskach odpadów nie przetworzonych, tj. zawierających substancje organiczne w ilościach ponad 5 % lub posiadających wartość opałową wyższą niż 5000 kJ/kg. Informacje te ilustruje tabela nr 1.

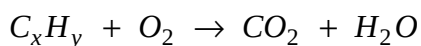
Tabela nr 1. Ograniczenia w składowaniu odpadów komunalnych na składowiskach w niektórych krajach Unii Europejskiej [2].

Kraj	Regulacje prawne
Austria	Zakaz składowania odpadów zawierających substancje organiczne w ilości powyżej 5 % od roku 2004
Szwajcaria	Zakaz składowania na składowiskach odpadów palnych (już obowiązuje)
Francja	Zakaz składowania na składowiskach odpadów palnych od roku 2002
Dania	Zakaz składowania na składowiskach odpadów palnych do roku 1998
Holandia	Zakaz składowania na składowiskach odpadów palnych, papierowych i kartonu (już obowiązuje). Zakaz składowania na składowiskach odpadów komunalnych nieprzetworzonych od roku 2000.
Niemcy	Zakaz składowania odpadów zawierających substancje organiczne w ilości powyżej 5 % od roku 2005

Widać więc, że spalanie, jako element systemu gospodarki odpadami komunalnymi w krajach Europy Zachodniej, przeżywa stały rozwój, staje się podstawowym ogniwem systemu gospodarki odpadami komunalnymi, a liczba spalarni systematycznie rośnie. Wydaje się więc, że wobec przyszłego członkostwa Polski w Unii Europejskiej i u nas ten kierunek w perspektywie kilkunastu lat stanie się dominującym.

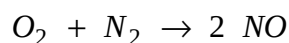
Spalarnie odpadów komunalnych swoją złą sławę zawdzięczają emisji do atmosfery wielu szkodliwych substancji, a przede wszystkim dioksyn. Trzeba przyznać, że jest to opinia częściowo uzasadniona. Rzeczywiście emisja substancji szkodliwych do atmosfery jest poważnym problemem spalarni odpadów. Warto więc zastanowić się, czy dziś technika potrafi uporać się z tym problemem.

Tylko niepoprawny optymista może mieć nadzieję, że w wyniku spalania substancji organicznych - (przede wszystkim różnego rodzaju węglowodorów) powstaje jedynie dwutlenek węgla (CO₂) i woda zgodnie z reakcją:



Powszechnie wiadomo, że proces spalania nie zawsze zachodzi w pełni i że dodatkowym produktem (niepełnego spalania) jest tlenek węgla (CO). Ponadto w wysokich temperaturach panujących w strefie spalania zachodzi w wyniku wielu reakcji przebiegających zgodnie

z różnymi mechanizmami (NO_x paliwowe, szybkie, termiczne) powstawanie tlenku azotu (NO) zgodnie z najprostszym ogólnym równaniem:



Tlenek azotu w obecności tlenu, w niższych temperaturach (poniżej 100°C) ulega konwersji przede wszystkim do dwutlenku azotu (NO_2) a także w pewnym stopniu do trójtlenku azotu (N_2O_3) i podtlenku azotu (N_2O). Przyjmuje się, że w spalinach mamy do czynienia

z mieszaniną tlenków azotu o ogólnym wzorze NO_x , przy czym dla celów obliczeniowych stężenia i emisje przelicza się na dwutlenek azotu (NO_2).

Odpady komunalne nie są materiałem jednorodnym. Zawierają w swojej masie spore ilości substancji niepalnych. Naturalną konsekwencją tego faktu jest emisja pyłu z procesów spalania. Tak więc z całą pewnością w spalinach ze spalarni odpadów komunalnych możemy spodziewać się obecności takich zanieczyszczeń jak:

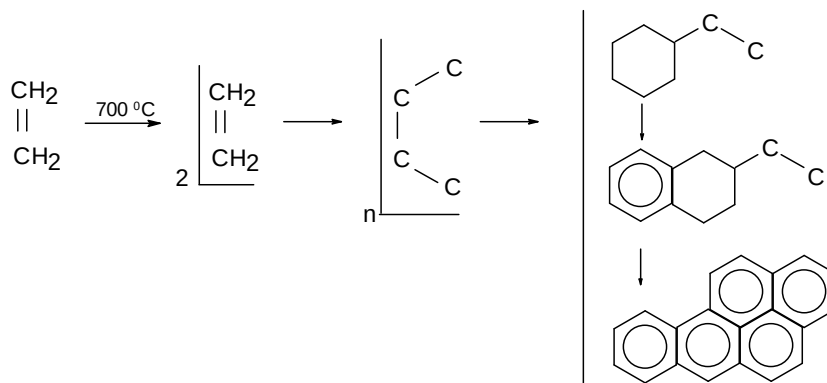
- dwutlenek węgla - CO_2
- tlenek węgla - CO
- tlenki azotu - NO_x
- pył

Identyczne zanieczyszczenia emitowane są ze wszystkich procesów spalania - również klasycznych paliw kopalnych (węgiel, drewno, olej opałowy itp.). Niestety nie są to wszystkie zanieczyszczenia. Jak już powiedziano odpady komunalne nie są materiałem jednorodnym. Wśród ich składników wiele zawiera w swojej budowie cząsteczkowej domieszki innych pierwiastków - siarki, chloru czy fluoru. Konsekwencją tego jest emisja kolejnych zanieczyszczeń o charakterze kwaśnym:

- dwutlenek siarki - SO_2 (lub rzadziej siarkowodór - H_2S)
- chlorowodór - HCl
- fluorowodór - HF

Obecność w odpadach substancji organicznych o charakterze nienasyconym czyli zawierających w cząsteczce podwójne lub potrójne wiązania węgiel-węgiel ($\text{C} = \text{C}$ lub $\text{C} \equiv \text{C}$) powoduje, że w temperaturze ok. $500 - 700^\circ\text{C}$ zachodzi reakcja syntezy

wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku nr 1.



Rysunek nr 1. Mechanizm powstawania wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych podczas spalania [4]

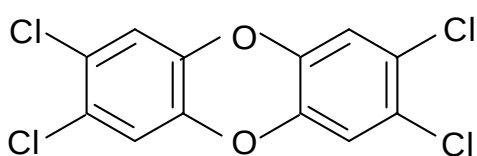
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) należą do jednych z najbardziej niebezpiecznych substancji w środowisku. Wiele z nich, jak np. benzo(a)piren, benzo(a)antracen, benzo(k)fluoranten, dibenzo(a,h)antracen, indeno(1,2,3-c,d)piren zaliczane są przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) do substancji o udowodnionym działaniu kancerogennym. Emitowane są do atmosfery praktycznie z wszystkich procesów spalania, nie tylko ze spalarni odpadów komunalnych.

Obecność w spalanych odpadach wielu elementów zawierających metale powoduje ich emisję do atmosfery z procesów spalania. Metale te zawarte są głównie z pyłu emitowanym z procesów spalania, zarówno w spalarniach odpadów komunalnych jak i elektrowniach, elektrociepłowniach i kotłowniach wszelkiego rodzaju spalających paliwa kopalne. Niektóre z metali, takie jak rtęć, arsen, selen mają zdolność do samodzielnej emisji w postaci par. Do najbardziej niebezpiecznych dla zdrowia ludności i środowiska zalicza się następujące metale:

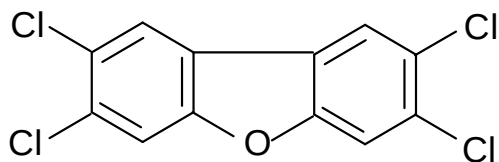
- Antymon - Sb,
- Arsen - As,
- Bor - B,
- Chrom - Cr,
- Cyna - Sn,
- Cynk - Zn,

- Kadm - Cd,
- Kobalt - Co,
- Mangan - Mn,
- Miedź - Cu,
- Nikiel - Ni,
- Ołów - Pb,
- Rtęć - Hg,
- Selen - Se,
- Srebro - Ag,
- Tal - Tl,
- Wanad - V,

Obecność w masie odpadów kierowanych do spalania substancji zawierających związki chloru (organiczne i nieorganiczne) jest źródłem powstawania kolejnych zanieczyszczeń, którym właśnie spalarnie zawdzięczają swoją złą „sławę”. Są to polichlorowane dibenzo-*p*-dio-ksyny i polichlorowane dibenzofurany. Nazwy te określają całą grupę związków obejmujących 75 polichlorowanych dibenzo-*p*-dioksyn i 135 polichlorowanych dibenzofuranów. Są to związki o znanej toksyczności [5], [6], z których za najniebezpieczniejsze uważa się związki przedstawione na rysunku nr 2.



2,3,7,8-tetrachloro-dibenzo-*p*-dioksyna



2,3,7,8-tetrachloro-dibenzofuran

*Rysunek nr 2. Najbardziej toksyczne kongenery grupy polichlorowanych dibenzo-*p*-dioksyn i polichlorowanych dibenzofuranów*

Źródłem powstawania polichlorowanych dibenzo-*p*-dioksyn i polichlorowanych dibenzofuranów są wszelkie procesy wysokotemperaturowe (powyżej 300 °C), w których obecne są cząsteczki chloru. I tak dioksyny i furany powstają we wszystkich procesach spalania (również węgla zawierającego często ok. 1 % chloru), w hutnictwie, komunikacji. Podstawowe źródła emisji dioksyn do atmosfery przedstawiono w tabeli nr 2.

Tabela nr 2. Podstawowe źródła emisji dioksyn w gospodarce Niemiec [7]

Lp.	Źródło emisji dioksyn	Rok 1989/90 g I-TEQ/rok	Rok 1994/95 g I-TEQ/rok	Prognoza 1999/2000 g I-TEQ/rok
1.	Spalanie odpadów	400	32	< 2 (osiągane obecnie)
2.	Hutnictwo i przeróbka metali	750	220	< 40
3.	Elektrownie i elektrociepłownie opalane węglem	5	3	< 3
4.	Spalanie w procesach przemysłowych	20	15	<10
5.	Paleniska domowe	20	15	<10
6.	Komunikacja, spalanie benzyn	10	4	<1
Udział spalania odpadów w całkowitej emisji dioksyn na terenie Niemiec		33 %	11 %	3 %

Obok wcześniej wymienionych substancji chemicznych emitowanych do atmosfery z procesów spalania należy jeszcze pamiętać o produktach niepełnego spalania substancji organicznych. Wydawałoby się, że w drastycznych warunkach spalania, w temperaturze około 1000 °C wszelkie substancje organiczne muszą ulec spaleni. Niestety nie jest to prawda. Wiele związków chemicznych, często palnych, nie ulega pełnej destrukcji podczas spalania odpadów. Przykładem mogą być niektóre pochodne benzenu trwałe w warunkach spalania, gdyż pierścień aromatyczny ulega rozerwaniu dopiero w temperaturze powyżej 1400 °C. Podobnie jest z prostymi aldehydami i ketonami (formaldehyd, aldehyd octowy, aceton), kwasami (kwas mrówkowy, kwas octowy) które często występują w spalinach, niezależnie od tego czy spalane są odpady czy też węgiel.. Według danych literaturowych [3] w spalinach ze spalarni odpadów stwierdzono obecność następujących substancji organicznych:

- węglowodory C₁ i C₂,
- akrylonitryl, acetonitryl
- benzen, toluen, etylobenzen,

- o-dichlorobenzen, p-dichlorobenzen, 1,2,4-trichlorobenzen, heksachlorobenzen,
- fenol, 2,4-dinitrofenol, 2,4-dichlorofenol, 2,4,5-trichlorofenol, pentachlorofenol,
- chlorometan, chloroform, chlorek metylenu, 1,1-dichloroetan, 1,2-dichloroetan, 1,1,1-trichloroetan, 1,1,2-trichloroetan, 1,1,2,2-tetrachloroetan, czterochlorek węgla,
- 1,1-dichloroetylen, trichloroetylen, tetrachloroetylen,
- formaldehyd, aldehyd octowy, aceton, metyloeteyloketon,
- chlorek winylu, ftalan dietylu, kwas mrówkowy, kwas octowy

Uświadamiając sobie teraz jak wiele substancji chemicznych, często o znanej, wysokiej toksyczności zawartych jest w spalinach opuszczających kocioł spalarni odpadów komunalnych nie może dziwić ogromny nacisk jaki został położony na oczyszczanie gazów spalinowych. Paradoksem tylko jest fakt, że większość tych zanieczyszczeń emitowanych jest również z procesu spalania węgla w dziesiątkach elektrowni, elektrociepłowni czy zwykłych kotłowni i pieców domowych.

Współczesne spalarnie odpadów komunalnych, szczególnie ostatnio zmodernizowane lub oddane do użytku w latach dziewięćdziesiątych, zostały zaprojektowane z myślą o spełnianiu najbardziej rygorystycznych norm dotyczących zawartości substancji toksycznych w spalinach. W tabeli nr 2 zestawiono wymogi stawiane spalinom ze współczesnych spalarni odpadów komunalnych. Analizując tę tabelę widać, że najostrzejsze przepisy dotyczące kontroli emisji zanieczyszczeń ze spalarni wprowadzono w Niemczech. Podobnie ostre są uregulowania holenderskie i szwajcarskie, zaś Dyrektywa Unii Europejskiej daleko odstaje od nich.

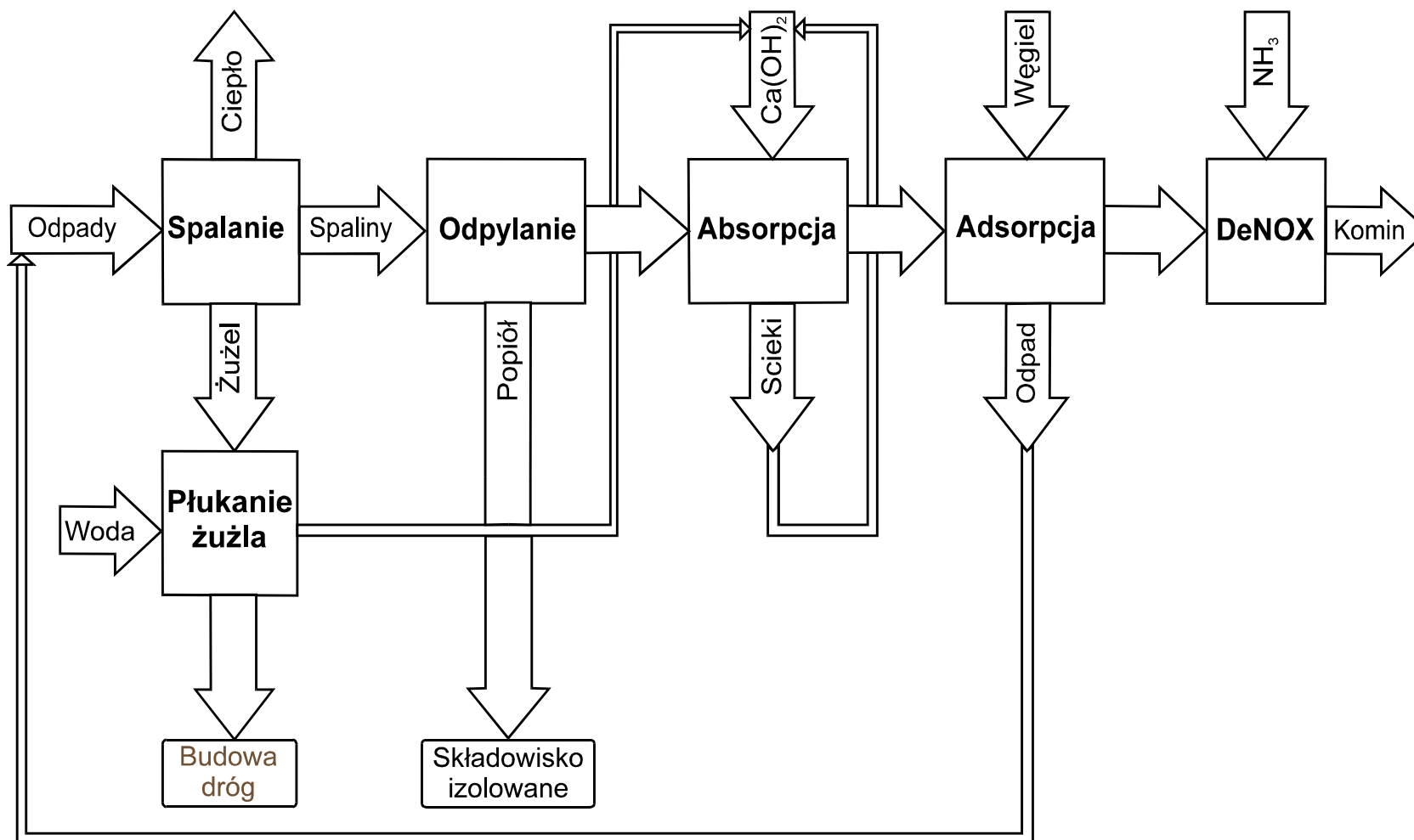
Z punktu widzenia budowy w każdej nowoczesnej spalarni odpadów komunalnych możemy wyróżnić następujące elementy [8]:

- zasobnik odpadów, zwany niekiedy „fosą”,
- kocioł do spalania odpadów z rusztem (najczęściej schodkowym lub walcowym) i system wytwarzania pary,
- układ oczyszczania spalin,
- system odprowadzania żużla z kotła,

- system oczyszczania i regeneracji absorbentów,
- system płukania i oczyszczania żuźla
- komin

Tabela nr 3. Dopuszczalne stężenia zanieczyszczeń w spalinach pochodzących ze spalania odpadów komunalnych (zestawienie na podstawie danych własnych za rok 1996 oraz [1] i [9]).

Lp	Rodzaj substancji	Dopuszczalne stężenie w gazach spalinowych [mg/m ³]									
		Dyrektywa 89/369/EEC (1989)	Austria LRG-K/LRV-K (1988/89)	Niemcy 17 BImSchV (1990)	Szwajcaria LRV (1992)	Holandia RV (1989)	Dania (1991)	Norwegia SFT	Belgia (1982)	Szwecja	Wlk. Bryt. (1992)
1.	Pył	30	15	10	10	5	30	10	100	20	30
2.	Dwutlenek siarki	300	50	50	50	40	300	300	63	300	61
3.	Dwutlenek azotu	-	100	200	80	70	-	-	-	400	350
4.	Tlenek węgla	100	50	-	50	50	100	100	1000	100	100
5.	Chlorowodór	50	10	10	20	10	50	100	100	100	30
6.	Fluorowodór	2	0.7	1	2	1	2	-	5	1	2
7.	Kadm - Cd	0.2	0.05	0.05	0.1	0.05	0.2	-	-	-	0.2
8.	Rtęć - Hg	0.2	0.05	0.05	0.1	0.05	0.2	0.1	-	0.03	0.2
9.	Metale ciężkie: Pb + Cu + Cr + Mn	5	2	0.5	1.0	1	5	-	-	-	-
10.	Metale ciężkie: As + Ni	1	0.5	0.5			1	-	-	-	-
11.	Całkowity węgiel organiczny (TOC)	20	20	10	20	10	20	-	-	-	20
12.	PCDD/PCDF [ng TEQ/m ³]	-	0.1	0.1	-	0.1	-	2	-	0.1	1



Rysunek nr 3. Uproszczony schemat spalarni odpadów komunalnych

Z punktu widzenia ochrony środowiska najistotniejszym elementem jest układ oczyszczania spalin oraz system powiązany z nim oczyszczania i regeneracji absorbentów. Uproszczony schemat nowoczesnej spalarni odpadów komunalnych przedstawiono na rysunku nr 3. W zakresie systemu oczyszczania spalin jest to jedna z wielu możliwości skutecznego oczyszczania gazów spalinowych. Analizując ten rysunek widać wyraźnie, że konieczność spełnienia coraz bardziej rygorystycznych wymagań dotyczących czystości gazów spalinowych powoduje, że instalacje oczyszczania spalin stają się coraz bardziej rozbudowane.

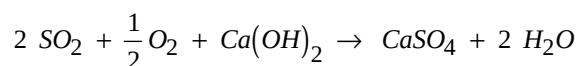
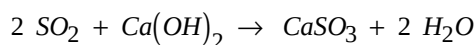
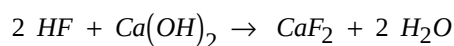
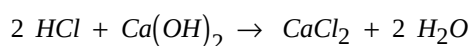
System oczyszczania gazów spalinowych w nowoczesnych spalarniach odpadów komunalnych musi być bardzo wydajny, gdyż wymagany stopień usunięcia zanieczyszczeń niejednokrotnie jest równy 99.99 %. Ilustrują to dane zawarte w tabeli nr 4, w której porównano stężenia wybranych zanieczyszczeń występujących w gazach spalinowych przed oczyszczeniem z wymogami stawianymi gazom oczyszczonym emitowanym do atmosfery.

Tabela nr 4. Stężenie wybranych zanieczyszczeń w gazach spalinowych surowych (przed oczyszczaniem) w porównaniu ze stężeniami w gazach oczyszczonych i wymaganiami niemieckimi (17 BImSchV) [9], [10].

Lp.	Zanieczyszczenie	Gaz nieoczyszczony [mg/m ³]	Gaz oczyszczony [mg/m ³]	Stopień oczyszczenia [%]	Wymagania (17BImSchV) [mg/m ³]
1.	Pył	4700	3	99,94	10
2.	Dwutlenek siarki (SO ₂)	1500	5	99,67	50
3.	Tlenki azotu (jako NO ₂)	500	30	94,00	200
4.	Chlorowodór (HCl)	1060	1.5	99,86	10
5.	Fluorowodór (HF)	100	0.04	99,96	1
6.	Substancje organiczne (jako TOC)	20	1.0	95,00	20
7.	Rtęć (Hg)	1.0	0.01	99,00	0.05
8.	Kadm + Tal (Cd + Tl)	1.0	0.0045	99,55	0.05
9.	Pozostałe metale ciężkie	31	0.22	99,29	0.5
10.	PCDD/PCDF [ng TEQ/m ³]	15	0.01	99,93	0.1

Zazwyczaj w skład instalacji oczyszczania gazów spalinowych w nowoczesnej spalarni odpadów komunalnych wchodzi następujące urządzenia [8]:

- System odpylania spalin (elektrofiltr, bateria cyklonów lub rzadziej filtry tkaninowe), bardzo ważny z punktu widzenia ochrony środowiska, gdyż to właśnie pył jest nośnikiem emisji metali ciężkich (rtęć, ołów, kadm, miedź, chrom, mangan, arsen, nikiel, antymon i tal) jak również cząsteczki pyłu są doskonałym sorbentem dioksyn, stąd dążenie do maksymalizacji wydajności urządzeń odpylających. Zazwyczaj w nowoczesnych spalarniach odpadów stosuje się do odpylania spalin elektrofiltry - urządzenia pozwalające zatrzymać nawet 99.9 % emitowanego pyłu. Znacznie rzadziej stosowane są cyklony, gdyż ich sprawność odpylania jest z reguły niższa. Ostatnio coraz częściej stosuje się filtry tkaninowe. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych materiałów filtracyjnych, odpornych na wysokie temperatury (włókna szklane powlekane specjalnie preparowanym teflonem) udaje się uzyskać bardzo wysokie stopnie odpylenia przy jednoczesnym znacznym ograniczeniu stężenia dioksyn w spalinach [11].
- Układ mokrego oczyszczania - najczęściej dwustopniowy. W pierwszym stopniu następuje schładzanie spalin zimną wodą i absorpcja chlorowodoru oraz fluorowodoru, zaś w drugim stopniu absorpcja pozostałych gazów kwaśnych (przede wszystkim SO_2) w zawiesinie wodorotlenku lub węgla wapniowego. Jest to absorpcja połączona z reakcją chemiczną w wyniku której otrzymuje się odpadowy gips oraz chlorek i fluorek wapnia zgodnie z następującymi równaniami reakcji:



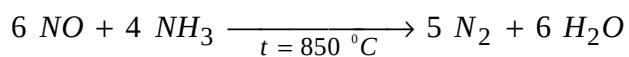
- Dozowanie koksu aktywnego (węglu aktywnego) w celu eliminacji (adsorpcji) dioksyn i furanów, a następnie odpylenie gazów spalinowych na filtrach

tkaninowych. Wariantem tej metody są adsorbery ze złożem węgla aktywnego usytuowane jako ostatni element systemu oczyszczania spalin przed wprowadzeniem ich do komina. Układ ten pozwala na ograniczenie emisji również i innych związków organicznych oraz niektórych metali ciężkich (np. rtęci) które adsorbują się na powierzchni węgla (koks) aktywnego. W niektórych rozwiązaniach technicznych spalarni odpad ten jest wprowadzany razem z odpadami komunalnymi do komory spalania i w ten sposób nie stanowi on zagrożenia dla środowiska. W innych rozwiązaniach odpad ten odpylany w układzie filtrów tkaninowych wspólnie z produktami półsuchego oczyszczania gazów spalinowych za pomocą wodorotlenku wapnia i stanowi wtórny odpad, który składowany jest na izolowanych składowiskach odpadów niebezpiecznych.

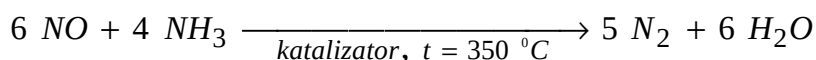
- Opcjonalnie - w nowoczesnych instalacjach oczyszczania gazów spalinowych w spalarniach instalowany jest system usuwania tlenków azotu realizowany dwiema podstawowymi technikami:

- SNCR - selektywna redukcja niekatalityczna polegająca na wprowadzeniu do komory spalania gazowego amoniaku, wody amoniakalnej bądź mocznika, które to substancje w temperaturze ok. 850 °C redukują tlenki azotu do wolnego azotu. Istotną sprawą jest tutaj temperatura. Selektywna niekatalityczna redukcja tlenków azotu przebiega z najlepszą wydajnością w temperaturze ok. 850 °C. Zarówno wzrost temperatury powyżej 900 °C jak i spadek poniżej 800 °C powodują spadek wydajności redukcji, który maksymalnie wynosi ok. 60 - 70 %.
- SCR - selektywna redukcja katalityczna polegająca na tym, że oczyszczone z pyłu i gazów kwaśnych podanymi powyżej metodami gazy spalinowe po podgrzaniu do temperatury ok. 300 °C i wymieszaniu z amoniakiem kierowane są na złożę katalityczne (katalizator platynowy lub wanadowy) gdzie następuje redukcja tlenków azotu do wolnego azotu. Proces ten przebiega z wydajnością powyżej 90 %, często 95 - 98 %.

Zarówno selektywna niekatalityczna redukcja tlenków azotu (SNCR) jak i selektywna katalityczna redukcja tlenków azotu (SCR) prowadzone są za pomocą amoniaku zgodnie z następującym równaniem reakcji:

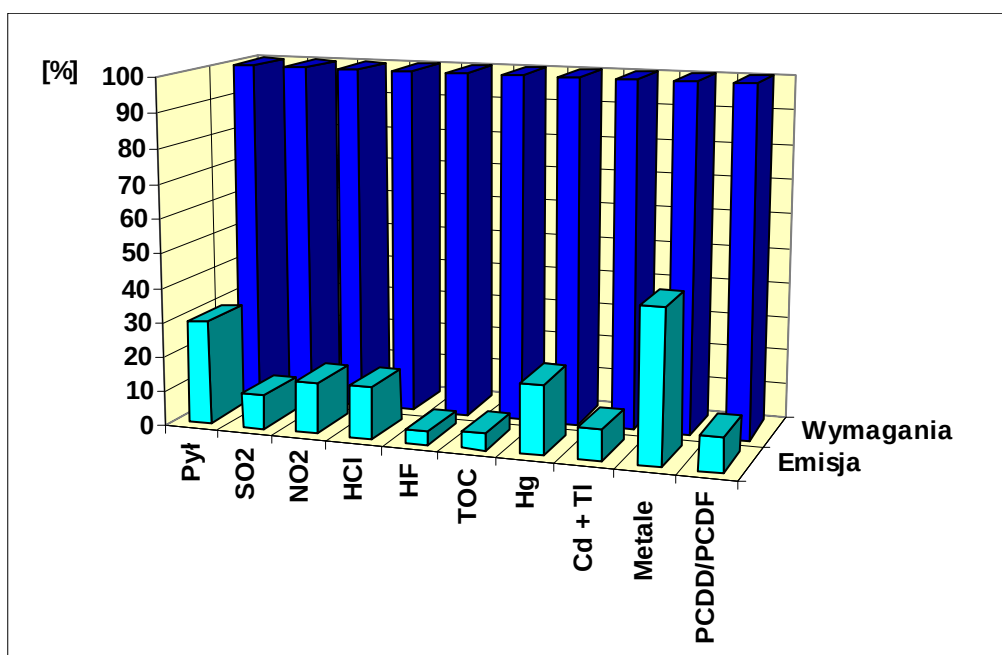


lub



Jedna z podanych powyżej dwóch metod usuwania tlenków azotu musi być stosowana w celu osiągnięcia wymagań niemieckich (17 BImSchV), szwajcarskich, holenderskich oraz austriackich w zakresie dopuszczalnych stężeń tlenków azotu w gazach spalinowych. Ponadto system katalitycznej lub niekatalitycznej redukcji tlenków azotu spełnia jeszcze drugą rolę - w procesie tym następuje również skuteczna redukcja dioksyn i furanów - dla układów katalitycznych z wydajnością ok. 80 - 90 %, a dla układów niekatalitycznych z wydajnością ok. 50 % [12].

Zazwyczaj, w nowoczesnych spalarniach odpadów rzeczywista emisja jest średnio na poziomie ok. 10 % wartości dopuszczalnych określonych nawet w najostrzejszych przepisach. Ilustruje to rysunek nr 4.



Rysunek nr 4. Stopień wykorzystania dopuszczalnych wartości stężeń zanieczyszczeń emitowanych z nowoczesnych spalarni odpadów komunalnych [10], [13], [14].

Tak więc oczyszczanie gazów spalinowych w nowoczesnych spalarniach odpadów komunalnych jest bardzo rozbudowane i wieloetapowe. W tabeli nr 5 zestawiono informacje na temat skuteczności stosowanych metod ograniczania emisji zanieczyszczeń ze spalarni odpadów w stosunku do różnych rodzajów emitowanych zanieczyszczeń. Analizując dane przedstawione na rysunku nr 4 oraz w tabelach nr 3, 4 i 5 można powiedzieć, że praktycznie niezależnie od tego co wprowadzimy na wejściu do systemu oczyszczania gazów spalinowych w efekcie otrzymamy prawie że całkowite usunięcie wszystkich zanieczyszczeń.

Widać więc wyraźnie, na podstawie przedstawionych powyżej danych, że systemy oczyszczania gazów odlotowych w nowoczesnych spalarniach odpadów komunalnych są bardzo skomplikowane, wielostopniowe i bardzo skuteczne, a tym samym nowoczesne spalarnie odpadów komunalnych nie stanowią istotnego zagrożenia dla środowiska. Tak pozytywna ocena jednak jest tylko możliwa dla nowoczesnych spalarni wybudowanych i oddanych do eksploatacji w latach dziewięćdziesiątych, przy czym tyczy ona jedynie spalarni niemieckich, holenderskich, austriackich i szwajcarskich. Większość europejskich spalarni, szczególnie angielskich, francuskich, hiszpańskich czy belgijskich stanowią instalacje wybudowane w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych i tym samym nie spełniają one aktualnych norm Unii Europejskiej nie mówią już o rygorystycznych normach niemieckich czy holenderskich. Stan wyposażenia europejskich spalarni odpadów komunalnych w instalacje oczyszczania gazów spalinowych przedstawiono w tabeli nr 6. Analizując zestawione w niej dane widać, że praktycznie wszystkie spalarnie hiszpańskie oraz angielskie nie posiadają praktycznie systemu oczyszczania spalin lub jedynie węzeł odpylania, zaś skuteczne systemy oczyszczania spalin z prawdziwego zdarzenia posiadają jedynie nowoczesne spalarnie niemieckie, holenderskie, austriackie, szwajcarskie i duńskie. Konsekwencją tego jest konieczność ich zamknięcia lub gruntownej modernizacji w najbliższych latach. Dane na ten temat zawarte są w tabeli nr 7.

Analizując ciągły postęp w zakresie konstrukcji i budowy spalarni odpadów komunalnych a w szczególności w zakresie systemów oczyszczania spalin należy stwierdzić, że na przestrzeni ostatnich 30 lat dokonał się w tym zakresie ogromny postęp. Spalarnie odpadów tzw. pierwszej generacji z lat sześćdziesiątych najczęściej nie posiadały żadnych instalacji oczyszczania spalin. W latach siedemdziesiątych w tzw. spalarniach drugiej generacji pojawiły się urządzenia odpylające - najczęściej elektrofiltry. Trzecia generacja spalarni, z lat

osiemdziesiątych została wyposażona w systemy mokrego oczyszczania spalin służące do usuwania gazów kwaśnych. Spalarnie lat dziewięćdziesiątych - tzw. czwartej generacji wyposażone są układy redukcji tlenków azotu i filtry z węglem aktywnym zapewniając prawie całkowite usunięcie wszystkich aktualnie znanych zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery w spalinach ze spalarni odpadów komunalnych.

Tabela nr 5. Skuteczność stosowanych metod ograniczania emisji zanieczyszczeń ze spalarni odpadów(wg danych własnych oraz [15])

Zanieczyszczenie Technologia oczyszczania gazów		Pył	Gazy kwaśne				Metale ciężkie		Inne substancje organiczne jako TOC	PCDD PCDF	Uwagi
			SO ₂	HCl	HF	NO _x	w fazie gazowej	w fazie stałej			
Odpylanie	elektrofiltr	★★★★	-	-	-	-	-	★★★★	★★★	★★★	Podczas odpylanie następuje usunięcie metali ciężkich wchodzących w skład pyłu oraz zaadsorbowanych na pyłe innych substancji organicznych
	cyklon	★★★	-	-	-	-	-	★★★	★★	★★	
	filtr tkaninowy	★★★★	-	-	-	-	-	★★★★	★★★★	★★★★	
Absorpcja	metoda sucha	★★★	★	★	★	★	-	★★★	★	★★	Metody absorpcyjne służą do usunięcia gazów kwaśnych Efektem ubocznym jest skuteczne odpylanie - usunięcie również zaadsorbowanych na pyłe zanieczyszczeń
	metoda półsucha	★★★	★★	★★	★★	★	-	★★★	★	★★	
	metoda mokra jednostopniowa	★★★★	★★★★	★★	★★	★	-	★★★	★	★★	
	metoda mokra dwustopniowa	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★	-	★★★	★	★★	
Adsorpcja	metoda strumieniowa	-	-	-	-	-	★★★	-	★★★	★★★	Na węglu aktywnym występuje skuteczna adsorpcja dioksyn, lotnych metali ciężkich oraz innych substancji organicznych
	metoda ze złożem stałym	-	-	-	-	-	★★★★	-	★★★★	★★★★	
Redukcja	SCR (selective catalytic reduction)	-	-	-	-	★★★★	-	-	★	★★★★	Ubočnym efektem redukcji tlenków azotu jest redukcja dioksyn oraz katalityczna redukcja innych związków organicznych
	SNCR (selective noncatalytic reduction)	-	-	-	-	★★	-	-	-	★★★	

★★★★ - bardzo wysoka skuteczność (ponad 95 %)

★★ - średnia skuteczność

*** - wysoka skuteczność

* - niska skuteczność

Tabela nr 6. Istniejące systemy oczyszczania gazów spalinowych w instalacjach spalania odpadów komunalnych w Europie (dane za rok 1993) [1].

Lp.	Kraj	Ilość spalarni odpadów komunalnych	Bez oczyszczania gazów	Tylko odpylanie	Skruber suchy	Skruber półsuchy	Skruber mokry jedno-stopniowy	Skruber mokry dwu-stopniowy	Adsorpcja na węglu	Odzysk ciepła
-	-	-	%	%	%	%	%	%	%	%
1	Austria	2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
2	Belgia	24	0,0	75,0	8,3	4,2	8,3	4,2	0,0	45,8
3	Szwajcaria	30	0,0	26,7	0,0	6,7	3,3	63,3	0,0	80,0
4	Niemcy	49	0,0	0,0	8,2	24,5	16,3	36,7	14,3	100,0
5	Dania	30	0,0	23,3	23,3	16,7	26,7	10,0	0,0	100,0
6	Hiszpania	15	46,7	46,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,7
7	Francja	225	0,0	17,3	4,0	6,2	4,4	0,0	0,0	42,2
8	Włochy	28	0,0	28,6	7,1	0,0	10,7	0,0	0,0	64,3
9	Luksemburg	1	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	100,0
10	Norwegia	18	0,0	72,2	0,0	0,0	27,8	0,0	0,0	27,8
11	Holandia	10	0,0	10,0	10,0	0,0	20,0	40,0	20,0	90,0
12	Szwecja	21	0,0	28,6	42,9	0,0	28,6	0,0	0,0	100,0
13	Finlandia	1	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
14	Wielka Brytania	31	9,7	90,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,1
Europa - razem :		485	2,1	28,0	7,0	7,2	9,3	9,3	2,3	56,7

Tabela nr 7. Plany wybranych państw europejskich w zakresie budowy i modernizacji spalarni odpadów komunalnych. (wg danych własnych oraz [1])

Państwo	Plany
Austria	Rozważana jest budowa kolejnych 2 spalarni odpadów komunalnych.
Belgia	Do 2010 roku wszystkie instalacje będą zamknięte i zastąpione przez 5 - 7 nowych dużych, nowoczesnych spalarni.
Szwajcaria	planowana jest budowa 1 nowej instalacji w Genewie.
Niemcy	planowana jest budowa ok. 16 - 18 nowych spalarni odpadów, znaczna część w tzw. „nowych landach”, sukcesywna modernizacja istniejących instalacji.
Dania	Nie planuje się budowy nowych spalarni, sukcesywna modernizacja istniejących spalarni.
Hiszpania	Planowana budowa 6 dużych, nowych instalacji o łącznej wydajności ok. 1 640 000 t/rok.(Madryt, Santander, Valencia, Bahia de Cadiz, Palma de Mallorca, Marseme) oraz rozważana jest budowa 5 następnych (Sevilla, Barcelona, Extremadura, Consermancha, Las Palmas/Tenerife).
Francja	Planowana jest stopniowa likwidacja starych małych spalarni odpadów i budowa w ich miejsce dużych nowoczesnych obiektów.
Włochy	Brak informacji.
Grecja	Nie planuje się budowy spalarni.
Irlandia	Nie planuje się budowy spalarni do 2010 roku.
Luksemburg	Nie planuje się budowy nowej spalarni - istniejąca w pełni pokrywa potrzeby.
Norwegia	Planowana budowa 2 spalarni odpadów (Tromso i Bergen), stopniowa modernizacja instalacji istniejących
Holandia	Budowa 5 nowych, dużych spalarni odpadów o łącznej wydajności 2 350 000 t/rok do 2000 roku. Rozbudowa 2 instalacji o łącznie 230 000 t/rok, likwidacja 2 małych, starych instalacji.
Portugalia	Brak informacji.
Szwecja	Rozbudowa 1 instalacji o jedną linię o wydajności 105 000 t/rok, modernizacja instalacji istniejących.
Finlandia	Budowa 2 instalacji w Pori - ok. 60 000 t/rok oraz w Helsinkach ok. 600 000 t/rok, gruntowna modernizacja istniejącej spalarni.
Wielka Brytania	Budowa 8 nowych spalarni odpadów, w tym największej w Europie spalarni „Belvedere” niedaleko Londynu ok. 1 200 000 t/rok, oraz w Londynie - 400 000 t/rok, Leeds - 300 000 t/rok, Portsmouth - 300 000 t/rok, Isle of Man - 24 000 t/rok, Birkenhead 18 000 t/rok oraz w Derby i Birmingham. Z aktualnie pracujących spalarni 20 małych przeznaczonych jest do całkowitej likwidacji po wybudowaniu nowych, pozostałe większe instalacje będą sukcesywnie modernizowane.

Rozwój naszej wiedzy o procesach spalania oraz o produktach procesu spalania powoduje, że z każdym rokiem instalacje oczyszczania gazów spalinowych stają się coraz doskonalsze i bardziej skomplikowane. Doskonałym przykładem jest tutaj problem dioksyn - o ich właściwościach toksycznych świat dowiedział się na początku lat siedemdziesiątych, pod koniec lat siedemdziesiątych odkryto je w spalinach ze spalarni odpadów, zaś na początku lat dziewięćdziesiątych nauka i technika poradziły sobie z tym problemem instalując w spalarniach początkowo filtry z węglem aktywnym a następnie również instalacje katalityczne - służące przede wszystkim redukcji tlenków azotu ale także i dioksyn. Dzięki temu dziś, w nowoczesnych spalarniach odpadów komunalnych wybudowanych w latach dziewięćdziesiątych problem emisji dioksyn po prostu nie istnieje.

W ślad za rozwojem naszej wiedzy o toksyczności produktów spalania idą zmiany w przepisach dotyczących emisji ze spalarni odpadów - są one systematycznie zaostrzane. Aktualny stan regulacji prawnych dotyczących emisji ze spalarni odpadów komunalnych przedstawiono w tabeli nr 3. Widać wyraźnie, że występuje duże zróżnicowanie w wymogach wstawianych emisji ze spalarni w różnych krajach. Znajduje to swoje częściowe odbicie w danych zawartych w tabeli nr 5. Kraje, w których przepisy są liberalne, posiadają instalacje nie odpowiadające dzisiejszym standardom. Zmiany w przepisach prawnych dotyczących emisji ze spalarni odpadów najlepiej prześledzić na przykładzie Niemiec (tabela nr 8). Widać wyraźnie, że wraz z rozwojem nauki i techniki, wraz ze wzrostem naszej wiedzy na temat emisji z procesu spalania przepisy te były systematycznie zaostrzane.

Wspomniano wcześniej, że obowiązująca ciągle dyrektywa Unii Europejskiej dotycząca emisji ze spalarni odpadów (Nr 89/369/EEC z 1989 roku) nie odpowiada już dzisiejszym standardom w zakresie ochrony czystości powietrza atmosferycznego. Od kilku lat spodziewane jest jej nowelizacji, choć spotyka to się z dużym oporem szczególnie w krajach mających bardzo liberalne ustawodawstwo w zakresie emisji zanieczyszczeń z procesu spalania odpadów (Francja, Belgia, Hiszpania, Wielka Brytania). Projekt nowej dyrektywy [17] opublikowany w lutym 1998 roku praktycznie zrównuje wymagania dotyczące emisji ze spalarni odpadów komunalnych z wymogami dotyczącymi emisji ze spalarni odpadów niebezpiecznych (Dyrektywa 94/67/EEC) i jest identyczny jak wymagania niemieckie (17 BImSchV). Ilustruje to tabela nr 9.

Tabela nr 8. Zmiany w przepisach niemieckich regulujących emisję ze spalarni odpadów komunalnych [15].

Substancja	Dopuszczalne stężenie w gazach spalinowych [mg/m ³]		
	TA-Luft 1974	TA-Luft 1986	17 BImSchV 1991
Pył	100,0	30,0	10,0
Dwutlenek siarki - SO ₂	-	100,0	50,0
Tlenki azotu - NO _x	-	500,0	200,0
Tlenek węgla - CO	1000,0	100,0	50,0
Chlorowodór - HCl	100,0	50,0	10,0
Fluorowodór - HF	5,0	2,0	1,0
Substancje organiczne (jako TOC)	-	20,0	10,0
Metale grupy I: Rtęć - Hg	20,0	0,2	0,1
Metale grupy I: Kadm i tal - Cd + Tl	20,0	0,2	0,1
Metale grupy II: As, Co, Ni, Se, Te	50,0	1,0	0,5
Metale grupy III: Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Pt, Rh, Sn	70,0	5,0	0,5
Polichlorowane dibenzo- <i>p</i> -dioksyny i polichlorowane dibenzofurany - PCDD/PCDF [ng/TEG/m ³]	-	-	0,1

Z tego punktu widzenia, wobec nieuchronnej wydaje się perspektywy budowy spalarni odpadów komunalnych również i w naszym kraju, szczególnie dotkliwy jest brak polskich przepisów normujących emisję ze spalarni odpadów. Konsekwencją może być przeniesienie do Polski spalarni odpadów komunalnych, które ze względu na wymogi ochrony środowiska są w niektórych krajach zamykane (vide oferta sprzedaży niemieckiej spalarni odpadów komunalnych w Zirndorf opublikowana w Internecie, czy oferta sprzedaży jednej ze szwajcarskich spalarni odpadów- KVA Mittelthurgau). Według informacji z Ministerstwa Ochrony Środowiska można w najbliższym czasie (w 1999 roku) oczekiwać takich uregulowań prawnych w Polsce (w postaci aneksu do Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa w sprawie wprowadzania substancji

zanieczyszczających do powietrza z procesów technologicznych i operacji technicznych [18]) przy czym wartości dopuszczalne mają być zbliżone do aktualnie obowiązującej dyrektywy Unii Europejskiej.

Tabela nr 9. Porównanie wartości dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń w spalinach emitowanych ze spalarni odpadów komunalnych (Dyrektywa 89/369/EEC), spalarni odpadów przemysłowych (Dyrektywa 94/67/EEC), określonych w przepisach niemieckich (17 BImSchV) oraz proponowanych w nowej Dyrektywie Unii Europejskiej (COM(1998) 558 Final).

Rodzaj substancji	Dopuszczalne stężenie w gazach spalinowych [mg/m ³]			
	Dyrektywa 89/369/EEC	Dyrektywa 94/67/EEC	Niemcy 17 BImSchV (1991)	Propozycja Dyrektywy COM(1998) 558 Final
Pył	30	10	10	10
Dwutlenek siarki	300	50	50	50
Dwutlenek azotu	-	-	200	200
Tlenek węgla	100	50	-	50
Chlorowodór	50	10	10	10
Fluorowodór	2	1	1	1
Metale ciężkie: Pb + Cu + Cr + Mn	5	0,5	0,5	0,5
Metale ciężkie: As + Ni+Sb	1			
Kadm - Cd	0,2	0,05	0,05	0,05
Rtęć - Hg	0,2	0,05	0,05	0,05
Całkowity węgiel organiczny (TOC)	20	10	10	10
PCDD/PCDF [ng TEQ/m ³]	-	0,1	0,1	0,1

Analizując jednak globalnie problem oczyszczania gazów odlotowych ze spalarni odpadów komunalnych można więc dziś śmiało postawić tezę, że systemy oczyszczania gazów odlotowych w nowoczesnych spalarniach (bardzo skomplikowane, wielostopniowe i tym samym bardzo skuteczne), są tak skuteczne, że niezależnie od tego co wprowadzimy na wejściu do systemu oczyszczania gazów spalinowych w efekcie otrzymamy prawie że

całkowite usunięcie wszystkich zanieczyszczeń. Tym samym nowoczesne spalarnie odpadów komunalnych, (oddane do eksploatacji w latach dziewięćdziesiątych - IV generacji) nie stanowią istotnego zagrożenia dla środowiska.

Porównanie stężeń niektórych zanieczyszczeń opuszczających spalarnie odpadów z typowymi stężeniami emitowanymi przez większość polskich elektrowni (i to dobrych!) prowadzi do stwierdzenia, że emisja ze spalarni odpadów jest daleko bardziej bezpieczna dla środowiska niż emisja z istniejących obiektów energetycznych. Ostateczna konkluzja więc brzmi - można nie bać się emisji z nowoczesnych spalarni odpadów.

Literatura.

1. Rijpkema L. P. M., Krajenbrink G. W., Stijnman P. W. A., de Groot J. L. B . - *Survey of municipal solid waste combustion in Europe*. - TNO Environmental and Energy Research Report, Apeldoorn, 1993,
2. Whiting K. J., Schwager F. J. - *European trends in thermal treatment of solid wastes*. - ISWA Yearbook 1997/98,
3. Eduljee G. H. - *Organic micropollutant emissions from waste incineration*. - w: Hester R. E., Harrison R. M. (ed.) - „Waste incineration and the environment”, Royal Society of Chemistry, London 1994,
4. Brandys J. - *Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne*. - w: Gumińska M. (red.) - „Chemiczne substancje toksyczne w środowisku i ich wpływ na zdrowie człowieka”, Ossolineum, Wrocław 1990,
5. Grochowalski A. - *Dioksyny a środowisko. Historia, dzień dzisiejszy i perspektywy*. - referat na II Ogólnopolskim Sympozjum „Dioksyny-Człowiek-Środowisko”. Kraków 1996
6. Knypl E., Knypl M. - *Dioksyny mniej straszne*. - Regionalne Centrum Edukacji Ekologicznej, Bielsko Biała 1997,
7. Pająk - *Termiczna utylizacja odpadów komunalnych jako element współczesnej kompleksowej gospodarki odpadami*. - Przegląd Komunalny, 1998, 3 (78), 17,
8. Thome-Kozmiensky K. J. - *Thermische Abfallbehandlung*. - EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 1994;

9. Rijpkema L. P. M. - *The impact of a change in EC legislation on the combustion of municipal solid waste*. - TNO Environmental and Energy Research Report, Apeldoorn, 1993,
10. *Spittelau District Heating Plant* - materiał informacyjny Fernwärme Wien GmbH, 1995
11. Pranghofer G. - *Control of dioxins/furanes and heavy metals with membrane filters and additives in European incineration plants*. - referat na III Międzynarodowej Konferencji „Spalanie odpadów - technologie i problemy”, Szczyrk, 1997,
12. Pająk T. - *Katalityczna redukcja dioksyn* - referat na III Międzynarodowej Konferencji „Spalanie odpadów - technologie i problemy”, Szczyrk, 1997,
13. Christmann A., Lohe G. - *Wysokotemperaturowe, współprądowe spalanie na ruszcie walcowym. Nowoczesne rozwiązanie spalarni odpadów komunalnych*. - referat na Sympozjum „Zintegrowane systemy ochrony środowiska - Termiczna utylizacja odpadów”, Międzyzdroje 1996,
14. Kubisa R., Schumacher W., Becker J., Sobolewski H. - *Przegląd termicznych metod utylizacji odpadów*. - referat na Sympozjum „Zintegrowane systemy ochrony środowiska - Termiczna utylizacja odpadów”, Międzyzdroje 1996,
15. Pająk T. - *Ekologiczne bezpieczeństwo współczesnych technologii termicznej utylizacji odpadów komunalnych* - referat na V Ogólnopolskim Sympozjum „Ochrona powietrza w przemyśle, Spała, październik 1998,
16. Materiały informacyjne Bundesministerium für Umwelt (Niemcy) - czerwiec 1998,
17. *Working Paper on The Incineration of Wastes* - Commission of European Communities, Brussels, February 1998,
18. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 8 września 1998 roku w sprawie wprowadzania substancji zanieczyszczających do powietrza z procesów technologicznych i operacji technicznych. (Dz. Ust. 1998, Nr 121, poz. 793);