



# Własności fizykochemiczne odpadów komunalnych wymuszające rodzaj technologii recyklingu termicznego

**Physicochemical properties of municipal solid waste that determine the choice of thermal recycling method**

dr inż. Henryk KARCZ, mgr inż. Wojciech KOMOROWSKI, mgr inż. Michał GRABOWICZ, mgr inż. Piotr PĘDZIK

Karcz Henryk  
Pol. Wroclawska Wydz.  
Mech.-Energ.  
Zakład Kotłów i Turbin  
Komorowski Wojciech  
ZBUS-TKW Combustion  
Głowno  
Grabowicz Michał  
ZBUS Combustion Głowno  
Pędzik Piotr  
West Real Estate S.A.

Parametrami substancji palnej które w decydujący sposób wpływają na proces zapłonu jest zawartość wilgoci i zawartość popiołu. Zawartość wilgoci, sposób jej rozmieszczenia i struktura fizyczna substancji mineralnej ma natomiast duży wpływ na szybkość termicznego rozkładu i szybkość wydzielania gazów pirolitycznych.

Substancja mineralna może bowiem wchodzić w chemiczny skład substancji organicznej lub może tworzyć odrębne struktury połączone fizycznie z substancją organiczną lub może otaczać je. Wpływ i oddziaływanie substancji mineralnej objawia się w różny, często nieprzewidywalny sposób zarówno w fazie suszenia, w fazie wyjścia części lotnych, jak i w fazie spalania karbonizatu.

Z energetycznego punktu widzenia projektowanie instalacji do spalania odpadów komunalnych musi opierać się na bardzo wiarygodnych informacjach dotyczących zawartości wilgoci, popiołu, kaloryczności, składu elementarnego substancji organicznej i nieorganicznej, stopnia konwersji w gaz pirolityczny w trakcie odgazowania, własności fizycznych popiołu w wysokich temperaturach, właściwości kinetycznych gazów pirolitycznych i właściwości fizykochemicznych karbonizatów.

Parametry te muszą być konieczne określone dla wybranych odpadów dla których będzie konstruowana instalacja kotłowa. Nie można w żadnym przypadku przez „per analogie” przenosić oznaczeń i wyników badań dotyczących konwencjonalnych paliw stałych na paliwa pochodzące z odpadów.



## W KILKU SŁOWACH

Projektowanie instalacji do spalania odpadów komunalnych musi opierać się na bardzo wiarygodnych informacjach dotyczących zawartości wilgoci, popiołu, kaloryczności, składu elementarnego substancji organicznej i nieorganicznej, stopnia konwersji w gaz pirolityczny w trakcie odgazowania, własności fizycznych popiołu w wysokich temperaturach, właściwości kinetycznych gazów pirolitycznych i właściwości fizykochemicznych karbonizatów. Artykuł przedstawia wyniki badań procesu spalania odpadów komunalnych.



## ABSTRACT

The engineering of municipal solid waste (MSW) incinerators requires very accurate information on parameters such as moisture and ash content, calorific value, elemental composition of organic and inorganic substances, degree of conversion into pyrolysis gas in degassing, physical properties of high temperature ash, kinetic properties of pyrolysis gases and physicochemical properties of carbonizers. This article discusses a research on the process of incineration of municipal waste.

Analiza techniczna i technologiczna potencjalnych paliw energetycznych wytworzonych z odpadów komunalnych wykazała, że najbardziej ekonomicznym i ekologicznym sposobem Energetycznego Recyklingu Odpadów (ERO) jest wytworzenie Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE) w postaci sprasowanych kęsów, brykietów lub peletów służących do opalania kotłów elektrociepłowni pracujących w układzie kogeneracji.

Propozycja zasilania układów kotłowych przez APE (Alternatywne Paliwa Energetyczne) w postaci FAPE wynika bowiem z analizy logistycznej podawania paliwa do elektrociepłowni. Zasilanie elektrociepłowni FAPE w pierwszej kolejności zmniejsza objętość podawanego pa-



liwa, a w drugiej kolejności zmniejsza jego zawilgocenie i zwiększa kaloryczność. Jest to prawidłowość niezależna od stosowanych technologii i rodzaju urządzeń do brykietowania i peletowania biomasy z wyselekcjonowanych frakcji odpadów komunalnych i przemysłowych. Najbardziej prosty sposób wytwarzania FAPE jest bowiem związany zawsze z częściowym pozbawieniem odpadów wilgoci i wzrostem ciepła spalania, co stanowi najbardziej racjonalny technologicznie i ekonomicznie wariant energetyczny. Oznacza to konieczność budowy zakładów zagęszczających palne części w bezpośrednim sąsiedztwie wysypisk i sortowni odpadów. W konsekwencji jest to „dar natury”, który umożliwia oddzielenie uciążliwych wysypisk, składowisk i sortowni odpadów od elektrociepłowni opalanych wytworzonym FAPE, usytuowanych w ośrodkach zurbanizowanych w których istnieje możliwość odbioru wyprodukowanej energii cieplnej bez przykrych i uciążliwych konsekwencji dla miejscowej ludności.

Bardzo istotna cecha odpadu jest jego postać fizyczna, wartość opałowa, zawartość części palnych, części lotnych, wody, substancji mineralnych, skład chemiczny, skład fazowy, skład pierwiastkowy, bezpośrednia toksyczność i skażenie biologiczne.

Przy spalaniu odpadów należy brać pod uwagę nie tylko fizyczny charakter odpadu, lecz również charakter połączeń chemicznych, które powinny ulec rozpadowi, a produkty rozpadu powinny się utlenić. Ważna jest tu również temperatura procesu oraz czas kontaktu tzn. czas, w którym odpad znajduje się w korzystnym dla jego unieszkodliwiania obszarze temperaturowym przy odpowiednim składzie fazy gazowej. Ważny jest też charakter stałej pozostałości, niedopału i popiołu. Emisja pyłów może bowiem prowadzić do wtórnej syntezy substancji szkodliwych na powierzchni ziaren.

Zasadniczo spalanie odpadów stanowi utlenienie materiałów palnych zawartych w odpadach. Odpady są na ogół bardzo zróżnicowanymi materiałami, składającymi się przede wszystkim z substancji organicznych, minerałów, metali oraz wody.

Podczas procesu spalania odpadów powstają produkty gazowe, głównie  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$ , produkty stałe, popiół i żużel w ilościach zależnych od

spalonego odpadu i stosowanej technologii oraz mogą powstać również niedopały. Lotny popiół unoszony z gazami spalinowymi składa się z drobnych cząstek mineralnych, oraz może zawierać zanieczyszczenia wtórne, powstałe wskutek reakcji powierzchniowych. W warunkach niedoboru tlenu popiołowi mogą towarzyszyć cząsteczki sadzy na których powierzchni mogą być zaabsorbowane ciężkie węglowodory aromatyczne (WWA). Mogą być również zawarte inne składniki szkodliwe oraz metale ciężkie.

Występują pewne utrudnienia technologiczne, które muszą być uwzględnione przy projektowaniu instalacji dla energetycznego recyklingu odpadów. Utrudnienia te występują z uwagi na budowę fizykochemiczną i skład chemiczny odpadów, a szczególnie jej części mineralnej. Bardzo ważnym problemem występującym przy spalaniu odpadów w kotłach energetycznych jest zawarty w nich chlor oraz pierwiastki grupy metali alkalicznych takich jak: wapń i magnez, grupy azotowców: fosfor i azot, grupy chlorowców: chlor, grupy litowców; sód i potas.

Niektóre pierwiastki tych grup oddziałują niekorzystnie na powierzchnie ogrzewalne kotłów, będąc sprawcą tzw. korozji chlorowej lub zanieczyszczających nadmiernie powierzchnie ogrzewalne poprzez tworzenie szklistych powłok powstałych w wyniku kondensacji par np. Na i K. Pierwiastki z grupy metali alkalicznych obniżają również znacznie temperaturę mięknięcia popiołu, co prowadzi do zażużlowania komór spalania i niszczenia struktury złoża fluidalnego w kotłach fluidalnych oraz warstwy paliwa w kotłach rusztowych, poprzez tworzenie się różnego rodzaju spieków i aglomeratów żużlowych. Spalanie odpadów w kotłach energetycznych z uwagi na skład chemiczny substancji organicznej i nieorganicznej przebiega również odmiennie od spalania stałych paliw konwencjonalnych, nie można więc w żadnym przypadku przenosić wyników ze spalania węgla na procesy spalania odpadów.

Aby prawidłowo zaprojektować proces spalania odpadów należy „bezwzględnie” określić ich własności fizykochemiczne i kinetyczne zarówno substancji palnej jak i nieorganicznej. Szczególnie duże znaczenie ma znajomość zachowania się popiołu w wysokich temperaturach jakie występują w komorze kotła. Informacja o kine-





tyce suszenia, termicznego rozkładu, spalania gazu pirolitycznego, karbonizatu oraz przemian jakie występują w popiele w trakcie spalania mają decydujące znaczenie dla zaprojektowania instalacji o maksymalnej sprawności termicznej i całkowicie bezpiecznej ekologicznie. Znajomość podstawowych własności biomasy ma tu decydujące znaczenie [1-5].

## 2. Skład morfologiczny odpadów komunalnych

Skład morfologiczny odpadów komunalnych jest w dużej mierze uzależniony od regionu kraju oraz od rodzaju aglomeracji. Odpady pochodzące z uprzemysłowionej, zurbanizowanej części kraju, morfologicznie znacznie różnią się od odpadów pochodzących z obszarów wiejskich czy małomiasteczkowych. Niezależnie od tych czynników można jednak z całą pewnością przyjąć że głównymi składnikami morfologicznymi odpadów niezależnie od ich udziału masowego są następujące substancje organiczne i nieorganiczne:

- 1-odpady ceramiczne,
- 2-odpady szklane,
- 3-odpady metalowe,
- 4-odpady drewna budowlanego,
- 5-odpady makulatury papierowej,
- 6-odpady makulatury kartonowej,
- 7-odpady tworzyw sztucznych,
- 8-odpady PCV,
- 9-odpady tekstylne,
- 10-odpady skórzane,
- 11-odpady gumowe,
- 12-odpady organiczne pochodzenia roślinnego,
- 13-odpady organiczne mięsne,
- 14-odpady organiczne kostne,
- 15-brykiety z drewna mieszanego,
- 16-pelety z drewna mieszanego,
- 17-osady ściekowe.

Odpady 1÷3 zawierające ceramiczne odpady budowlane, szkło oraz metale żelazne i metale kolorowe są odpadami niepalnymi i powinny być usunięte z ogólnej masy odpadów w procesie sortowania ręcznego i sortowania mechanicznego bezwzględnie przed procesem termicznej utylizacji. Obecność materiałów ceramicznych i szklanych zwiększa niepotrzebnie masę popiołu, który w zależności od sto-

sowanej technologii i składu morfologicznego utylizowanych odpadów może być popiołem zaliczanym do odpadów, powiększając w ten sposób masę odpadu który podlega dalszemu procesowi utylizacji. Odpady ceramiczne i szklane są również częstą przyczyną, jako substancje trwałe o znacznych rozmiarach, awarii urządzeń kotłowych i urządzeń odpopielania –rusztów i urządzeń transportu popiołu. Pogarszając w istotny sposób wskaźniki niezawodności pracy instalacji.

Segregacja i odseparowywanie materiałów niepalnych ze strumienia utylizowanych odpadów jest więc czynnością niezbędną z ekonomicznego punktu widzenia oraz ze strony pewności i niezawodności eksploatacyjnej instalacji.

Pozostałe substancje odpadów (4÷14) są to odpady palne organiczne i nieorganiczne. Odpady te powinny podlegać segregacji gabarytowej z uwagi na wielkość urządzeń transportujących oraz urządzeń procesu suszenia i procesu termicznego rozkładu. Zmniejszenie wymiarów gabarytowych, szczególnie drewna budowlanego, powoduje wzrost gęstości nasypowej i znaczne obniżenie objętość urządzeń technologicznych instalacji.

Dodatkowym rozwiązaniem problemu powinno być rozdrobnienie odpadów do takich rozmiarów aby mogła nastąpić peletyzacja, brykietyzacja lub zagęszczenie do postaci kęsów o rozmiarach nie większych jak 200mm. Sprasowana postać odpadów jest najbardziej ekonomicznym i ekologicznym rozwiązaniem logistycznym dostarczania odpadów ze składowiska do instalacji termicznej utylizacji. Powstałe w wyniku procesu rozdrobnienia i prasowania formowane alternatywne paliwo energetyczne (FAPE) posiada w zależności od rodzaju substancji i stopnia sprasowania gęstość nasypową ( $D_{rn}$ ) w granicach 400÷600 kg/m<sup>3</sup> oraz wilgotność w granicach ( $W_r$ ) 5-15%, co w przypadku gęstości jest dwukrotnie większe w stosunku do odpadów luźno ułożonych, a w przypadku wilgotności jest 3-4 krotnie mniejsze od wilgotności materiału surowego.

Wykonanie sortowania i sprasowania odpadów z jednej strony daje wysokokaloryczne paliwo energetyczne (FAPE) a z drugiej strony umożliwia usytuowanie instalacji do termicznej utylizacji odpadów w środowisku wysoce zurba-



nizowanym, lecz posiadającym możliwości odbioru wytworzonej energii cieplnej.

Odpadem, który może być również utylizowany w instalacji są osady ściekowe. Osady ściekowe powinny być przed dostarczeniem do instalacji poddane procesowi naturalnego odsączenia na lagunach w oczyszczalni ścieków lub powinny być odwodnione mechanicznie w wirówkach lub prasach.

Jako alternatywne paliwo energetyczne do spalania w instalacji można użyć biomasy pochodzącej z drewna leśnego lub z innych upraw rolniczych. Sprasowana substancja biomasy roślinnej może spełniać zamiennie rolę paliwa w instalacji utylizacji odpadów.

Najkorzystniej jest wówczas, gdy biomasa jest zagęszczona do formy peletów, brykietów lub kęsów. Biomasa w takiej formie może być podawana do instalacji łącznie z FAPE pochodzącym z odpadów lub może być spalona samodzielnie.

### **3. Własności fizykochemiczne podstawowych składników odpadów, osadów ściekowych i biomasy pochodzącej z drewna.**

Własności fizykochemiczne podstawowych składników morfologicznych odpadów komunalnych podane zostały w tabeli nr 1. W celach porównawczych podano również własności fizykochemiczne biomasy pochodzącej z drewna oraz osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków „GOS” Łódź.

Parametrami substancji palnej które w decydujący sposób wpływają na proces zapłonu jest zawartość wilgoci i zawartość popiołu. Zawartość wilgoci, sposób rozmieszczenia i struktura fizyczna substancji mineralnej ma również duży wpływ na szybkość termicznego rozkładu i szybkość wydzielania gazów pirolitycznych.

Pomijając różne częste odstępstwa, można generalnie stwierdzić że wzrost zawartości wilgoci i substancji mineralnej, zawsze prowadzi do wzrostu czasu zapłonu substancji palnej. Rozpatrując zawartość wilgoci (Wr) i popiołu (Ar) w (przedstawionych w tabeli nr 1) składnikach morfologicznych odpadów, należy zaznaczyć bardzo duży rozrzut szczególnie zawartości wilgoci (Wr). W dostarczonej próbce odpadów, zawartość wilgoci poszczególnych składników morfologicznych waha się od 0,68% do 28,45%.

Zawartość wilgoci roboczej (Wr) jest ściśle uzależniona od strukturalnej budowy fizycznej danej substancji. Wilgoć robocza (Wr), a szczególnie wilgoć przemijająca (Wp) jest ściśle związana z wilgotnością analityczną (Wa), która jest fizyczną cechą danej substancji. Wilgotność osadów ściekowych w stanie dostarczonym (roboczym), przytoczona jako punkt odniesienia jest bardzo wysoko i sięga 78,12%, natomiast wilgotność brykietów i peletów pochodzących z drewna, które w stanie luźnym posiadają wilgotność (Wr) około 40÷60%, po sprasowaniu posiadają wilgotność rzędu 9,62÷11,84%.

Zawartość wilgoci materiałów o bardzo dużej nasiąkliwości można znacznie zmniejszyć na drodze prasowania. Proces ten w istotny sposób obniża balastową zawartość wilgoci w paliwie i w zdecydowany sposób poprawia wartość energetyczną danej substancji, czego wskaźnikiem jest wartość opałowa (Qri).

Substancja mineralna może tworzyć chemiczne związki z substancją organiczną lub może tworzyć odrębne struktury połączone fizycznie. Wpływ i oddziaływanie substancji mineralnej objawia się w różny, często nieprzewidywalny sposób zarówno w fazie suszenia, w fazie wyjścia części lotnych, jak i w fazie spalania karbofizatu.

Oznaczone zawartości popiołu (Ar) przedstawione w tabeli nr 1 wykazały że składniki morfologiczne odpadów pochodzących z organicznych substancji roślinnych i zwierzęcych (poza odpadami kostnymi) zawierają znacznie mniej popiołu niż odpady pochodzenia przemysłowego typu; PCV, guma i skóry w których pierwiastki chemiczne tworzą popiół w znacznej mierze związany chemicznie z pierwiastkami tworzącymi substancję palną. Substancję mineralną w tej grupie odpadów tworzą głównie pierwiastki: Si, Al, Fe, Co, Ni, które znacznie podnoszą do góry charakterystyczne temperatury popiołu, co przedstawia tabela nr.2.

Popiół pochodzący z odpadów roślinnych i zwierzęcych powstaje głównie z pierwiastków grupy: (Ca, Mg, Na, K), które w istotny sposób obniżają charakterystyczne temperatury popiołu w trakcie termicznego nagrzewu. Obniżenie temperatur jest na tyle znaczne, że wymaga bardzo uważnego prowadzenia procesu w takim zakresie, aby nie przekroczyć temperatury





w złożu spalającego się paliwa powyżej 1000°C, gdyż powoduje to oblepienie niespalonego paliwa przez roztopiony żużel i znaczny wzrost straty niecałkowitego spalania w żużlu.

Zawartość popiołu autochtonicznego w odpadach organicznych, waha się od 0,5 do 5%, a w odpadach przemysłowych, waha się od 10 do 20%. Wśród odpadów organicznych jedynie odpady kostne zawierają duże ilości popiołu na poziomie  $Ar=25\div 35\%$ . Oprócz dużej ilości popiołu, odpady kostne charakteryzują się popiołem o bardzo niskiej temperaturze spiekania, mięknięcia i topnienia.

proces optymalnego termicznie i bezpiecznego ekologicznie energetycznego recyklingu odpadów. Analiza wyników dotychczas przeprowadzonych oznaczeń własności fizykochemicznych badanych substancji wykazała znaczne różnice zarówno co do zawartości wilgoci (W), popiołu (A) jak i wartości opałowej ( $Q_{ri}$ ) próbek pochodzących z różnych składników morfologicznych odpadów. Rozrzut określonych parametrów wskazuje na konieczność dość ścisłego określenia składnika morfologicznego odpadu, który będzie poddany procesowi termicznej utylizacji.

Lp.	Rodzaj substancji	A %	V %	W %	$Q_{rj}$ KJ/kg	A' %	C' %	H' %	O' %	N' %	S' %	Cl' %	K' %	M' %	V <sup>d</sup>	K <sup>d</sup>	C <sup>d</sup> <sub>k</sub>
1	Odpady z drewna budowlanego	0,54	65,60	20,00	14460	0,40	40,80	4,80	33,35	0,20	0,10	0,35	14,0	79,6	82,00	17,06	96,48
2	Odpady papierowe (makulatura)	19,27	59,88	23,20	9430	14,0	28,80	4,1	29,1	0,3	0,2	0,10	9,12	62	77,97	2,76	100,00
3	Odpady z kartonów	5,42	65,51	20,12	11190	9,14	34,67	4,1	31,7	0,2	0,1	0,23	5,23	70,74	88,26	6,55	100,00
4	Odpady z tworzyw sztucznych	3,52	69,74	1,34	24960	3,48	60,88	8,74	21,03	1,01	1,28	2,26	25,44	95,18	70,69	25,79	94,68
5	Odpady z PCV	7,51	64,25	0,68	25480	7,26	38,06	5,04	43,90	0,39	0,73	4,66	27,48	91,99	64,83	27,86	78,37
6	Odpady organiczne pochodzenia roślinnego	7,00	57,39	28,45	11305	5,01	40,60	4,42	21,00	0,30	0,01	0,01	9,15	66,54	80,27	12,79	100,00
7	Odpady organiczne mięsne	7,50	55,61	35,72	18420	4,82	35,72	5,94	17,00	0,72	0,08	0,00	3,85	59,46	86,51	5,99	100,00
8	Odpady organiczne kostne	41,90	30,45	4,84	10760	40,16	31,15	4,35	18,35	0,37	0,28	0,50	24,55	55,00	32,00	26,10	56,42
9	Odpady tekstylne	3,80	69,05	16,28	20860	3,18	52,68	4,95	21,45	0,86	0,42	0,18	11,45	80,54	82,48	13,72	94,65
10	Odpady skórzane	2,95	41,42	23,48	22460	2,26	31,87	4,82	35,92	0,96	0,68	0,01	32,84	74,26	54,15	42,90	86,02
11	Odpady gumowe	13,64	35,07	5,94	24180	12,84	64,15	4,94	11,05	0,18	0,75	0,15	46,15	81,22	37,28	49,08	73,85
12	Brykiety z drewna	0,75	72,00	11,84	16570	0,66	42,64	5,16	38,49	0,27	0,16	0,78	15,30	87,50	81,90	17,35	100,00
13	Pelety z drewna	0,75	73,84	9,62	16810	0,68	43,95	5,89	38,59	0,29	0,17	0,81	15,86	89,70	81,70	17,55	100,00
14	Osady ściekowe	43,05	8,89	78,12	1724	9,42	6,14	1,87	3,59	0,55	0,16	0,15	3,57	12,46	40,63	16,31	94,25

Tabela nr 1. Wyniki analizy technicznej i elementarnej głównych składników odpadów komunalnych

#### 4. Niezbędny zakres informacji dotyczących fizykochemicznych i kinetycznych własności zasadniczych składników morfologicznych odpadów

Zaprojektowanie procesu technologicznego termicznej konwersji odpadów wymaga gruntownego poznania ich własności fizykochemicznych i kinetycznych. Informacje dotyczące składu elementarnego, kaloryczności, zdolności do suszenia, odgazowania oraz procesu spalania są niezbędne dla zaprojektowania poszczególnych elementów instalacji, w której realizowany jest

Z energetycznego punktu widzenia projektowanie instalacji do spalania odpadów komunalnych musi opierać się na bardzo wiarygodnych informacjach dotyczących zawartości wilgoci, popiołu, kaloryczności, składu elementarnego substancji organicznej i nieorganicznej, stopnia konwersji w gaz pirolityczny w trakcie odgazowania, własności fizycznych popiołu w wysokich temperaturach, właściwości kinetycznych gazów pirolitycznych i właściwości fizykochemicznych karbonizatów.

Parametry te muszą być konieczne określone dla wybranych odpadów dla których będzie



konstruowana instalacja kotłowa. Nie można w żadnym przypadku przez „per analogie” przenosić oznaczeń i wyników badań dotyczących konwencjonalnych paliw stałych na paliwa pochodzące z odpadów.

Występują jednak pewne utrudnienia technologiczne, które muszą być uwzględnione przy projektowaniu instalacji do energetycznego recyklingu odpadów. Utrudnienia te wynikają z własności fizykochemicznych substancji organicznej, a szczególnie z jej części mineralnej. Bardzo ważnym problemem występującym przy spalaniu odpadów w kotłach energetycznych, są pierwiastki grupy metali alkalicznych takich jak: wapń i magnez, grupy azotowców: fosfor i azot, grupy chlorowców: chlor i grupy litowców: sód i potas.

Niektóre pierwiastki oddziałują niekorzystnie na powierzchnie ogrzewalne kotłów będąc sprawcami tzw. korozji chlorowej lub zanieczyszczających nadmiernie powierzchnie ogrzewalne poprzez tworzenie szklistych powłok powstałych w wyniku kondensacji par np. Na, K itd.

Pierwiastki grupy metali alkalicznych i grupy litowców obniżają znacznie temperaturę mięknięcia popiołu co prowadzi do zażużlowania komór spalania i niszczenia struktury złoża spalanego paliwa poprzez tworzenie się różnego rodzaju spieków. Spalanie odpadów w kotłach energetycznych z uwagi na skład chemiczny substancji organicznej i nieorganicznej przebiega odmienne od spalania stałych paliw konwencjonalnych. Aby prawidłowo zaprojektować proces spalania odpadów należy „bezwzględnie” określić własności fizykochemiczne i kinetyczne zarówno substancji organicznej jak i nieorganicznej.

Składnikiem paliwa który decyduje o czasie całkowitego wypalania danej substancji jest karbonizat (Kr), który pozostaje po odgazowaniu danej substancji. Ilość karbonizatu pozostałego po odgazowaniu oraz jego struktura fizykochemiczna (skład chemiczny i sposób ułożenia siatek krystalicznych węgla) decyduje o szybkości wypalania danego składnika morfologicznego odpadów. Czas wypalania poszczególnych struktur morfologicznych wpływa bowiem na strukturę złoża wypalonych odpadów (o ile są one wypalane w złożu np. na ruszcie). Struktura złoża wpływa bowiem w zdecydowany sposób

na powstałą stratę kominową (Sk) oraz stratę niecałkowitego spalania w żużlu (Snz).

Pozostałość karbonizatu (Kr) po procesie odgazowania jest więc bardzo ważną cechą fizykochemiczną składników morfologicznych, które w bardzo istotny sposób wpływają na sprawność termiczną, oraz sprawność ekologiczną procesu termicznej utylizacji. Obniżenie sprawności termicznej wynika ze wzrostu straty kominowej (Sk) i straty niecałkowitego spalania (Sn), a pogorszenie sprawności ekologicznej wynika ze wzrostu zawartości koksiku (C) w żużlu i popiele.

Zawartość karbonizatu (Kr) jako pozostałości po odgazowaniu jest w bardzo znacznej mierze uzależniona od rodzaju morfologicznego odpadów. Najmniejszą ilość karbonizatu uzyskuje się w wyniku odgazowania substancji organicznych pochodzących z mięsnych odpadów zwierzęcych (Kr= 3,85%) z makulatury (Kr= 3,18÷5,23%), oraz osadów ściekowych (Kr= 3,57%). Najwyższe ilości karbonizatu powstają przy odgazowaniu odpadów pochodzących z PCV (Kr= 27,48%), oraz z odpadów skórzanych (Kr= 32,84%) i z odpadów gumowych (Kr= 46,15%).

O szybkości wypalania karbonizatu, oraz o sposobie zachowania się spalonej substancji w istotny sposób decyduje ilość oraz skład elementarny substancji mineralnej z której po spalaniu powstaje popiół. Substancja mineralna może bowiem wchodzić w związki chemiczne z pierwiastkami (C, H, O, S, N), które tworzą substancję palną (guma, PCV, kości) i wówczas jest to tzw. substancja związana chemicznie lub może nie być związana chemicznie z substancją palną, będąc substancją przybyszową, dającą się mechanicznie oddzielić np. w procesie flotacji. Skład chemiczny substancji mineralnej odgrywa natomiast bardzo istotną rolę w procesie termicznych przemian popiołu w trakcie spalania.

Pierwiastki metali grupy alkalicznych (Mg, Ca), oraz grupy litowców (Na, K) w bardzo istotny sposób obniżają temperatury fizyczne popiołu (spiekania, mięknięcia, topnienia i płynięcia). W przeciwieństwie do tych grup pierwiastkowych, pierwiastki grupy węglowców (Si), borowców (Al.) oraz żelazowców (Fe, Co, Ni), charakterystyczne temperatury popiołu znacznie podnoszą.





LITERATURA

[1] Kruczek St.: Kotły. Oficyna Wydawnicza Pol. Wroc. Wrocław 2001  
 [2] Przywarska B.: Odpady komunalne źródłem energii odnawialnej. Recykling 2009 Nr 7-8 (103-104).  
 [3] Ścierański W., Niedziałkiewicz J.: Zapłon paliw odpadowych w warstwie usypanej na ruszcie stałym. Książka Wandrasz J.W., Niedziałkiewicz J.: „Paliwa z odpadów” Tom II Gliwice 2000.  
 [4] Pająk T.: Energia z odpadów- ogólne uwarunkowania i bariery. Konferencja „Perspektywy energetycznej utylizacji odpadów komunalnych” Podkarpacka Agencja Energetyczna. Rzeszów 3 marca 2008r.  
 [5] Pająk T.: Spalanie odpadów komunalnych- potrzeby, realia, perspektywy budowy „Termiczne unieszkodliwianie odpadów”, „Restrukturyzacja procesów termicznych” praca zbiorowa pod redakcją prof. Janusza W. Wandrasza Poznań 2007 s. 112.  
 [6] Karcz H., Kantorek M., Folga K., Butmankiewicz T., Kozakiewicz A., Kotulski A.: „Spalanie racjonalną metodą utylizacji odpadów”. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja 2009 Nr 3 (468) s. 3-7 cz. I. 2009 Nr 4 (469) s. 6-9 cz. II.  
 [7] Karcz H., Krzysztof M., Szczepaniak St., Komorowski W., Folga K.: Technologia „KRK” spalania biomasy w kotłach rusztowych. Prace naukowe Pol. Śląskiej Monografie Seria konferencja Gliwice 2007 Z 19, s. 94-106.  
 [8] Karcz H., Krzysztof M., Folga K., Butmankiewicz T., Kubiak J.: Przyczyny obniżenia sprawności kotłów rusztowych przy współspalaniu biomasy. Instal 2007 Nr 12 s. 2-7.  
 [9] Karcz H., Kantorek M., Krzysztof M., Folga K., Kubiak J., Szczepaniak St.: Wpływ sposobu podawania biomasy na sprawność termiczną kotła rusztowego. Ciepłe Maszyny Przemysłowe, Turbomachiny 2007 Nr 132, s. 111-122 Zeszyty Naukowe Pol. Łódź Nr 1002 Łódź 2007.  
 [10] Karcz H., Kantorek M., Kozakiewicz A., Grabowicz M., Komorowski W., Szczepaniak St.: Elektrociepłownia opalana biomasą pochodzącą z odpadów. Archiwum spalania Vol. 9 (2009) Nr 1-2 s. 39-73.  
 [11] Karcz H., Kantorek M., Kozakiewicz A., Jesionek K., Komorowski W., Grabowicz M.: Możliwości technologiczne energetycznego wykorzystania mączki mięsno-kostnej. Archiwum spalania Vol. 9 (2009) Nr 1-2, s. 135-149.  
 [12] Karcz H., Kantorek M., Folga K., Szczepaniak St.: Możliwości spalania w kotłach energetycznych biomasy pochodzącej z odpadów. Nowa Energia 2009, Nr 6, s. 60-70.  
 [13] Karcz H., Kantorek M., Modliński Zb., Folga K., Szczepaniak St., Grabowicz M., Butmankiewicz T.: Energetyczna instalacja kotłowa do ekologicznego recyklingu odpadów. Nowa Energia 2010 nr 1 (13) s. 125-136.

W karbonizacji oprócz pierwiastka C występują inne pierwiastki które wchodziły w skład substancji mineralnej. Pierwiastki te impregnują substancje układów krystalitów węglowych, z reguły znacznie spowalniają proces wypalania ziaren karbonizatów.

Oprócz różnic w zawartości składników balastowych (Ar, Wr) występują dość znaczne różnice w składzie elementarnym substancji organicznej. Zawartość pierwiastków C, H, O od których głównie zależy wartość ciepła spalania (Qc) zmieniają się w dość szerokim zakresie, co powoduje znaczne fluktuacje w intensywności wydzielania się ciepła w poszczególnych fazach procesu spalania. Jest to przyczyną występowania znacznych spiętrzeń temperaturowych w fazie spalania gazów pirolitycznych prowadzących do przekroczenia dopuszczalnych temperatur mięknięcia i spieknięcia popiołu oraz zatapiania niespalonych części odpadów w aglomeratach substancji żuźlowej.

Poszczególne składniki morfologiczne odpadów komunalnych w bardzo istotny sposób różnią się między sobą zarówno składem chemicznym jak i fizyczną budową strukturalną. Różnice te są tak istotne z chemicznego punktu widzenia że praktycznie nie można dokonać żadnych merytorycznych porównań i szukać wspólnej platformy odniesienia. Budowa fizykochemiczna poszczególnych gatunków morfologicznych odpadów nakazuje traktować je jako odrębne strukturalnie substancje, które mają podlegać procesowi termicznego przekształcania.

**5.Badania procesu spalania**

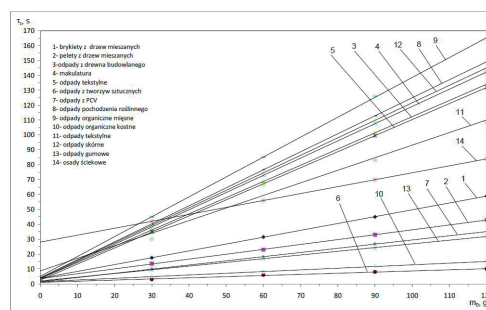
Badania procesu spalania wyodrębnionych gatunków morfologicznych odpadów przeprowadzono na stanowisku badawczym dokładnie opisanym we wcześniejszych pracach autorów [6-11]. Badania przeprowadzono w temperaturze 1000°C, którą można przyjąć jako reprezentatywną temperaturę parującą w strefie wydzielania i spalania gazów pirolitycznych w końcowej części sklepienia zapłonowego nad rusztem. Szybkość przepływu powietrza przez warstwę badanej substancji zmieniano w zakresie od 2 do 5 m/s, zbliżoną do szybkości przepływu powietrza przez

warstwę odpadów w strefie zapłonowej rusztu.

Charakterystyczne czasy procesu spalania badanych substancji przeprowadzono dla struktur ziarnowych o różnej masie o wyselekcjonowanym kształcie geometrycznym, charakterystycznym dla danej odmiany morfologicznej odpadów. Zbliżony kształt wyselekcjonowanych (do badań) ziaren miał na celu stworzenie podobnych warunków dla przebiegu reakcji chemicznych, które w zdecydowanej większości przebiegają na powierzchni ziarna.

Uzyskane rezultaty wykazały niezbicie że problem doboru kształtu zewnętrznego ziaren jest bardzo ważny. Można stwierdzić że im kształt ziaren był do siebie bardziej podobny, tym rozrzut wyników badań był zdecydowanie mniejszy.

W trakcie badań określono czas odprowadzenia wilgoci i czas nagrzania próbki do momentu w którym wydzielają się gazy pirolityczne w ilości niezbędnej do utworzenia mieszanki palnej zdolnej do zapłonu. Ten okres indukcji zapłonu gazów pirolitycznych oznaczony został przez czas zapłonu ( $\tau_z$ ). Zależność czasu zapłonu ( $\tau_z$ ) badanych gatunków morfologicznych w komorze spalania o temperaturze  $t_p=1000^\circ\text{C}$  w zależności od masy próbki, przedstawia wykres na rys.1.



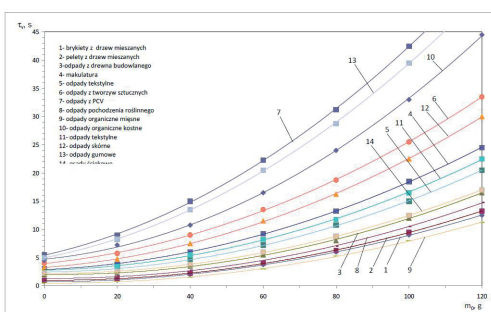
Rys. 1. Czas zapłonu w zależności od masy próbki.

Najistotniejszym parametrem spalanej substancji decydującej o jej czasie zapłonu jest zawartość wilgoci. Czas zapłonu ( $\tau_z$ ) ustalonej masy próbki, rośnie proporcjonalnie ze wzrostem zawartości wilgoci (Wr) w próbce wejściowej. W warunkach kotłów rusztowych, przy stałym przesuwie rusztu, zapłon poszczególnych frakcji morfologicznych

będzie rozciągnięty na znaczną długość rusztu, nawet w stosunku jak 1:20.

Czas wydzielania i spalania gazów pirolitycznych ( $\tau_v$ ) przedstawiony jest na wykresie rys.2. Najkrótszy czas wydzielania i spalania gazów pirolitycznych charakterystyczny jest dla odpadów pochodzenia zwierzęcego. Gazy pirolityczne wydzielają się w sposób wybuchowy, powodujące eksplozję substancji mięsnej. W podobny sposób przebiega proces współspalania i spalania gazów pirolitycznych z peletów i brykietów pochodzących z tkanki roślinnej. Wydzielające się gazy powodują wzrost ciśnienia wewnątrz peletu lub brykietu i ich rozpad na drobne elementy, które spalają się jako niezależne, niewielkie fragmenty.

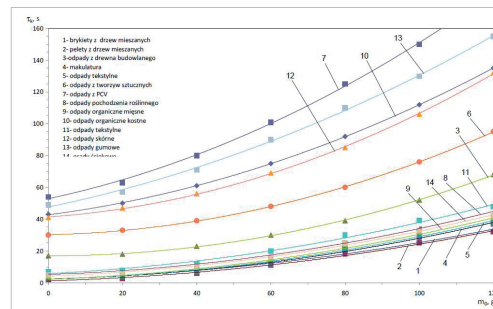
Proces wydzielania i spalania gazów pirolitycznych odpadów mięsnych-pozza kostnymi- peletów, brykietów pochodzenia roślinnego oraz odpadów pochodzenia roślinnego jest 3-4 krotnie krótszy od czasu spalania gazów pirolitycznych pochodzących z odpadów gumowych, PCV i odpadów kostnych. Niezależnie od gatunku morfologicznego odpadów, proces ich termicznego rozkładu jest gwałtowny i ma z reguły charakter wybuchowy-pozza odpadami gumowymi, PCV i osadami ściekowymi- połączone z eksplozyjnym mikrospalaniem. W zależności od zawartości wodoru w substancji organicznej w wytworzonym froncie spalania gazów pirolitycznych temperatura osiąga poziom 1500-1600°C.



Rys. 2. Czas wydzielania i spalania gazów pirolitycznych w zależności od masy próbki.

Stopień przemiany substancji organicznej odpadów na fazę gazową posiada odbicie w czasie wypalania karbonizatu pozostałego po odgazowaniu utylizowanej substancji. Wykres na rys. 3 przedstawia czas wypalania pozostałości po odgazowaniu spalanej substancji morfologicznej odpadów. Najkrótszy czas spalania pozostałości po odgazowaniu charakterystyczny

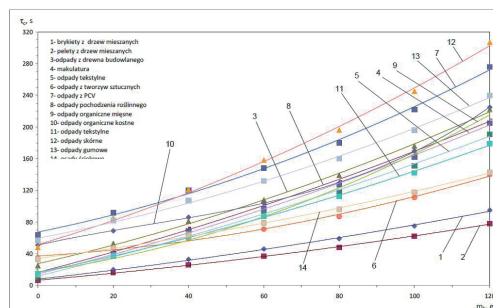
jest dla peletów, brykietów pochodzenia roślinnego, makulatury, odpadów pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, odpadów tekstylnych i osadów ściekowych. 2-3 krotnie dłuższy czas wypalania karbonizatu, charakterystyczny jest dla odpadów pochodzących z drewna budowlanego oraz z tworzyw sztucznych.



Rys. 3. Czas wypalania pozostałości po odgazowaniu w zależności od masy próbki.

Najdłuższy czas wypalania charakterystyczny jest dla karbonizatów pochodzących z odpadów PCV, gumy, kości i skóry. Czas ten jest przeciętnie 5-6 krotnie dłuższy od czasów wypalania karbonizatów pochodzących z odpadów tkanki zwierzęcej i odpadów roślinnych. Długi czas wypalania karbonizatów pochodzących z PCV i gumy jest spowodowany inhibicyjnym oddziaływaniem substancji mineralnych utwardzających lub impregnujących związki organiczne substancji wyjściowych odpadów. Wewnętrzne struktury chemiczne zawierające pierwiastki wchodzące w skład substancji mineralnej spowalniają proces wyjścia atomów C z łańcuchowych układów sieciowych i wejście w reakcję z cząsteczką  $O_2$ . Struktury te w znaczący sposób powodują wydłużenie czasu wypalania substancji karbonizatu pozostałego po fazie odgazowania.

Całkowity czas spalania ( $\tau_c$ ) substancji badanych odpadów w zależności od ich masy przedstawia wykres na rys. 4.



Rys. 4. Całkowity czas spalania w zależności od masy próbki.

[14] Karcz H., Butmankiewicz T., Andryjowicz Cz.: Sposób i instalacja termicznej utylizacji osadów ściekowych. Zgłoszenie patentowe P362326 z dnia 2003.09.22

[15] Karcz H., Butmankiewicz T.: Sposób i urządzenie do termicznej utylizacji odpadów organicznych. Patent do zgłoszenia P362586 z dnia 2003.10.02







Najkrótszy całkowity czas wypalania substancji odpadów charakterystyczny jest dla peletów i brykietów pochodzących z substancji roślinnych.

Całkowity czas wypalania Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE) pochodzących z organicznych substancji roślinnych jest 4-5 krotnie krótszy od czasu spalania odpadów pochodzących ze skóry, PCV i gumy. Odpady pochodzące z tworzyw sztucznych i osady ściekowe spalają się około 1,5 raza dłużej od peletów i brykietów pochodzenia roślinnego.

Grupa odpadów pochodzących z makulatury, drewna budowlanego, odpadów tekstylnych i odpadów zwierzęcych spala się 2-krotnie wolniej od peletów i brykietów pochodzenia roślinnego lecz znacznie krócej od odpadów pochodzących ze skóry, PCV i gumy.

W zakresie określonego rozdrobnienia, różny czas wypalania ( $\tau_c$ ) identycznych masowo, lecz różniących się geometrycznie, różnych struktur morfologicznych odpadów powoduje dezorganizację procesu spalania warstwy wsadu na ruszcie- niezależnie od jego typu. Jednorodna początkowa warstwa paliwa na ruszcie posiadająca jednakowy opór hydrauliczny dla przepływającego przez daną strefy powietrza, staje się z powodu różnych szybkości wypalania poszczególnych gatunków morfologicznych, warstwą „dziurawą” o strukturze „sera szwajcarskiego”.

Wypalone substancje odpadów stanowią wolne przestrzenie w warstwie paliwa na ruszcie, przez które przepływa swobodnie powietrze przeznaczone do spalania. Następuje ucieczka powietrza, które nie bierze bezpośredniego udziału w utlenianiu pozostałych części niespalonego paliwa.

### 6. Charakterystyki fizyczne popiołu pochodzące z różnych rodzajów morfologicznych odpadów.

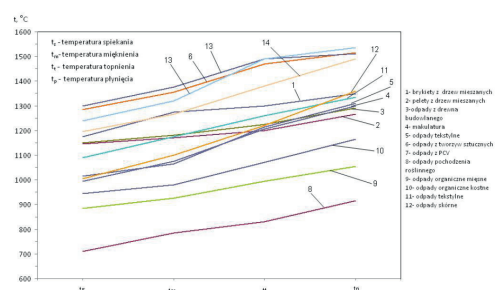
Zachowanie się substancji popiołu podczas procesu spalania określają charakterystyczne temperatury jakie przechodzi popiół w trakcie termicznego nagrzewu.

Niezależnie od metody wyznaczenia charakterystycznych temperatur, oznaczenie sprowadza się do określenia:

- temperatury spiekania ( $t_s$ ),
- temperatury mięknięcia ( $t_m$ ),
- temperatury topnienia ( $t_t$ ),
- temperatura płynięcia ( $t_p$ )

Charakterystyczne temperatury popiołu badanych struktur morfologicznych odpadów przedstawione zostały na diagramie rys. 5.

Charakterystyczne temperatury zostały wyznaczone przy pomocy metody Bunte-Bauna [1].



Rys. 5. Charakterystyczne temperatury popiołu.

Charakterystyczne temperatury popiołu są ściśle uzależnione od składu chemicznego substancji mineralnej spalanych struktur morfologicznych odpadów. Temperatury popiołu ulegają szczególnemu obniżeniu wówczas, gdy w substancji mineralnej występują duże ilości Na i K. Ponieważ odpady pochodzenia roślinnego i zwierzęcego zawierają największą ilość Na i K, dlatego charakterystyczne temperatury ich popiołów są niskie. Temperatura mięknięcia odpadów pochodzenia roślinnego wynosi około 710°C, odpadów mięsnych- 890°C, a odpadów kostnych- 950°C.

Najwyższe temperatury mięknięcia charakterystyczne są dla odpadów pochodzących z tworzyw sztucznych, PCV i gumy. Temperatura mięknięcia popiołu pochodzącego z tworzyw sztucznych wynosi około 1300°C. Popiół pochodzący z drewna, makulatury, tekstyliów i skór posiada temperaturę mięknięcia w przedziale 1000÷1200°C.

Istotne znaczenie mają również temperatury topnienia i płynięcia popiołu odpadów roślinnych i zwierzęcych których wartości zawierają się w przedziale 900-1150°C. Niskie wartości tych temperatur szczególnie w przypadku odpadów kostnych powodują istotną dezorgani-

zację procesu spalania odpadów o niskiej reaktywności.

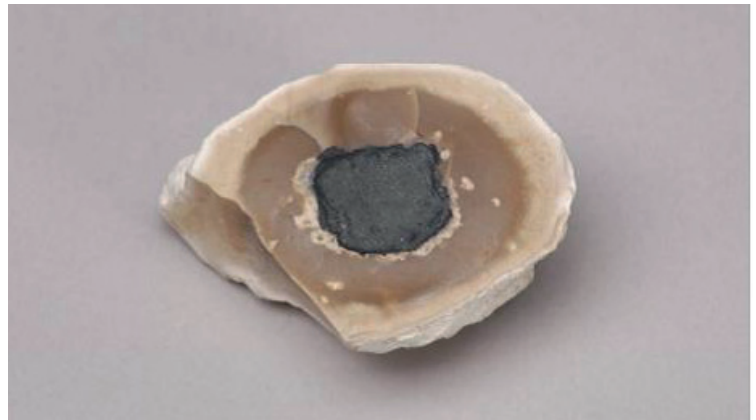
Powstaje bowiem sytuacja gdy płynna substancja popiołu pochodzącego ze spalania odpadów kostnych zatapia niespalony karbonizat pochodzący np. z odpadów gumowych czy tekstylnych. Oblepione płynnym popiołem ziarna karbonizatów są zatopione wewnątrz powłoki żuźlowej. Proces spalania zostaje przerwany, a wewnątrz powstaje niedopał w postaci niespalonego karbonizatu, co bardzo dokładnie obrazują zdjęcia fragmentu żuźla pobranego z pod rusztu kotła rusztowego spalarni odpadów w Warszawie.

Przedstawiona na rys. 6 dokumentacja zdjęciowa jest charakterystycznym przypadkiem spalania odpadów komunalnych, składających się z różnych gatunków morfologicznych, różniących się zarówno substancją organiczną jak i substancją mineralną. Różnice pomiędzy poszczególnymi strukturami morfologicznymi występują praktycznie we wszystkich charakterystykach mających wpływ na proces spalania. Różnice te, co pokazały zamieszczone wyniki badań są na tyle znaczne, że powodują trudne do przewidzenia skutki, wzajemnie nakładających się lub znoszących się efektów fizykochemicznych.

Różnorodność przebiegających zjawisk podczas spalania poszczególnych struktur morfologicznych oraz ich przesunięcia czasowe powodują nakładanie się niekorzystnych zjawisk, które prowadzą do powstania straty niecałkowitego spalania w żuźlu oraz wzrostu straty kominowej spowodowanej niekontrolowanym przepływem „fałszywego” powietrza przez te fragmenty rusztu w których nastąpiło wcześniejsze wypalenie najbardziej reakcyjnych odmian morfologicznych odpadów.

### 7. 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 następuje proces suszenia i odgazowania. Przestrzeń na ruszcie w której odbywa się ten proces jest uzależniona od rodzaju odmiany morfologicznej



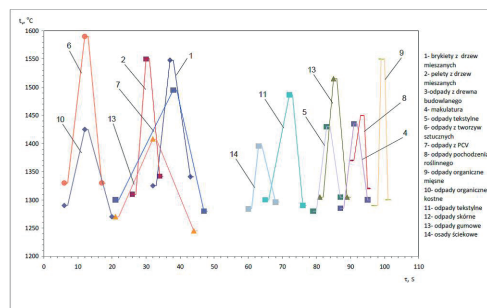
Rys. 6. Niedopał powstały w żuźlu.



odpadów, które charakteryzują się odmiennymi czasami suszenia i spalania wydzielanych gazów pirolitycznych. Różnice te dokładnie charakteryzują zależności przedstawione na wykresach rys. 1 i 2.

Przestrzeń na ruszcie gdzie odbywa się proces spalania gazów pirolitycznych pochodzących z różnych odmian morfologicznych odpadów jest dość znaczna i przykładowo przedstawiona (dla warunków eksperymentu) na wykresie rys. 8, wynosi około 2 min., co dla określonej prędkości przesuwu rusztu może wynieść kilka metrów. Na powyższej przestrzeni rusztu, jednocześnie podana mieszanina odpadów w czasie około 2 min będzie generowała wydzielanie gazów pirolitycznych i ich spalanie. Z przedstawionej na wykresie rys.7 zależności określającej temperaturę spalania gazów pirolitycznych w zależności od czasu 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.

W najkrótszym czasie, w początkowej strefie rusztu będą spalać się gazy pirolityczne pochodzące z tworzyw sztucznych i odpadów kostnych. Należy tu jednak zaznaczyć że temperatura spalania gazów pirolitycznych pochodzących z tworzyw sztucznych jest o około 200°C wyższa od temperatury spalania gazów pirolitycznych pochodzących z odgazowania kości. Temperatura spalania gazów pirolitycznych pochodzących z tworzyw sztucznych wynosi około 1600°C, a pochodzących z odpadów kostnych wynosi około 1400°C. Następna, dalsza, prawie wyodrębniona przestrzeń na ruszcie jest przyporządkowana strefie spalania gazów pirolitycznych pochodzących z odpadów gumowych, odpadów PCV, peletów i drewna odpadowego. Najniższą temperaturę spalania rzędu 1410°C osiągają gazy pochodzące z gumy. Temperatura spalania gazów pirolitycznych pochodzących z PCV wynosi około 1480°C, a drewna około 1550°C.



Rys. 7. Temperatury spalania gazów pirolitycznych badanych prób.

Trzecią przestrzeń rusztu zajmuje strefa, w której spalają się gazy pirolityczne pochodzące z odpadów tekstylnych, makulatury, drewna budowlanego i odpadów ściekowych. Temperatura spalania gazów pirolitycznych osadów ściekowych wynosi około 1390°C, makulatury około 1430°C, odpadów roślinnych około 1450°C, tekstylnych około 1480°C, drewna budowlanego około 1520°C, a odpadów mięsnych około 1560°C.

Proces spalania gazów pirolitycznych pochodzących z różnych odmian morfologicznych spalających się w danej strefie rusztu jest jednorodnym procesem przebiegającym w mieszaninie gazów pirolitycznych pochodzących z całej grupy odpadów znajdujących się w danej przestrzeni rusztu.

Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić że podczas procesu spalania odpadów komunalnych w kotłach rusztowych, na ruszcie występują wyraźne trzy strefy spalania gazów pirolitycznych pochodzących z wyodrębnionych odmian morfologicznych odpadów. Strefy te są wyraźnie wyodrębnione, przesunięte w czasie i w przestrzeni. Nie jest to jednak podział sztywny, gdyż jest on ściśle uzależniony od zawartości wilgoci ( $W_r$ ) oraz i stopnia rozdrobnienia geometrycznego i masowego. Przedstawione na wykresie rys. 7 zależności pokazują jakie mogą wystąpić temperatury w danej strefie rusztu i jakie konsekwencje mogą powodować w pozostałej części substancji organicznej i nieorganicznej odpadów. Z przedstawionej zależności wyraźnie widać że równoczesne przemiany termiczne substancji dwóch, lub większej ilości odmian morfologicznych odpadów o odmiennych charakterystykach fizykochemicznych i kinetycznych mogą powodować trudne do przewidzenia skutki, przeważnie o charakterze negatywnym.



Negatywnym skutkiem takiego procesu spalania odpadów komunalnych na ruszcie jest zatopienie substancji palnej odpadów przez stopioną substancję mineralną popiołu. Wykres na rys. 7 pokazuje że przemianę termiczną na ruszcie przechodzi jednocześnie odpad gumowy i odpad kostny. Temperatura spalania gazów pirolitycznych w tej strefie rusztu wynosi odpowiednio około 1430°C i 1590°C i jest znacznie większa od temperatury mięknięcia (tm) i temperatury płynięcia (tp=900°C) popiołu pochodzącego z odpadów kostnych. W tym samym czasie powstaje karbonizat po odgazowaniu odpadów gumowych, którego czas wypalania ( $\tau_k$ ) jest znacznie dłuższy od czasu spalania gazów pirolitycznych, co przedstawia wykres na rys. 3. Jeżeli ziarno karbonizatu pochodzące z gumy znajdzie się w pobliżu płynnej fazy popiołu pochodzącego z kości, wówczas zostanie zatopione wewnątrz powłoki żużla. Proces spalania zostaje przerwany i powstaje niedopał w postaci karbonizatu składającego się w znacznej mierze z pierwiastka C.

Zjawisko to obrazują zdjęcia przedstawione na rys. 6. Powyższe zdjęcia przedstawiają fragment żużla otrzymanego ze spalania mieszaniny odpadów komunalnych w kotle rusztowym spalarni na „Targówku” w Warszawie. Przedstawiony obraz pokazuje typowy przykład historii spalania mieszaniny odpadów komunalnych na ruszcie. Analiza koloru warstw poszczególnych aglomeratów żużlowych pozwala dokładnie prześledzić historię przebiegu procesu spalania. Zatopiony wewnątrz karbonizat na pewno pochodził z odmiany morfologicznej, która uległa całkowicie procesowi odgazowania, ponieważ powłoka stopionego żużla jest jednolita, bez śladów penetracji wydzielających się gazów pirolitycznych. Istnieje duże prawdopodobieństwo że zatopiony karbonizat pochodzi z odpadów gumowych lub z PCV. Kolor i struktura warstwy oblepiającej karbonizat wskazuje na odpad pochodzący z kości zwierzęcych. Dalsze warstwy spieku mogą pochodzić już z dowolnej odmiany morfologicznej odpadów. Analiza innych, dowolnie wybranych spieków, potwierdza w całej rozciągłości przytoczoną analizę i w całości ją potwierdza.

Proces spalania mieszaniny odpadów komunalnych w kotłach rusztowych jest procesem

niecałkowitym i zawsze prowadzi do niecałkowitego spalania i obecności niespalonych części odpadów w żużlu, z reguły znacznie przekraczających 5% udziału masowego żużla. Powstaje w ten sposób odpad, który musi być składowany na specjalnych składowiskach lub musi być przeznaczony do dalszej utylizacji. Wielkość niedopału w dużej mierze jest zależna od składu morfologicznego odpadów i może dochodzić nawet do 20%.

## 8.Wnioski

1. Odmiany morfologiczne odpadów komunalnych znacznie różnią się między sobą zarówno własnościami fizykochemicznymi, jak i kinetycznymi.
2. Różnice we własnościach kinetycznych poszczególnych odmian morfologicznych odpadów uniemożliwiają ich spalanie jako mieszaniny paliwowej w kotłach rusztowych o spotykanej konstrukcji rusztów.
3. Skład chemiczny substancji mineralnej różnych odmian morfologicznych jest na tyle odmienny, że utrudnia spalanie mieszaniny odpadów w kotle rusztowym z uwagi na temperatury spiekania popiołów przynależnych do różnych odmian morfologicznych.
4. Spalanie odpadów komunalnych w kotle rusztowym powoduje znaczny wzrost straty kominowej ( $S_k$ ) i straty niecałkowitego spalania w żużlu ( $S_{nz}$ ), powodujących obniżenie sprawności termicznej kotła nawet o kilka procent.
5. Znaczna zawartość części palnych w żużlu spowodowana jest zatopieniem koksiku w płynnym żużlu. Powoduje to powstanie żużlu o zawartości części palnych znacznie powyżej 5%, który staje się odpadem przeznaczonym do składowania lub do dalszej utylizacji.
6. Proces termicznej utylizacji odpadów komunalnych aby był wysokosprawny termicznie i bezpieczny ekologicznie musi przebiegać w warunkach rozdziału w czasie i przestrzeni procesów termicznego rozkładu odpadów oraz spalania gazów pirolitycznych i karbonizatu.
7. Przedstawione wyniki badań fizykochemicznych i kinetycznych wybranych-





stawowych) odmian morfologicznych odpadów w sposób jednoznaczny wykazały że nie można prowadzić procesu termicznej utylizacji odpadów komunalnych stanowiących (dowolną) mieszkankę różnych struktur morfologicznych jednocześnie w czasie ciągłego procesu przebiegającego w jednej przestrzeni reakcyjnej.

8. Nakładanie się procesów termicznych przebiegających w fazie gazowej i w fazie stałej, powoduje powstanie niekorzystnych zjawisk, prowadzących do powstania z jednej strony strat w postaci niecałkowitego spalania fazy stałej –karbonizatu-, a z drugiej strony powstania niekorzystnych z ekologicznego punktu widzenia, związków gazowych w postaci tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ), tlenków siarki ( $\text{SO}_x$ ) oraz chlorowodoru ( $\text{HCl}$ ). Zjawisk tych, spalając odpady w kotłach rusztowych nie da się uniknąć ponieważ są to charakterystyczne własności technologiczne dla tego typu układów technologicznych.
9. Rozwiązaniem problemu jest układ ciągłego procesu termicznego, rozdzielonego jednocześnie w czasie i w przestrzeni. Układ

taki powstaje wówczas, gdy proces suszenia i odgazowania powstaje w przestrzeni o atmosferze redukcyjnej w której temperatura jest niższa od temperatury spiekania popiołu ( $t_s$ ). Powstałe w tej części procesu gazy pirolityczne odprowadzone są do przestrzeni komory spalania przy kontrolowanej atmosferze gazowej i temperaturowej, tak aby ilość powstałych  $\text{NO}_x$  termicznych była minimalna. W strefie suszenia i pirolizy powinna być również dokonana redukcja siarki i chloru zawartych w odpadach przy pomocy dodatkowo wprowadzonych związków wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ) [12-15].

10. Układ technologiczny gdzie proces termicznej utylizacji jest ciągły i przebiega przy ściśle określonych parametrach termodynamicznych i w określonej atmosferze gazowej w poszczególnych fazach procesu termicznej przemiany daje możliwość całkowitego, zupełnego i w pełni ekologicznego procesu spalania. Układ taki zapewnia osiągnięcie maksymalnej sprawności termicznej oraz optymalnego bezpieczeństwa ekologicznego [14-15]

20 lat  
doświadczenia  
w fotografii  
przemysłowej



zapraszamy do współpracy  
fotografia artystyczna i reklamowa

**Piotr Komander**

tel. +48 601 438 404

[www.komander.com.pl](http://www.komander.com.pl)