

EMISJA ZE WSPÓŁSPALANIA WĘGLA I STAŁYCH ODPADÓW KOMUNALNYCH W DOMOWYM KOTLE CO

Ewelina Maria Cieślik¹, Tomasz Konieczny¹

¹ Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, ul. Marii Skłodowskiej-Curie 34, 41-819 Zabrze, e-mail: ewelina.cieslik@ipis.zabrze.pl

STRESZCZENIE

Współspalanie węgla i stałych odpadów komunalnych jest zjawiskiem społecznym, stanowiącym poważne źródło emisji substancji szkodliwych do powietrza. Przeprowadzono badania porównawcze współspalania węgla kamiennego z poszczególnymi frakcjami stałych odpadów komunalnych (m.in. makulatura, PE, PCV) w kotle CO o mocy 18 kW wyposażonym w automatyczny podajnik paliwa. Badania miały na celu porównanie parametrów spalin, zawartości pyłu (popiołu lotnego) i gazowych substancji zanieczyszczających powietrze w emitowanych spalinach z danego kotła CO. Podczas spalania pobierane były próbki emitowanego pyłu oraz analizowany był w sposób ciągły skład jakościowy i ilościowy spalin – analiza chemiczna spalin obejmowała: CO₂, CO, H₂O, SO₂, NO_x. Oznaczono ponadto stężenie pyłu w spalinach. Pobrany popiół lotny został poddany oznaczeniom zawartości węgla C – organicznego, elementarnego i całkowitego, PM10 i PM2,5 oraz zawartości 16 WWA. Wyniki zostały przeanalizowane pod względem efektywności spalania, emisji głównych zanieczyszczeń (NO_x, CO, SO₂) i popiołu lotnego oraz zaadsorbowanych na jego powierzchni WWA. Średnie stężenie emitowanego pyłu wynosiło 764 mg m⁻³, natomiast CO – 1944, SO₂ – 1256, NO_x – 555 mg m⁻³ (STP, 3% O₂, gaz suchy). Spaliny zawierały popiół lotny, ze znaczną zawartością węgla EC (średnio 31%) oraz wysokim udziałem PM10 oraz PM2,5 – odpowiednio 100 i 75% obj.

Słowa kluczowe: popiół lotny, odpady stałe, wskaźniki emisji

EMISSIONS FROM CO-COMBUSTION OF COAL AND MUNICIPAL SOLID WASTE IN DOMESTIC CENTRAL HEATING BOILER

ABSTRACT

Co-combustion of coal and solid municipal waste is a social phenomenon. It constitutes an important emission source of harmful air pollutants. The comparative research was conducted. It concerned co-combustion of coal and different types of municipal solid waste (including wastepaper, PE, PVC) in the domestic CH (central heating) boiler (18-kW power) equipped with an automatic fuel feeder. The aim of this research was to compare the parameters of flue gas, content of dust (fly ash) and gaseous air pollutants in the flue gases from the CH boiler. During the combustion were taken the fly ash samples and was continuously analyzed qualitative and quantitative composition of flue gas. Chemical analysis of flue gases included: CO₂, CO, H₂O, SO₂ and NO_x. Concentration of fly ash in the flue gas was determined. The fly ash samples were analysed for the organic, elemental and total carbon, PM10 and PM2,5, and 16 PAHs content. The results were analyzed in terms of combustion efficiency, emissions of major pollutants (NO_x, CO, SO₂) and fly ash with adsorbed of PAHs on its surface. The average concentration of emitted particulate matter was 764 mg m⁻³, and CO – 1944, SO₂ – 1256, NO_x – 555 mg m⁻³ (STP, 3% O₂, dry gas). The flue gases contain fly ash, with a significant carbon content EC (average 31%) and a high proportion of PM10 and PM2.5 – respectively 100 and 75% by volume.

Keywords: fly ash, municipal solid waste, emission factors

WSTĘP

Społeczeństwo produkuje wiele rodzajów odpadów, m.in. odpady komunalne (papier, tworzywa sztuczne, skóra, guma, żywność, tkaniny). Zwiększająca się ilość wytwarzanych odpadów skutkuje koniecznością ich unieszkodliwienia. W tym celu używana jest m.in. metoda termiczna.

Głównymi gazowymi produktami spalania paliw są CO_2 i $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$. Ponadto w spalinach występują również CO i organiczne składniki palne powstające w wyniku niecałkowitego i niezupełnego spalania paliw oraz tlenki siarki i azotu spowodowane obecnością w spalonym materiale związków siarki i azotu. Zawartość w spalonym paliwie substancji mineralnej skutkuje emisją pyłu zawierającego zaadsorbowane na nim liczne związki organiczne [Wielgosiński 2011; Łowkins 1994; Gaffney 2009, Ross 2002].

Spalanie paliw w warunkach niekontrolowanych sprzyja emisji trwałych zanieczyszczeń organicznych, zwłaszcza dioksyn i furanów (PCD-D/F) [Grochowalski 2008, Sánchez-Hervási 2005, Lemieux 2004], wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) oraz mikrozanieczyszczeń organicznych pochodzących z niepełnego rozkładu termicznego materii organicznej [Szewczyńska 2006; Estrellan 2010].

Badania nad spalaniem mieszanin domowych odpadów realizowali Nakao [2006] (małe spalanie odpadów), Lönnermark [2008], Sidhu [2005] (spalanie na otwartych przestrzeniach, Christian [2010] (wysypiska śmieci). Analizowano emisję gazowych i pyłowych zanieczyszczeń w wyniku spalania opon [Shakya 2008, EPA 2002], PE i PCV [Valavanidis 2008, Conesa 2009], papieru [Nakao 2006]. Nie badano dotychczas procesów współspalania z węglem odpadów komunalnych w rzeczywistych urządzeniach kotłowych, wyposażonych w automatyczny dozownik i podajnik paliwa. W urządzeniach, które są stosowane w instalacjach centralnego ogrzewania w małych budynkach. Dozownik paliwa, poprzez podawanie do komory spalania małej porcji paliwa, ma wpływać na polepszenie procesu spalania paliw i poprawę wskaźników emisji zanieczyszczeń.

W wielu rejonach Polski praktykuje się utylizację powstających odpadów komunalnych w domowych piecach na paliwo stałe, nieprzystosowanych do tego celu. Współspalanie węgla i stałych odpadów komunalnych jest zjawiskiem społecznym, stanowiącym poważne źródło emisji substancji szkodliwych do powietrza.

W roku 2012 około 49% gospodarstw domowych w Polsce ogrzewało pomieszczenia urządzeniami grzewczymi na paliwa stałe. Najczęściej użytkowane były jedno- i dwufunkcyjne kotły centralnego ogrzewania (około 35% gospodarstw) [GUS 2014]. Można przypuszczać, że dzięki przeprowadzanym na szeroką skalę wymianom starych kotłów na „piece na ekogroszek”, duża część z tych urządzeń to unowocześnione kotły wyposażone w podajnik paliwa.

Dlatego zasadne wydaje się przeprowadzenie badań nad emisją zanieczyszczeń w wyniku spalania paliw w wyżej wspomnianych kotłach.

Prowadzone badania miały na celu porównanie parametrów spalin, zawartości popiołu lotnego i gazowych substancji zanieczyszczających powietrze w emitowanych spalinach z kotła CO na paliwo stałe, wyposażonym w podajnik paliwa, w wyniku spalania węgla i współspalania węgla z poszczególnymi frakcjami odpadów komunalnych.

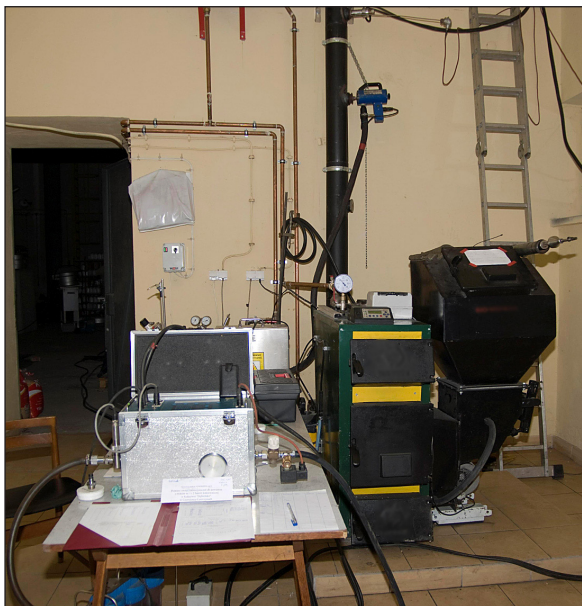
METODY I WYNIKI

Przeprowadzono badania porównawcze współspalania węgla kamiennego z poszczególnymi frakcjami stałych odpadów komunalnych (makulatura, PE (polietylen), PCV (poli(chlorok winylu), opony, EPDM (terpolimer etylen/propylen/dien)) w kotle CO o mocy 18 kW wyposażonym w automatyczny podajnik paliwa. Ogólny widok stanowiska badawczego ukazuje rysunek 1. Udział odpadów komunalnych w paliwie wynosił 10% wag.

Podczas spalania pobierano próbki emitowanego popiołu lotnego oraz analizowano w sposób ciągły skład jakościowy i ilościowy spalin – analiza chemiczna spalin obejmowała: CO_2 , CO, H_2O , SO_2 , NO_x . Oznaczono ponadto stężenie pyłu w spalinach. Pobrany popiół lotny został poddany oznaczeniom zawartości węgla C – organicznego, elementarnego i całkowitego, PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ oraz zawartości WWA.

Zgodnie z normą PN-Z-04030-07:1994 „Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną” dokonano pomiaru prędkości spalin. Rejestracja danych odbywała się w jednoczesnych odstępach czasu przez cały czas prowadzenia pomiarów.

Stężenie i strumień masy popiołu lotnego wraz z parametrami fizyko-chemicznymi spalin oznaczano zgodnie z PN-Z-04030-07:1994 „Po-



Rys. 1. Ogólny widok stanowiska badawczego
Fig 1. General view of the research boiler installation

miar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną”. W celu oznaczenia masy pyłu lotnego stosowano filtry firmy WHATMAN: płaskie z włókna szklanego typu GF/A oraz kwarcowe typu QM-A. Stosowana była filtracja wewnętrzna – filtr umieszczony był w oprawie wewnątrz komina odprowadzającego spaliny. Dzięki czemu uniknięto kondensacji pary wodnej na filtrach.

Stężenia CO_2 , CO , H_2O , SO_2 , NO określano zgodnie z PN-ISO 10396 „Emisja ze źródeł stacjonarnych. Pobieranie próbek do automatycznego pomiaru stężenia składników gazowych” analizatorem spalin DX-4000 Gaset z cominutową rejestracją danych.

Popiół lotny został poddany analizie na zawartość węgla C – organicznego, elementarnego i całkowitego analizatorem Sunset Laboratory Inc. metodą termooptyczną. Próbki popiołu zostały termicznie zdesorbowane z filtra w obojętnej atmosferze helu po czym utlenione w procesie z kontrolowanym wzrostem temperatury.

Analizy granulometryczne próbek popiołu lotnego zostały wykonane laserowym analizatorem cząstek (Analysette 22 firmy Fritsch), wyposażonym w laser helowo-neonowy, system optyczny, przepływową celę pomiarową oraz jednostkę dyspergującą.

Filtry z popiołem lotnym ekstrahowano w dichlorometanie w łaźni ultradźwiękowej ze stałym przepływem wody chłodzącej 2 razy po 30 minut.

Ekstrakty oczyszczano, zateżono i poddano analizie jakościowo-ilościowej na zawartość WWA metodą chromatografii gazowej sprzężonej z detektorem mas GC-MS (GC-MS QP-2010 Plus Shimadzu) z użyciem wzorca wewnętrznego.

W tabeli 1 zebrano uśrednione wyniki pomiarów. Stężenia CO , SO_2 , NO_x , pyłu podano w odniesieniu do warunków standardowych suchych, w przeliczeniu na 3% tlenu.

Udział tlenu w spalinach wahał się od 15,4 do 17%, natomiast CO_2 od 2,7 do 6,2%. Najniższe stężenie CO odnotowano przy spalaniu węgla a najwyższe przy współspalaniu węgla z dodatkiem 10% opon. Przy spalaniu tej mieszanki odnotowano również najwyższe stężenie SO_2 w spalinach. Stężenie tlenków azotu występowało na podobnym poziomie przy spalaniu wszystkich mieszanin paliw. Wysokie stężenie popiołu lotnego odnotowano w spalinach ze spalania węgla z dodatkiem 10% PCV.

Wartości PM_{10} we wszystkich badanych popiołach lotnych ze spalania mieszanek paliw wynosiła około 100%, natomiast występowały różnice przy frakcjach pyłu $\text{PM}_{2,5}$. Najwyższa zawartość $\text{PM}_{2,5}$ występowała przy współspalaniu węgla z makulaturą, a najniższa przy współspalaniu węgla z PCV (tabela 2). Odnotowano również przewagę występowania form węgla EC w badanych popiołach lotnych, co wiąże się z wysoką zawartością sadzy w tych pyłach.

Tabela 3 przedstawia uzyskane wyniki wskaźników emisji zanieczyszczeń przy współspalaniu węgla i odpadów komunalnych. Najniższe wskaźniki emisji zarówno dla popiołu lotnego, SO_2 , NO_x oraz CO odnotowano przy współspalaniu węgla z makulaturą. Najwyższy wskaźnik emisji CO odnotowano przy współspalaniu węgla z oponami. Wskaźnik emisji NO_x wahał się 1,5 do 4,2 g/kg paliwa.

WNIOSKI

Prezentowano wyniki badań efektywności spalania, emisji głównych zanieczyszczeń (NO_x , CO , SO_2) i popiołu lotnego oraz zaadsorbowanych na jego powierzchni WWA. Wysoka zawartość węgla EC, czyli sadzy, która może być nośnikiem substancji toksycznych i kancerogennych, i wysoka zawartość PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$, które mogą przenikać do organizmu człowieka, w badanych popiołach lotnych oraz wskaźniki emisji popiołu

Tabela 1. Uśrednione wyniki przeprowadzonych pomiarów**Table 1.** Averaged results of the measurements

| Wyszczególnienie | O ₂ | CO ₂ | CO | SO ₂ | NO _x | Popiół lotny |
|------------------|----------------|-----------------|------|-----------------|--|--------------|
| | [%] | | [%] | | [mg m ⁻³ _{3%O₂}] | |
| Węgiel kamienny | 15,5 | 6,2 | 914 | 1401 | 515 | 517 |
| Makulatura 10% | 15,8 | 4,5 | 2208 | 1160 | 605 | 585 |
| EPDM 10% | 15,4 | 4,7 | 1552 | 1157 | 591 | 595 |
| Opony 10% | 15,9 | 4,3 | 3318 | 1666 | 584 | 406 |
| PE 10% | 15,4 | 4,7 | 1065 | 1088 | 545 | 614 |
| PCV 10% | 17,0 | 2,7 | 1265 | 931 | 510 | 1360 |

Tabela 2. Udział PM₁₀, PM_{2,5}, form węgla C [%] oraz stężenie WWA [ug/g_{pyłu}] w emitowanym popiele lotnym**Table 2.** Percentage of the PM₁₀, PM_{2,5}, C forms [%] and PAH concentration [ug/g_{fly ash}] in the emitted fly ash

| Wyszczególnienie | Węgiel kamienny | Makulatura | EPDM | Opony | PE | PCV |
|-------------------|-----------------|------------|--------|--------|--------|-------|
| | | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% |
| PM ₁₀ | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 99,90 |
| PM _{2,5} | 75,30 | 86,07 | 74,82 | 72,07 | 81,49 | 67,99 |
| OC | 28,4 | 10,7 | 23,8 | 21,6 | 14,9 | 34,5 |
| EC | 32,4 | 18,7 | 34,7 | 44,4 | 17,1 | 28,4 |
| Σ16WWA | 327 | 216 | 359 | 107 | 496 | 377 |

Tabela 3. Wskaźniki emisji [g/kg_{paliwa}]**Table 3.** Emission factors [g/kg_{fuel}]

| Wyszczególnienie | Węgiel kamienny | Makulatura | EPDM | Opony | PE | PCV |
|------------------|-----------------|------------|------|-------|-----|-----|
| | | 10% | 10% | 10% | 10% | 10% |
| Popiół lotny | 3,6 | 1,5 | 3,7 | 2,0 | 4,2 | 5,9 |
| SO ₂ | 10,2 | 2,9 | 6,4 | 7,7 | 8,4 | 3,9 |
| NO _x | 3,8 | 1,5 | 3,3 | 2,7 | 4,2 | 2,1 |
| CO | 6,7 | 5,6 | 8,6 | 15,3 | 8,2 | 5,3 |

lotnego ze współspalania węgla z odpadami komunalnymi świadczy o dużej szkodliwości takiego spalania na zdrowie człowieka.

Odnotowane niskie wskaźniki emisji popiołu lotnego, SO₂, NO_x oraz CO przy współspalaniu węgla z makulaturą, przy równoczesnym wysokim udziale PM_{2,5} w powstałym popiele lotnym również nie pozwalają uznać, że spalanie makulatury skutkuje bezpieczną dla zdrowia ludzi emisją zanieczyszczeń do powietrza. Na podstawie uzyskanych danych można stwierdzić, że polepszenie procesu spalania paliw związane z zastosowaniem podajnika paliwa w kotłach CO, nie zapobiega emisji zanieczyszczeń pyłowych i gazowych do powietrza.

Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/11/N/ST10/00995

LITERATURA

1. Christian T.J., Yokelson R.J., C'ardenas B., Molina L.T., Engling G., Hsu S.-C. (2010); Trace gas and particle emissions from domestic and industrial-biofuel use and garbage burning in central Mexico; Atmospheric Chemistry and Physics; 10; 565–584.
2. Conesa J.A., Font R., Fullana A., Martín-Gullón I., Aracil I., Gálvez A., Moltó J., Gómez-Rico M.F. (2009); Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis; 84(1); 95–102.
3. EPA Report; Emissions of Organic Air Toxics from Open Burning; EPA-600/R-02-076; October 2002.
4. Estrellan C.R., Iino F. (2010); Toxic emissions from open burning; Chemosphere; 80; 193–207.
5. Gaffney J. S., Marley N. A. (2009); The impacts of combustion emissions on air quality and climate – From coal to biofuels and beyond; Atmospheric Environment; 43(1); 23–36
6. Grochowalski A, Koniecznyński J. (2008); PCDDs/

- PCDFs, dl-PCBs and HCB in the flue gas from coal fired CFB boilers; *Chemosphere*; 73(1); 97–10.
7. GUS, Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2012 roku, Warszawa 2014.
 8. Lemieux P.M., Lutes Ch.C., Santoianni D.A. (2004); Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review; *Progress in Energy and Combustion Science*; 30; 1–32.
 9. Lönnemark A., Blomqvist P., Marklund S. (2008); Emissions from simulated deep-seated fires in domestic waste; *Chemosphere*; 70; 626–639.
 10. Łowkins J.M., Jagiełło R., Kaczmarek K.K., Surowiec M. (1994); Termiczna utylizacja odpadów przemysłowych i ich oddziaływanie na środowisko; *Ochrona środowiska*; 3–4(54–55); 57–64.
 11. Nakao T., Aozasa O., Ohta S., Miyata H. (2006); Formation of toxic chemicals including dioxin-related compounds by combustion from a small home waste incinerator; *Chemosphere*; 62; 459–468.
 12. Ross A.B., Jones J.M., Chaiklangmuang S., Pourkashanian M., Williams A., Kubica K., Andersson J.T., Kerst M., Danihelka P., Bartle K.D. (2002); Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace; *Fuel*; 81(5); 571–582.
 13. Sánchez-Hervás L., Armesto J.M., Ruiz-Martínez E., Otero-Ruiz J., Pandelova M., K.W. Schramm (2005); PCDD/PCDF emissions from co-combustion of coal and PVC in a bubbling fluidised bed boiler; *Fuel*; 84(17); 2149–2157.
 14. Shakya P.R., Shrestha P., Tamrakar C.S., Bhattarai P.K. (2008); Studies on potential emission of hazardous gases due to uncontrolled open-air burning of waste vehicle tyres and their possible impacts on the environment; *Atmospheric Environment*; 42; 6555–6559.
 15. Sidhu S., Brian Gullett B., Striebich R., Klosterman J., Contreras J., DeVito M. (2005); Endocrine disrupting chemical emissions from combustion sources: diesel particulate emissions and domestic waste open burn emissions; *Atmospheric Environment*; 39; 801–811.
 16. Szewczyńska M., Ekiert E., Pośniak M. (2006); Niekontrolowane procesy spalania jako źródła powstawania dioksyn i furanów; *Bezpieczeństwo pracy*; 1; 8–11.
 17. Wielgosiński G.; Przegląd technologii termicznego przekształcania odpadów; *Nowa Energia*; 1/2011.
 18. Valavanidis A., Iliopoulos N., Gotsis G., Fiotakis K. (2008); Persistent free radicals, heavy metals and PAHs generated in particulate soot emissions and residue ash from controlled combustion of common types of plastic; *Journal of Hazardous Materials*; 156; 277–284.