
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Construction Materials

Nr 7

ISSN 1899-3230

Rok IV

Warszawa–Opole 2011

Porównanie wielkości emisji zanieczyszczeń dla różnych opcji spalania odpadów

W wyniku spalania odpadów do atmosfery emitowane są różne szkodliwe substancje. Wielkość emisji zanieczyszczeń uzależniona jest od rodzaju paliwa, jego parametrów fizykochemicznych, technik spalania i wydajności systemów oczyszczania gazów. Instalacje przemysłowe spalające lub współspalające odpady obowiązują europejskie standardy emisyjne. W przypadku niekontrolowanego spalania odpadów na wolnym powietrzu (tzw. *open burning*), wielkość emisji zanieczyszczeń jest zdecydowanie większa niż w przypadku spalania w układach energetycznych. W pracy porównano wielkości emisji zanieczyszczeń w przypadku niekontrolowanego i kontrolowanego spalania odpadów.

1. Wprowadzenie

W wyniku spalania paliw z odpadów, w tym odpadów komunalnych, do atmosfery emitowane są takie substancje, jak CO, CO₂, SO_x, NO_x, lotne związki organiczne VOC, całkowity węgiel organiczny TOC, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne PAH, dioksyny PCDD, furany PCDF, HCL, HF, pyły, w tym metale ciężkie. Wielkość emisji zanieczyszczeń uzależniona jest od rodzaju paliwa, jego parametrów fizykochemicznych, technik spalania i wydajności systemów oczyszczania gazów. Podstawowym europejskim dokumentem regulującym wielkość emisji zanieczyszczeń jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych. Wielkość emisji z instalacji przemysłowych w normalnych warunkach eksploatacji nie może przekraczać poziomów emisji powiązanych z najlepszymi dostępnymi technikami. Dla instalacji spalających lub współspalających odpady określono standardy emisyjne [9–10]. Dodatkowo proces spalania lub współspalania odpadów musi odbywać się przy zapewnieniu odpowiednich parametrów eksploatacyjnych, tj.: utleniającej atmosfery, minimalnej temperatury procesu wynoszącej 850°C oraz czasu przebywania spalin w wysokich temperaturach co najmniej przez 2 s, co gwarantuje całkowity rozkład termiczny spalanych paliw.

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

W przypadku niekontrolowanego spalania odpadów na wolnym powietrzu (tzw. *open burning*), co ma miejsce m.in. w czasie pożarów, spalania śmieci w beczkach itp., wielkość emisji zanieczyszczeń jest zdecydowanie większa niż w przypadku spalania w układach energetycznych. Związane jest to z brakiem odpowiednich warunków spalania (temperatury, czasu przebywania, współczynnika nadmiaru powietrza itp.), jak również brakiem układów oczyszczających spaliny.

2. Wskaźniki emisji z kontrolowanego procesu spalania odpadów

Proces spalania lub współspalania odpadów lub paliw wytworzonych na bazie odpadów komunalnych powinien być prowadzony w instalacjach spełniających wymogi Dyrektywy 2010/75/UE [10]. Spalanie odpadów może więc odbywać się w instalacjach specjalnie zaprojektowanych i eksploatowanych w celu termicznej utylizacji odpadów, tj. spalaniach lub też w procesie wypalania klinkieru, gdzie istnieją duże możliwości wykorzystania, poza konwencjonalnymi paliwami, różnego typu innych paliw odpadowych.

Piece do wypału klinkieru dzięki swojej konstrukcji oraz wysokotemperaturowemu procesowi spełniają szereg warunków, gwarantując całkowity rozkład termiczny spalanych paliw. Do głównych zalet pieca obrotowego należy zaliczyć [12]:

- wysoką temperaturę (do 2000°C) oraz długą i wąską komorę spalania, co gwarantuje całkowite spalenie części palnych,
- zasadowe środowisko (znaczna absorpcja kwaśnych gazów i metali ciężkich przez mączkę surowcową),
- utleniającą atmosferę ($O_2 > 6\%$),
- długą i ciągłą pracę pieca zapewniającą stabilne warunki termiczne,
- długi czas spalania (przepływ spalin przez piec wynosi ok. 5–10 s),
- dużą pojemność cieplną, zapewniającą warunki termiczne w chwili zaniku płomienia,
- dużą powierzchnię wymiany ciepła,
- dobre wymieszanie gazów i produktów,
- brak pozostałości ze spalania, pozostałości po spalaniu pozostają w klinkierze (całkowita absorpcja metalicznych i niemetalicznych produktów spalania),
- wysoką skuteczność oczyszczania gazów odlotowych, co pozwala eliminować emisję metali (kondensują one na cząstkach pyłu, wychwytywanych w urządzeniach odpylających, które zwracane są do procesu),
- ciepło ze spalania odpadów jest w całości wykorzystane podczas wypalania klinkieru, zmniejsza się zużycie nieodnawialnych paliw oraz proporcjonalnie do tego emisja CO_2 .

W Polsce jeszcze 10 lat temu udział ciepła dostarczanego do układu z paliw alternatywnych wynosił ok. 2%, obecnie kształtuje się na poziomie 36%. W przypadku niektórych cementowni wynosi on nawet 80%. Wielkość emisji z układów wypalania klinkieru poszczególnych zanieczyszczeń związana jest ze specyfiką procesu – uzależniona jest więc od konfiguracji układu, zastosowanej technologii oraz rodzaju wykorzystanych surowców i paliw. Wskaźniki emisji dla poszczególnych technologii spalania i współspalania odpadów przedstawiono w tabeli 1.

T a b e l a 1

Wskaźniki emisyjne dla spalarni śmieci i cementowni

Zanieczyszczenie	Spalarnia		Cementownia	
	wskaźnik emisji [11] [g/tpal]	średnia [11] [kg/tpal]	technologia	wskaźnik emisji [13] [kg/tkl]
NO _x	510–1797	1,6	metoda mokra	3,7
			metoda sucha piec z wieżą wymienników	2,4
			metoda sucha piec z wieżą wymienników + kalcynator	2,1
Pył	0,7–101,8	0,038	metoda mokra	48,521
			metoda mokra z ESP	0,287
			metoda mokra FF	0,172
			metoda sucha piec z wieżą wymienników ESP	0,097
			metoda sucha piec z wieżą wymienników FF	0,093
			chłodnik z ESP	0,036
			chłodnik FF	0,049
SO ₂	10,1–189,1	0,042	metoda mokra	4,1
			metoda sucha piec z wieżą wymienników	0,27
			metoda sucha piec z wieżą wymienników + kalcynator	0,54
HCl	12,4–115,5	0,058	ESP	0,025
			FF	0,073
HF	0,1–3,4	0,001	b.d.	b.d.
VOC	1,5–45,4	0,008	b.d.	b.d.
Kadm	0,0009–0,0158	0,00005	ESP	$4,2 \cdot 10^{-6}$
			FF	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Rtęć	0,0022–0,1782	0,0005	ESP	0,00011
			FF	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Dioksyny i furany (TEQ)	$(33-3319) \cdot 10^{-9}$	$0,400 \cdot 10^{-9}$	FF	$1,54 \cdot 10^{-9}$

ESP – elektrofiltr, FF – filtr tkaninowy.

3. Wskaźniki emisji z niekontrolowanego procesu spalania odpadów

Niekontrolowany proces spalania tzw. *open burning*, definiowany jest jako spalanie każdego rodzaju substancji w atmosferze tlenowej, gdy produkty spalania emitowane są bezpośrednio do otoczenia, a proces odbywa się w urządzeniu do tego nieprzystosowanym. Niekontrolowanym procesem spalania są pożary składowisk śmieci, lasów, łąk, domów, ogniska, palenie świec, sztuczne ognie, itp. Wielkość emisji zanieczyszczeń jest zdecydowanie większa niż w przypadku spalania w układach energetycznych, gdzie proces jest kontrolowany i zapewnione są odpowiednie warunki spalania. Wśród gazowych produktów spalania odpadów komunalnych znajdują się toksyczne związki, takie jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne oraz polichlorowane dibenzo-p-dioksyny PCDDs i polichlorowane dibenzofurany PCDFs. Emisje z pożarów wysypisk śmieci uznawane są za znaczące, jeżeli nie dominujące, źródło światowej emisji dioksyn i furan.

Przeprowadzono przegląd literatury [1–8, 11, 13] dotyczącej określenia wskaźników emisji zanieczyszczeń związanych ze spalaniem odpadów komunalnych. Wyniki analizy zebrano w tabelach 2–5.

Tabela 2

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń *open burning* [4]

Zanieczyszczenie	Odpady segregowane	Odpady niesegregowane
	wskaźnik emisji [g/kgpal]	
PM ₁₀	5,8	19,0
HCL	2,400	0,284
VOC	2,0526	4,2775
PCDD	0,047 · 10 ⁻³	0,038 · 10 ⁻³
PCDF	0,22 · 10 ⁻³	0,0061 · 10 ⁻³
PAH	0,02351	0,06603
PCB	1,007 · 10 ⁻³	0,4242 · 10 ⁻³
Hg	< 0,00001416	< 0,00003705

Tabela 3

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń *open burning* [4]

Metale	Odpady segregowane	Odpady niesegregowane
	wskaźnik emisji [g/kgpal]	
Ag	0,000023	0,0000525
Al	0,108746	0,003641
As	0,001369	0,0022415
Ba	0,000092	0,000911
Be	< 0,0000175	0,000047
Cd	0,000105	0,000138

cd. tab. 3

Metale	Odpady segregowane	Odpady niesegregowane
	wskaźnik emisji [g/kgpal]	
Cr	0,000223	0,000202
Cu	0,010596	0,0013685
Hg	< 0,000015	< 0,0000635
Mg	0,002062	0,002513
Ni	0,000496	0,000239
Pb	0,001488	0,000486
Se	< 0,000442	< 0,001171
Zn	0,01098	< 0,000492

Tabela 4

Wskaźniki emisji open burning [2]

Zanieczyszczenie	Wskaźnik emisji [g/kgpal]
Pył	8
NO _x	3
SO ₂	0,5
VOC	6,5
TOC (metan)	6,5
TOC (inne niż metan)	15
CO	42,38

Tabela 5

Wskaźniki emisji dioksyn i furanów (open burning)

Źródło literaturowe	Zanieczyszczenie					
	PCDD [ng/kg]	PCDF [ng/kg]	PCDD/F [ng/kg]	PCDD [ngTEQ/kg]	PCDF [ngTEQ/kg]	PCDD/F [ngTEQ/kg]
Wg [1]			5,8 · 10 ³			76,8
Wg [6]			257-306 758			2-6 433
Wg[4]	odpady segregowane	47 000	220 000			
	odpady niesegregowane	38 000	6 100			
Wg [3]*						202-1 700 średnio 823
Wg [7]			1,4-425			2-992 średnio 77
Wg [8]						200-5 000

* podane w przeliczeniu na kg spalonego węgla.

4. Porównanie wielkości emisji zanieczyszczeń

W celu określenia wielkości emisji zanieczyszczeń podczas spalania odpadów komunalnych porównano 3 różne procesy. Dwa zapewniające kontrolowany termiczny rozkład substancji (spalarnie, cementownie) oraz jeden, gdzie proces spalania odbywa się w sposób niekontrolowany. Do określenia wielkości emisji zanieczyszczeń wykorzystano wskaźniki emisji przedstawione uprzednio w rozdziałach 2 i 3. Wskaźniki emisji odnoszą się do kg spalanego paliwa. W przypadku cementowni wskaźniki te podano w g/kg klinkieru. Przy obliczaniu wielkości emisji w układzie wypalania klinkieru założono, że:

- na każdy wyprodukowany kg klinkieru należy dostarczyć do procesu 3,6 MJ energii,
- paliwa alternatywne o wartości opałowej 16 MJ/kg dostarczają 50% ciepła technologicznego.

Przy powyższych założeniach, spalając 1 kg odpadów komunalnych, można wyprodukować 8,9 kg klinkieru.

W procesie *open burning* wskaźnik emisji dioksyn i furanów przyjęto na poziomie 300 ngTEQ/kg. Jest to wielkość emisji dla nielegalnie spalanych odpadów w Niemczech [8].

T a b e l a 6

Porównanie wielkości emisji zanieczyszczeń dla różnych opcji spalania odpadów komunalnych

Zanieczyszczenie	Wskaźniki emisji [g/kg]			Emisja ze spalania 1 t odpadów [g]		
	spalarnia	cementownia	niekontrolowany proces spalania	spalarnia	cementownia	niekontrolowany proces spalania
Pył	0,038	0,093	8	38	826,7	8 000
NO _x	1,6	2,4	3	1600	21 333,3	3 000
SO _x	0,042	0,27	0,5	42	2 400,0	500
HCl	0,058	0,073	0,284	58	648,9	284
Cd	0,00005	0,000011	0,000138	0,05	0,010	0,14
Hg	0,00005	0,000012	3,705E-05	0,05	0,107	0,04
Dioksyny, furany	4E-10	1,54E-09	0,0000003	4E-07	1,37E-05	0,0003
VOC	0,008	b.d.	6,5	8	–	6500

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne na podstawie: [2, 4, 11, 13].

Porównanie wielkości emisji zanieczyszczeń ze spalania 1000 kg odpadów komunalnych przedstawiono w tabeli 6. Najlepszym przykładem obrazującym korzyści związane ze spalaniem odpadów w układach zapewniających ich termiczny rozkład jest porównanie emisji ze spalarni śmieci i emisji *open burning*.

Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku odpady komunalne są jedynym źródłem paliwa. Spalanie odpadów w spalarniach gwarantuje niskie emisje zanieczyszczeń. Emisja pyłu jest ponad 200 razy mniejsza, dioksyn i furanów 750, a lotnych związków organicznych ponad 800 razy mniejsza niż w przypadku emisji z procesów spalania niekontrolowanego.

W przypadku układu wypalania klinkieru źródłem emitowanych zanieczyszczeń są nie tylko paliwa alternatywne, ale również surowce oraz paliwa konwencjonalne. Przykładowo emisja SO_2 z cementowni zależy przede wszystkim od ilości lotnej siarki zawartej w surowcach. Główny wpływ na wielkość emisji metali ma również skład surowca. Emisja z paliw stanowi niewielki udział w całkowitej emisji tych związków. Natomiast redukcja emisji tlenków azotu, która ściśle związana jest z temperaturą, jest ograniczona ze względu na wymagania procesu, tj. utrzymania dobrej jakości klinkieru. Dlatego też trudno jest porównywać wielkość emisji z tego procesu technologicznego z pozostałymi emisjami. Wielkość emisji z układu pieca obrotowego podano tylko w celach informacyjnych.

5. Podsumowanie

Wskaźniki emisji zanieczyszczeń z procesu spalania zależą od rodzaju, parametrów fizykochemicznych paliwa, technik spalania i wydajności systemów oczyszczania gazów.

Do określenia wielkości emisji zanieczyszczeń z trzech analizowanych układów: spalarni śmieci, układu wypalania klinkieru oraz spalania śmieci na wolnym powietrzu wykorzystano wskaźniki emisji przedstawione w rozdziale 2 i 3. Emisje zanieczyszczeń, co oczywiste, osiągają najniższe wartości w przypadku prowadzenia procesu przy zachowaniu odpowiednich parametrów spalania oraz stosując układy oczyszczania spalin. Emisje ze spalania odpadów komunalnych w spalarni w porównaniu do emisji z procesów spalania niekontrolowanego w przypadku pyłu jest ponad 200 razy, dioksyn i furanów 750, a lotnych związków organicznych ponad 800 razy mniejsza.

Wielkości emisji zanieczyszczeń z układów wypalania klinkieru, w których utylizacja paliw alternatywnych jest tylko działalnością uboczną, nie można porównywać z pozostałymi dwoma analizowanymi układami. Na wielkość emisji zanieczyszczeń z tego procesu mają wpływ nie tylko paliwa alternatywne, ale również surowce oraz paliwa konwencjonalne.

Literatura

- [1] Lemieux P.M., Lutes Ch.C., Santoianni D.A., *Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review*, „Progress in Energy and Combustion Science” 2004, Vol. 30, s. 1–32.
- [2] United States Environmental Protection Agency EPA, <http://www.epa.gov/> (18.04.2011).

- [3] Gullett B.K., Wyrzykowska B., Grandesso E., Touati A., Tabor D.G., Ochoa G.S., *PCDD/F, PBDD/F, and PBDE emissions from open burning of a residential waste dump*, „Environmental Science and Technology” 2010, Vol. 44, s. 394–399.
- [4] Lemieux P.M., Evaluation of emissions from the open burning of household waste in barrels, United States Environmental Protection Agency 1997, http://www.ecy.wa.gov/programs/air/outdoor_woodsmoke/PDFs/EPABarln1.pdf (18.04.2011).
- [5] Nammani D.R., Hogland W., Marques M., Nimmermark S., Moutavtchi V., *Emissions from a controlled fire in municipal solid waste bales*, „Waste Management” 2004, Vol. 24, s. 9–18.
- [6] Lemieux P.M., Gullett B.K., Lutes Ch.C., Winterrowd Ch.K., Winters D.I., Parameters Influencing Emissions of PCDDs/Fs from Open Burning of Household Waste in Barrels, For presentation at AWMA/Environment Canada Specialty Conference „Recent Advances in the Science and Management of Air Toxics” April 10–12, 2000, Banff, Alberta, Canada, http://www.iowadnr.gov/air/prof/meet_wg/burn/files/BanffBarrels00.pdf (18.04.2011).
- [7] Lemieux P., Gullett B., Lutes C., Winterrowd C., *Winters Variables affecting emissions of PCDDs/Fs from uncontrolled combustion of household waste in barrels*, „Journal of the Air Waste Management Association” 2003, Vol. 53, s. 523–533.
- [8] Information exchange on reduction of dioxin emissions from domestic sources. Final report april 2009, <http://ec.europa.eu/environment/dioxin/pdf/report09.pdf> (18.04.2011).
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, Dz.U. z 2005 r. nr 260, poz. 2181.
- [10] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych.
- [11] Comparison of emissions from waste management options Research undertaken for the National Society for Clean Air and Environmental Protection June 2002, <http://www.environmental-protection.org.uk/assets/library/documents/ComparisonEmissionsWasteManagementOptions.pdf> (18.04.2011).
- [12] Duda J., *Współspalanie węgla i paliw alternatywnych w cementowych piecach obrotowych*, „Prace IMMB” 2003, nr 35/36.
- [13] Wskaźniki emisji dla przemysłu cementowego, <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s06.pdf> (18.04.2011).

EWA GŁODEK

COMPARISON OF EMISSIONS LEVELS VALUE FOR DIFFERENT OPTIONS OF WASTE INCINERATION

Pollutions are emitted into the atmosphere from incineration of municipal waste. The emissions depends on the type of fuel, its physico-chemical parameters, combustion's techniques and efficiency of gas cleaning systems. Waste incinerating plants have a duty to comply with european emission standards. Open burning emissions of pollutants is much higher than for incinerating. The study compares the emission of pollutants in the case of uncontrolled and controlled burning of waste.