

dr inż. Karcz Henryk
mgr inż. Kozakiewicz Andrzej
ZBUS-TKW Combustion Główno
mgr inż. Kantorek Marcin
Politechnika Wrocławska Wydz. Mech.-Energ.
Zakład Kotłów i Turbin
dr inż. Dziugan Piotr
Politechnika Łódzka
Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności
Prof. dr hab. inż. Wierzbicki Krzysztof
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy Warszawa

Czy właściwa jest termiczna utylizacja odpadów komunalnych w rusztowych kotłach energetycznych

1. Wstęp

Polska wchodząc do Unii zobowiązała się do ograniczenia odpadów na wysypiskach. Zobowiązaliśmy się, że do 2012 roku ograniczymy o 25% ilość śmieci, które wyrzucane są na wysypiska. Na składowiska ma trafić nie więcej niż 75% masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji. W 2013 roku musi to być już nie więcej jak 50%, a w 2020 roku maksymalnie 35%. Pozostało jeszcze kilka miesięcy, ale eksperci są zgodni, będziemy musieli zapłacić kary, nawet 250 tys. Euro dziennie, co oznacza, że opóźnienie może nas kosztować około 100 mln EURO rocznie. W tym momencie nie ma już żadnych szans na spełnienie naszych zobowiązań w dziedzinie gospodarki odpadami. Spełnienia zobowiązań akcesyjnych wymaga podjęcia kompleksowych i systemowych działań: budowy zakładów przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych oraz utworzenia regionów gospodarki odpadami komunalnymi, co powinno przyczynić się do uzyskania wysokiej efektywności ekonomicznej i ekologicznej konkretnych przedsięwzięć [1-2].

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, łączącej w sobie układ turbogeneratora parowego i turbogeneratora ORC.

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 paliwa, 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 i wyselekcjonowanych frakcji odpadów komunalnych i przemysłowych. Najbardziej prosty sposób wytwarzania FAPE jest bowiem związany zawsze z częściowym pozbawieniem odpadów wilgoci (powstaje wysokoenergetyczne paliwo energetyczne) i wzrost 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 istotną cechą odpadów 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 [3-6].

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 unieszkodliwienia 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 popiołu.

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

Odpady komunalne stanowią jedną z najbardziej istotnych grup odpadów wytwarzanych w Polsce. Strumień wytworzonych odpadów komunalnych, z wyraźną tendencją wzrostową, zarówno w ujęciu ich masy jak i wartości opałowej, sięga w skali roku 10 mln Mg.

Jednym z podstawowych celów jest zredukowanie w określonych terminach strumienia masy ulegających biodegradacji odpadów komunalnych. Realizacja tego celu, co wyraźnie udowadniają takie strategiczne dokumenty rządowe jak Krajowy Plan Gospodarki Odpadami (KPGO) 2010 oraz tzw. lista indykatywna dużych projektów, zatwierdzana w listopadzie 2007 r. przez Radę Ministrów w ramach II osi priorytetowej Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko, nie będzie możliwa bez wdrożenia instalacji termicznego przekształcania odpadów komunalnych, szczególnie w systemach gospodarki odpadami komunalnymi dużych polskich miast czy w systemach o znaczeniu regionalnym.

Zapisane w Traktacie Akcesyjnym oraz w krajowych ustawach i rozporządzeniach zobowiązania oraz obowiązki związane z uporządkowaniem krajowej gospodarki odpadami komunalnymi wyznaczają konkretne cele, skojarzone z konkretnymi datami ich osiągnięcia.

Wyznaczone cele muszą być osiągnięte poprzez wybudowanie elektrociepłowni opalanych odpadami ulegającymi spalaniu, które spełnić mają dwa podstawowe warunki:

- po pierwsze zapewnić możliwość wypełnienia przyjętych zobowiązań w zakresie redukcji odpadów ulegających biodegradacji,
- a po drugie dostarczyć znaczące ilości energii elektrycznej i ciepła, w tym, w znacznej części traktowanych, jako energia ze źródeł odnawialnych.

Prawnie w myśl aktualnie tworzonego rozporządzenia Ministra Środowiska, biodegradowalne odpady komunalne mają wszelkie cechy energii odnawialnej, a więc mogą zostać uznane za biomasę, która poddana procesowi termicznego przekształcania w elektrociepłowni opalanej FAPE może stanowić źródło energii odnawialnej.

Planowane w ten sposób do budowy elektrociepłowni opalane odpadami, mogą w istotny sposób przyczynić się do osiągnięcia wymaganych docelowych, procentowych udziałów energii ze źródeł odnawialnych.

Spoglądając na to z perspektywy swojego rodzaju wartość dodaną w aspekcie podejmowanych projektów budowy spalarni odpadów w Polsce, a przykład Holandii, w której w roku 2005, odpady ulegające biodegradacji zawarte w poddawanych spalaniu odpadach komunalnych

stanowiły drugie co do wielkości źródło energii odnawialnej (19% udziału), a średnio każda spalarnia produkowała dzięki odzyskowi z tych odpadów 47% tzw. „zielonej energii”, jest tego najlepszym dowodem. Kolejnym przykładem może być spalarnia odpadów komunalnych w Bratysławie, która potwierdziła, że w 2006 r. 49,44% wytworzonej w tej spalarni energii elektrycznej pochodziło z odpadów ulegających biodegradacji i stanowiło zieloną energię. Tego rodzaju przykładów, zaczerpniętych w oparciu o inne spalarnie krajów UE, można podać znacznie więcej [1-2].

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 skórzanego,
- 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.

Segregacja i odseparowywanie materiałów niepalnych ze strumienia utylizowanych odpadów jest 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 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 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 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 zamiennie 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 [7-9].

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.

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 jej rozmieszczenia i struktura fizyczna substancji mineralnej ma 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.

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%.

Oznaczone zawartości popiołu (A^r) 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 występujące 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 obłepienie 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 $A^r=25\div35\%$. Oprócz dużej ilości popiołu, odpady kostne charakteryzują się popiołem o bardzo niskiej temperaturze spiekania, mięknięcia i topnienia.

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%, 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%.

Tabela nr 1. 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 skórzanne	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

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_i^f).

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

Najwyższa zawartość substancji balastowych w postaci wilgoci charakterystyczna jest dla składników morfologicznych pochodzenia roślinnego i zwierzęcego. Składniki 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 $W^f=78,12\%$.

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 palną. Substancja mineralna stanowi różnego rodzaju wypełniacze, utwardzacze itd., które trwale są związane z pierwiastkami zaliczanymi do pierwiastków tworzących substancję organiczną. Stwierdzenie to znajduje odzwierciedlenie w składzie chemicznym karbonizatu otrzymanego w trakcie procesu pirolizy.

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:

- wilgoć (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 rtęciową 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 ($10^2 \div 10^3 \text{ deg/s}$) jakie panują w początkowej strefie paleniska kotła rusztowego.

W karbonizacie oprócz pierwiastka C występują inne pierwiastki które wchodzi w skład substancji mineralnej. Pierwiastki te impregnują substancje układów siatek 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 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 spiekania 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 strukturalnie substancje, które mają podlegać procesowi termicznego przekształcania.

4.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 próbek 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).

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^r) 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.

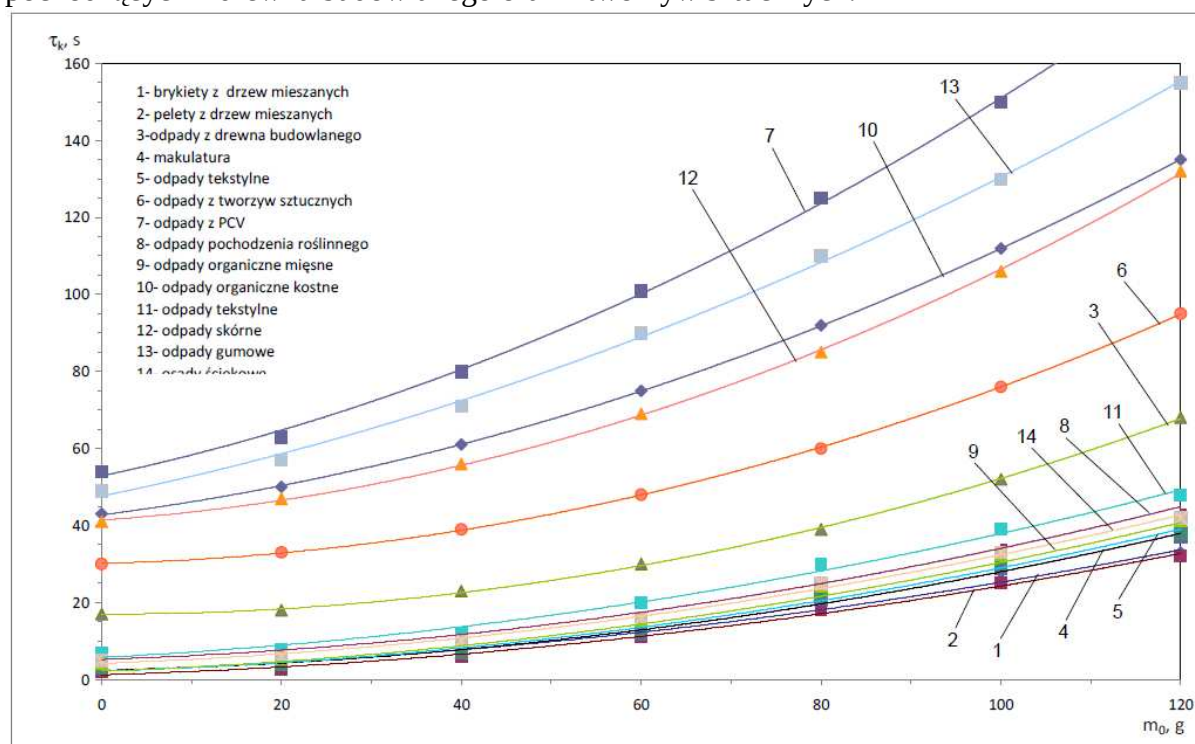
Gazy pirolityczne wydzielają się w sposób wybuchowy, powodując eksplozję np. substancji mięsnej. W podobny sposób przebiega proces współspalania i spalania gazów pirolitycznych z peletów i brykietów pochodzących z tkanki roślinnej. Wydzielające się gazy powodują wzrost ciśnienia wewnątrz peletu lub brykietu 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.

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.

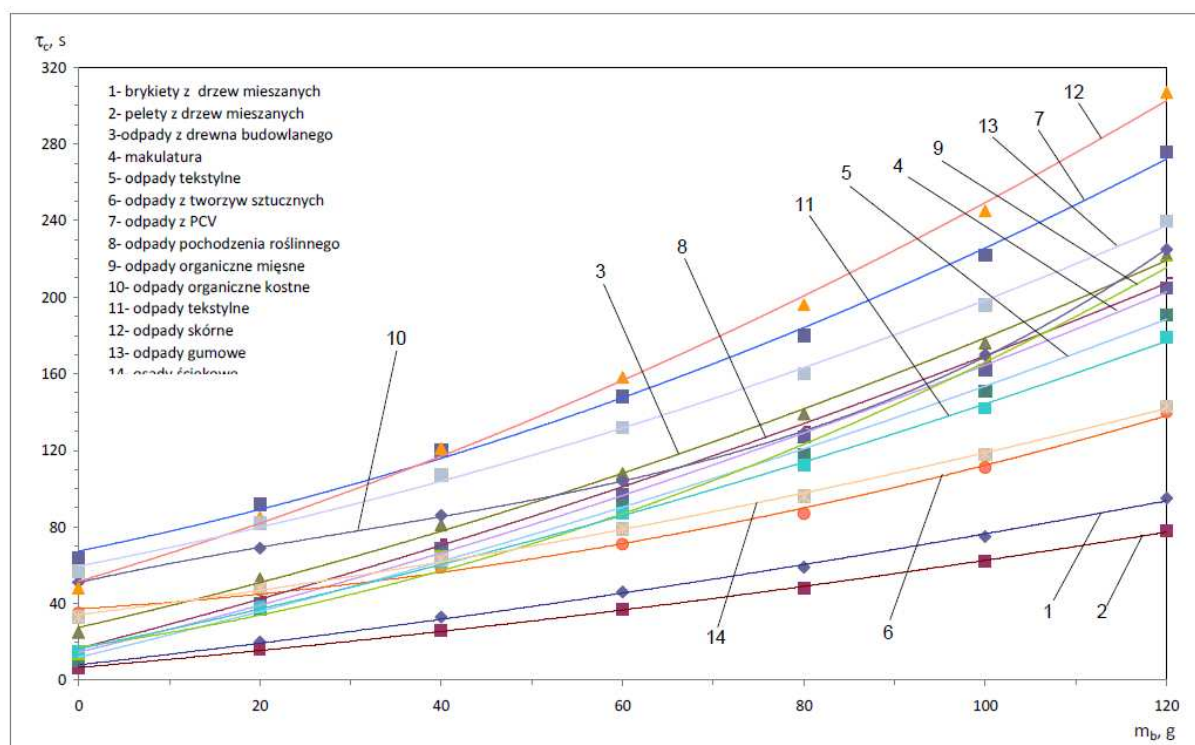
Stopień przemiany substancji organicznej odpadów na fazę gazową posiada odbicie w czasie wypalania karbonizatu pozostałego po odgazowaniu utylizowanej substancji. Wykres na rys. 1 przedstawia czas wypalania pozostałości po odgazowaniu spalanej substancji morfologicznej odpadów. Najkrótszy czas spalania pozostałości po odgazowaniu charakterystyczny jest dla peletów i 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. 1. 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 O₂. 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. 2.



Rys. 2. Całkowity czas spalania w zależności od masy próbki.

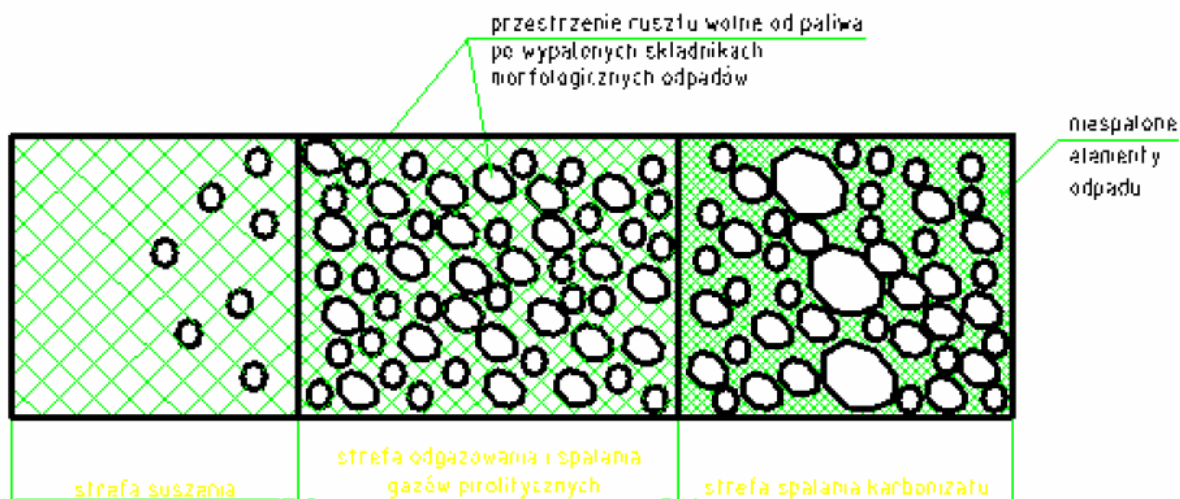
Najkrótszy całkowity czas wypalania substancji odpadów charakterystyczny jest dla peletów i brykietów pochodzących z substancji roślinnych.

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 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”.

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. Powietrze to bez specjalnych oporów hydraulicznych przepływa z nadmierną prędkością, powodując dodatkowe obniżenie temperatury nieprzereagowanych karbonizatów, powodując dalsze obniżenie szybkości spalania. Nierównomierna szybkość wypalania różnych gatunków morfologicznych powoduje dezorganizację struktury warstwy spalających się odpadów na ruszcie, co obrazuje rycina przedstawiona na rys.3.



Rys. 3. 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 reaktywności 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 reaktywnością 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 żużla, który staje się odpadem koniecznym do składowania lub do dalszej utylizacji, ponieważ będzie zawierał znacznie powyżej 5% części palnych.

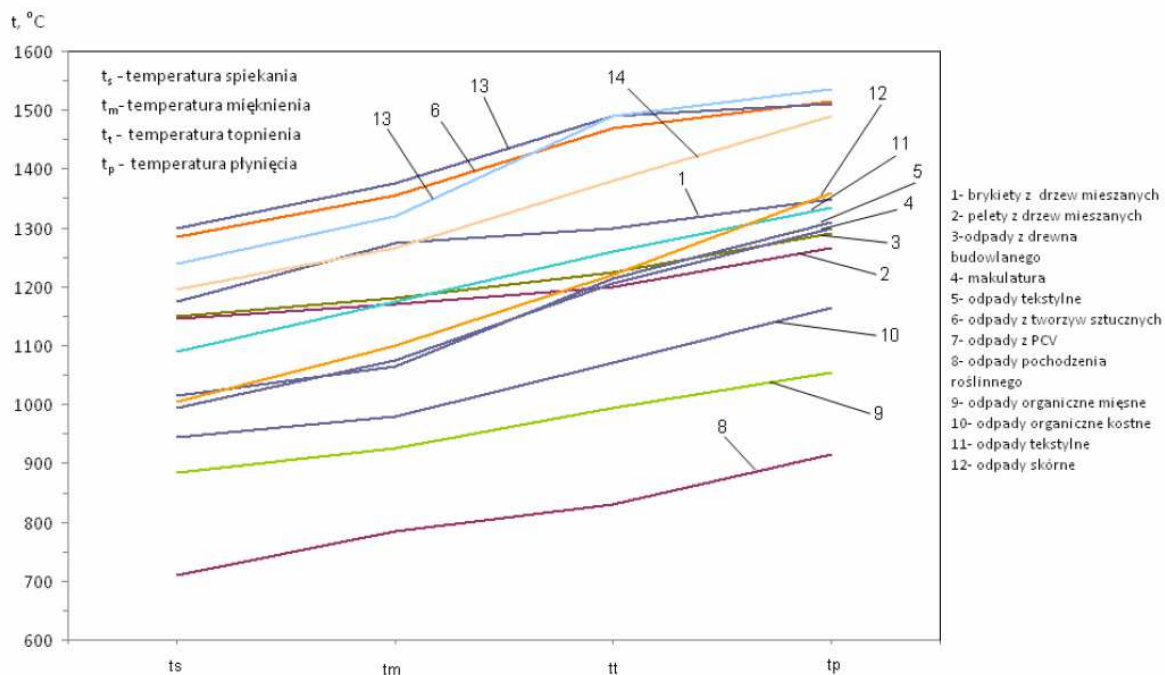
5. Charakterystyki fizyczne popiołu pochodzące z różnych rodzajów morfologicznych odpadów.

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

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 na diagramie rys. 4.



Rys. 4. 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 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. 5 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.

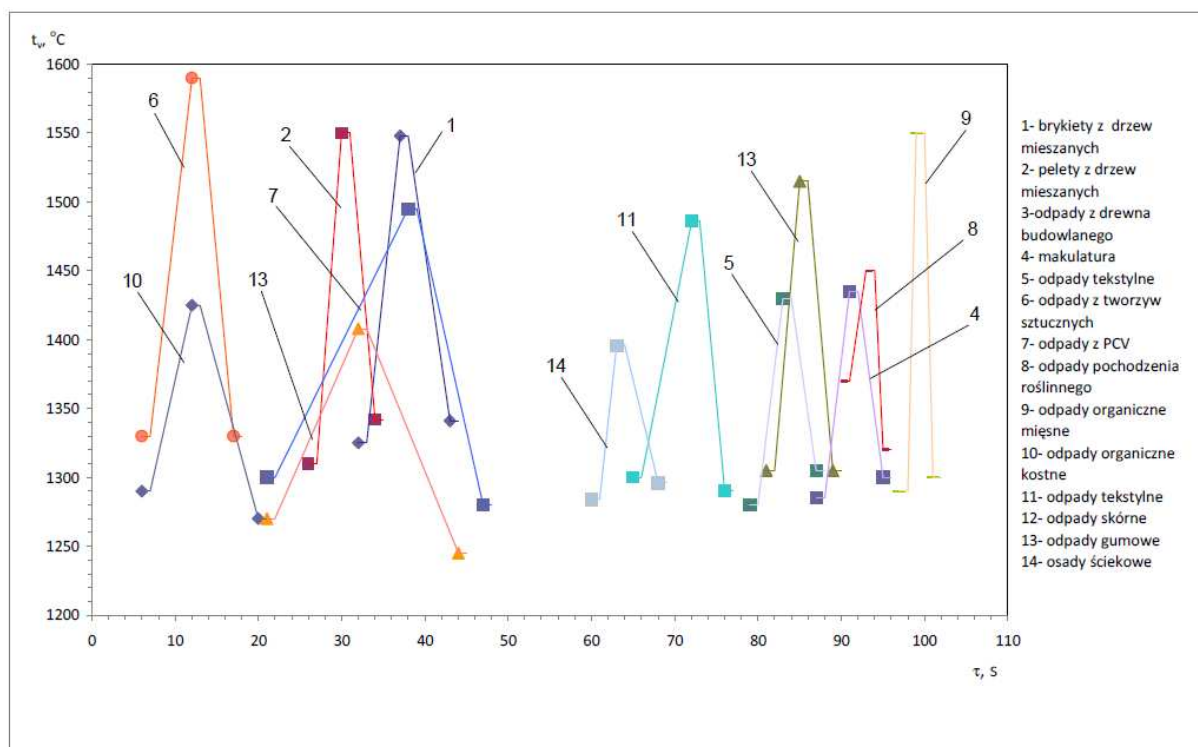
Różnorodność przebiegających zjawisk podczas spalania poszczególnych struktur morfologicznych oraz ich przesunięcia czasowe powodują nakładanie się niekorzystnych zjawisk, które prowadzą do powstania straty niecałkowitego spalania w żużlu oraz wzrostu straty kominowej spowodowanej niekontrolowanym przepływem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



Rys. 5. Niedopał powstały w żużlu.

Przestrzeń na ruszcie gdzie odbywa się proces spalania gazów pirolitycznych pochodzących z różnych odmian morfologicznych odpadów jest dość znaczna i czas ich wypalania 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.6 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. 6. 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) oraz stopnia rozdrobnienia geometrycznego i masowego. Przedstawione na wykresie rys. 6 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. 6 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 zatapianie substancji palnej odpadów przez stopioną substancję mineralną popiołu. Wykres na rys. 6 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. W tym samym czasie powstaje karbonizat po odgazowaniu odpadów gumowych, którego czas wypalania (τ_k) jest znacznie dłuższy od czasu spalania gazów pirolitycznych. 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 (zdjęcie na rys.5).

Proces spalania mieszaniny odpadów komunalnych w kotłach rusztowych jest procesem niecałkowitym i zawsze prowadzi do niecałkowitego spalania i obecności niespalonych części (paliwa) odpadów w żużlu z reguły 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 przekraczać nawet 20%.

6.Wnioski

1) Negatywnym skutkiem takiego procesu spalania odpadów komunalnych na ruszcie jest zatapianie substancji palnej odpadów przez stopioną substancję mineralną popiołu. Jeżeli ziarno niespalonego karbonizatu znajdzie się w pobliżu płynnej fazy popiołu pochodzącego np. 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. 5. 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.

2) Proces spalania mieszaniny odpadów komunalnych w kotłach rusztowych jest procesem niecałkowitym i zawsze prowadzi do niecałkowitego spalania i obecności niespalonych części (paliwa) odpadów w żużlu z reguły przekraczających 5% udziału masowego 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%.

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) 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.

SPIS LITERATURY

- [1] Pająk t.: Energia z odpadów- ogólne uwarunkowania i bariery. Mat. konferenc. „Perspektywy energetycznej utylizacji odpadów komunalnych’ Podkarpacka Agencja Energetyczna. Rzeszów 3 marca 2008.
- [2] Pająk T.: Spalarnie odpadów komunalnych- potrzeby, realia, perspektywy budowy. „Termiczne unieszkodliwianie odpadów”, Restrukturyzacja procesów termicznych- praca zbiorowa pod redakcją prof. Janusza W. Wandrasza Poznań 2007 str. 1/3.
- [3] Głąbik R., Rzepa K., modliński Z., Sikorski W., Kosiorek-Herbuś A., Karcz H.: Obliczenia cieplne kotła OP-150 dla różnych udziałów energetycznych biomasy w paliwie. Międzynarodowa X Konferencja Kotłowa 2006 pt. „Aktualne problemy Budowy i Eksploatacji Kotłów” Szczyrk „Orle Gniazdo” 17-20 październik 2006. Prace naukowe JM i UE Polit. Śląska 10 th International Conference on Boiler Technology. Seria Monografie, Konferencja 2006, Z 16, t 1, s. 215-235.
- [4] Karcz H., Głąbik R., Kosiorek-Herbuś A., Korzalewski J., Kozakiewicz A., Rzepa K.: Możliwości spalania biomasy w kotłach energetycznych. Konferencja naukowo-techniczna pt; „Nowoczesne technologie spalania węgla i paliw odpadowych”. Materiały konferencyjne s. 79-92 Szczyrk 15-17 listopada 2006.
- [5] Karcz H., Modliński Z., Głąbik R., Kosiorek-Herbuś A., Kurzalewski J.: Wpływ spalania biomasy w przedpalenisku na aerodynamikę kotła energetycznego. Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Nowoczesne technologie spalania węgla i paliw odpadowych” Materiały konferencyjne s. 107-120. Szczyrk 15-17 listopada 2006.
- [6] Modliński Z., Głąbik R., Rączka P., Kosiorek-Herbuś A., Karcz H.: Badania teoretyczne cyrkulacji wody w parowniku zmodernizowanego kotła OP-150 współpracującego z przedpaleniskiem na biomasę o mocy cieplnej 40 MW. Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Nowoczesna technologia spalania węgla i paliw odpadowych” materiały konferencyjne s. 177-190. Szczyrk 15-17 listopada 2006r.
- [7] Karcz H., Butmaniewicz T.: Sposób termicznej utylizacji odpadów zwierzęcych i organicznych.
Zgłoszenie patentowe z dnia 2004.06.08
- [8] Karcz H., Butmaniewicz T.: Instalacja i sposób odwadniania i suszenia osadów ściekowych.
Zgłoszenie patentowe P370751 z dnia 2004.10.18
- [9] Kruczek St.: Kotły
Oficyna wydawnicza Polit. Wrocław. Wrocław 2001.