

Karcz Henryk

Komorowski Wojciech

Jachula Edward

Łęcki Piotr

Kantorek Marcin

Dlaczego nie powinno się spalać
odpadów komunalnych
w kotłach rusztowych

Skład morfologiczny odpadów komunalnych jest w danej 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-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. Dla prawidłowego funkcjonowania instalacji do termicznej utylizacji odpadów, substancje te powinny być bezwzględnie usunięte ze strumienia odpadów podawanych do instalacji. Obecność materiałów ceramicznych i szklanych zwiększa niepotrzebnie masę popiołu, który w zależności od stosowanej 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 hydrotransportu popiołu. Pogarszając w istotny sposób wskaźniki niezawodności pracy instalacji.

Brak odbioru metali ze strumienia odpadów podawanych do instalacji utylizacji powoduje straty ekonomiczne z tytułu odzysku cennego- dość drogiego- surowca w postaci złomu żelaznego i złomu metali kolorowych, oraz powoduje straty spowodowane wzrostem ilości przestojów wynikających z destrukcyjnego oddziaływania elementów złomu na urządzenia komory spalania i urządzenia transportu popiołu. Przeniesienie procesu odbioru złomu metali z fazy zasilania instalacji na fazę odprowadzenia popiołu jest czynnością niepoprawną technologicznie z powodu znacznej utraty własności ferromagnetycznych przez elementy żelazne. Spowodowane jest to niekiedy bardzo grubą warstwą ‘zendry’, która powstaje na powierzchni metalu w wyniku wysokotemperaturowego utleniania. Przy braku mechanicznego wychwytywaniu metali ze strumienia popiołu. Stopień oczyszczania popiołu z metali, obniża się w niektórych przypadkach bardzo znacznie i utrata metali może być większa od 50% ich masy wejściowej.

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 objętości urządzeń technologicznych instalacji.

Dodatkowym rozwiązaniem problemu powinno być rozdrobnienie odpadów do takich rozmiarów aby mogła nastąpić paletyzacja, 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 stopnia sprasowania gęstość nasypową (D_n^f) w granicach 400÷600 kg/m³ oraz wilgotność w granicach (W^f) 5-15%, co w przypadku gęstości jest dwukrotnie większe w stosunku do odpadów luźno ułożonych, a w przypadku wilgoci jest 3-4 krotnie mniejsze od wilgoci 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 zurbanizowanym, lecz posiadającym możliwości odbioru wytworzonej energii cieplnej w postaci wody, przetworzonej na energię gorącej wody i prądu elektrycznego.

W takim przypadku, transport FAPE z wysypiska odpadów do instalacji nie stanowi żadnego problemu logistycznego i ekologicznego. Nie stanowi również żadnego zagrożenia dla środowiska naturalnego i nie jest żadną uciążliwością dla otoczenia ludzkiego wzdłuż trasy dowozu FAPE z wysypiska usytuowanego poza siedzibami ludzkimi do instalacji usytuowanej w ludzkim środowisku mieszkalnym. Przykładowa instalacja, która będzie utylizować rocznie około 200000t odpadów, co odpowiada godzinnemu zużyciu około 25t/h, wymaga obsługi jedynie przez 3-4 „tiry”, które w ciągu 1h będą zwiększać ruch samochodowy w danym rejonie ulicznym. Przy takiej technologii przygotowania odpadów do spalania i odpowiedniej technologii termicznego ich przekształcania, uciążliwość dla otoczenia spowodowana ich transportem jest całkowicie pomijalna.

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

Najkorzystniej jest wówczas, gdy biomasa jest również 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.

Opadem, który może być utylizowany w instalacji są również 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.

Częściowo pozbawiony wody osad ściekowy może być poddany procesowi termicznej utylizacji samodzielnie lub może być spalony w dowolnych proporcjach masowych łącznie z FAPE pochodzącym z odpadów lub współspalony łącznie z biomasą.

2. 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 jej rozmieszczenia i struktura fizyczna substancji mineralnej ma natomiast duży wpływ na szybkość termicznego rozkładu i szybkość wydzielania się 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: 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. 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 (W^r) i popiołu (A^r) w przedstawionych w tabeli 1 składnikach morfologicznych odpadów, należy zaznaczyć bardzo duży rozrzut szczególnie zawartości wilgoci (W^r). W dostarczonej próbce odpadów, zawartość wilgoci poszczególnych składników morfologicznych waha się od 0,68% do 28,45%. Zawartość wilgoci roboczej (W^r) jest ściśle uzależniona od strukturalnej budowy fizycznej danej substancji. Wilgoć robocza (W^r), a szczególnie wilgoć przemijająca (W^p) jest, bowiem ściśle związana z wilgotnością analityczną (W^a), która jest fizyczną cechą danej substancji. Wilgotność osadów ściekowych w stanie dostarczonym (roboczym), przytoczona jako punkt odniesienia jest bardzo wysoko i sięga 78, 12%, a natomiast, wilgotność brykietów i peletów pochodzących z drewna, które w stanie luźnym posiada wilgotność (W^r) około 40÷60%, po sprasowaniu posiada 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, (Q_{ri}).

Składnikiem paliwa który decyduje o czasie całkowitego wypalania danej substancji jest karbonizat (K^r), 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 się danego składnika morfologicznego odpadów. Czas wypalania poszczególnych struktur morfologicznych wpływa, bowiem na strukturę złoża wypalonych odpadów (o ile są one wypalone w złożu np. na ruszcie). Struktura złoża wpływa bowiem w zdecydowany sposób na powstałą stratę kominową (S_k) oraz stratę niecałkowitego spalania w żużlu (S_{nz}).

Pozostałość karbonizatu (K^r) 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 (S_k) i straty niecałkowitego spalania (S_n), a pogorszenie sprawności ekologicznej wynika ze wzrostu zawartości koksiku (C) w żużlu i popiele.

Zawartość karbonizatu (K^r), 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 ($K^r= 3,85\%$) z makulatury ($K^r= 3,18\div 5,23\%$), oraz osadów ściekowych ($K^r= 3,57\%$). Najwyższe ilości karbonizatu powstają przy odgazowaniu odpadów pochodzących z PCV ($K^r= 27, 48\%$), oraz z odpadów skórzanych ($K^r= 32, 84\%$) i z odpadów gumowych ($K^r= 46,15\%$).

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 będącą 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.

Oznaczone zawartości popiołu (A^r) przedstawione w tabeli 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, 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 to powoduje oblepienie niespalnego paliwa przez roztopiony żużel i znaczny wzrost straty niecałkowitego spalania w żużlu.

Zawartość popiołu autotochtonicznego 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 $A^r=25\div 35\%$. Oprócz dużej ilości popiołu, odpady kostne charakteryzują się popiołem o bardzo niskiej temperaturze spiekania, mięknięcia i topnienia.

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

Zaprojektowanie procesu technologicznego termicznej konwersji odpadów wymaga gruntowego 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 proces optymalnego termicznie i bezpiecznego ekologicznie energetycznego recyklingu odpadów. Analiza dotychczas przeprowadzonych wyników oznaczeń własności fizykochemicznych badanych substancji wykazała znaczne różnice zarówno, co do zawartości wilgoci (W), popiołu (A) jak i wartości opałowej (Q^r_i) 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.

Z energetycznego punktu widzenia projektowanie instalacji do spalania odpadów komunalnych musi opierać się na bardzo wiarygodnych informacjach dotyczących zawartości wilgoci, popiołu, kaloryczności, składu elementarnej substancji organicznej i nieorganicznej, stopnia konwersji w gaz pizolityczny 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, 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 spalonego paliwa poprzez tworzenie się różnego rodzaju ścieków. 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. Wykonane zostać, zatem muszą; analiza techniczna, elementarna, fizyczna oraz badania procesu suszenia, pirolizy, zapłonu i spalania badanych składników morfologicznych, które obejmują:

1) Oznaczenie parametrów fizykochemicznych

- wykonanie oznaczeń analizy termicznej substancji wyjściowej (roboczej),
- wykonanie oznaczeń analizy elementarnej,
- wykonanie oznaczeń gęstości pozornej, gęstości rzeczywistej, gęstości nasypowej oraz określenie porowatości,
- oznaczenie rozkładu ziarnowego.

2) Badania procesu suszenia

-oznaczenie czasu odparowania wilgoci przemijającej w zależności od frakcji wymiarowych,

-oznaczenie czasu i szybkości odparowania wilgoci w zależności od temperatury procesu w zakresie od 100°C do 800°C i frakcji wymiarowej.

3) Określenie kinetyki szybkiej pirolizy

-wyznaczenie szybkości pirolizy w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-wyznaczenie stopnia konwersji substancji organicznej badanych prób w fazę gazową w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-oznaczenie składu chemicznego gazu pirolitycznego w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-oznaczenie własności fizycznych karbonizatu; gęstości pozornej, rzeczywistej, nasypowej i określenie porowatości w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-oznaczenie masy karbonizatu oraz jego składu elementarnego w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-oznaczenie składu chemicznego popiołu otrzymanego podczas spoielenia w warunkach szybkiej pirolizy, w zależności od temperatury procesu, szybkości nagrzewu i frakcji ziarnowej,

-oznaczenie charakterystycznych temperatur popiołu otrzymanego z szybkiej pirolizy podczas nagrzewu w atmosferze utleniającej, półredukcyjnej i redukcyjnej.

4) Określenie kinetyki spalania

-wyznaczenie minimalnej temperatury zapłonu w zależności od rodzaju morfologicznego odpadów, od frakcji ziarnowej i koncentracji tlenu w strefie reakcji,

-wyznaczenie charakterystycznych czasów spalania: czasu zapłonu, czasu spalania części lotnych, czasu spalania karbonizatu i całkowitego czasu spalania warstwy substancji w zależności od temperatury procesu, masy spalanej substancji, koncentracji tlenu i stopnia uziarnienia,

-wyznaczenie charakterystycznych temperatur spalania: części lotnych i karbonizatu warstwy substancji, określonej masy w zależności od temperatury procesu, koncentracji tlenu i stopnia uziarnienia,

--określenie charakterystycznych stałych kinetycznych poszczególnych faz spalania w zależności od temperatury procesu, koncentracji tlenu, stopnia uziarnienia i spalanej masy,

-wyznaczenie składu chemicznego gazów spalinowych otrzymanych w trakcie spalania warstwy substancji w zależności od temperatury procesu, koncentracji tlenu, stopnia uziarnienia i rodzaju morfologicznego odpadów,

-oznaczenie składu chemicznego popiołu otrzymanego w trakcie spalania w zależności od temperatury procesu, koncentracji tlenu i stopnia uziarnienia,

-oznaczenie charakterystycznych temperatur popiołu w czasie nagrzewu w atmosferze pólutleniającej i redukcyjnej poszczególnych składników morfologicznych odpadów.

3. Wyniki badań fizykochemicznych i kinetycznych podstawowych składników morfologicznych odpadów komunalnych

3.1. Analizy techniczne i elementarne

Analizy techniczne i elementarne składników morfologicznych odpadów przeprowadzono w Zakładzie Kotłów i Turbin ITC i MP Politechniki Wrocławskiej we współpracy z Zakładem Chemii i Technologii Węgla Kamiennych i Pirolitycznych Instytutu Chemii i Technologii Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej.

Analizę chemiczną i elementarną wykonano według odpowiednich norm:

-wilgość (W) według PN-80/G-04511

-popiół (A) według PN-80/G-04512

-części lotne (V) według PN-81/G-04516

-ciepło spalania (Q_3) według PN-81/G-U44513

-gęstość rzeczywista (d_r) według PN-81/G-04307

-gęstość pozorną (d_p) określono metodą rțęciową pod ciśnieniem atmosferycznym

-węgiel (C) według PN-59/G-04335

-wodór (H) według PN-59/G-04339

-azot (N) według PN-58/G-04345

-siarka (S) według PN-58/G-04340

-tlen (O) obliczono jako pozostałość.

Wyniki analizy technicznej i elementarnej badanych prób morfologicznych odpadów przedstawione są w tabeli nr 1.

W tabeli przedstawiono również udział gazów pirolitycznych i karbonizatu otrzymanych w trakcie termicznego rozkładu badanych substancji w temperaturze 1000°C, w warunkach szybkiego nagrzewu ($10^2\div 10^3$ deg/s), jakie panują w początkowej strefie paleniska kotła rusztowego.

Przedstawione wyniki badań wykazały, że poszczególne składniki morfologiczne znacznie różnią się między sobą zarówno zawartością wilgoci, (W_r), która jest w pewnym sensie cechą fizyczną danej substancji, jak również zawartością substancji mineralnej, chemicznie związanej z substancją organiczną jak i mineralną wolną-przybyszowa.

Najwyższa zawartość substancji balastowych w postaci wilgoci charakterystyczna jest dla składników morfologicznych pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Substancje te charakteryzują się natomiast bardzo małą ilością substancji mineralnych chemicznie związanych z substancją organiczną. Wyjątek stanowią odpady kostne, które posiadają 40% udział substancji mineralnej chemicznie związanej z substancją organiczną. Odpady pochodzenia roślinnego i zwierzęcego posiadają bardzo dużą zdolność do wchłaniania wilgoci, co objawia się zawartością wilgoci znacznie powyżej 20%. Najwyższa zawartość wilgoci występuje w osadach ściekowych $W^r=78,12\%$.

Odpady pochodzące z folii, PCV i gumy charakteryzują się bardzo niską zawartością wilgoci. Wilgoć w ich przypadku jest wyłącznie wilgocią powierzchniową zewnętrzną, jej zawartość nie przekracza z reguły 5%. Substancje te charakteryzują się natomiast związaną chemicznie substancją mineralną z substancją organiczną. Substancja mineralna stanowi różnego rodzaju wypełniacze, utwardzacze itd., które trwale są związane z pierwiastkami zaliczanymi do pierwiastków tworzących substancje organiczną. Stwierdzenie to znajduje odzwierciedlenie w składzie chemicznym karbonizatu otrzymanego w trakcie procesu pirolizy. W karbonizacie oprócz pierwiastka C występują inne pierwiastki, które wchodzą w skład substancji mineralnej. Pierwiastki te impregnują substancje układów krystalitów węglowych, z reguły znacznie spowalniając proces wypalania ziaren karbonizatów.

Oprócz różnic w zawartości składników balastowych (A^r , W^r) występują dość znaczne różnice w składzie elementarnym substancji organicznej. Zawartość pierwiastków C, H, O, od których głównie zależy wartość ciepła spalania (Q_c) 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 żużlowej.

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 i fizycznego 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 strukturalne substancje, które mają podlegać procesowi termicznego przekształcania.

Wyniki analizy technicznej i elementarnej głównych składników odpadów komunalnych

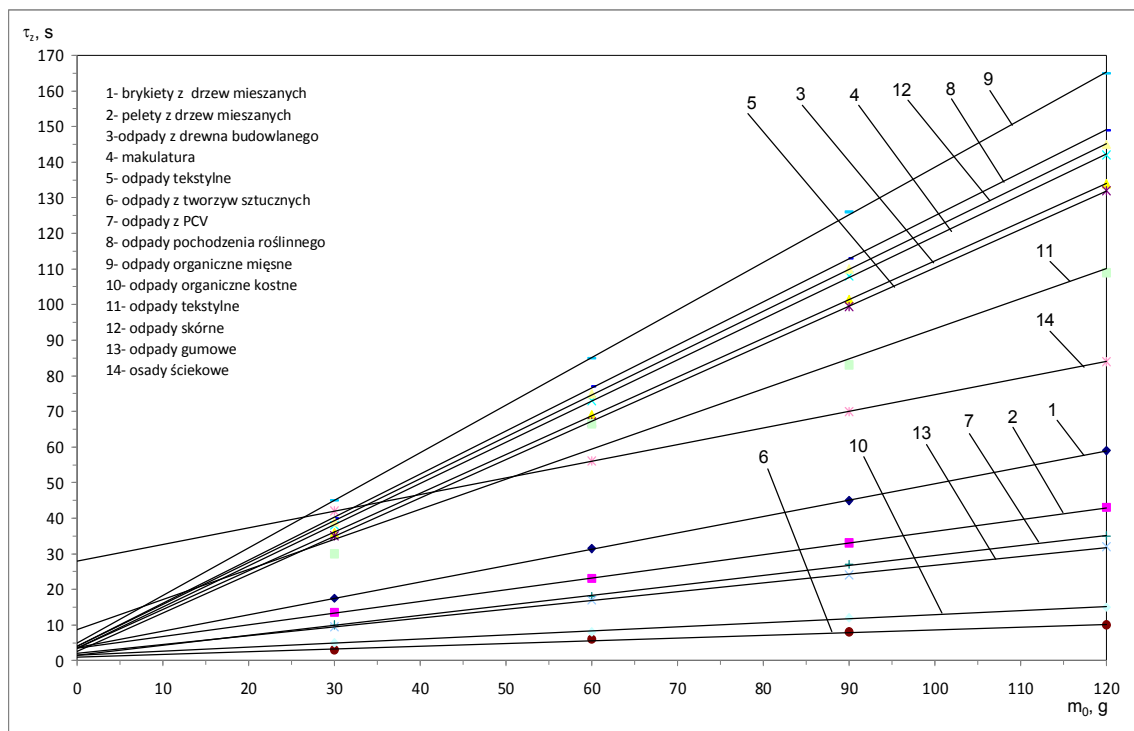
Lp.	Rodzaj substancji	A %	V ^r %	W ^r %	Q _i KJ/kg	A ^r %	C ^r %	H ^r %	O ^r %	N ^r %	S ^r %	Cl ^r %	K ^r %	M ^r %	V ^d	K ^d	C ^d _k
1.	Odpady z drewna budowlanego	0,54	65,60	20,00	14460	0,40	40,80	4,80	33,35	0,20	0,10	0,35	14,0	79,6	82,00	17,06	96,48
2.	Odpady papierowe (makulatura)	19,27	59,88	23,20	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

3.2. Badania procesu spalania

Badania procesu spalania prób wyodrębnionych gatunków morfologicznych odpadów przeprowadzono w temperaturze 1000°C przy przepływie powietrza przez warstwę spalanej substancji. Badania przeprowadzono dla prób o różnej masie w równowagowych warunkach termodynamicznych.

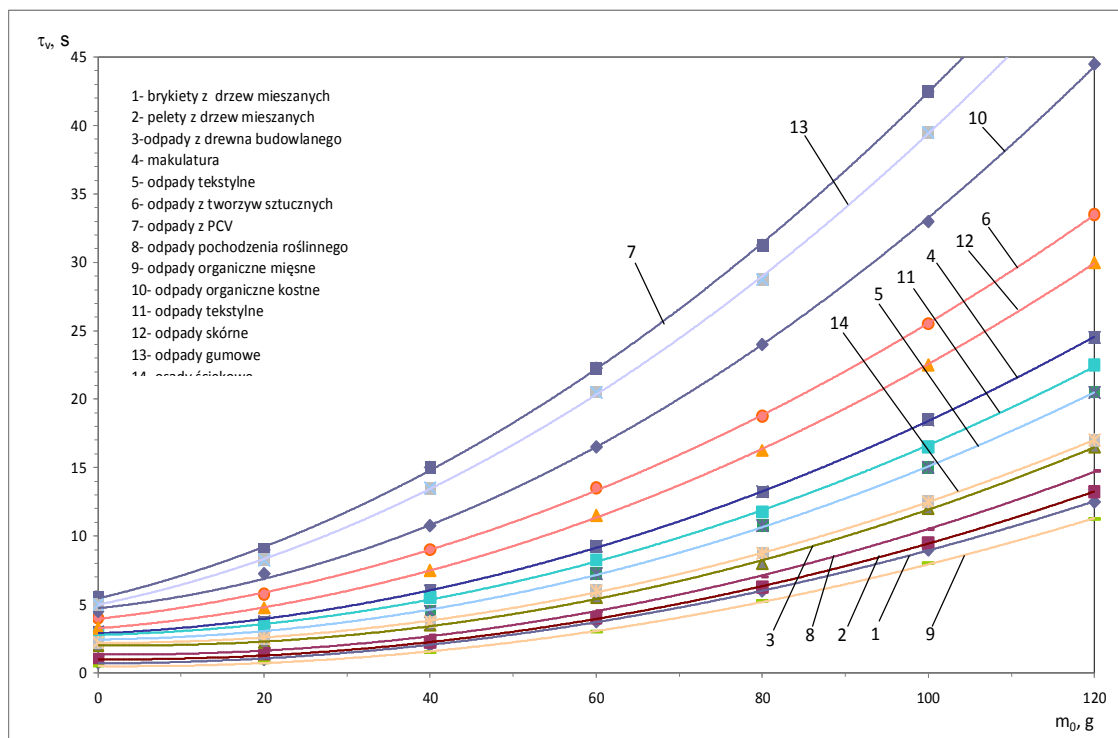
W trakcie badań określono czas odparowania wilgoci i czas nagrzania próbki do momentu, w którym wydzielają się gazy pirolityczne w ilości niezbędnej do utworzenia mieszanki palnej zdolnej do zapłonu. Ten okres indukcji zapłonu gazów pirolitycznych oznaczony został przez czas zapłonu (τ_z). Zależność czasu zapłonu (τ_z) 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, przedstawia wykres na rys.1. Czas zapłonu rośnie wraz ze wzrostem masy próbki, co jest rzeczą naturalną przy spalaniu wszelkiego rodzaju paliw. O czasie zapłonu (τ_z) decyduje głównie zawartość wilgoci (W^I) i szybkość termicznego rozkładu substancji organicznej.



Rys. 1. Czas zapłonu w zależności od masy próbki

Najistotniejszym parametrem spalanej substancji decydującej o jej czasie zapłonu jest zawartość wilgoci. Czas zapłonu (τ_z) ustalonej masy próbki, rośnie proporcjonalnie ze wzrostem zawartości wilgoci (W^I) 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.

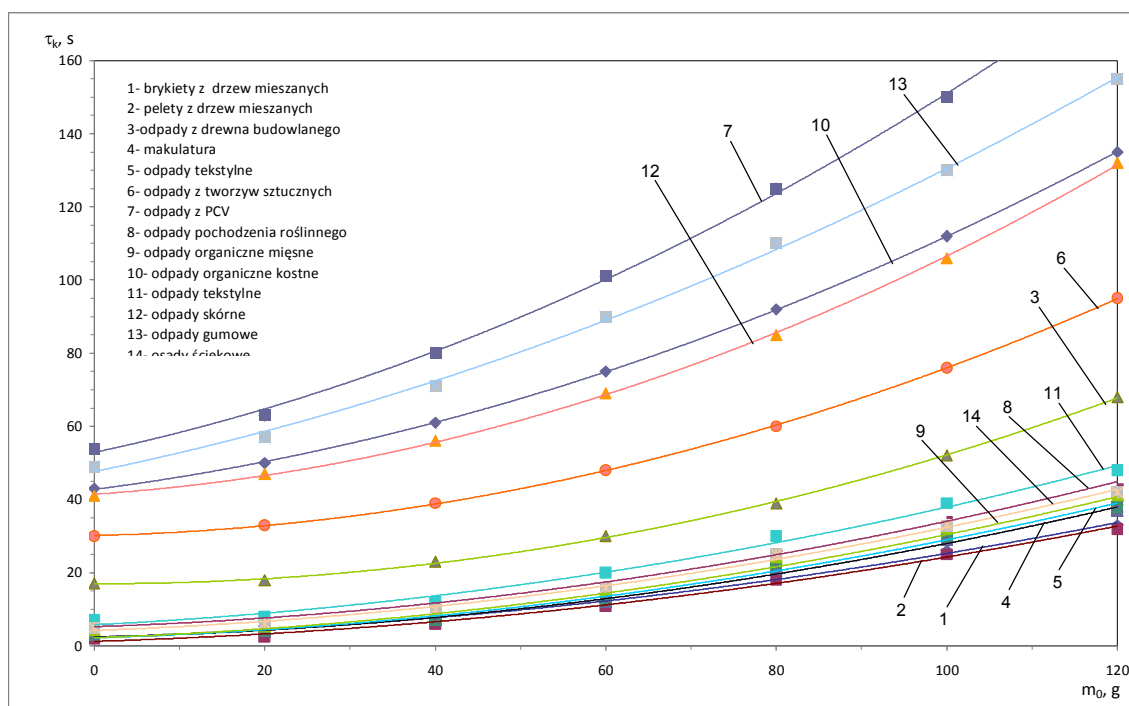
Czas wydzielania i spalania gazów pirolitycznych (τ_v) przedstawiony jest na wykresie rys.2. Najkrótszy czas wydzielania i spalania gazów pirolitycznych charakterystyczny jest dla odpadów pochodzenia zwierzęcego. Gazy pirolityczne wydzielają się w sposób wybuchowy, powodujące eksplozję substancji mięsnej. 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-poza 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-poza odpadami gumowymi, PCV i osadami ściekowymi- połączony 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.

W zależności od gatunku morfologicznego odpadów, w fazę gazową przechodzi od 50 do 95% substancji organicznej. Największy udział substancji gazowej występuje w przypadku utylizacji odpadów mięsnych. Procentowy udział gazów pirolitycznych w stosunku do masy substancji wyjściowej jest 6-razy większy od podobnego stosunku charakterystycznego dla PCV i odpadów gumowych.

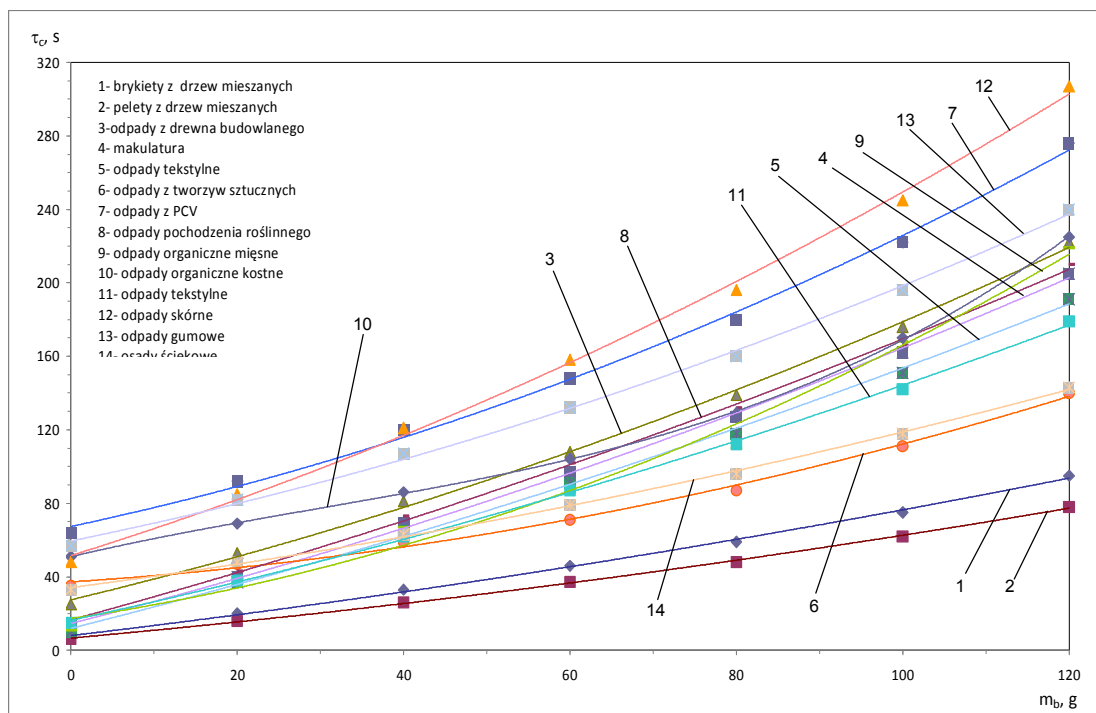
Stopień przemiany substancji organicznej odpadów na fazę gazową posiada odbicie w czasie wypalania karbonizatu pozostałego po odgazowaniu utylizowanej substancji. Wykres na rys. 3 przedstawia czas wypalania pozostałości po odgazowaniu spalanej substancji morfologicznej odpadów. Najkrótszy czas spalania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

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 reakcje z cząsteczką O_2 . Struktury te w znaczący sposób powodują wydłużenie czasu wypalania substancji karbonizatu pozostałego po fazie odgazowania.

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



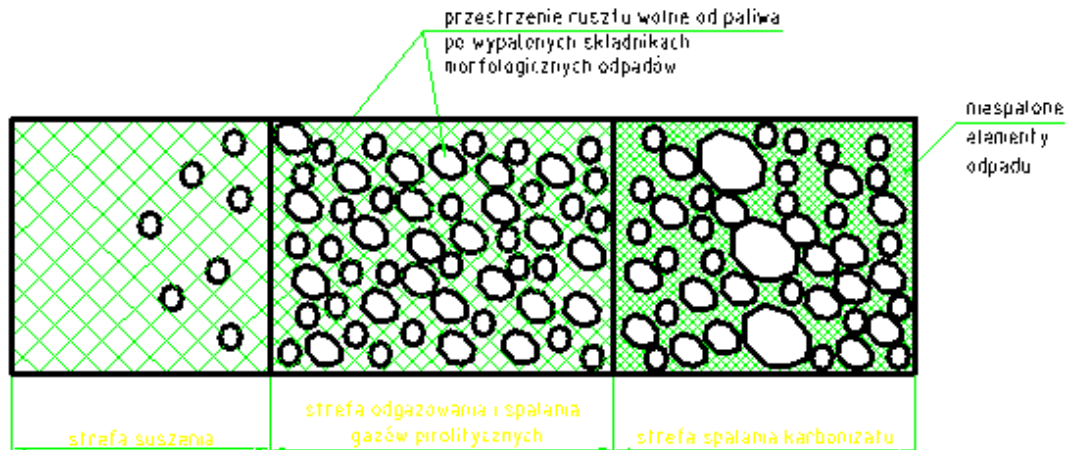
Rys. 4. Całkowity czas spalania w zależności odmasy próbek.

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, odpadów zwierzęcych spala się 2-krotnie wolniej od peletów i brykietów pochodzenia roślinnego, lecz znacznie krócej od odpadów pochodzących ze skóry, PCV i gumy. Jest to szczególnie widoczne w przypadku ustalonego rozdrobnienia odpadów. W zakresie określonego rozdrobnienia, całkowity, lecz inny czas wypalania (τ_c) identycznych masowo, lecz niekiedy różniących się geometrycznie, różnych struktur morfologicznych odpadów powoduje dezorganizację procesu spalania się warstwy wsadu na ruszcie niezależnie od jego typu. Jednorodna początkowa warstwa paliwa na ruszcie posiadająca jednakowy opór hydrauliczny dla przepływającego przez dane strefy powietrza, staje się z powodu różnych szybkości wypalania poszczególnych gatunków morfologicznych, warstwą „dziurawą” o strukturze „sera szwajcarskiego”. Wypalona substancja odpadów stanowi 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. Powietrze to bez specjalnych oporów hydraulicznych przepływa z nadmierną prędkością, powodując dodatkowe obniżenie temperatury nieprzereagowanych karbonizatów,

powodując dalsze obniżenia szybkości spalania. Nierównomierna szybkość wypalania różnych gatunków morfologicznych powoduje dezorganizację struktury warstwy spalających się odpadów na ruszcie, co obrazuje rycina przedstawiona na rys.5.



Rys. 5. Dezorganizacja struktury warstwy spalających się odpadów.

W wyniku takiej dezorganizacji procesu spalania na ruszcie, znacznie rośnie strata kominowa, ponieważ rośnie ilość podawanego powietrza pod ruszt w celu dopalenia niespalonych części karbonizatu. Część karbonizatu pochodząca z frakcji o najmniejszej reakcyjności w ogóle nie zdąży się spalić na ruszcie, powodując stratę niecałkowitego spalania w żużlu. W tym przypadku strata niecałkowitego spalania pochodzi głównie z tych struktur morfologicznych odpadów, które charakteryzują się najniższą reakcyjnością i najdłuższym czasem spalania. W zależności od składu morfologicznego strata ta może być na tyle znaczna, że obniży sprawność termiczną układu kotłowego o kilka procent. Strata ta stwarza kłopot w postaci żużlu, który staje się odpadem koniecznym do składowania lub do dalszej utylizacji, ponieważ będzie zawierał powyżej 5% części palnych.

4. Charakterystyki fizyczne popiołu pochodzące z różnych rodzajów morfologicznych odpadów.

Zachowanie się substancji popiołu podczas procesu spalania (jakiegokolwiek gatunku paliwa stałego) określają charakterystyczne temperatury, jakie przechodzi popiół w trakcie procesu spania.

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

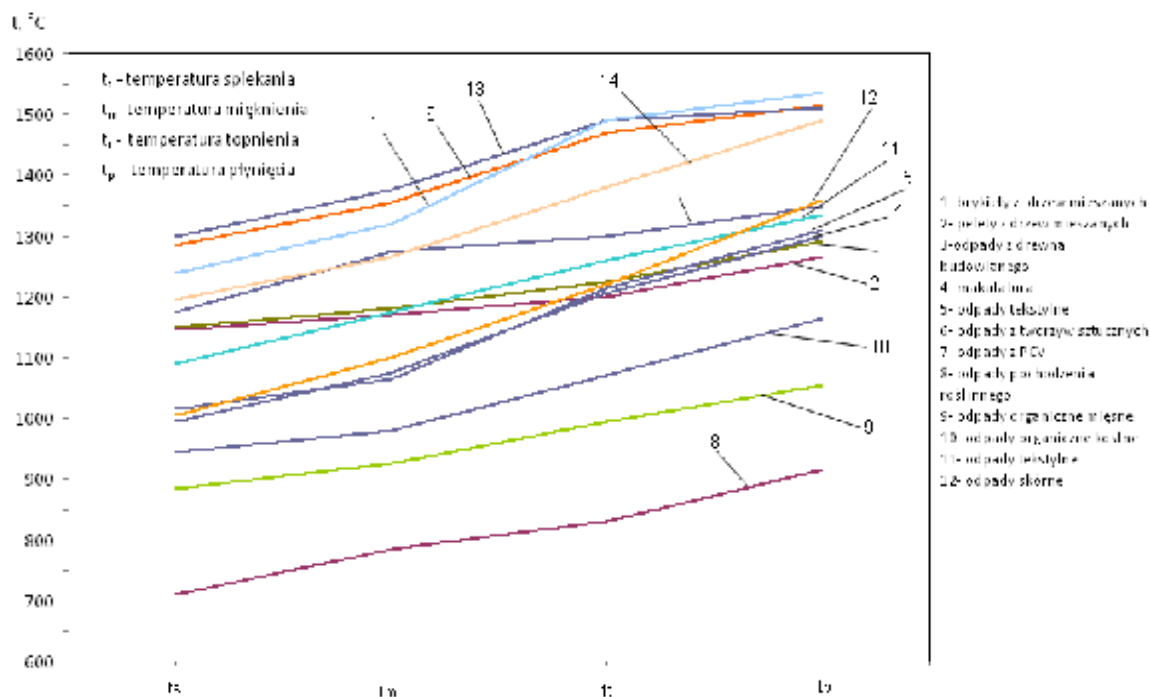
-temperatury spiekania (t_s),

-temperatury mięknięcia,

-temperatury topnienia (t_t),

-temperatura płynięcia (t_p)

Charakterystyczne temperatury popiołu badanych struktur morfologicznych odpadów przedstawione zostały w tabeli nr 2 oraz na diagramie rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyczne temperatury popiołu.

Fizyczne temperatury popiołu

Lp.	Rodzaj substancji	Temperatura spalania t_s °C	Temperatura mięknięcia t_m °C	Temperatura topliwości t_t °C	Temperatura płynięcia t_p °C
1.	Pelety, brykiety, kęsy z pospolki drzew liściastych i iglastych	1175	1970	1305	1348
2.	Drewno odpadowe użytkowe- meblowe, stolarskie	1148	1169	1205	1264
3.	Odpady z drewna budowlanego	1145	1188	1224	1296
4.	Odpady papierowe	994	1083	1207	1294
5.	Odpady kartonowe	1016	1095	1232	1325
6.	Odpady z tworzyw sztucznych	1285	1354	1468	1535
7.	Odpady z PCV	1296	1368	1474	1512

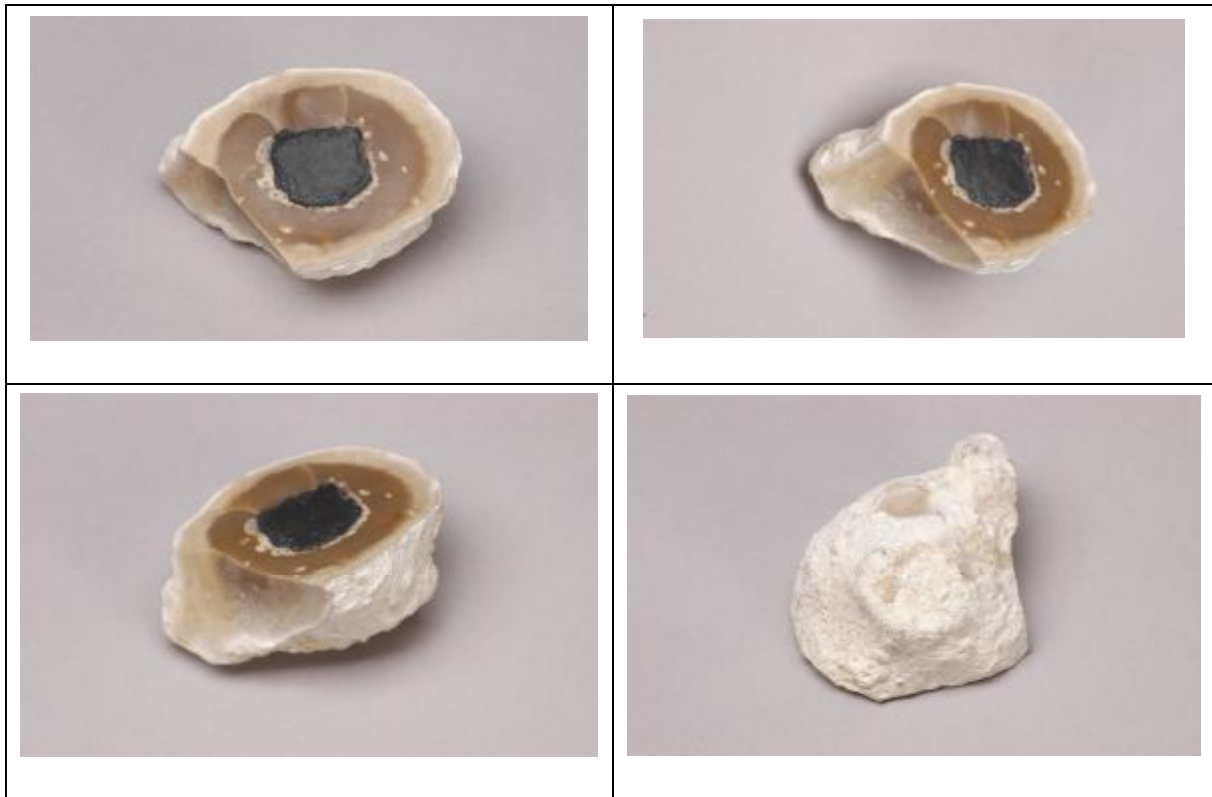
8.	Odpady organiczne pochodzenia roślinnego	708	785	824	917
9.	Odpady organiczne mięsne	887	924	995	1064
10.	Odpady organiczne kostne	942	985	1073	1168
11.	Odpady tekstylne	1085	1169	1254	1315
12.	Odpady skórzane	1012	1094	1216	1384
13.	Odpady gumowe	1246	1318	1495	1524
14.	Osad ściekowy	1195	1268	1384	1492

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 dezorganizację 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 żużlowej. Proces spalania zostaje przerwany, a wewnątrz powstaje niedopał w postaci niespalonego karbonizatu, co bardzo dokładnie obrazują zdjęcia fragmentu żużla pobranego z pod rusztu kotła rusztowego spalarni odpadów w Warszawie. Przedstawiona na rys. 7 dokumentacja zdjęciowa jest charakterystycznym przypadkiem spalania odpadów komunalnych, składających się z różnych gatunków morfologicznych, różniących się zarówno substancją organiczną jak i substancją mineralną. Również pomiędzy poszczególnymi strukturami morfologicznymi występują praktycznie we wszystkich charakterystykach mających wpływ na proces spalania. Różnice tej, co pokazały zamieszczone wyniki badań, są nie 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 w straty niecałkowitego spalania w żużlu oraz wzrostu straty kominowej spowodowanej

niekontrolowanym przepływem „falszywego” powietrza przez te fragmenty rusztu, w których nastąpiło wcześniejsze wypalenie najbardziej reakcyjnych odmian morfologicznych odpadów.

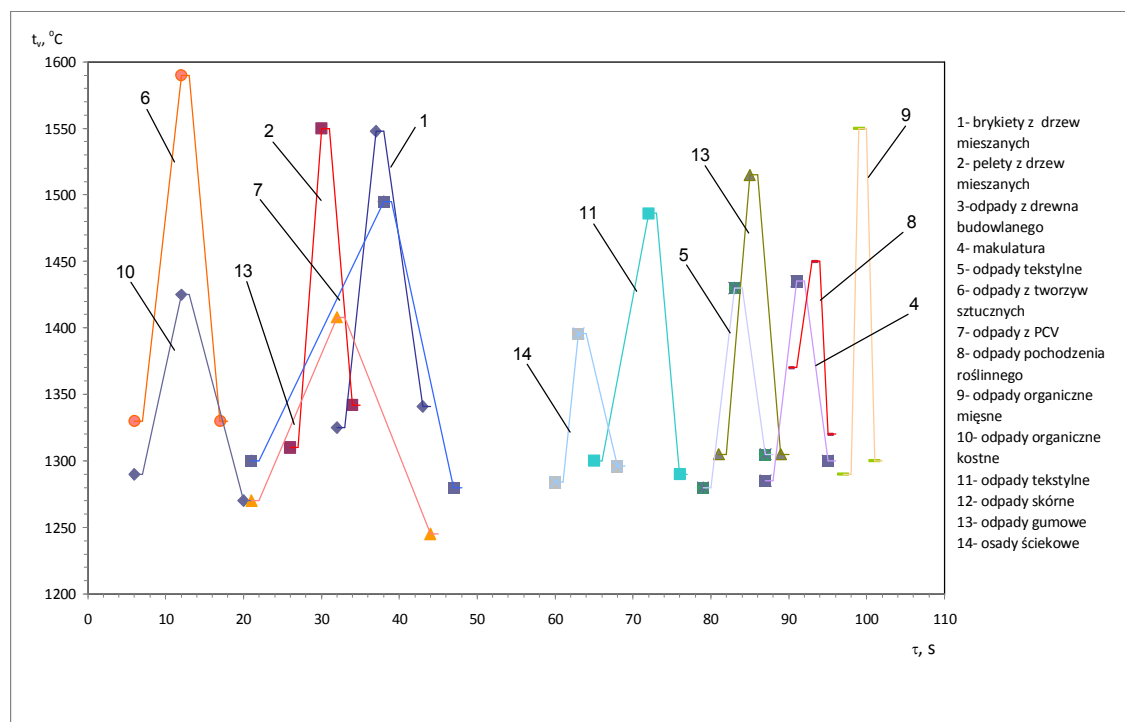


Rys. 7. Niedopał powstały w żużlu.

5. Wpływ spalania gazów pirolitycznych na proces wypalania odpadów.

Proces wydzielania i spalania gazów pirolitycznych odpadów podawanych do kotłó w 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 uzależniony od rodzaju odmiany morfologicznej odpadów, które charakteryzują się odmiennymi czasami suszenia i spalania wydzielających 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 proces spalania gazów pirolitycznych. 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 się spalać 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. Następną dalszą prawie wyodrębnioną 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. 8. Temperatury spalania gazów pirolitycznych badanych prób.

Trzecia przestrzeń rusztu jest strefą, 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^f) 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 na rys. 7 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 (t_m) i temperatury płynięcia ($t_p=900^{\circ}\text{C}$) popiołu pochodzącego z odpadów kostnych, co przedstawia wykres na rys. 5. W tym samym czasie powstaje karbonizat po odgazowaniu odpadów gumowych, którego czas wypalania (τ_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 żużłu. 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 żużła 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 żużłu 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 niecałkowitego i zawsze prowadzi do niecałkowitego spalania i obecności niespalonych części (paliwa) odpadów z żużłu z reguły przekraczających 5% udziału masowego żużłu. 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 10%.

6.W jaki sposób można uzyskać całkowite, zupełne oraz ekologiczne spalania odpadów komunalnych

Przedstawione wyniki badań fizykochemicznych i kinetycznych wybranych (podstawowych) 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. 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 (NO_x), tlenków siarki (SO_x) oraz chlorowodoru (HCl). Zjawisk tych, spalając odpady w kotłach rusztowych nie da się uniknąć, ponieważ są to charakterystyczne własności technologiczne dla tego typu układów reakcyjnych. Rozwiązaniem problemu jest układ ciągłego procesu termicznego, rozdzielonego jednocześnie

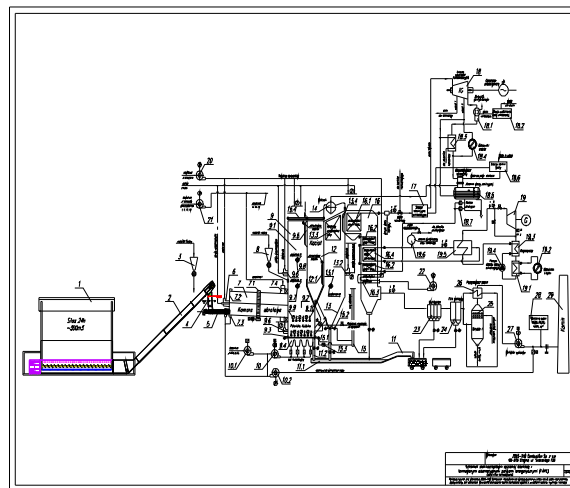
w czasie i w przestrzeni. Układ taki powstaje wówczas, gdy proces suszenia i odgazowania powstaje w przestrzeni o atmosferze redukcyjnej, w której temperatura jest niższa od temperatury spiekania popiołu (t_s). Powstałe w tej części procesu gazy pirolityczne odprowadzone są do przestrzeni komory spalania przy kontrolowanej atmosferze reakcyjnej w określonym reżimie temperaturowym, tak, aby ilość powstałych 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 (CaCO_3).

Powstały w trakcie odgazowania popiół i karbonizat powinien bezpośrednio podany być do tej części komory spalania, w której oddzielnie od gazów pirolitycznych, w ściśle określonej temperaturze przestrzeni reakcyjnej-poniżej temperatury spiekania (t_s) popiołu-zostanie całkowicie spalony.

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.

Tak zaprojektowany układ termicznej utylizacji odpadów komunalnych zrealizowany jest w układzie technologicznym typu „K”. Schemat technologiczny typu „K” przedstawiony jest na rys. 9. Instalacja składa się z układu przygotowania i podawania odpadów wraz z układem podawania katalizatora wapniowego. Proces suszenia i odgazowania inicjowany

i podtrzymywany jest przez płomień paliwa wspomagającego, którego ilość jest ściśle uzależniona od zawartości wilgoci w podawanych odpadach, oraz zależy od ciepła rozkładu utylizowanej substancji. Wydzielany w trakcie odgazowania chlor i tlenki siarki neutralizowane są w tej fazie procesu przez gazowe tlenki wapnia powstałe w wyniku termicznego rozkładu CaCO_3 . Temperatura w obrotowej komorze suszenia i pirolizy jest ściśle kontrolowana i jest zawsze mniejsza od temperatury spiekania. W komorze obrotowej następuje rozkład substancji odpadów na gazową fazę gazów pirolitycznych i stałą fazę karbonizatu.



Rys. 9. Schemat technologiczny instalacji.

Gazy pirolityczne odprowadzane są do komory fluidalnej, z którą bezpośrednio łączy się komora fluidalna. Gazy pirolityczne spalają się w górnej części komory fluidalnej w obecności powietrza doprowadzonego w kilku strefach tak, aby temperatura płomienia nie była wyższa od $1250\div 1300^{\circ}\text{C}$.

Karbonizat i popiół odprowadzane są do złoża fluidalnego, które zamyka komorę fluidalną od spodu. Karbonizat, popiół i materiał inertyny stanowi substancję złoża fluidalnego. Karbonizat w złożu spala się w określonej atmosferze tlenowej przy 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 (t_m). Gazy spalinowe na wylocie z komory fluidalnej i komory separacji są częściowo oczyszczone z lotnego popiołu, a całkowity proces dopalania ewentualnie niespalonych gazów palnych i lotnego koksiku dopalony

jest w strefie popromiennej, płomienia olejowego lub gazowego palnika umieszczonego w komorze dopalania.

W górnej części komory dopalania w strefie temperatur 950-1000°C wdmuchiwany jest w postaci fazy stałej mocznik, który daje możliwość zmniejszenia zawartości NO_x w spalinach na wyjściu z instalacji kotłowej poniżej 100mg/um³.

Osiągnięte efekty termicznej utylizacji odpadów metodami „pierwotnymi” podczas procesu spalania w instalacji kotłowej praktycznie w całym zakresie, spełniają normy emisji w fazie gazowej i stałej określone przez odpowiednie dyrektywy unijne i rozporządzenia krajowe.

7.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.
- 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, 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.