

Henryk Karcz  
Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów  
Politechniki Wrocławskiej

Andrzej Kozakiewicz  
TKW Combustion

## Termiczna utylizacja odpadów zwierzęcych

Do spalania każdego rodzaju paliwa (stałego, ciekłego i gazowego) potrzebny jest inny rodzaj paleniska i palnika. Paliwa odpadowe w zależności od wielkości gabarytów, w jakich się znajdują, w zależności od wilgoci i wartości opałowej mogą być spalane na ruszcie poziomym, pochylonym lub schodkowym niekiedy chłodzonym wodą, a także w palniku pyłowym. Również sposób dozowania paliwa do komory spalania zależy od wymiarów geometrycznych paliwa.

W przypadku ziaren o małych rozmiarach i trocin stosuje się dozowniki komórkowe i ślimakowe oraz transport pneumatyczny. W starszych typach palenisk stosowane jest dozowanie grawitacyjne z leja zsykowego na ruszt mechaniczny.

Stałe paliwa odpadowe w postaci ziarnistej spalane są w kotłach rusztowych i kotłach komorowych przy pomocy palników strumieniowych lub mieszanych, zainstalowanych na ścianie komory paleniska kotła. W kotłach rusztowych palniki mogą pracować samodzielnie bez wspomaganie spalaniem na ruszcie innego paliwa, np. węgla kamiennego. Istnieją również palniki pyłowe wirowe i strumieniowe, w których spala się paliwo odpadowe w postaci pyłu, ale spalanie to jest stabilizowane (wspomagane) przez spalanie węgla kamiennego na ruszcie.

Palniki do spalania ziarnistego paliwa odpadowego mogą być zainstalowane również w technologicznych piecach mufowych i piecach obrotowych, gdzie spalanie paliwa odpadowego jest stabilizowane spalaniem podstawowego paliwa gazowego lub ciekłego. W zależności od mocy palnika na paliwo odpadowe w stosunku do mocy całkowitej uzyskanej w komorze spalania, w celu uzyskania niskiej emisji tlenków azotu, stosuje się spalanie

ziarnistego paliwa odpadowego płomieniem przylegającym do płomienia paliwa zasadniczego lub płomieniem, który tworzy się dopiero w środku komory spalania, a po drodze ziarna paliwa odpadowego ulegają zgazowaniu, co powoduje redukcję tlenków azotu. Wprowadzenie jednak ziarnistego paliwa odpadowego nad warstwę spalającego się węgla na ruszcie nie zapewnia wymaganych warunków do utylizacji paliwa odpadowego.

Temperatury panujące nad rusztem są zbyt niskie i nie są wyrównane w całym przekroju poziomym komory kotła. Najdrobniejsze frakcje rozdrobnionego materiału odpadowego są wynoszone z komory kotła do powierzchni ogrzewalnych i do lejów zsykowych. W lotnym popiele i żużlu znajduje się duża ilość nie spalonego paliwa odpadowego.

Gdy strumień spalanych odpadów jest stosunkowo nieduży, a uziarnienie jest tego samego rzędu, wtedy stosuje się zgazowanie odpadów w pierwszej części komory spalania, a uzyskany gaz dopala się w drugiej części komory spalania. Istnieje także możliwość gazyfikacji pyłu w retorcie stacjonarnej i dopalanie w komorze spalania kotła. Niekiedy pył odpadowy może być zgazowany w retorcie fluidalnej, a otrzymany gaz spalany w palniku gazowym umieszczonym w komorze kotła. Instalacje te są jednak kłopotliwe ze względu na wysoką emisję NO<sub>x</sub> i pyłów, które wymagają stosowania specjalnych układów odpylających i precyzyjnego ograniczenia powietrza podawanego do palnika

Sposób termicznej utylizacji odpadów organicznych, zwłaszcza mączki mięsno-kostnej, tłuszczów odpadowych i innych przetworzonych odpadów pochodzenia zwierzęcego, charakteryzuje się tym, że odpady organiczne wprowadza się do komory obrotowej pieca i w czasie obrotów tej komory odpady rozdrabnia się, nagrzewa, suszy i poddaje pirolizie poprzez obróbkę termiczną w temperaturze powyżej 1000°C, w strefie początkowej komory obrotowej. Do termicznej obróbki odpadów stosuje się zwykle paliwo ciekłe lub gazowe. Wytwarza się gaz pirolityczny, który po zmieszaniu z powietrzem wtórnym jako mieszanka gazowa spala się w komorze pieca obrotowego.

<sup>1)</sup> Dr inż. Henryk Karcz jest pracownikiem naukowym w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, a także prezesem spółki *TKW Combustion* z siedzibą w Głownie. Jest autorem 280 publikacji naukowych na temat spalania i 48 patentów i zastrzeżeń patentowych, a w 2002 r. otrzymał z rąk Prezesa Rady Ministrów nagrodę za wybitne krajowe osiągnięcia naukowo-techniczne. Wolny czas poświęca pszczelarstwu, sadownictwu, interesuje się także ornitologią i jest wielkim miłośnikiem przyrody. Mgr inż. Andrzej Kozakiewicz jest projektantem w *TKW Combustion* z siedzibą w Głownie.

Odpady organiczne, zwłaszcza mączki mięsno-kostne, tłuszcze odpadowe i inne przetworzone odpady pochodzenia zwierzęcego jak dotychczas są spalane z dużym powodzeniem w cementowniczych piecach obrotowych w procesie wypalania klinkieru, z paliwem szlachetnym lub mieszanką zawierającą paliwa szlachetne i alternatywne. Odpady te są dodawane do pieca cementowniczego przez główny palnik do płomienia z temperaturami od 1900 do 2000°C lub do gorącej części pieca obrotowego z temperaturami od 1400 do 1900°C. Część wartości energetycznej paliwa dotychczas stosowanego zastępuje się wówczas mączką mięsno-kostną, tłuszczem odpadowym lub innymi odpadami pochodzenia zwierzęcego, które przy wysokich temperaturach i utleniającej atmosferze piecowej z nadmiarem powietrza zostają spalone z wykorzystaniem ich wartości opałowej. Nietoksyczne spaliny po rozkładzie termicznym częściowo zostają wychwycone przy wypalaniu przeciwnym przez zmieszanie z mączką surowców i tworzący się klinkier, a popiół powstały z minerałów kostnych po spalaniu przereagowuje do masy klinkieru z mineralizującym działaniem tlenu fosforu  $P_2O_5$  na tworzenie faz klinkierowych.

Metoda ta, mimo że jest bardzo skuteczna pod względem pewności utylizacji materiałów zwierzęcych o najwyższym stopniu zagrożenia oraz przynosi bardzo wymierne korzyści ekonomiczne przy procesie wypalania klinkieru, stwarza duże trudnienie dla zakładów zbywających wymienione odpady. Przede wszystkim z powodu dowozu materiałów na znaczne odległości, co związane jest ze specyfiką rozmieszczeń zakładów cementowniczych. Dla zbywających odpady system ten stanowi znaczne obciążenie finansowe i organizacyjne.

## Instalacja do termicznej utylizacji odpadów zwierzęcych

Układ do spalania odpadów organicznych, zwłaszcza mączki mięsno-kostnej, tłuszczów odpadowych, składa się z następujących urządzeń:

- bunkra załadowczego, do którego odpad doprowadzony jest za pomocą transportu pneumatycznego lub dowożony pojemnikami,
- podajnika ślimakowego, podającego pulpę do pieca,
- pieca obrotowego, gdzie następuje suszenie, zgazowanie i częściowe spalanie materiału,
- komory wylotowej, w której następuje spalanie gazów pirolitycznych wytworzonych w procesie zgazowania,
- paleniska fluidalnego, w którym ulega spalaniu karbofizat – pozostałość po odgazowaniu,
- kotła parowego, spełniającego funkcję kotła odzysknicowego.

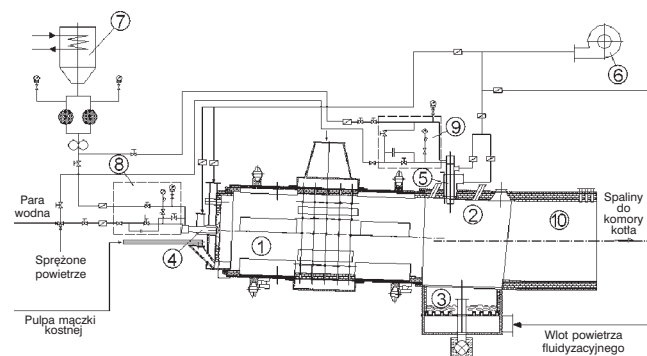
Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 1. Układ technologiczny i instalacja do spalania odpadów zwierzęcych są chronione patentami i zgłoszeniami patentowymi [1–8], których właścicielem jest *TKW Combustion Głowno*.

## Opis instalacji

Komora pieca obrotowego wykonana jest z płaszczu zewnętrznego w postaci rury stalowej o średnicy ok. 1,5 m, długości 8 m z wewnętrzną wymurówką wykonaną z ceramicznego materiału ognioodpornego. Wewnątrz komory umocowane są półki przesypowe, wykonane z profilowanych blach żaroodpornych. Komora obraca się za pomocą układu napędowego składającego się z wieńców napędowych i odpowiednio wyprofilowanych bieżni przyspawanych do płaszczu w początkowej i końcowej części obrotowej komory. Z uwagi na pochylenie komory w kierunku wylotowym pod kątem od 1° do 2° w stosunku do poziomu, zabezpieczeniem przed przesunięciem są rolki oporowe, umieszczone pod tylnym wieńcem napędowym. W środkowej części obrotowa komora posiada kilka rzędów otworów, wykonanych w płaszczu i wymurówce. Od zewnątrz otwory osłonięte są cylindrycznym płaszczem z wlotem dla powietrza. Połączenie płaszczu cylindrycznego z obrotową komorą uszczelnione jest sznurem grafitowym. Obrotowa komora od przodu zamknięta jest gardzielą czołową poprzez uszczelnienie podobnego typu. Gardziel czołowa wykonana jest z płyty z wymurówką ognioodporną. Płyta czołowa w dolnej swojej części posiada otwór, do którego doprowadzana jest pulpa tkanki zwierzęcej lub inne odpady zwierzęce, podajnikiem ślimakowym.

W osi gardzieli czołowej umieszczony jest palnik olejowy lub gazowy. Palnik znajduje się w kanale powietrza. W płycie czołowej płaszczu powietrza umieszczona jest również zapalarka, czujnik kontroli płomienia oraz wzornik służący do obserwacji płomienia. Kanał powietrza zasilany jest przez wentylator, klapę regulacyjną i klapę odcinającą. Za klapą odcinającą zamontowany jest manometr kontrolny z zaworem odcinającym.

Komora wylotowa zamyka w części końcowej komorę pieca obrotowego i połączona jest z czopuchem spalin odprowadzającym spaliny do płomienicy kotła odzysknicowego. W dolnej części komora wylotowa połączona jest z paleniskiem fluidalnym dla dopalenia stałej pozostałości po odgazowaniu i częściowym wypaleniu w komorze obrotowej.



Rys. 1. Schemat komory spalania

Komora wylotowa wykonana jest z metalowego płaszcza zewnętrznego i z ceramicznej wymurówki wewnętrznej. W górnej części komory umieszczony jest palnik stabilizujący, zasilany paliwem ciekłym lub gazowym. Palnik umieszczony jest w kanale powietrza. Wyposażenie palnika jest identyczne jak w przypadku palnika umieszczonego w gardzieli czołowej.

Komora wylotowa dolną częścią łączy się z fluidalną komorą spalania, która wykonana jest ze stalowego płaszcza zewnętrznego z wewnętrzną wymurówką. Komora zamknięta jest od spodu dnem sitowym. Powietrze fluidyzacyjne doprowadzane jest do skrzyni umieszczonej pod dnem sitowym. Króciec zasilający skrzynię zasilany jest przez wentylator, kanał powietrza i klapę regulacyjną. Ze złoża fluidalnego popiół odprowadzany jest rurą zsypową zamkniętą od spodu służą i połączoną z podajnikiem odprowadzającym popiół.

Czopuch odprowadzający spaliny wykonany jest ze stalowego płaszcza i żaroodpornej wymurówki. W czopuchu na wlocie do płomienicy kotła odzysknicowego umieszczone są króćce do pomiaru temperatury spalin, do poboru próbek gazu do analizy chemicznej oraz do pomiaru ciśnienia w czopuchu.

## Sposób termicznej utylizacji odpadów zwierzęcych

Sposób termicznej utylizacji odpadów organicznych, w tym mączki mięsno-kostnej polega na tym, że odpady organiczne wprowadza się do komory obrotowej 1 pieca zespolonego i w czasie obrotów tej komory odpady rozdrabnia się, nagrzewa, suszy i poddaje pirolizie. Termiczna obróbka wsadu następuje przy pomocy palnika głównego 4 zasilanego ze zbiornika 7 poprzez węzeł armatury przypalnikowej 8 paliwem stabilizującym (ciekłym lub gazowym) oraz zasilanego powietrzem pierwotnym i wtórnym z wentylatora 6.

Proces spalania paliwa stabilizującego jest tak prowadzony, aby temperatura w początkowej strefie komory w pobliżu ścian była wyższa od 850°C, a korzystniej, była wyższa od 1000°C. Przy termicznej obróbce odpadów korzystnie jest stosować jako paliwo stabilizujące tłuszcz zwierzęcy, który przed spaleniem podgrzewa się do temperatury powyżej 80°C i rozpyla się przy pomocy pary wodnej lub, w przypadku jej braku, sprężonego powietrza. Ze spalania paliwa stabilizującego i pirolizy odpadów, wytwarzający się gaz pirolityczny po zmieszaniu z powietrzem jako palna mieszanka gazowa spala się w komorze wylotowej 2, natomiast wytwarzający się karbonizat pod wpływem sił ciężkości i obrotów pochylonej komory obrotowej 1 zsypuje się do paleniska fluidalnej komory 3, gdzie ulega całkowitemu spalaniu. Palna mieszanka gazowa i karbonizat zapalają się od płomienia zapłonowego palnika 5 osadzonego w górnej części komory wylotowej 2 i zasilanego paliwem stabilizującym poprzez węzeł armatury przypalnikowej 9 oraz zasilanego powietrzem pierwotnym i wtórnym z wentylatora 6.

Proces spalania paliwa w palniku głównym prowadzi się z lekkim niedomiarem powietrza w celu wytworzenia w początkowej części komory obrotowej lekkiej atmosfery redukcyjnej, która zapobiega spalaniu gazów pirolitycznych i nadmiernemu wzrostowi temperatury w komorze obrotowej 1.

Komora wylotowa połączona jest z czopuchem 10, który wprowadza spaliny do kotła odzysknicowego. Komora wylotowa 2 wyposażona jest w króćce do pomiaru płomienia temperatury spalin i ciśnienia. Komora wylotowa 2 jest w dolnej części połączona z fluidalną komorą spalania zawierającą dno sitowe, króciec zasilający skrzynię powietrza, rurę zsypową popiołu z podajnikiem umieszczonym w zbiorniku napełnionym wodą. W płaszczu i wymurówce czopucha spalin 10 są osadzone króćce do pomiaru temperatury, poboru spalin do analizy chemicznej oraz do pomiaru ciśnienia.

## Fizykochemiczna charakterystyka odpadów (mączki mięsno-kostnej i tłuszczu zwierzęcego)

Wyniki analizy technicznej i elementarnej mączki mięsno-kostnej przedstawiono w tabeli 1.

Mączka mięsno-kostna charakteryzuje się niską zawartością wilgoci (w próbce dostarczonej  $W^r = 4,21$ ) i dużą zawartością popiołu ( $A^d = 18,58\%$ ).

Ilość części lotnych w próbce dostarczonej jest bardzo wysoka  $V^r = 71,50\%$ , po przeliczeniu na próbę suchą i bezpopiołową ( $V^{daf} = 91,68\%$ ) wskazuje, że prawie cała substancja organiczna mączki mięsno-kostnej przy podgrzaniu do temperatury 830°C przechodzi w części lotne, które stanowią palny gaz węglowodorowy. Pozostała część substancji organicznej mączki, tzw pozostałość koksowa zwana karbonizatorem, składa się prawie w 100% z pierwiastka C.

Tabela 1  
Analiza techniczna i elementarna mączki mięsno-kostnej

Rodzaj oznaczenia	Symbol, jednostka	Wartość
Wilgoć – w próbce dostarczonej	$W^r$ , %	4,21
Zawartość popiołu – w próbce dostarczonej	$A^r$ , %	17,80
– stan suchy	$A^d$ , %	18,58
Zawartość części lotnych – w próbce dostarczonej	$V^r$ , %	71,50
– w próbce suchej bezpopiołowej	$V^{daf}$ , %	91,68
Ciepło spalania – w próbce dostarczonej	$Q_p^r$ , kJ/kg	23979
Skład elementarny:		
węgiel	$C^a$ , %	48,00
wodór	$H^a$ , %	7,06
azot	$N^a$ , %	3,56
siarka	$S^a$ , %	0,10
tlen	$O^a$ , %	41,28

Analiza elementarna pozostałości koksowej oprócz pierwiastka C wykazała ślady siarki ( $S^{daf}$  około 0,05%) i ślady substancji mineralnej ( $A_{org.}$  około 0,15%), które, jak można przypuszczać, organicznie były związane z pierwiastkami w substancji organicznej mączki. Poza siarką i substancją mineralną w karbonizacie nie stwierdzono innych pierwiastków.

Mączka mięsno-kostna charakteryzuje się wysoką wartością ciepła spalania (23 979 kJ/kg) porównywalną z wysokiej klasy węglem energetycznym. Pod względem klasyfikacji węgla jest podobna do niskozapielonego węgla brunatnego, a zwłaszcza do jego wysokożywiczej odmiany petrograficznej piro-pissytu.

Wysoka wartość ciepła spalania wynika głównie z wysokiej zawartości wodoru. Z kolei duża zawartość tlenu ( $O^a = 41,280\%$ ) stawia mączkę mięsno-kostną w gronie paliw o dużej reaktywności i daje możliwość podawania mączki mięsno-kostnej do komory spalania z niewielką ilością powietrza. Tlen zawarty w substancji organicznej mączki stanowi prawie 40% tlenu niezbędnego do całkowitego spalania.

Niewielka zawartość siarki ( $S^a = 0,10\%$ ) wskazuje na organiczne jej pochodzenie. Siarka ta w 100% jest siarką palną, związaną z substancją organiczną mączki kostnej. W bardzo niewielkiej ilości nie stanowi ona żadnego zagrożenia dla otoczenia. Nie stwierdzono również w produktach pirolizy żadnych związków siarki z węglem, wodorem lub azotem, które mogłyby stanowić zagrożenie ekologiczne.

Wysoka zawartość azotu ( $N^a = 3,56$ ), który chemicznie jest związany z substancją organiczną mączki będzie powodować powstanie tzw. paliwowych tlenków azotu. Pod względem zawartości azotu mączka znajduje się w gronie wysoko zaazotowanych węgla energetycznych.

Wysoka zawartość części lotnych  $V^{daf} = 91,68\%$  powoduje, że proces spalania mączki sprowadza się głównie do procesu pirolizy i spalania się wydzielonych gazów węglowodorowych. Faza ta wynosi 90% całkowitego czasu wypalania ziaren mączki.

Określona w warunkach standardowych wynikających z PN ilość części lotnych pochodzi z procesu powolnego nagrzewu substancji organicznej mączki. Warunki procesu spalania mączki w komorze kotła odbiegają znacznie od warunków określonych w PN. W trakcie procesu spalania temperatura ośrodka, do którego wprowadza się mączkę, jest znacznie wyższa i wynosi około 1600°C. Proces termiczny przemiany mączki przebiega w warunkach tzw. szybkiej pirolizy, w której w gaz węglowodorowy przechodzi większa masa substancji organicznej mączki. Określona w tych warunkach ilość części lotnych  $V^{daf} = 96,47\%$ . Pozostała część mączki w ilości niecałkowicie 4% występuje jako karbonizat o bardzo wysokiej porowatości ( $\mathcal{E}$  około 85%) i spala się w postaci fazy stałej.

Analizy dotyczące składu elementarnego i własności fizykochemicznych tłuszczu (tab. 2) oraz wyniki badań procesu spalania nie świadczą o zagrożeniu ekologicznym przy jego termicznym przekształcaniu. Określony skład chemiczny oraz własności energetyczne i fizyczne nie wskazują na możliwość powstania związków szkodliwych dla atmosfery. Zawartość siarki jest śladowa (ok. 0,05%) i wskazuje na obecność siarki, która biologicznie jest związana z substancją organiczną tłuszczu. Zawartość ta jest znacznie mniejsza od zawartości siarki w olejach lekkich; napędowym i opałowym. Podobnie zawartość azotu (ok. 0,8%) można określić jako azot organiczny związany biologicznie z substancją tłuszczową zwierząt.

Zawartość wilgoci i popiołu jest porównywalna z wielkością osadu i ilością wody w oleju opałowym. Ciepło spalania jest wyższe od ciepła spalania ciężkich olei opałowych (mazut) i jest porównywalne z ciepłem spalania lekkich olei opałowych. Analiza chemiczna tłuszczu nie wykazała innych pierwiastków lub związków chemicznych, które podczas spalania mogłyby generować substancje szkodliwe dla otoczenia.

Badania procesu spalania tłuszczu w instalacji doświadczalnej o mocy 15 MW wykazały, że przy optymalnej pracy palnika proces spalania jest całkowity i zupełny, tzn., że w spalinach jest zawarty jedynie dwutlenek węgla ( $CO_2$ ), para wodna ( $H_2O$ ) i azot atmosferyczny ( $N_2$ ) ze śladami dwutlenku siarki ( $SO_2$ ) oraz tlenku azotu ( $NO_x$ ) poniżej 200 mg/ $\mu m^3$ .

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań procesu spalania można stwierdzić, że przebadany tłuszcz może być wykorzystywany do przekształceń termicznych jako paliwo stabilizujące proces zapłonu i spalania mączki kostnej bez jakichkolwiek zagrożeń ekologicznych.

Tabela 2  
Analiza techniczna i elementarna tłuszczu zwierzęcego

Rodzaj oznaczenia	Symbol, jednostka	Wartość
Zawartość wilgoci	$W^a, \%$	0,56
Zawartość popiołu		
– analityczna	$A^a, \%$	0,84
– stan suchy	$A^a, \%$	0,84
Zwartość części lotnych		
– analityczna	$V^a, \%$	98,44
– stan suchy, bez popiołu	$V^{daf}, \%$	99,84
Ciepło spalania	$Q_{st}^a, \text{kJ/kg}$	40.958
Wartość opałowa	$Q_{st}^a, \text{kJ/kg}$	38.316
Skład elementarny:		
azot	$N^a, \%$	0,80
	$N^{daf}, \%$	0,81
węgiel	$C^a, \%$	75,41
	$C^{daf}, \%$	76,48
wodór	$H^a, \%$	12,04
	$H^{daf}, \%$	12,21
siarka	$S^a, \%$	0,05
	$S^{d_{11}}, \%$	0,05
tlen	$O^V, \%$	19,64

## Technologia spalania odpadów

Komora pieca zespolonego, układ zasilania paliwem stabilizującym i odpadami zwierzęcymi oraz układ technologiczny kotła posiadają pełny monitoring. Układ kontrolowany jest przez system oparty na programowalnym sterowniku SIMATIC S7-300 wyposażonym w system wizualizacji parametrów pracy.

Odpady zwierzęce do komory obrotowej pieca zespolonego można dostarczać w postaci: surowej, pulpy, częściowo przetworzonej w destruktorach lub w postaci mączki mięsno-kostnej.

### Technologia spalania mączki mięsno-kostnej

Zapłon i stabilizacja procesu spalania mączki kostno-mięsnej (SRM) odbywa się od żagwi płomienia stabilizującego. Żagiew płomienia powstaje ze spalania oleju, gazu, a korzystnie tłuszczu zwierzęcego w palniku gazodynamicznym z wewnętrznym mieszaniem i rozpylaniem parowym [1–3].

Wprowadzenie mączki mięsno-kostnej w ruch wirowy zapewnia dostateczny czas pobytu ziaren mączki w strefie wysokich temperatur (powyżej 1200°C), które zapewniają całkowite wypalenie ziaren mączki. Po wprowadzeniu mączki mięsno-kostnej w strefę czoła płomienia stabilizującego o temperaturze 1580°C następuje szybka piroliza ziaren mączki, podczas której wydzielają się ok. 90% (udziału masowego) części lotnych. Części lotne w postaci gazowej spalają się zupełnie w strefie wysokich temperatur płomienia tłuszczowego w atmosferze bogatej w tlen do CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O w obszarze komory wylotowej.

Pozostałość koksowa (ok. 10% udziału masowego) po odgazowaniu znajduje się w strefie temperatur powyżej 1300°C, które zapewniają całkowite wypalenie ziaren pozostałości koksowej powstałych w wyniku szybkiej pirolizy mączki mięsno-kostnej.

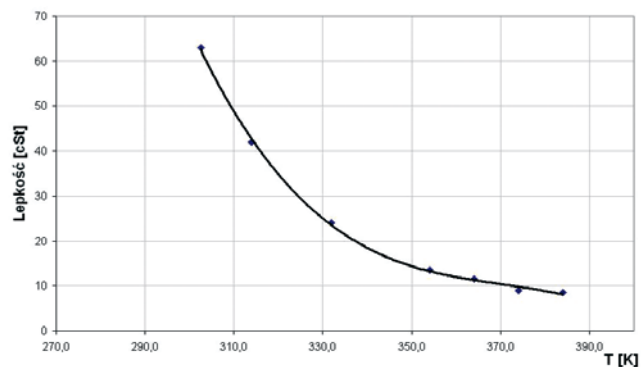
Proces szybkiej pirolizy mączki mięsno-kostnej przebiegający w strefie czoła frontu płomienia stabilizującego zapewnia z jednej strony przejście około 90% udziału masowego mączki w fazę gazową, która łatwo ulega zapłonowi i zupełnemu spaleniu, a z drugiej strony powoduje powstanie ziaren karbonizatu o bardzo wysokiej reaktywności, która zapewnia całkowite i zupełne spalenie bez emisji substancji szkodliwych w gazach spalinowych oraz śladów substancji organicznej w odprowadzanym popiele.

### Technologia spalania tłuszczu zwierzęcego

Do spalania tłuszczu zostały zastosowane lance palników gazodynamicznych z wewnętrznym mieszaniem typu K chronione patentami [1–3] o wydajności nominalnej 300 kg/h i płynnej regulacji w zakresie od 30 do 400 kg/h przy zachowaniu całkowitego i zupełnego spalania.

Podstawowe parametry pracy palnika to: rodzaj, ciśnienie i temperatura substancji rozpylanej i czynnika rozpylającego.

Ciśnienie substancji rozpylanej zmienia się od 0,05 do 1,0 MPa, a czynnika rozpylającego od 0,2 do 1,5 MPa. Zużycie czynnika rozpylającego w zależności od stopnia obciążenia palnika zmienia się od 7 do 15% zużycia substancji rozpylanej, czyli tłuszczu zwierzęcego. Czynnikiem rozpylającym może być para wodna wilgotna lub przegrzana albo powietrze. Temperatura pary może się zmieniać od minimalnej temperatury pary nasyconej do maksymalnej rzędu 620 K, co podyktowane jest dopuszczalną temperaturą pracy armatury odcinająco-sterującej. Temperatura powietrza może być równa temperaturze otoczenia lub równa dowolnie wyższej temperaturze, lecz niższej od 620 K. Temperatura (substancji rozpylanej) tłuszczu musi zapewnić lepkość umożliwiającą przepływ tłuszczu rurociągami zasilającymi. Im wyższa temperatura tłuszczu, tym jego lepkość jest niższa (rys. 2) i tym lepsze są warunki do transportu i do rozpylania w głowicy palnika.



Rys. 2. Zależność lepkości kinematycznej tłuszczu od temperatury

Lepkość tłuszczu powyżej 373 K praktycznie nie ulega zmianie i nie obniża się ze wzrostem temperatury. Przy temperaturze 372 K osiąga wartość około 9,2 cSt i jest graniczną wartością lepkości tłuszczu zwierzęcego niezależną od temperatury.

Badania procesu spalania obejmowały:

- rodzaj i moc źródła zapłonowego,
- sposób doprowadzenia powietrza do spalania,
- rodzaj i sposób stabilizacji frontu płomienia,
- sposób i rodzaj dozoru płomienia,
- skład mieszanki palnej wzdłuż żagwi płomienia
- skład spalin na wylocie z komory spalania.

Badania nad rodzajem i mocą źródła zapłonowego [9] wykazały, że bardzo wysoką skuteczność zapłonu tłuszczu osiąga się przy zastosowaniu wysokoenergetycznej zapalarki elektrycznej firmy *Fireye*, zasilanej prądem o napięciu 220 V. Moc wytwarzanej iskry rzędu 10J jest wystarczająca do skutecznego uruchomienia palnika.

Wysokoenergetyczna zapalarka typu HESI firmy Fireye jest bezpiecznym w stosunku do innych źródeł zapłonowych (kwacz nasączony olejem opałowym lub zapalarka gazowa z zapalarką elektryczną na 10 kV) i pewnym eksploatacyjnie urządzeniem zapłonu tłuszczu.

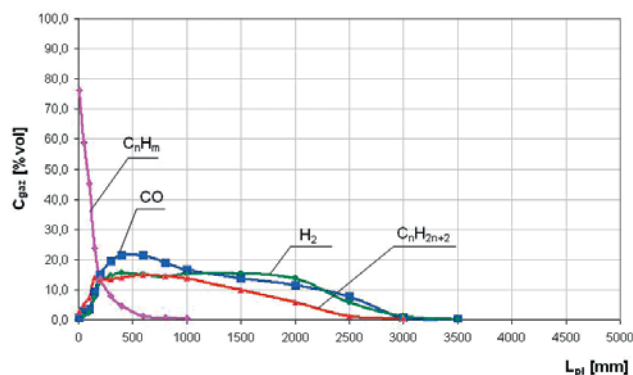
Powietrze do spalania rozdzielone zostało na powietrze „pierwotne” i powietrze „wtórne”.

Powietrze podawane jest poprzez skrzynię palnikową z odpowiednio ukształtowanym kanałem powietrza „pierwotnego” i „wtórnego” [10]. Dla uzyskania stabilnego frontu płomienia kanał powietrza „pierwotnego” zakończony jest stabilizatorem w kształcie stożka.

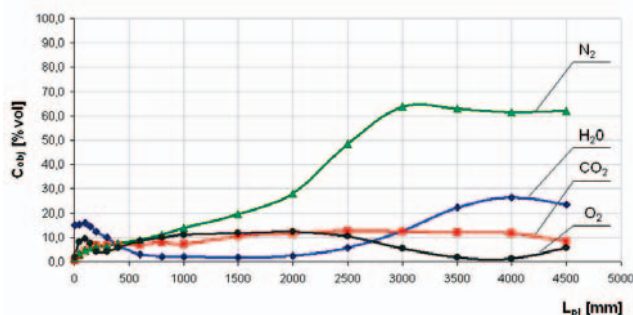
Optymalne prędkości powietrza, przy którym front płomienia jest stabilny, a skuteczność zapłonu jest 100% wynoszą: powietrze „pierwotne” 8–12 m/s, powietrze „wtórne” 20–25 m/s.

Kontrola istnienia płomienia z punktu widzenia instalacji jest bardzo ważnym elementem jej bezpieczeństwa [11]. Sygnał od istnienia płomienia jest jednym z głównych zabezpieczeń instalacji kotłowej. Właściwy dobór urządzenia dozoru płomienia ma ogromny wpływ na pewność eksploatacyjną komory spalania oraz bezpieczeństwo obsługi i otoczenia kotłowni. Przeprowadzone testy różnego rodzaju urządzeń dozoru płomienia wykazały, że największą powtarzalność w generowaniu sygnałów z dozorowanego płomienia posiada skaner działający w podczerwieni, posiadający dużą zdolność dyskryminacji i reagowania tylko na obecność lub brak dozorowanego płomienia i ignorowania innych źródeł płomienia z obszaru komory spalania. Najlepiej spełniającym te wymagania jest skaner typu 45RM4-1001 firmy Fireye działający w podczerwieni i posiadający dużą rozdzielność i dyskryminację innych źródeł promieniowania.

Wyniki pomiarów określające rozkład stężeń składników gazowych powstałych w wyniku przemiany fazowej tłuszczu w paliwo gazowe oraz procesów pirolizy i utleniania paliwa wzdłuż osi palnika i wzdłuż komory spalania przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Rozkład stężeń składników gazowych wzdłuż osi palnika

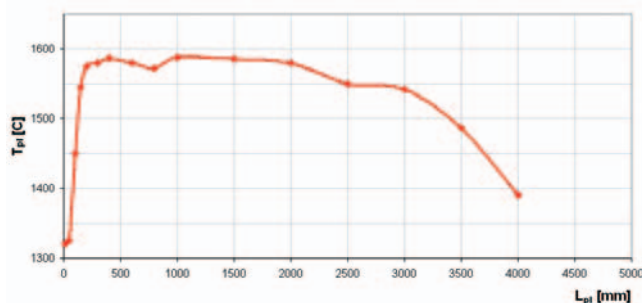


Rys. 4. Rozkład stężeń produktów spalania wzdłuż osi palnika

Badania składu chemicznego wzdłuż żagwi płomienia prowadzono w komorze spalania przy pomocy systemu pomiarowego przedstawionego w [12–13]. Mierzono stężenie następujących składników:  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  oraz sumy  $C_nH_m$  przy pomocy analizatorów ULTRAMAT 23 typu NDIR oraz analizatora IMR-3. Pobierano również próbki do analizy chromatograficznej, gdzie określano stężenie  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$  oraz  $C_4H_{10}$ .

Pobór próbek gazu dokonano w osi żagwi płomienia co 50 mm począwszy od głowicy lancy palnika oraz w dalszej części płomienia co 200 mm i 500 mm.

Pomiary temperatury żagwi płomienia wykonano za pomocą pirometru dwubarwnego, w tych samych punktach, co pobierano próbki gazu. Rozkład temperatury wzdłuż żagwi płomienia przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład temperatury płomienia wzdłuż żagwi spalającego się tłuszczu

Tłuszcz zwierzęcy jest niestabilny termicznie. W wysokich temperaturach przy niedoborze tlenu podlega równocześnie odparowaniu i rozkładowi na węglowodory ciężkie i lekkie, które z kolei rozkładają się na wodór i tlenek węgla. Na podstawie otrzymanych wyników prześledzić można drogę przejścia od fazy płynnej poprzez węglowodory ciężkie do węglowodorów lekkich oraz wodoru i tlenku węgla. Przejście to jest szczególnie szybkie w sąsiedztwie głowicy palnika na odcinku do 200 mm. W bezpośrednim sąsiedztwie głowicy na odcinku do 50 mm występują prawie wyłącznie krople tłuszczu i pierwotne frakcje zawierające głównie węglowodory ciężkie. Obecne w tej przestrzeni niewielkie ilości tlenku węgla i węglowodorów lekkich pochodzą głównie z termicznego rozkładu tłuszczu przez parę rozpylającą.

Realizacja stabilnego płomienia tłuszczu oraz całkowitego i zupełnego spalania, tzn. braku cząsteczek sadzy i ciężkich Wielopierścieniowych Węglowodorów Aromatycznych (WWA) w końcu żagwi płomienia, wymaga szybkiego wygenerowania palnych składników gazowych o szerokich, stężeniowych granicach zapłonu i obecności tlenu koniecznego do szybkiego, częściowego utlenienia węglowodorów, nim rozpoczną się procesy polimeryzacji i krakingu.

Osiągnięcie wysokich stężeń wodoru, tlenu węgla, acetyleny i węglowodorów lekkich w pobliżu głowicy palnika wyjaśnia wysoką stabilność płomienia i zupełne spalanie, dzięki czemu płomień posiada dużą odporność na zerwanie i zgaśnięcie, brak również w spalinach sadzy i substancji szkodliwych dla otoczenia.

Rozkład temperatur żagwi płomienia tłuszczu wzdłuż komory spalania ma bardzo istotne znaczenie dla procesu zapłonu i spalania mączki kostnej. Żagiew płomienia stanowi źródło zapłonu i stabilizacji wypalania mączki kostnej. Temperatura żagwi płomienia tłuszczu musi spełniać jeden podstawowy warunek: musi być wyższa od minimalnej temperatury zapłonu ziaren mączki kostnej.

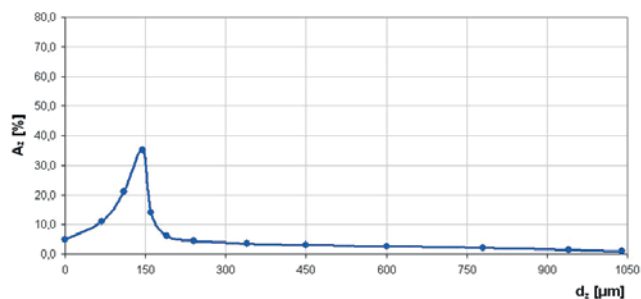
Według obligatoryjnych wymagań wynikających z bezpiecznego termicznego przekształcenia mączki kostnej w bezpieczne dla otoczenia produkty spalania ustalono, że minimalna temperatura ośrodka komory spalania powinna nie być niższa od 850°C. Umieszczenie w osi komory spalania palnika tłuszczu wymagania to całkowicie spełnia. Z rysunku 5 wynika, że temperatura żagwi płomienia na całej długości komory jest znacznie wyższa od minimalnej temperatury spalania mączki kostnej.

Czoło frontu płomienia tłuszczu tworzy się w odległości 20-30 mm od głowicy dyszowej lancy palnika. Temperatura w czole frontu płomienia wynosi 1330°C. Żagiew płomienia jest w pełni ukształtowana w odległości około 200 mm od głowicy lancy. Pomiary temperatury czoła frontu płomienia były wykonywane co 100 mm, w ustabilizowanej części żagwi co 200 mm i co 500 mm. Temperatura żagwi płomienia na długości do 2000 mm jest ustabilizowana i wynosi około 1580°C. W tylnej części żagwi temperatura płomienia stopniowo spada na skutek oddawania ciepła do otoczenia, by w końcowej części osiągnąć temperaturę ok. 1390°C. Proces spalania tłuszczu praktycznie kończy się na odcinku komory spalania poniżej 4000 mm.

Z rysunku 3 wyraźnie wynika, że w odległości 3000 mm od głowicy dyszowej palnika w żagwi płomienia nie ma żadnych palnych składników gazowych, występują jedynie produkty spalania w postaci dwutlenku węgla, pary wodnej, azotu oraz niewielkie ilości tlenu.

## Kinetyczna charakterystyka mączki mięsno-kostnej

W celu przeprowadzenia badań nad charakterystykami kinetycznymi rozfrakcjonowano mączkę na frakcje ziarnowe: 20–50, 50–85, 85–128, 128–156, 172–200, 200–300, 300–400, 400–500, 500–700, 700–860, 860–1000 i 1000–1200µm.



Rys. 6. Rozkład ziarnowy mączki mięsno-kostnej

Rozkład sitowy ziaren mączki przedstawiono na rysunku 6. Z krzywej rozkładu wynika, że przeważają frakcje ziarnowe od 100 do 200 µm. Mniejszych frakcji od 100 µm jest około 15–20%, a frakcji większych od 200 µm jest poniżej 8%.

Badania nad charakterystykami kinetycznymi obejmowały określenie:

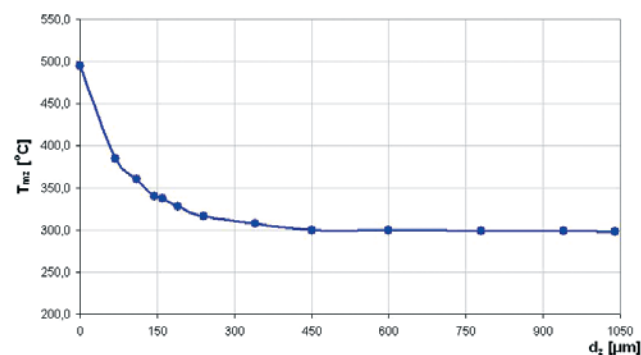
- minimalnej temperatury zapłonu pyłu monofrakcyjnego w zależności od wielkości frakcji ziarnowej,
- czasu zapłonu części lotnych,
- czasu spalania części lotnych,
- czasu wypalenia pozostałości koksowej,
- całkowitego czasu spalania ziaren w zależności od wielkości frakcji ziarnowej i temperatury ośrodka.

Przeprowadzono badania procesu spalania chmury ziarnowej w atmosferze powietrza przy temperaturze ośrodka gazowego 850, 950, 1050, 1150 i 1250°C w piecu opadowym. Badania nad minimalną temperaturą zapłonu ziaren mączki przeprowadzono dla pojedynczych ziaren metodą „igły kwarcowej”.

## Minimalna temperatura zapłonu

Minimalną temperaturę zapłonu ziaren mączki przedstawiono na rysunku 7.

Jako minimalną temperaturę przyjęto temperaturę ośrodka gazowego, przy której następuje zapłon i wypalanie ziarna.

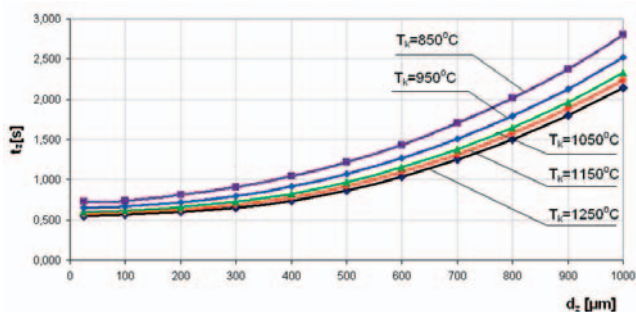


Rys. 7. Minimalna temperatura zapłonu w zależności od wielkości ziarna

Najwyższą temperaturę zapłonu posiadają ziarna o najmniejszych wymiarach. Najmniejsze frakcje ziarnowe wymagają do zapłonu temperatury ośrodka gazowego od 400 do 500°C. Frakcje ziarnowe o średnicy od 100 do 200 μm zapalają się w temperaturze ośrodka od 320 do 360°C. Najniższą temperaturę zapłonu posiadają frakcje powyżej 200 μm. Minimalna temperatura zapłonu tych frakcji bardzo niewiele zależy od średnicy ziarna i zawiera się w granicach 300°C.

## Czas zapłonu

Zależność czasu zapłonu ziaren mączki od wielkości frakcji ziarnowej i temperatury komory spalania przedstawiono na rysunku 8. Czas zapłonu jest praktycznie równy czasowi, w którym nastąpi termiczny rozkład substancji organicznej ziarna i utworzy się mieszanka gazowa zdolna do zapłonu. Najniższy czas zapłonu, poniżej 1 s, mają ziarna o najmniejszych rozmiarach. Czas zapłonu ziaren rośnie z wielkością ziarna i spadkiem temperatury komory spalania. Ziarna najmniejsze w temperaturze 1250°C zapalają się po czasie ok. 0,5 s. Czas zapłonu ziaren asymptotycznie dąży ze wzrostem temperatury do wartości granicznej, która jest charakterystyczna dla danej substancji organicznej. Można przyjąć, że główna masa frakcyjna o rozmiarach od 100 do 200 μm będzie ulegać zapłonowi w temperaturach komory spalania rzędu 1500°C w czasie około 0,4 s.

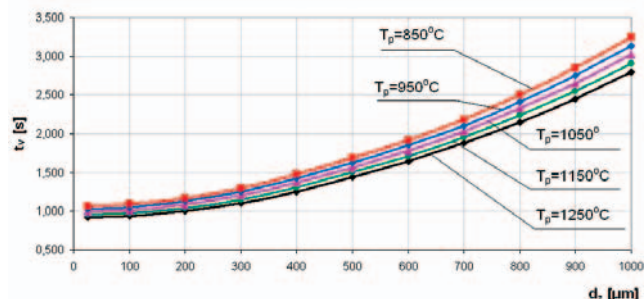


Rys. 8. Czas zapłonu ziaren mączki w zależności od średnicy ziarna i temperatury komory

## Czasy poszczególnych faz spalania

Czas spalania części lotnych dotyczy tej fazy procesu, w którym wydzielone gazy węglowodorowe utworzą mieszaninę palną i ulegną spalaniu tworząc zamknięty front spalania wokół ziarna mączki. W czasie fazy wypalania części lotnych zaobserwowano wybuchowy charakter procesu. Dotyczyło to szczególnie frakcji ziarnowych o najwyższych rozmiarach. W początkowej fazie procesu części lotne wydzielają się w sposób wybuchowy powodując rozrywanie się dużych ziaren na małe fragmenty.

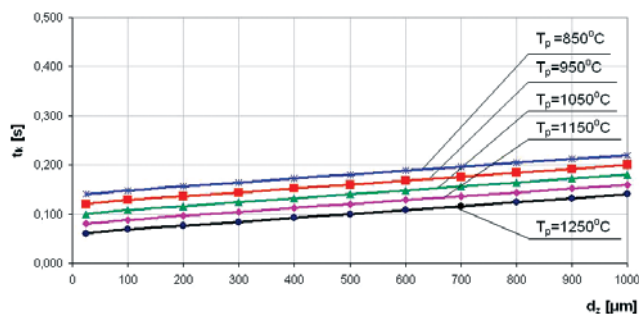
Zależność czasu wypalania się części lotnych od wielkości frakcji ziarnowej i temperatury komory spalania przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Czas wypalania się części lotnych w zależności od średnicy ziarna i temperatury komory

Czas spalania części lotnych rośnie ze wzrostem wielkości ziarna i maleje prawie proporcjonalnie ze wzrostem temperatury komory spalania. Wychodząc z tej zależności można sądzić, że przy temperaturze komory 1500°C czas spalania części lotnych frakcji ziarnowej od 100 do 200 μm będzie wynosił 0,6 s, a najgrubszej frakcji od 1000 do 1200 μm ok. 2,6 s.

Czas spalania pozostałości koksowej w zależności od frakcji ziarnowej i temperatury komory spalania przedstawiono na rysunku 10.

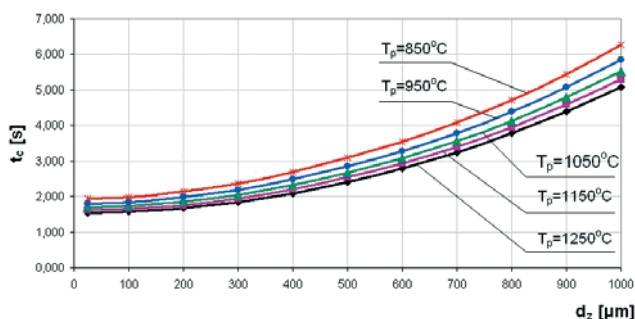


Rys. 10. Czas wypalania się pozostałości koksowej w zależności od średnicy ziarna i temperatury komory

Czas wypalania pozostałości koksowej w niewielkim stopniu zależy od średnicy ziarna i temperatury komory spalania. Niewielki wpływ średnicy ziarna na czas wypalania pozostałości koksowej wynika z rozpadu ziarna w czasie termicznego nagrzewu oraz fazy wydzielania i spalania części lotnych. Szybki nagrzew, tym większy im wyższa jest temperatura komory spalania, powoduje detonacyjne wydzielanie się części lotnych i rozerwanie ziarna na małe fragmenty. Można przypuszczać, że w temperaturze 1500–1600°C szybkość nagrzewu ziaren będzie tak wysoka, że nastąpi detonacyjny rozpad ziarna na małe fragmenty, które będą ulegały spalaniu razem z częściami lotnymi.

Proces spalania ziaren mączki będzie się wówczas składał jedynie z fazy nagrzewu i fazy wydzielania i spalania części lotnych, bez fazy spalania karbonizatu. Całkowity czas spalania ziaren mączki mięsno-kostnej w funkcji frakcji ziarnowej i temperatury komory spalania przedstawiono na rysunku 11.





Rys.11. Całkowity czas wypalania ziaren mączki w zależności od średnicy ziarna i temperatury komory

Całkowity czas spalania ziaren mączki w dość dużym stopniu zależy od średnicy ziarna i temperatury spalania. Wyraźna zależność czasu spalania od temperatury komory jest szczególnie widoczna w obszarze niskich temperatur spalania. W miarę wzrostu temperatury komory czas wypalania ziaren mączki asymptotycznie dąży do wartości granicznej, która dla ziaren 100–200  $\mu\text{m}$  wynosi ok. 2 s.

Całkowity czas spalania ziaren w najwyższym stopniu zależy od termicznej pirolizy i czasu wypalania wydzielonych części lotnych. Faza termicznego rozkładu i spalania wydzielonych gazów pirolitycznych determinuje proces spalania ziaren mączki.

## Wnioski

1. Przebadane materiały posiadają stosunkowo niskie wartości opałowe w stanie roboczym. Dla stabilnego i nieszkodliwego dla otoczenia procesu spalania wymagają stabilizacji termicznej przy pomocy paliwa o wysokim cieple spalania.
2. W procesie termicznej utylizacji spalać się będą z dodatnim efektem termicznym, co pozwoli odnieść korzyści ekonomiczne w postaci wytworzonej pary lub gorącej wody.
3. Spaliny nie zawierają substancji szkodliwych dla atmosfery.
4. Popiół nie zawiera pierwiastków metali ciężkich ani związków zagrażających otoczeniu, zwłaszcza glebie.
5. Utylizacja termiczna przebadanych produktów odpadów przy zrealizowaniu procesu całkowitego i pełnego spalania jest właściwym kierunkiem do osiągnięcia pozytywnych efektów ekonomicznych i ekologicznych.
6. W czasie utylizacji proces spalania odpadów zwierzęcych nie jest uciążliwy dla otoczenia. Nie stwierdzono przykrych zapachów wydzielających się w czasie procesu spalania, jak również w wychodzących z komina spalinach oraz w popiele odprowadzanym na składowisko.
7. Termiczna utylizacja odpadów zwierzęcych przyniesie duże efekty ekonomiczne wynikające z oszczędności za opłaty utylizacyjne uiszczane dla obcych jednostek gospodarczych oraz z tytułu oszczędności na paliwie konwencjonalnym do wytworzenia określonej ilości ciepła technologicznego dla zakładu.

8. Umieszczenie palnika gazodynamicznego do spalania zapewnia zapłon i spalanie mączki mięsno-kostnej. Wysoka temperatura żągnięcia płomienia tłuszczowego (ok. 1580°C) w pełni zabezpiecza zapłon mączki mięsno-kostnej.

## LITERATURA

- [1] Zgłoszenie patentowe P360207 z dnia 19.05.2003 r. pt. „Sposób i instalacja spalania odpadów zwierzęcych”
- [2] Zgłoszenie patentowe P362586 z dnia 02.10.2003 r. pt. „Sposób i urządzenia do termicznej utylizacji odpadów organicznych”
- [3] Patent nr 175529 z dnia 05.11.1994 r. pt. „Sposób i układ automatycznego sterowania pracą gazodynamicznych palników mazutowych, rozpałkowo-podtrzymujących w kotłach energetycznych”
- [4] Patent nr 181624 z dnia 18.01.1997 r. pt. „Układ zapłonu ciężkich paliw płynnych w komorze spalania kotła energetycznego”
- [5] Zgłoszenie patentowe P351191 z dnia 14.12.2001 r. pt. „Zespół dozoru płomienia”
- [6] Patent nr 165780 z dnia 18.02.1990 r. pt. „Węzeł armatury trzypalnikowej do współpracy z palnikiem mazutowym rozpałkowym, zwłaszcza do rozpalania kotłów energetycznych”
- [7] Patent nr 162314 z dnia 19.02.1990 r. pt. „Sposób chłodzenia i czyszczenia głowicy palnika olejowego dwuczynnikowego, układ do chłodzenia, czyszczenia głowicy palnika olejowego dwuczynnikowego”
- [8] Patent nr 164172 z dnia 01.10.1990 r. pt. „Palnik do spalania paliwa ciekłego”
- [9] Karcz H., Adynowski J., Sokołowski P.: System zapłonu palników olejowych. *Prace Naukowe ITCiMP Politechniki Wrocławskiej*, zeszyt nr 56, seria Konferencje nr 10
- [10] Karcz H., Sikorski W., Przegaliński K., Butmankiewicz J.: Problemy stabilności płomienia olejowych w palnikach wielkiej mocy. Krajowa Konferencja Energetyczna, Poznań – Rydzyna 20-22 października 1999
- [11] Adynowski J., Sokołowski P., Karcz H.: System dozoru płomienia dla kotłów energetycznych i ciepłowniczych. *Prace Naukowe ITCiMP Politechniki Wrocławskiej*, zeszyt nr 56, seria Konferencje nr 10
- [12] Karcz H., Butmankiewicz J., Andryjowicz C.: Stabilność eksploatacyjna palników. Tamże
- [13] Karcz H., Andryjowicz Cz., Przegaliński K.: Stabilność, pewność eksploatacyjna palników olejowych wielkiej mocy. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, seria Elektryka*, nr 255/2000, zeszyt nr 49
- [14] Karcz H., Zembruski M.: Kinetyczne charakterystyki paliw stałych w świetle ich fizykochemicznych własności. *Archiwum Energetyki* 1974, nr 3

