

*Marcin Kantorek<sup>1)</sup>, Henryk Karcz<sup>2)</sup>, Wojciech Komorowski<sup>2)</sup>,  
Krzysztof Wierzbicki<sup>3)</sup>*

*<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska ITCiMP*

*<sup>2)</sup> ZBUS-TKW Combustion Sp. z o.o.*

*<sup>3)</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach*

*Wyższa Szkoła Infrastruktury i Zarządzania w Warszawie*

## **WYBRANE PROBLEMY UNIESZKODLIWIANIA ODPADÓW KOMUNALNYCH Z ZAWARTOŚCIĄ BIOMASY**

### **Streszczenie**

Oplaty związane ze składowaniem odpadów komunalnych na składowiskach systematycznie wzrastają i tak w 2007 r. wynosiły one  $15 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ , w 2008 r. –  $75 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ , w 2009 r. –  $100 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ , w 2010 r. –  $104 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ , a w 2013 r. przewiduje się, że opłaty te będą wynosić  $245 \text{ zł}\cdot\text{t}^{-1}$ . W związku z powyższym rozpoczęto opracowywanie innych technologii unieszkodliwiania odpadów komunalnych. Jedną z nich jest termiczne unieszkodliwianie, odbywające się w odpowiednio przystosowanych piecach, zazwyczaj rusztowych. Mając na uwadze rozwój tego rodzaju technologii badaniom procesu spalania poddano 13 rodzajów odpadów, wchodzących w skład odpadów komunalnych. Określono charakterystyczne czasy spalania oraz charakterystyczne temperatury popiołu, co obrazuje zachowanie się substancji palnej i substancji mineralnej odpadów podczas procesu spalania.

**Słowa kluczowe:** biomasa, odpady, spalanie

### **Wstęp**

Skład morfologiczny odpadów komunalnych w dużej mierze jest uzależniony od regionu kraju oraz od rodzaju aglomeracji. Odpady, pochodzące z przemysłowej, zurbanizowanej części kraju, morfologicznie znacznie różnią się od odpadów pochodzących z obszarów wiejskich czy małomiasteczkowych [Eymontt, Wierzbicki 2009; Wierzbicki 2007a]. Niezależnie od tych czynników można jednak z całą pewnością przyjąć, że głównymi składnikami morfologicznymi odpadów, niezależnie od ich udziału masowego są substancje organiczne i nieorganiczne. Z punktu widzenia procesów spalania interesujące są jedynie odpady palne [Bulewicz, Jemicka 1997].

Parametrami substancji palnej, które w decydujący sposób wpływają na proces zapłonu są zawartość wilgoci i popiołu. Zawartość wilgoci, głównie sposób jej rozmieszczenia oraz struktura fizyczna substancji mineralnej ma duży

wpływ na szybkość termicznego rozkładu i szybkość wydzielania gazów pirolitycznych. Wpływ oddziaływania substancji mineralnej objawia się w różny, często nieprzewidywalny sposób zarówno w czasie suszenia, w trakcie wyjścia części lotnych, jak i w fazie spalania karbonizatu. Pomijając różne odstępstwa, można stwierdzić, że wzrost zawartości wilgoci i substancji mineralnej, prowadzi do wzrostu czasu zapłonu substancji palnej. Składnikiem paliwa, który decyduje o czasie całkowitego wypalania danej substancji, jest karbonizat. Ilość karbonizatu pozostałego po odgazowaniu oraz jego struktura fizykochemiczna (skład chemiczny i sposób ułożenia siatek krystalicznych węgla) decyduje o szybkości wypalania się danego składnika morfologicznego odpadów. Czas wypalania poszczególnych struktur morfologicznych wpływa na strukturę całego złoża wypalonych odpadów, która z kolei wpływa w zdecydowany sposób na powstałą stratę kominową oraz stratę niecałkowitego spalania w żużlu. Pozostałość karbonizatu po procesie odgazowania jest więc bardzo ważną cechą fizykochemiczną składników morfologicznych, która w bardzo istotny sposób wpływa na sprawność termiczną oraz sprawność ekologiczną procesu termicznej utylizacji. Obniżenie sprawności termicznej wynika ze wzrostu straty kominowej i straty niecałkowitego spalania, a pogorszenie sprawności ekologicznej wynika ze wzrostu zawartości koksiku w żużlu i popiele.

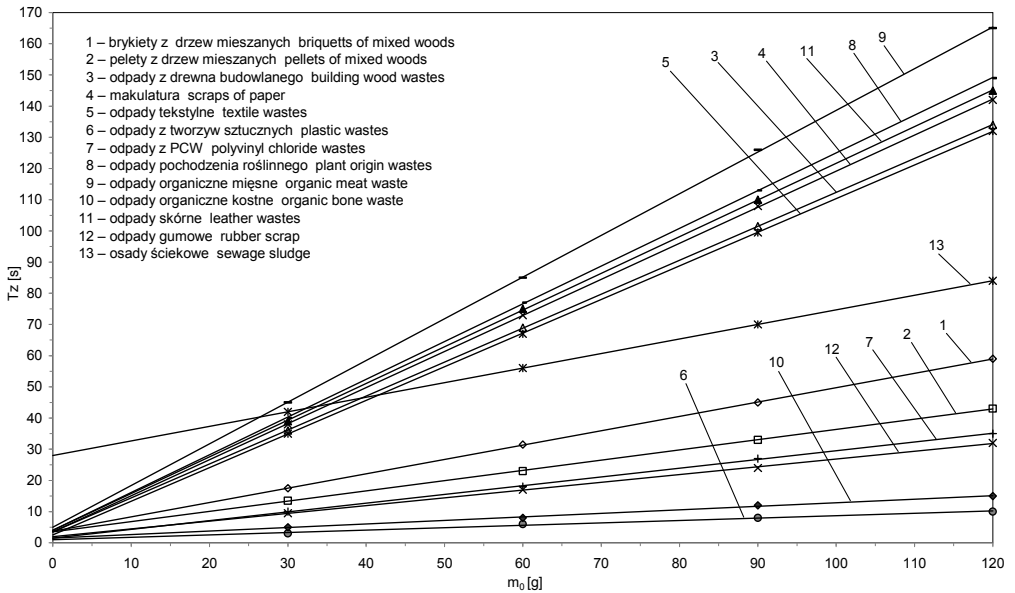
### **Badania procesu spalania**

Badania procesu spalania prób wyodrębnionych gatunków morfologicznych odpadów przeprowadzono na stanowiskach badawczych, w temperaturze 1000°C, w warunkach przepływu powietrza przez warstwę spalanej substancji, zgodnie z metodyką opisaną w pracach autorów [Karcz i in. 2006; 2009a, b], a analizę dokładności wykonywanych pomiarów według Zembrzuskiego i Karcz [1970] oraz Zembrzuskiego i in. [1975].

Zależność czasu zapłonu badanych gatunków morfologicznych w komorze spalania o temperaturze  $t_p = 1000^\circ\text{C}$  (temperaturę tę przyjęto jako średnią wartość występującą w warunkach termicznej utylizacji odpadów na ruszcie, w zależności od masy próbki), przedstawiono na rysunku 1. Czas zapłonu rośnie wraz ze wzrostem masy próbki, co jest zjawiskiem towarzyszącym spalaniu wszelkiego rodzaju paliw. O czasie zapłonu decyduje głównie zawartość wilgoci i szybkość termicznego rozkładu substancji organicznej.

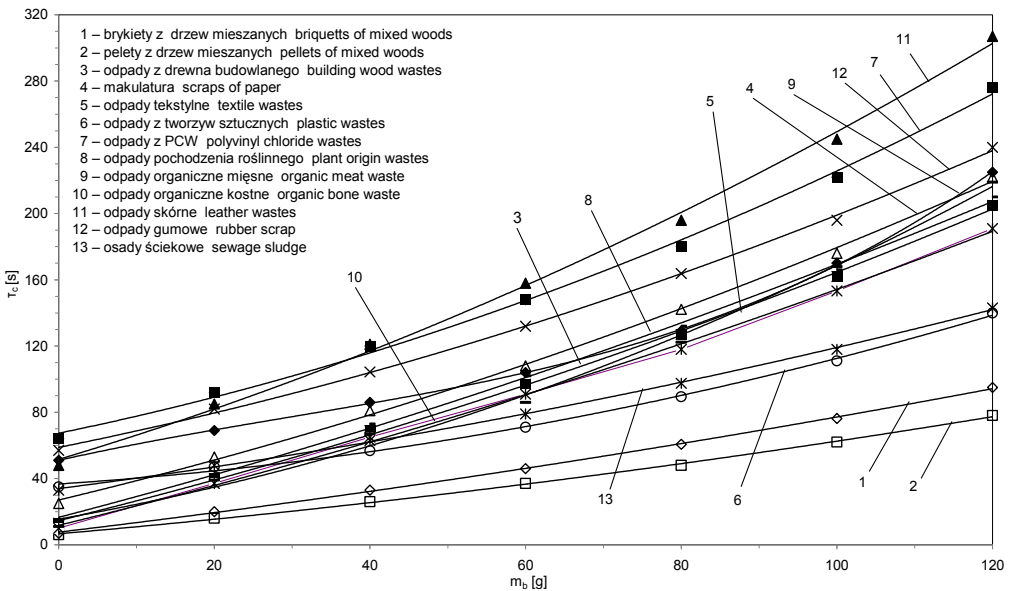
Czas zapłonu ustalonej masy próbki rośnie proporcjonalnie ze wzrostem zawartości wilgoci w próbce wejściowej. W warunkach kotłów rusztowych, zapłon poszczególnych frakcji morfologicznych będzie rozciągnięty na znaczną długość rusztu, nawet w stosunku jak 1:20.

Całkowity czas spalania substancji badanych odpadów, w zależności od ich masy, przedstawiono na rysunku 2. Całkowity czas wypalania Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE), pochodzących z organicznych



Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 1. Czas zapłonu w zależności od masy próbki  
 Fig. 1. Time of ignition depending on the sample weight

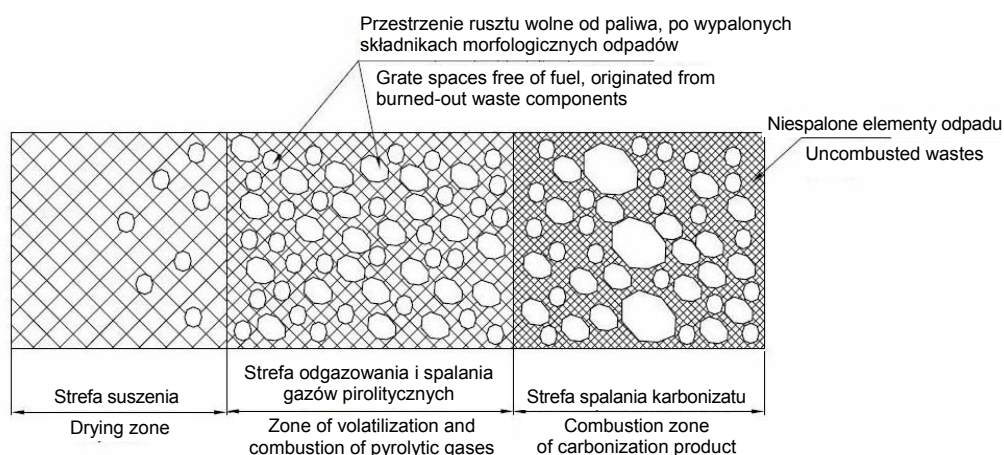


Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 2. Całkowity czas spalania w zależności od masy próbki  
 Fig. 2. Total time of incineration depending on the sample weight

substancji roślinnych jest 5-krotnie krótszy od czasu spalania odpadów pochodzących ze skóry, PCW i gumy. Odpady pochodzące z tworzyw sztucznych i osady ściekowe spalają się ok. 1,5 razy dłużej od peletów i brykietów pochodzenia roślinnego.

Wypalone substancje odpadów stanowią wolne przestrzenie w warstwie paliwa na ruszcie, przez które swobodnie przepływa powietrze przeznaczone do spalania. Powietrze to bez specjalnych oporów hydraulicznych przepływa z nadmierną prędkością, powodując dodatkowe obniżenie temperatury nieprzereagowanych karbonizatów, skutkiem czego następuje dalsze zmniejszenie szybkości spalania. Nierównomierna szybkość wypalania różnych gatunków morfologicznych powoduje dezorganizację struktury warstwy spalających się odpadów na ruszcie, co obrazuje rysunek 3. W wyniku takiej dezorganizacji procesu spalania rośnie strata kominowa.

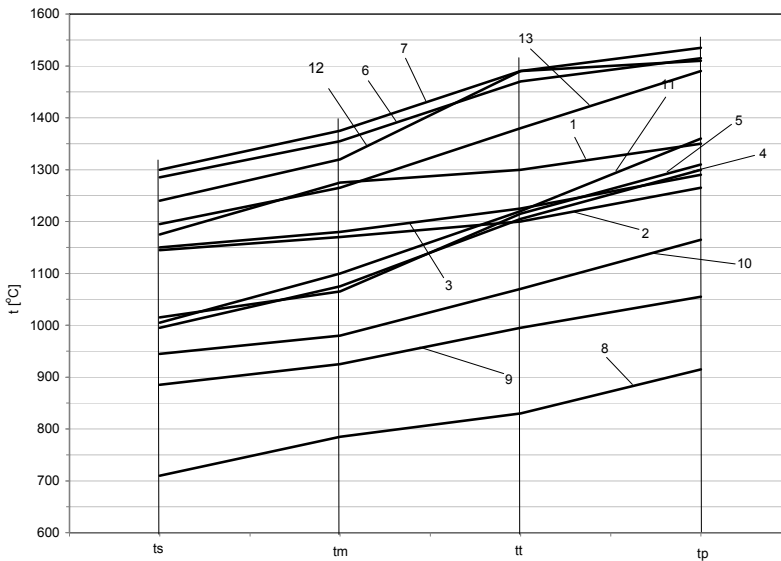


Źródło: własne. Source: own.

Rys. 3. Dezorganizacja struktury warstwy spalających się odpadów  
Fig. 3. Structure disruption of the waste layer during incineration

### Charakterystyki fizyczne popiołu pochodzącego z różnego rodzaju odpadów morfologicznych

Charakterystyczne temperatury popiołu badanych struktur morfologicznych odpadów przedstawiono na rysunku 4. Najwyższe temperatury mięknięcia są charakterystyczne dla odpadów pochodzących z tworzyw sztucznych, PCW i gumy. Temperatura mięknięcia popiołu, pochodzącego z tworzyw sztucznych, wynosi ok. 1300°C. Temperatura mięknięcia popiołu pochodzącego z drewna, makulatury, tekstyliów i skór mieści się w przedziale 1000–1200°C. Temperatura mięknięcia odpadów pochodzenia roślinnego to ok. 710°C, odpadów mięsnych – 890°C, a odpadów kostnych – 950°C.



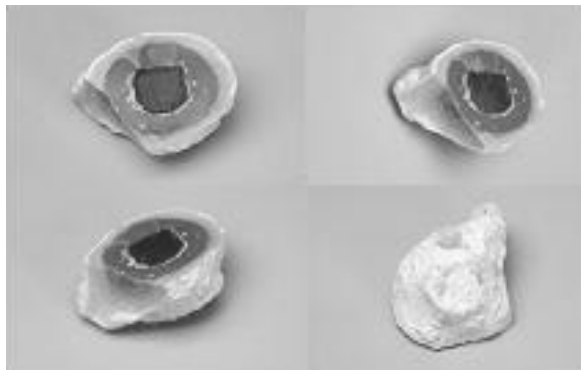
1 – brykiety z drzew mieszanych briquetts of mixed woods; 2 – pelety z drzew mieszanych pellets of mixed woods; 3 – odpady z drewna budowlanego building wood wastes; 4 – makulatura scraps of paper; 5 – odpady tekstylne textile wastes; 6 – odpady z tworzyw sztucznych plastic wastes; 7 – odpady z PCW polyvinyl chloride wastes; 8 – odpady pochodzenia roślinnego plant origin wastes; 9 – odpady organiczne mięsne organic meat waste; 10 – odpady organiczne kostne organic bone waste; 11 – odpady skórne leather wastes; 12 – odpady gumowe rubber scrap; 13 – osady ściekowe sewage sludge

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Rys. 4. Charakterystyczne temperatury popiołu:  $t_s$  – temperatura spiekania,  $t_m$  – temperatura mięknięcia,  $t_t$  – temperatura topnienia,  $t_p$  – temperatura płynięcia  
 Fig. 4. Characteristic ash temperatures:  $t_s$  – sintering temperature,  $t_m$  – softening temperature,  $t_t$  – fusion temperature,  $t_p$  – flow temperature

Istotne znaczenie ma również temperatura topnienia i płynięcia popiołu. Jej małe wartości, szczególnie w przypadku odpadów kostnych, powodują istotną dezorganizację procesu spalania odpadów o niskiej reakcyjności. Płynna substancja popiołu pochodzącego ze spalania, np. odpadów kostnych, zatapia bowiem niespalony karbonizat pochodzący z odpadów gumowych czy tekstylnych. Oblepione płynnym popiołem ziarna karbonizatów są zatopione wewnątrz powłoki żużlowej. Proces spalania zostaje przerwany, a wewnątrz powstaje niedopał w postaci niespalonego karbonizatu, co dokładnie widać na zdjęciu 1.

Przedstawiona dokumentacja zdjęciowa jest charakterystycznym przypadkiem spalania odpadów komunalnych, składających się z różnych gatunków morfologicznych, różniących się zarówno substancją organiczną, jak i substancją mineralną.



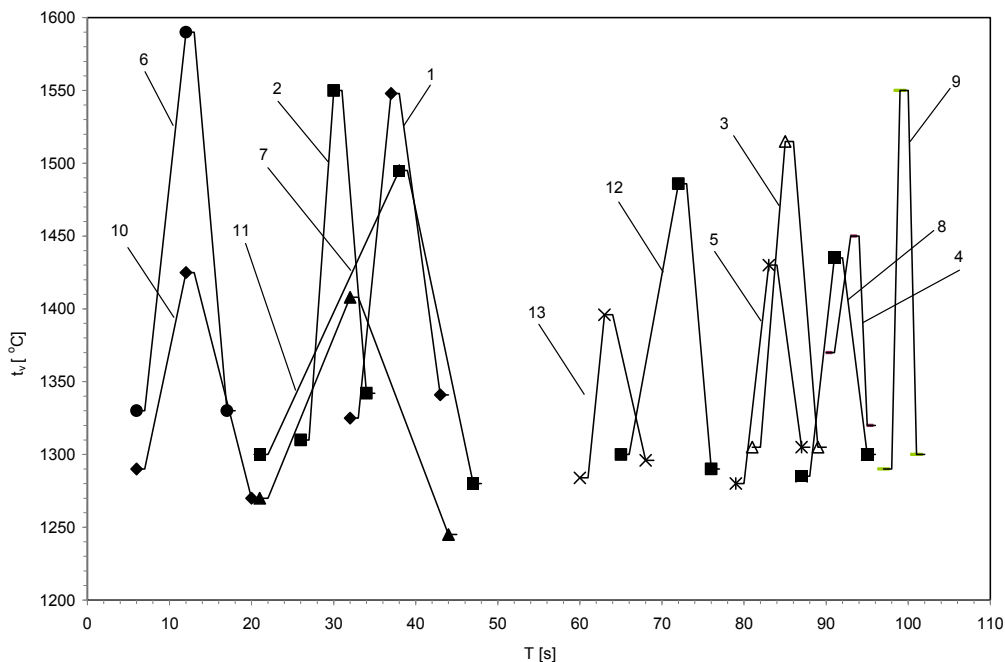
Fot. 1. Niedopał powstały w żużlu (fragment żużla pobranego spod rusztu kotła rusztowego spalarni odpadów w Warszawie)

Fig. 1. Under-burnt residue formed in slag (a piece of slag sampled from under the grate of stocker-fired boiler in Warsaw)

Źródło: fot. W. Komorowski. Source: fot. W. Komorowski.

### Wpływ spalania gazów pirolitycznych na proces wypalania odpadów

Proces wydzielania i spalania gazów pirolitycznych odpadów podawanych do kotłów rusztowych odbywa się w przedniej części kotła pod przednim sklepieniem, gdzie przebiega proces suszenia i odgazowania. Przestrzeń na ruszcie, w której odbywa się ten proces zależy od rodzaju odmiany morfologicznej odpadów, co charakteryzują zależności przedstawione na rysunku 1. Z przedstawionej na rysunku 5 zależności, określającej temperaturę spalania gazów pirolitycznych, uwarunkowanej czasem trwania procesu wynika, że w tym samym czasie i w tym samym miejscu na ruszcie będą się spalać gazy pirolityczne pochodzące z różnych odmian morfologicznych odpadów. Z badań wynika, że podczas procesu spalania odpadów komunalnych w kotłach rusztowych, na ruszcie występują wyraźne trzy strefy spalania gazów pirolitycznych, pochodzących z różnych odmian morfologicznych odpadów. Strefy te są wyraźnie przesunięte w czasie i w przestrzeni. Nie jest to jednak podział sztywny, jest on bowiem ściśle uzależniony od zawartości wilgoci i granulacji. Przedstawione na rysunku 5 zależności, wskazują jaka temperatura może wystąpić w danej strefie rusztu i jakie może to mieć konsekwencje dla pozostałej części substancji organicznej i nieorganicznej odpadów. Negatywnym skutkiem takiego procesu spalania odpadów komunalnych na ruszcie jest zatapianie substancji palnej odpadów przez stopioną substancję mineralną popiołu. Proces spalania mieszaniny odpadów komunalnych w kotłach rusztowych jest procesem niecałkowitym i zawsze prowadzi do niecałkowitego spalania i obecności niespalonych części (paliwa) odpadów w żużlu, z reguły przekraczających 5% udziału masowego żużlu. Powstaje w ten sposób odpad, który musi być składowany na specjalnych składowiskach lub utylizowany. Wielkość niedopału w dużej mierze zależy od składu morfologicznego odpadów i może stanowić nawet 10%.



1 – brykiety z drzew mieszanych briquetts of mixed woods; 2 – pelety z drzew mieszanych pellets of mixed woods; 3 – odpady z drewna budowlanego building wood wastes; 4 – makulatura scraps of paper; 5 – odpady tekstylne textile wastes; 6 – odpady z tworzyw sztucznych plastic wastes; 7 – odpady z PCW polyvinyl chloride wastes; 8 – odpady pochodzenia roślinnego plant origin wastes; 9 – odpady organiczne mięsne organic meat waste; 10 – odpady organiczne kostne organic bone waste; 11 – odpady skórne leather wastes; 12 – odpady gumowe rubber scrap; 13 – osady ściekowe sewage sludge

Źródło: wyniki własne. Source: own. study.

Rys. 5. Temperatury spalania gazów pirolitycznych badanych prób  
Fig. 5. Combustion temperatures of pyrolytic gases in tested samples

## Całkowite, zupełne oraz ekologiczne spalanie odpadów komunalnych

Przedstawione wyniki badań fizykochemicznych i kinetycznych wybranych odmian morfologicznych odpadów w sposób jednoznaczny wykazały, że nie można prowadzić procesu termicznej utylizacji odpadów komunalnych, stanowiących (dowolną) mieszaną różnych struktur morfologicznych, w czasie ciągłego procesu przebiegającego w jednej przestrzeni reakcyjnej.

Nakładanie się procesów termicznych, przebiegających w fazie gazowej i stałej, powoduje powstanie niekorzystnych zjawisk, prowadzących z jednej strony do strat w postaci niecałkowitego spalania fazy stałej karbonizatu, a z drugiej strony do powstania niekorzystnych, z ekologicznego punktu widzenia, związków gazowych w postaci tlenków azotu, tlenków siarki oraz chlorowodoru. Powyższych zjawisk nie da się uniknąć, spalając odpady w kotłach rusztowych, ponieważ są to charakterystyczne własności technologiczne dla tego typu układów reakcyjnych. Rozwiązaniem problemu jest

układ ciągłego procesu termicznego rozkładu, rozdzielonego jednocześnie w czasie i w przestrzeni. Tak zaprojektowany układ termicznej utylizacji odpadów komunalnych występuje w układzie technologicznym typu „K”, w którym proces suszenia i pirolizy przebiega w komorze obrotowej, a proces spalania w komorze fluidalnej ze stałą kontrolą temperatury. W komorze obrotowej następuje rozkład substancji odpadów na fazę gazów pirolitycznych i stałą fazę karbonizatu. Gazy pirolityczne spalają się w górnej części komory fluidalnej w obecności powietrza doprowadzanego w kilku strefach tak, aby temperatura płomienia nie przekraczała 1250–1300°C. Karbonizat i popiół są odprowadzane do złoża fluidalnego, które zamyka komorę fluidalną od spodu. Karbonizat w złożu spala się w określonej atmosferze tlenowej w określonej temperaturze, kontrolowanej przez skład gazu fluidyzacyjnego i koncentrację karbonizatu w złożu. Warunki termiczne są zawsze takie, aby temperatura złoża nie przekroczyła temperatury mięknięcia popiołu. Gazy spalinowe na wylocie z komory fluidalnej są częściowo oczyszczone z popiołu lotnego, a całkowity proces dopalania ewentualnie niespalonych gazów palnych i koksiku lotnego zachodzi w strefie popromiennej, płomienia olejowego lub gazowego, umieszczonego w komorze dopalania [Myczko i in. 2010; Wierzbicki i in. 2007b].

## **Wnioski**

Odmiany morfologiczne odpadów komunalnych znacznie różnią się pod względem własności kinetycznych (różnice w czasach zapłonu i całkowitych czasach spalania), co w dużym stopniu utrudnia ich spalanie jako mieszaniny paliwowej w kotłach rusztowych. Ponadto spore problemy są również z substancją mineralną popiołów powstałych po spaleniu odpadów z uwagi na dość znaczne różnice w wartościach charakterystycznych temperatur popiołów, przynależnych do różnych odmian morfologicznych, wchodzących w skład odpadów komunalnych. W wyniku tych różnic następuje szlakowanie powierzchni ogrzewalnych kotła oraz zatapianie koksiku w płynnym żużlu, powodując powstanie żużla o zawartości części palnych powyżej 5%, który staje się odpadem przeznaczonym do składowania lub dalszej utylizacji.

Podczas spalania odpadów komunalnych w kotle rusztowym następuje znaczny wzrost straty kominowej i straty niecałkowitego spalania w żużlu, powodujących zmniejszenie sprawności termicznej kotła nawet o kilka procent. Aby proces termicznej utylizacji odpadów komunalnych był wysoko sprawny termicznie i bezpieczny ekologicznie, musi przebiegać w warunkach rozdziału w czasie i przestrzeni procesów termicznego rozkładu odpadów oraz spalania gazów pirolitycznych i karbonizatu.



## **Bibliografia**

Bulewicz E.M., Jemicka E. 1997. Spalanie paliw odpadowych – problemy chemiczne. W: Paliwa z odpadów. Pr. zbior. Red. J.W. Wandrasz, J. Nadziałkiewicz. Gliwice. Pol. Śląska.

Eymontt A., Wierzbicki K. 2009. Wybrane problemy unieszkodliwiania odpadów w rolnictwie. Pamiętnik Puławski. Z. 151/II. Puławy. IUNG s. 451–464.

Karcz H., Jodkowski W., Krzysztof M., Folga K., Kozakiewicz A., Charusta M. 2006. Wykorzystanie technologii „KJN” do termicznej utylizacji osadów ściekowych. W: Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Konferencje. 10<sup>th</sup> International Conference on Boiler Technology s. 74–91.

Karcz H., Kantorek M., Kozakiewicz A., Folga K., Grabowicz M. 2009a. Możliwości wykorzystania mączki mięsno-kostnej jako paliwa w instalacjach energetycznych. Energetyka. Nr 1 s. 39–47.

Karcz H., Kantorek M., Folga K., Butmankiewicz T., Kozakiewicz A., Kotulski A. 2009b. Spalanie racjonalną metodą utylizacji odpadów. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja. Nr 3 (cz. 1) s. 3–7. Nr 4 (cz. 2) s. 6–9.

Myczko A., Karcz H., Wierzbicki K. 2010 Termiczne przekształcanie odpadów zwierzęcych na przykładzie mączki zwierzęcej. Mazowsze. Studia Regionalne. Nr 5 s. 119–127.

Wierzbicki K. 2007a. Czy osady ściekowe mogłyby być zaliczane do biomasy. Instal. Nr 11 s. 50–57.

Wierzbicki K., Karcz H., Nunberg J. 2007b. Instalacja KJN do termicznej utylizacji odpadów i spalania biomasy. Problemy Inżynierii Rolniczej. Nr 2. s. 87–97.

Zembrzuski M., Karcz H. 1970. Foto-pirometryczny pomiar temperatury spalania ziaren pyłu węglowego. Archiwum Procesów Spalania. Nr 3–4 s. 355–361.

Zembrzuski M., Karcz H., Chrząszcz St. 1975. A recognizing investigation on combustion of petrographical structures of coal rank 32 under the conditions of eMHD chamber. IV<sup>th</sup> International Symposium on Combustion Processes. Częstochowa.

## **SELECTED PROBLEMS OF NEUTRALIZING MUNICIPAL WASTES WITH BIOMASS CONTENTS**

### **Summary**

Charges connected with the storage of municipal wastes in landfills are raising systematically. In 2007 they amounted to 15 PLN·t<sup>-1</sup>, in 2008 – 75 PLN·t<sup>-1</sup>, in 2009 – 100 PLN·t<sup>-1</sup>, in 2010 – 104 PLN·t<sup>-1</sup>; in 2013 the charges are expected to reach 245 PLN·t<sup>-1</sup>. Consequently, a search for other methods of mu-

nicipal waste neutralization has been undertaken. One of such methods is their thermal neutralization in properly adapted furnaces, usually the grate furnaces. Taking into account the development of such technology, the incineration process of fourteen various waste types, contained in municipal wastes, was investigated. Characteristic duration time of incineration and characteristic ash temperatures, which reflect the behaviour of flammable substances in wastes during incineration process, were determined.

**Key words:** municipal wastes, biomass, combustion

Praca wpłynęła do Redakcji: 08.03.2011 r.

*Recenzenci: prof. dr hab. J. Lech Jugowar  
prof. dr hab. Aleksander Lisowski*

Adres do korespondencji:

mgr inż. Marcin Kantorek  
Politechnika Wroclawska ITCiMP  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
tel. 796-720-360; e-mail: marcin.kantorek@pwr.wroc.pl