

Henryk Karcz, Marcin Kantorek, Katedra Kotłów i Turbin, Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, Stanisław Szczepaniak, Krzysztof Folga, Andrzej Kozakiewicz, Tomasz Butmankiewicz, ZBUS-TKW Combustion Główno

MOŻLIWOŚCI OPALANIA KOTŁÓW ENERGETYCZNYCH

biomasą pochodzącą z odpadów

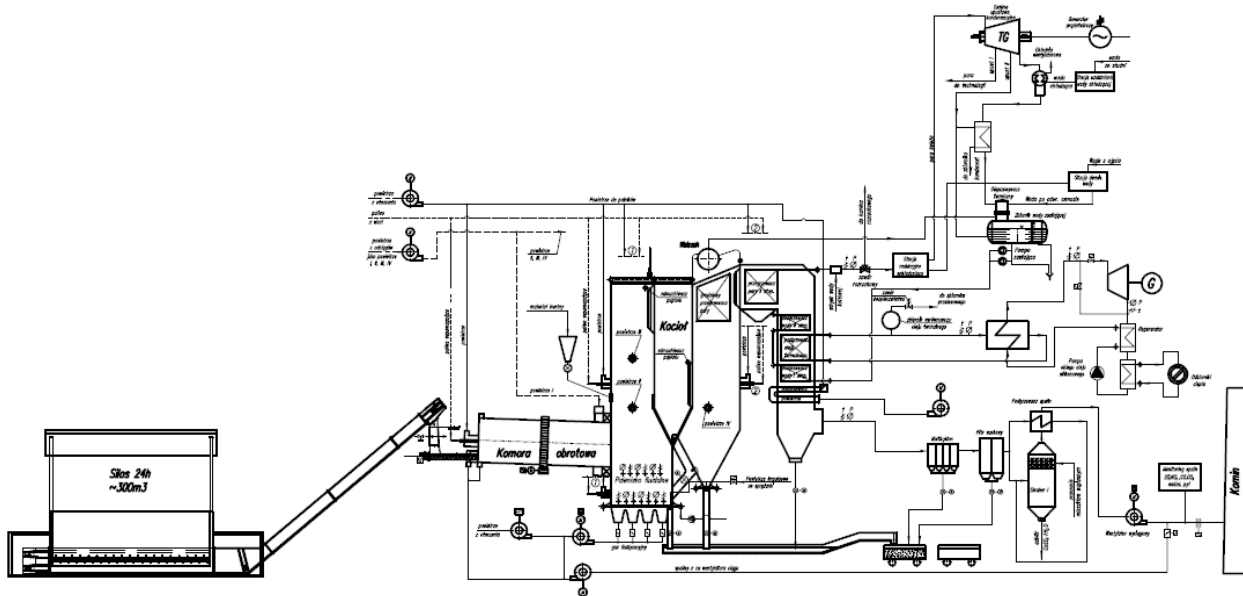
Analiza techniczna i technologiczna potencjalnych paliw energetycznych wytworzonych z odpadów komunalnych wykazała, że najbardziej ekonomicznym i ekologicznym sposobem Energetycznego Recyklingu Odpadów (ERO) jest wytworzenie Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE) w postaci brykietów lub 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, rodzaju urządzeń do brykietowania, peletowania biomasy i wyselekcjonowanych frakcji odpadów komunalnych oraz przemysłowych. Najbardziej prosty sposób wy-

tworzenia FAPE jest bowiem związany zawsze z częściowym pozbawieniem odpadów wilgoci (powstaje paliwo energetyczne) i wzrostem ciepła spalania, co stanowi najbardziej racjonalny technologicznie i ekonomicznie wariant energetyczny. Oznacza to konieczność budowy zakładów zagęszczających palne części w bezpośrednim sąsiedztwie wysypisk i sortowni odpadów. W konsekwencji jest to „dar natury”, który umożliwi oddzielenie uciążliwych wysypisk, składowisk i sortowni odpadów od elektrociepłowni opalanych wytworzonym FAPE, usytuowanych w ośrodkach zurbanizowa-

nych, w których istnieje możliwość odbioru wyprodukowanej energii cieplnej bez przykrych i uciążliwych konsekwencji dla miejscowej ludności.

Polska, wchodząc do Unii Europejskiej, zobowiązała się do ograniczenia składowania odpadów na wysypiskach. Zobowiązaliśmy się, że do 2010 r., ograniczymy o 25% ilość odpadów, które wyrzucane są na wysypiska. Na składowiska ma trafiać nie więcej niż 75% masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji. W 2013 r. musi to być już nie więcej niż 50%, a w 2020 r. maksymalnie 35%. Pozostało jeszcze 15 miesięcy, ale eksperci są zgodni,



Rys. 1. Schemat elektrociepłowni opalanej biomasą i formowanymi alternatywnymi paliwami energetycznymi (FAPE)

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. Spełnienie 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.

W Polsce nie istnieje efektywny ekonomicznie i ekologicznie system odzysku oraz recyklingu odpadów. To zaś powoduje, że brakuje pieniędzy na inwestycje związane z zagospodarowaniem odpadów poprzez budowę zakładów do segregowania, spalania czy kompostowania. Dotychczas podstawą postępowania z odpadami stanowił recykling organiczny – kompostowanie i fermentacja. Zaostrzenie jednak wymagań dla produkowanych kompostów pociąga za sobą konieczność zagospodarowania w inny sposób wytworzonego kompostu, który nie speł-

nia ustalonych norm. Alternatywą, która w inny sposób może przekształcić biomasę z odpadów komunalnych jest przekształcanie termiczne.

Alternatywa ta jest szczególnie cenna z uwagi na fakt włączenia przez UE odpadów komunalnych, ulegających biodegradacji do definicji odnawialnych źródeł energii – dyrektywa 2001/77/WE.

Musimy jednak i w tym przypadku umieć określić, w którym momencie przesadzamy z postępowaniem proekologicznym. Wzrost stężenia CO₂ w atmosferze rejestrowany w obserwatoriach jest mniejszy o około 33% od tego, który wynika z obliczeń bilansowych biorących pod uwagę ilość spalanych surowców energetycznych.

Bilans się nie zgadza, brakuje sporo dwutlenku węgla. Przyпуска się, że pochłonęły go rośliny, które pobierają węgiel z atmosferycznego CO₂ w trakcie fotosyntezy. Mniej więcej połowę zwracają do atmosfery oddychając, a resztę wbudowują w swoje tkanki zmniejszając CO₂ w atmosferze. Zwiększenie powierzchni lasów na Ziemi o 10%, spowodowałyby prawdopodobnie zrównoważenie całej ludzkiej produkcji dwutlenku węgla przez rośliny.

W naszej ziemskiej rzeczywistości powierzchnia lasów w skali globalnej jednak się nie zwiększa, lecz zmniejsza, bo rozwój przemysłu wraz z postępowaniem potrzebuje drewna. Globalne zmniejszenie emisji CO₂ to jednak nie tylko stojąca w pierwszym szeregu fotosynteza CO₂ przez roślinność, lecz spalanie również odpadów powstałych ze zwierząt i ptactwa ubojowego lub padłego, które w łańcuchu biologicznym wykorzystują również roślinność. Energetyczne wykorzystanie odpadów pochodzenia zwierzęcego jest również drogą do obniżenia przez Polskę opłat za emisję CO₂. Problem ten jest również spójny z faktem, że odpady zwierzęce, a w szczególności mączki mięsno-kostne zgodnie z Dyrektywami Unijnymi muszą być wyeliminowane z cyklu żywieniowego zwierząt. Oprócz wspomnianych nośników biomasy, istnieje cała gama surowców, które tworzą listę paliw pochodzących z tzw. źródeł odnawialnych. Są to różnego rodzaju odpady organiczne, szczególnie pochodzenia zwierzęcego, osady ściekowe i odpady komunalne. Największe jednak nadzieje można pokładać w powszechnie uprawianych gatunkach zbóż, jakimi są żyto i owies. Areal upraw tych zbóż





Rys. 2. Ogólny widok instalacji o mocy 12 MW

w skali kraju jest olbrzymi, szczególnie na ziemiach 5 i 6 klasy. Wartość opałowa tych gatunków zbóż w stanie suchym jest zbliżona do wartości opałowej średnio energetycznych węgla kamiennych. Dodatkową pozytywną cechą tego rodzaju biomasy jest łatwość magazynowania, transportu i przygotowania do procesu spalania w układach kotłowni komunalnych. W przypadku spalania w kotłach fluidalnych mączki mięsno-kostnej istnieje szereg trudności, które w konsekwencji eliminują ten nośnik energii jako potencjalne biopaliwo. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że w obecnych uwarunkowaniach biologicznych, geograficznych, ekonomicznych i ustawodawczych Polski, nie istnieje praktycznie gatunek rośliny, która zapewniłaby z zielonej masy dostawę surowca energetycznego wystarczającego na zaspokojenie energetyki, a także stworzenie trwałych rozwiązań systemowych, gwarantujących stabilność produkcji roślinnej dla produkcji biopaliw.

Odpady komunalne stanowią jedną z najbardziej istotnych grup odpadów wytwarzanych w Polsce. Strumień wy-

tworzonych 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. listaindykatywna dużych projektów, zatwierdzona 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 cele:

- po pierwsze, zapewnić możliwość wypełnienia przyjętych zobowiązań w zakresie redukcji odpadów ulegających biodegradacji,
- 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.

Spostrzeżenie to stanowi swojego rodzaju wartość dodaną w aspekcie aktualnie podejmowanych projektów budowy spalarni odpadów w Polsce. Przykładem Holandii, w której w 2005 r., 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].

W świetle tych rozważań należy stwierdzić, że stosując termiczne przekształcenie odpadów w układzie energetycznego recyklingu metodą „K”, można jednocześnie redukować ilość składowanych komunalnych odpadów ulegających biodegradowalności (dyrektywa 1999/31/WE oraz ustawa o odpadach) oraz pozyskiwać użyteczne formy energii cieplnej i elektrycznej w sposób kontrolowany i bezpieczny dla środowiska [1-10].

Problem energetycznego wykorzystania biomasy z odpadów komunalnych jest szczególnie istotny w aspekcie zobowiązań Polski wynikających z Traktatu Akcesyjnego, a także z ustawy o odpadach, dotyczących redukcji składowanych odpadów ulegających biodegradacji [11-13].

■ Wykorzystanie biomasy pochodzącej z OZE oraz formowanych alternatywnych paliw energetycznych (FAPE) w elektrociepłowniach małej mocy

Biomasa stała stanowi obecnie największe źródło energii odnawialnej w Polsce. Podstawowe sposoby wykorzystania biomasy w instalacjach energetycznych realizowane są poprzez jej spalanie (jako paliwa podstawowego) lub współspalanie (z innym paliwem alternatywnym). W grę wchodzi także przygotowanie paliw specjalnych na bazie biomasy (brykiety, pelety, itp.).

Współspalanie jest sposobem stosowanym przede wszystkim w większych instalacjach (np. w energetyce zawodowej) w kotłach przystosowanych zwykle do innego paliwa. Udział biomasy w procesie współspalania limitowany jest przede wszystkim przez jej własności, w tym dużą wilgotność, zawartość składników mogących powodować korozję oraz problemy z żużłowaniem kotłów. Przy dużej wilgotności, przekraczającej niekiedy granicę 50% oraz znaczącym udziale biomasy we wsadzie, energetycznym zagro-

żeniem może być nawet radykalne obniżenie sprawności kotła [14].

Jednym z trendów rozwoju ciepłownictwa w krajach europejskich jest budowa małych elektrociepłowni, przystosowanych konstrukcyjnie do korzystania z biomasy jako paliwa podstawowego. Doskonalone są technologie tradycyjne, znane od dawna, ale obok nich rozwijane są także zupełnie nowe. Wykorzystanie biopaliw w małych elektrociepłowniach jest intensywnie rozwijane w „starych” krajach unijnych, co najmniej od lat 80. ubiegłego wieku. Polska wstąpiła na drogę intensywniejszego rozwoju tej klasy obiektów dopiero od drugiej połowy lat 90. Rozpowszechnienie zarówno różnorodności stosowanych technologii, jak i skali wykorzystania biopaliw w naszym kraju, należy uznać za małe lub w optymistycznym aspekcie za umiarkowane.

Wobec planów radykalnego rozwoju wykorzystania energii odnawialnej oczekiwać należy w bliskiej przyszłości intensywnego rozwoju zarówno różnorodności technologii, jak i ilości wdrożeń. Jeśli zsumować wszystkie instalacje do spalania biomasy w Polsce to ich łączna moc zainstalowana sięgała w 2005 r. granicy 190 MW, zaś w 2006 r. przekroczyła 252 MW. Znaczącą pozycję w krajowym bilansie energii elektrycznej, odnawialnej jest produkcja oparta na współspa-

laniu biomasy w instalacjach elektrowni parowych (głównie dużych). Według URE, na koniec 2006 r. współspalanie biomasy realizowane było w 18 instalacjach o łącznej mocy 1700 MW.

Biomasa stała była w naszym kraju w przeszłości tradycyjnym surowcem dla niewielkich przemysłowych siłowni parowych (np. w zakładach przemysłu drzewnego).

Małe elektrociepłownie biomasowe, korzystające z technologii rozwijanych, obecnie doczekały się dopiero pierwszych, jeszcze nielicznych realizacji.

Przykładami są:

- elektrociepłownia w Jezuickiej Strudze SA wyposażona w turbinę parową o mocy 5 MW,
- ciepłownia w ZPM „Ostrowite” o mocy cieplnej 12 MW,
- ciepłownia w Jezuickiej Strudze SA o mocy cieplnej 10 MW,
- ciepłownia w ZPM EtK o mocy cieplnej 8 MW,
- komunalna elektrociepłownia wyposażona w turbinę parową o mocy 2,1 MW w Płońsku (uruchamiana),
- elektrociepłownia ORC o mocy 8 MW na biomasę w Ostrowie Wielkopolskim,
- oraz szereg niewielkich elektrociepłowni planowanych do realizacji w najbliższym czasie.

Jako źródło napędu generatora w małych elektrociepłowniach (wykorzy-



Rys. 3. Widok komory obrotowej do suszenia i pirolizy podczas wstępnego montażu u wytwórcy

stywane lub przewidywane do stosowania) wymieniane są m.in.: małe turbiny parowe, w tym instalowane w siłowniach ORC na czynniki robocze inne niż para wodna – układzie siłowni na niskie parametry. Celem ich wprowadzenia jest zapewnienie możliwie niskich kosztów produkcji energii z zachowaniem dostatecznie wysokiej sprawności konwersji energii w elektrociepłowni o małej mocy, pomimo niskich parametrów początkowych czynnika roboczego oraz umiarkowanych strumieni masy (a w konsekwencji objętości) czynnika roboczego. Sprawność siłowni pracujących wg tej technologii jest znacząco niższa niż osiągana w dużych instalacjach energetycznych. Mamy jednak do czynienia z instalacjami ciepłowniczymi małej mocy, opalonymi specyficznym paliwem, jakim jest biomasa.

Wysoki powyżej 95% stopień niezawodności eksploatacyjnej całego układu wymusza ostre wymagania wobec właściwości fizykochemicznych spalanej biomasy lub alternatywnych paliw formowanych. Ich jakość i skład chemiczny trzeba utrzymać w wąskich granicach tolerancji, a w dodatku przy niezawodnym systemie usuwania wszelkich wtrąceń metalowych, ceramicznych i ponadwymiarowych ze spalanej biomasy [15-16].

■ Instalacja kotłowa do spalania biomasy i alternatywnych paliw energetycznych

Źródło energii dla elektrociepłowni parowej z turbozespołem kondensacyjno-upustowym i olejowym układem ORC stanowi instalacja kotłowa z układem komory obrotowej i komory fluidalnej opalanej biomasą. Jako instalacje do spalania biomasy proponuje się układ technologiczny typu „K” składający się z komory obrotowej, w której zrealizowany jest proces suszenia i odgazowania biomasy oraz z komory fluidalnej, w której w górnej części spalane są gazy pirolityczne, a w dolnej części spalany jest karbonizat

pozostały po odgazowaniu biomasy. Powstałe w komorze fluidalnej spaliny oczyszczone są z lotnego popiołu i lotnego koksiku w komorze separacji i są dopalane w komorze dopalania kotła [17]. Schemat instalacji przedstawiony jest na rys. 1.

Ogólny widok instalacji do termicznego recyklingu biomasy o mocy 12 MW, pracujący w ZPM „Ostrowite”, gmina Lniano, woj. kujawsko-pomorskie przedstawiony jest na zdjęciu rys. 2.

Widok komory obrotowej przedstawia zdjęcie na rys. 3, a komory fluidalnej przedstawia zdjęcie na rys. 4.

Powyższy układ technologiczny zapewnia całkowite i zupełne spalanie biomasy (brak zawartości części palnych w żużlu i lotnym popiele oraz gazów palnych w spalinach) oraz niższą od dopuszczalnych norm emisję substancji szkodliwych do atmosfery (NO_x , SO_2 , HCl). Układ technologiczny typu „K” zawierający komorę obrotową i komorę fluidalną, w przeciwieństwie do instalacji technologicznej zawierającej kocioł z rusztem schodkowym, który nie zapewnia całkowitego spalania i generuje żużel, zawiera części palne w postaci karbonizatu składającego się z węgla organicznego w ilościach przekraczających dopuszczalną normą ilości (powyżej 5% udziału masowego). Otrzymany ze spalania biomasy w instalacji z rusztem schodkowym żużel stanowi w tym przypadku odpad, który musi zostać poddany dalszej utylizacji termicznej. Zjawisko powstania niedopału w żużlu w ilościach przekraczających dopuszczalne normy jest praktycznie powszechnie spotykaną cechą układów technologicznych z zastosowaniem kotłów z rusztem schodkowym. Z tego powodu układ kotła z rusztem schodkowym do spalania biomasy w technologii typu „K” nie został zastosowany.

Popiół z energetycznego recyklingu pochodzący z odpadów organicznych stanowi cenny surowiec do produkcji nawozów fosforowych, potasowych i wapniowo-magnezowych. Zawartość tzw. „fosfatów” w popiele, któ-

re stanowią główny surowiec do produkcji nawozów, dochodzi do 25-28% i jest około 5 razy wyższa od zawartych w kopalinach naturalnych.

Uzyskany popiół jest bardzo cennym surowcem z powodu dużej zawartości P_2O_5 oraz śladowych zawartości niedopału w postaci koks węgla organicznego. W porównaniu do dotychczas otrzymanego w innych instalacjach popiołu (instalacjach utylizujących odpady organiczne), w których niedopał jest znacznie większy od 10% zawartości niedopału w popiele pochodzącym z energetycznego recyklingu przy pomocy technologii typu „K” i wynosi mniej niż 1% udziału masowego. Otrzymany w instalacji popiół nie tylko nie stanowi niepożądanego niedopału, lecz jest cennym surowcem do produkcji nawozów sztucznych.

Musi spełniać jeden ważny warunek, powinien być pozbawiony węgla organicznego w postaci karbonizatu. Spełnienie tego warunku powoduje, że technologia spalania biomasy metodą „K” ma charakter technologii innowacyjnej i może być dotowana ze środków unijnych w ramach programu operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (4, 4.4).

Charakter innowacyjnej technologii spalania biomasy metodą „K” potwierdzają opinie o innowacyjności, wydane przez niezależne ośrodki naukowe w kraju.

Technologia typu „K” energetycznego recyklingu odpadów i spalania biomasy jest uniwersalną technologią, przy pomocy której można samodzielnie termicznie utylizować dowolne odpady lub spalać w dowolnych mieszkach różne rodzaje biomasy. Technologia typu „K” umożliwi termiczną utylizację dowolnych rodzajów odpadów oraz spalania dowolnej biomasy o łącznej zawartości wilgoci do 90% udziału masowego, przy zachowaniu dopuszczalnych emisji substancji szkodliwych do atmosfery i do gleby, poniżej wartości określonych, jako wartości dopuszczalne w stosownych zarządzeniach i normach krajowych oraz dyrektywach unijnych.

Energetyczny recykling odpadów bezpiecznych i niebezpiecznych przy użyciu technologii typ „K”, gwarantuje termiczną przemianę odpadów bez zawartości jakichkolwiek dioksyn i furanów w emitowanych do atmosfery spalinach. Energetyczny recykling odpadów i biomasy zapewnia termiczną przemianę energii chemicznej zawartej w odpadach i biomasy w energię cieplną i elektryczną przy optymalnej sprawności termodynamicznej układu technologicznego.

W zależności od stopnia zawilgocenia spalanej biomasy ilość doprowadzonego paliwa wspomagającego, ciekłego lub gazowego może zawierać się od 0,015 do 0,070 kg/kg biomasy.

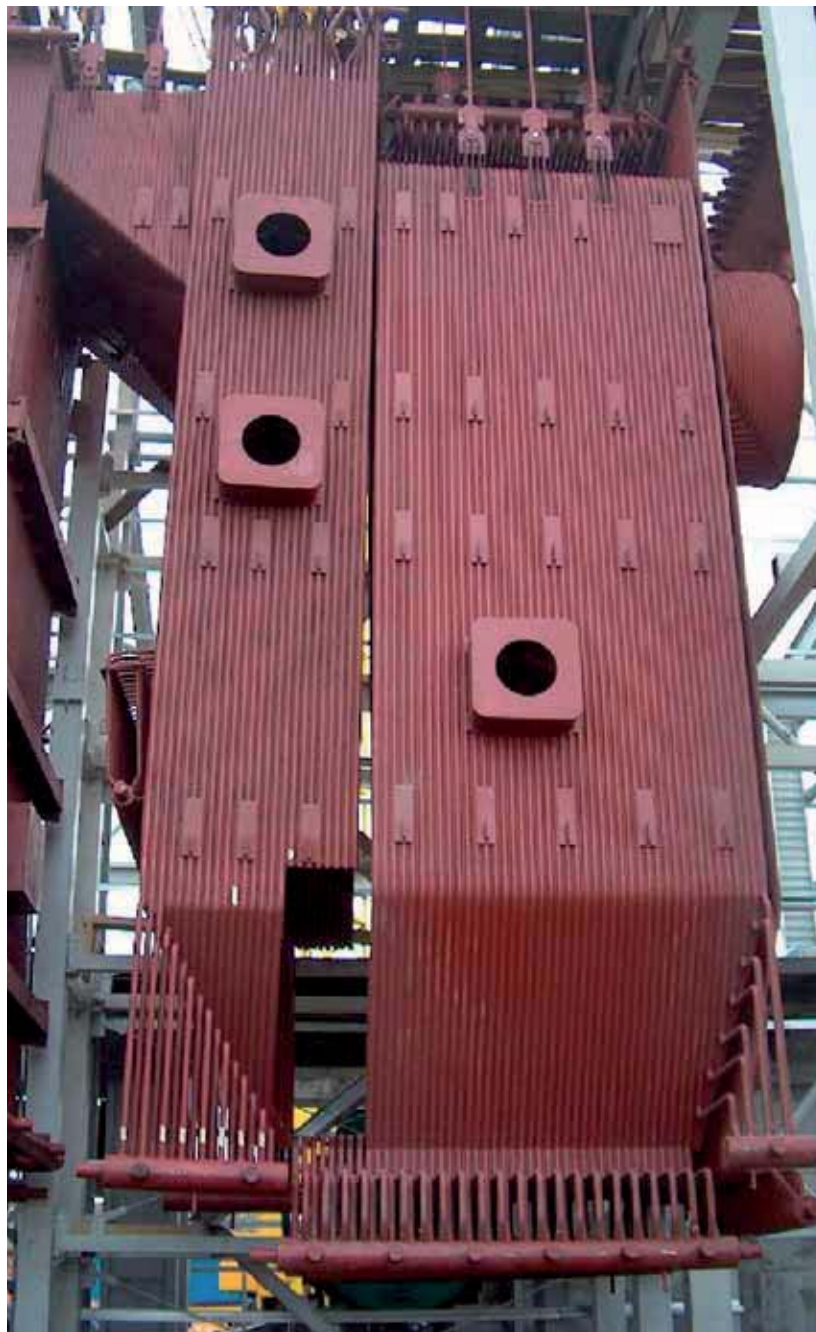
Struktura fizyczna spalanej biomasy może być w postaci stałej, w postaci „pulpy”, jak i gęstej „mazi”. Technologia typu „K” zapewnia w każdym przypadku optymalny efekt cieplny.

Optymalne wykorzystanie wytworzonego ciepła odbywa się w układzie kogeneracji przy pomocy turbozespołu parowego i olejowego z turbozespołem ORC, w których wytworzona zostaje energia elektryczna oraz energia cieplna w ilościach zależnych od potrzeb technologicznych.

Energetyczny recykling odpadów i spalanie biomasy przy użyciu technologii typu „K” umożliwia osiągnięcie maksymalnej sprawności termicznej, maksymalną ochronę ekologiczną atmosfery i gleby oraz optymalny efekt ekonomiczny. Podstawowym paliwem energetycznym są paliwa alternatywne i biomasa pochodząca z produkcji rolnej i produkcji leśnej.

Paliwem pomocniczym, rozruchowym jest paliwo gazowe lub paliwo ciekłe. Najkorzystniej jest stosować paliwa wspomagające pochodzące z OZE, gdyż wówczas całość energii wytworzonej w instalacji będzie pochodziła z OZE. Instalacja charakteryzuje się wysoką dyspozycyjnością i niezawodnością pracy.

Instalacja termicznego recyklingu typu „K” składa się z następujących układów i zespołów: układ przyjęcia i



Rys. 4. Widok komory fluidalnej do spalania gazów pirolitycznych i karbonizatu w trakcie montażu na obiekcie

transportu paliwa alternatywnego lub biomasy, komora obrotowa do suszenia i odgazowania paliwa alternatywnego lub biomasy, komora fluidalna z kotłem odzysknicowym, układ materiału inertnego, układ paliwa pomocniczego, układ preparatu wapiennego, układ powietrza zasilającego, chłodzącego i AKPiA oraz gazu fluidyzacyjnego, układ chemicznego przygotowania wody kotłowej, układ kondensatu, turbozespół parowy z turbiną kondensacyjno-upustową, układ oleju termalnego, układ oleju silikonowego, układ generatora ORC, układ odprowadzania energii elektrycznej, układ oczyszczania i odprowadzania spalin, układ odprowadzania popiołu, układ sterowania i AKPiA, układ elektryczny, układ monitoringu spalin, układ wytwarzania ener-

gii elektrycznej, układ wytwarzania i odprowadzania energii cieplnej do odbiorników technologicznych i grzewczych.

Minimalna ilość wsadu, przy którym instalacja może pracować wynosi 20% wydajności nominalnej, natomiast maksymalna to 120%, przy wilgotności roboczej do 90%.

Proces spalania przebiega przy temperaturach wyższych od 850°C i przy zawartości tlenu powyżej 8%. Zawartość części palnych w popiele jest poniżej 1%, a zawartość substancji szkodliwych w spalinach jest mniejsza od wielkości dopuszczalnych, określonych w stosownych normach i rozporządzeniach.

Proces energetycznego recyklingu i spalania biomasy jest procesem ciągłym, przebiegającym w jednym ciągu

urządzeń instalacji. Instalacja jest wyposażona w niezbędną aparaturę kontrolno-pomiarową do odczytów miejscowych i zdalnego przekazywania sygnałów do nastawni.

Instalacja jest wyposażona w system automatycznego sterowania pracą według założonego wstępnie algorytmu pracy. System sterowania obejmuje przebieg procesu technologicznego, wizualizację, archiwizację parametrów pracy instalacji, zachodzących zdarzeń oraz monitoringu parametrów substancji opuszczających instalację z możliwością bezpośredniej natychmiastowej ingerencji w przebieg procesu w celu zachowania założonych parametrów.

Instalacja i proces spalania są obsługiwane przez zaawansowany system sterowania, oparty na sterowniku PLC z wizualizacją w stacji operatorskiej, komunikujący się z inteligentnymi węzłami obiektowymi, zbierającymi informacje z czujników, przetworników pomiarowych oraz elementów wykonawczych. System realizuje algorytm sterowania pracą instalacji oraz rejestruje podstawowe parametry, istotne z punktu widzenia spełnienia wymogów Rozporządzenia 1774/2002 oraz wymogów Prawa Ochrony Środowiska.

■ Proces suszenia i odgazowania biomasy i paliw alternatywnych

Proces suszenia i odgazowania paliw alternatywnych i biomasy przebiega w komorze pieca obrotowego. Komora wykonana jest z rury stalowej z wewnętrzną wymurówką termoiżaroodporną. Od przodu komora zamknięta jest płytą czołową odpowiednio uszczelnioną z komorą obrotową. Poprzez płytę czołową podawane jest podajnikiem paliwo podstawowe w postaci biomasy lub paliwa alternatywnego z dodatkiem preparatu wapiennego w ilości zależnej od zawartości siarki i chloru w podawanej biomacie lub paliwie alternatywnym. W płycie czołowej znajduje się palnik zasilany paliwem

wspomagającym, który wyposażony jest w układ zapłonowy i układ dozoru płomienia [18-20]. Ilość spalanego paliwa jest regulowana automatycznie tak, aby temperatura w komorze obrotowej w strefie suszenia i odgazowania była w przedziale 700-800°C. W zależności od ilości spalanego paliwa wspomagającego, doprowadzone jest powietrze do spalania w takiej ilości, aby nastąpiło całkowite i zupełne spalanie tego paliwa, a zawartość tlenu (O_2) w strefie suszenia i odgazowania biomasy była zbliżona do zera (atmosfera redukcyjna). W zależności od zawartości O_2 w biomacie, regulowana jest ilość doprowadzonego powietrza do palnika. Proces (suszenia i odgazowania) prowadzony jest w atmosferze redukcyjnej (beztlenowej) w celu wytlumienia procesu spalania i wydzielenia ciepła w komorze obrotowej. Komora obrotowa, suszenia i odgazowania połączona jest z komorą fluidalną aparatem zawirowującym powietrze „pierwotne” niezbędne do częściowego spalania gazów pirolitycznych.

■ Proces spalania biomasy lub paliw alternatywnych

Proces spalania produktów termicznego rozkładu biomasy lub paliw alternatywnych odbywa się w komorze fluidalnej połączonej bezpośrednio z wyłotem pieca obrotowego. Komora fluidalna z komorą obrotową połączona jest poprzez aparat zawirowujący powietrze „pierwotne” niezbędne do częściowego spalania gazów pirolitycznych w takim zakresie, aby w jądrze płomienia nie przekroczyć temperatury 1300°C. W ścianach bocznych komory, nad złożem fluidalnym umieszczone są palniki, które służą, jako źródło zapłonu i stabilizacji spalania gazów pirolitycznych oraz nagrzewu złoża fluidalnego w fazie rozruchu. Palniki wyposażone są w układ zapłonu oraz układ dozoru płomienia [18-20].

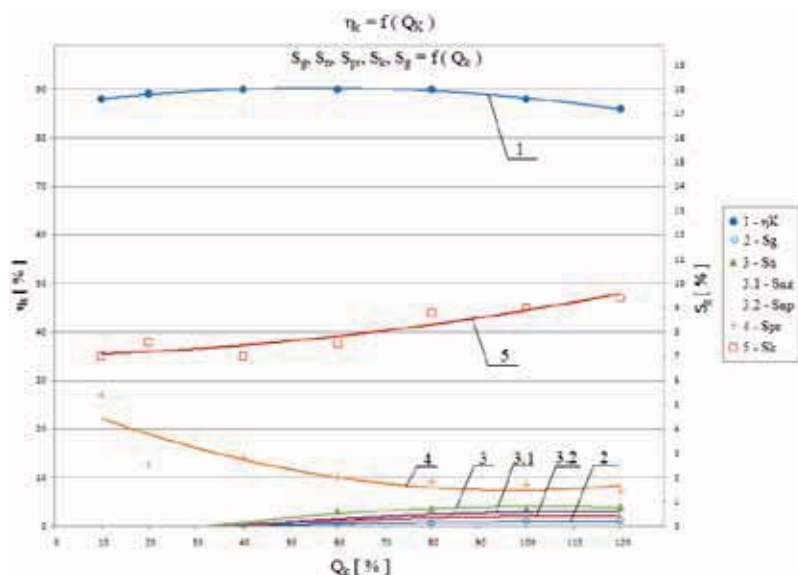
Proces spalania gazów pirolitycznych w komorze spalania jest rozcią-

gnięty na całą wysokość komory fluidalnej poprzez rozdzielanie powietrza niezbędnego do spalania na powietrze „wtórne” i powietrze „trzecie”. Dzięki takiemu rozdziałowi powietrza, możliwe stało się ograniczenie temperatury w jądrze płomienia spalających się gazów pirolitycznych poniżej 1300°C. Ograniczenie temperatury i ograniczenie koncentracji powietrza (cząstek N_2 i O_2) w strefie spalania, pozwala utrzymać proces tworzenia się termicznych NO_x na niskim poziomie [23-28].

Proces dopalania niespalonych gazów pirolitycznych i cząstek stałych karbonizatu, wyniesionych ze spalinami z komory spalania następuje w komorze dopalania, do której doprowadzone jest powietrze „czwarte” niezbędne do całkowitego i zupełnego spalania wszystkich części palnych spalanej biomasy lub paliwa alternatywnego.

Dolną część komory fluidalnej stanowi dno dyszowe złoża fluidalnego [29-30] do spalania karbonizatu powstałego w czasie odgazowania biomasy. Dno dyszowe składa się z czterech sekcji pochylonych w kierunku leja odprowadzającego popiół pod kątem 1-3°. Karbonizat, substancja mineralna, materiał inertny i kamień wapienny służący do wiązania siarki i chloru zawartych w odpadzie, zsypywane są z komory obrotowej do pierwszej sekcji dna dyszowego, gdzie pod wpływem doprowadzonego gazu fluidyzacyjnego, składającego się z powietrza i spalin z recykulacji, tworzą złożo fluidalne, które zapala się od promieniowania płomienia palników i spalających się gazów pirolitycznych.

Gazy pirolityczne spalają się w górnej części komory fluidalnej po wymieszaniu z powietrzem „pierwotnym” oraz powietrzem „drugim” i „trzecim”. Temperatura w strefie płomienia gazowego wynosi 1200-1300°C, a zawartość tlenu (O_2) w spalinach do 6%. Temperatura złoża fluidalnego wynosi 750-900°C i określona zostaje w oparciu o charakterystyki mięknięcia popiołu otrzymanego w procesie termicznego spalania. Współczynnik nadmiaru po-



Rys. 5. Sprawność (η_k), straty ciepłe (S_k) kotła w zależności od obciążenia cieplnego instalacji kotłowej (Q_k) opalanej biomasą

wietrza w złożu fluidalnym, odniesiony do całkowitej ilości powietrza wynosi 0,2-0,4, a zawartość O_2 w gazie fluidyzacyjnym zawiera się w przedziale 6-8%. Czas przebywania gazów pirolitycznych w komorze fluidalnej w temperaturach 1200-1300°C wynosi 6-10 s. Czas przebywania stałej pozostałości po odgazowaniu karbonizatu w złożu fluidalnym w temperaturach 750-900°C wynosi około 5 minut.

Gazy spalinowe na wylocie z komory dopalania będą zawierać:

- pył < 8 mg/nm³,
- SO_x < 30 mg/nm³,
- HCl < 6 mg/nm³,
- CO < 30 mg/nm³,
- HF < 0,5 mg/nm³,
- NO_x < 150 mg/nm³, suma dioksyn i furanów < 0,1 ng/nm³.

Popiół na wylocie ze złoża fluidalnego nie będzie zawierał w ogóle części palnych, sporadycznie w stanach ekstremalnych będzie zawierał jednak mniej niż 1% części palnych w postaci węgla pierwiastkowego.

■ Wskaźniki eksploatacyjne instalacji

□ Straty ciepłe instalacji kotłowej

Straty ciepłe instalacji kotłowej obejmują straty:

- niepełnego spalania obejmującego niespalone gazy palne (S_g),
- niecałkowitego spalania obejmującego niespalone części palne w karbonizacie zawartym w żużlu leżącego żużlowego (S_{nz}) oraz w karbonizacie zawartym w lotnym popiele (S_{np}),
- stratę promieniowania zewnętrznych powierzchni gabarytowych instalacji kotłowej (S_{pr}),
- stratę kominową obejmującą entalpię spalin wnoszonych z kanału wylotowego kotła (S_k).

Straty w zależności od obciążenia cieplnego przedstawiono na rysunku 5.

Strata niepełnego spalania (S_g) występuje wskutek lokalnego braku tlenu lub niedokładnego wymieszania gazowych produktów termicznego rozkładu paliwa, głównie CO i CH₄ z tlenem. W gazach spalinowych opuszczających komorę dopalania nie stwierdzono obecności H₂, CH₄ lub innych węglodorów, a jedynie śladowe ilości CO pojawiające się przy obciążeniach zbliżo-

nych do obciążenia nominalnego (Q_n).

Z tego względu stratę niepełnego spalania gazów pirolitycznych $S_g \sim 0,3\%$ - krzywa 2) można praktycznie pominąć.

Strata niecałkowitego spalania (S_n - krzywa 3) obejmuje stratę wynikającą z niespalonych części palnych znajdujących się w żużlu (S_{nz} - krzywa 3.1) oraz lotnym popiele (S_{np} - krzywa 3.2)

Strata niecałkowitego spalania pojawia się dopiero dla obciążeń cieplnych wyższych od 50%. Strata w lotnym koksiku (S_{np} - krzywa 3.2) jest prawie dwukrotnie niższa od straty (S_{nz} - krzywa 3.1) w żużlu i wynosi dla obciążenia nominalnego około 0,6%.

Stratę ciepła wskutek promieniowania (S_{pr} - krzywa 4) przyjmuje się na podstawie wykresu w zależności od mocy cieplnej kotła oraz rodzaju spalane paliwa [18]. Przy obciążeniach różniących się o więcej niż 25% od obciążenia nominalnego, stratę S_{pr} wyznacza się z wzoru:

$$S_{pr} = S_{pr}^{nom} \cdot \frac{D_{nom}}{D} [\%]$$

gdzie:

S_{pr}^{nom} - strata ciepła wskutek promieniowania dla obciążenia nominalnego D_{nom} .

Przyjmuje się, że straty promieniowania przypadające na komorę paleniskową i pozostałe kanały kotła są proporcjonalne do ilości ciepła oddanego przez spaliny w tych elementach.

Stratę w gorącym żużlu wyznacza się w zależności:

$$S_z = \frac{a_z(ct)_z A^r}{Q'_i}$$

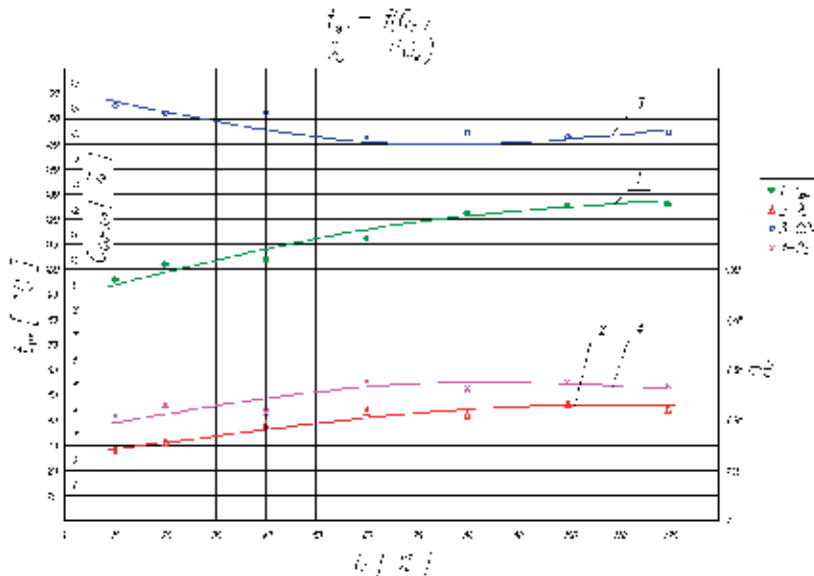
gdzie:

a_z - udział popiołu (A^r) w postaci żużla,

$(ct)_z$ - entalpia właściwa żużla w temperaturze (t_z) odprowadzanego z paleniska,

Q'_i - wartość opałowa.

Ponieważ zawartość substancji mineralnej w biomasie, z której powstaje



Rys. 6. Zależność temperatury wylotowej spalin (t_{spw}) oraz liczby nadmiaru powietrza (λ) i zawartości O_2 i CO_2 w spalinach wylotowych od obciążenia cieplnego kotła (Q_k)

popioł (A') jest niewielka – dla biomasy roślinnej wynosi 0,5-1,5%, dla zwierzęcej 0,5-5%, dla organicznej 0,5-10% i posiada strukturę luźno ułożonych elementów o rozwiniętej powierzchni zewnętrznej i bardzo niewielkiej gęstości pozornej ($d_a^d = 0,2-0,5 \text{ g/cm}^3$), jest w 60-80% wynoszona z fluidalnej komory spalania ze spalinami na zewnątrz kotła. Zawartość popiołu w postaci żużla odprowadzanego ze złoża fluidalnego jest więc znikoma, a strata ciepła w gorącym żużlu waha się od 0,012-0,05% i zawiera się w granicach błędów pomiarowych. W przypadku spalania biomasy strata ciepła w gorącym żużlu jest pomijana.

Strata wylotowa (kominowa) jest największą ze strat i rośnie ze wzrostem temperatury wylotowej spalin z kotła i współczynnika nadmiaru powietrza. Wartość straty wylotowej jest określana wzorem:

$$S_k = \frac{I_{sp.wyl} - I_{pow}}{Q_1} (100 - S_n) [\%]$$

gdzie:

$I_{sp.wyl}$ - entalpia spalin opuszczających kocioł [kJ/m^3] dla temperatury

spalin (t_{spw}) i współczynnika nadmiaru powietrza (λ).

I_{pow} - entalpia powietrza zasilającego kocioł [kJ/m^3].

Stratę kominową (S_k) w zależności od obciążenia cieplnego kotła (Q_k) przedstawia krzywa na rysunku 6.

Strata kominowa rośnie ze wzrostem obciążenia cieplnego układu kotłowego, co spowodowane jest wzrostem temperatury spalin wylotowych (t_{spw} - krzywa 1 na rys. 6) i liczby nadmiaru powietrza (λ - krzywa 2 na rys. 6). Wzrost tej straty w stosunku do zmiany obciążenia jest jednak niewielki. Spowodowane jest to głównie stabilną wartością liczby nadmiaru powietrza (λ) w całym zakresie zmiany obciążenia cieplnego kotła. Ilość doprowadzanego powietrza do układu kotłowego jest kontrolowana w taki sposób, aby niezależnie od obciążenia cieplnego liczba nadmiaru powietrza utrzymywała się na poziomie 1,15-2,25, a zawartość tlenu w spalinach na poziomie 4,0-5,5% (krzywa 5 na rys. 6).

Z uwagi na korzystniejsze warunki mieszania tlenu z gazami pirolitycznymi przy niższych obciążeniach cieplnych (w komorze spalania o ustalonych wymiarach geometrycznych) ilość dopro-

wadzonego powietrza w stosunku do zapotrzebowania stechiometrycznego może być mniejsza niż dla wysokich obciążeń. Fakt ten daje możliwość do znacznego obniżenia straty ciepła w spalinach wylotowych dla niskich obciążeń cieplnych w stosunku do wysokich obciążeń cieplnych ($S_k < 15\%$).

■ Sprawność układu

Możliwość dokładnej regulacji ilości powietrza i dostosowanie jej ilości do potrzeb, które wynikają ze stechiometrii spalania, pozwala tak optymalizować proces spalania, że poszczególne straty kotłowe są minimalne, optymalne dla danego obciążenia cieplnego kotła, a sprawność instalacji kotłowej do termicznego recyklingu spalanej biomasy jest bardzo wysoka i osiąga wartość $\eta_k \sim 90\%$. Krzywa sprawności (krzywa 4 na rys. 6) instalacji kotłowej w zależności od obciążenia cieplnego ma charakter bardzo płaski, niewiele odbiegający od wartości 90% w całym zakresie pracy instalacji. Płaski charakter przebiegu krzywej $\eta_k = f(Q_k)$ jest bardzo dogodny przy eksploatacji, co pozwala osiągać optymalnie wysokie wskaźniki ekonomiczne i minimalną emisję substancji szkodliwych do otoczenia.

■ Wnioski

1. Energetyczny recykling biomasy pochodzącej z Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) oraz z odpadów w postaci Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE) w elektrociepłowni przy pomocy technologii typu „K” zapewnia całkowite i zupełne spalanie bez powstawania odpadów i przekraczania dopuszczalnych emisji substancji szkodliwych do otoczenia.
2. Uzyskany w trakcie procesu spalania popioł nie zawiera substancji palnych w postaci karbonizatu składającego się z pierwiastka C, lecz stanowi cenny surowiec do produkcji nawozów fosforowych, potaso-

- wych i wapniowo-magnezowych.
- Energetyczny recykling biomasy przy pomocy technologii typu „K” zapewnia proces spalania, w którym gazy spalinowe metodą „pierwotną” posiadają ograniczone poniżej 150 mg/m³ zawartości NO_x, poniżej 100 mg/m³ zawartości SO₂ i poniżej 10 mg/m³ zawartości CO, posiadają śladowe ilości sadzy, zawartość lotnego popiołu poniżej 10 mg/m³ i nie posiadają mierzalnych ilości dioksyn i furanów.
 - Opalanie kotłów energetycznych Formowanymi Alternatywnymi Paliwami Energetycznymi (FAPE) jest najbardziej racjonalnym sposobem osiągnięcia maksymalnych efektów ekonomicznych i ekologicznych przy zachowaniu akceptacji społecznej spalarni odpadów biodegradowalnych.

■ Literatura

- Karcz H., Butmankiewicz T., Andryjowicz.: Sposób i instalacja termicznej utylizacji osadów ściekowych. Zgłoszenie patentowe P 362.326 z dnia 2003.09.22.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Sposób i urządzenie do termicznej utylizacji odpadów organicznych. Patent do zgłoszenia P362586 z dnia 2003.10.02.
- Karcz H., Butmankiewicz T., Sikorski W.: Sposób i instalacja spalania odpadów zwierzęcych. Patent do zgłoszenia 360207 z dnia 2003.05.19.
- Karcz H., Jodkowski W., Butmankiewicz T.: Urządzenie do spalania odpadów organicznych. Zgłoszenie patentowe P382495 z dnia 2003.12.05.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Sposób termicznej utylizacji odpadów zwierzęcych i organicznych. Zgłoszenie patentowe P383521 z dnia 2004.06.08.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Instalacja i sposób odwadniania i suszenia osadów ściekowych. Zgłoszenie patentowe P370751 z dnia 2004.10.18.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Instalacja i sposób odwadniania i suszenia osadów ściekowych. Zgłoszenie patentowe P370751 z dnia 2004.10.18.
- Karcz H., Butmankiewicz T., Nunberg J., Jodkowski W.: Sposób i instalacja termicznej utylizacji toksycznych produktów odpadowych. Zgłoszenie patentowe z dnia 2005.07.22.
- Karcz H., Butmankiewicz T., Modliński Zb., Kantorek M., Rzepa K.: Sposób i urządzenie do wytwarzania energii cieplnej. Zgłoszenie patentowe P382240 z dnia 2007.03.18.
- Karcz H., Butmankiewicz T., Jodkowski W.: Urządzenie napędowe komory pieca do termicznej utylizacji toksycznych produktów odpadowych. Zgłoszenie patentowe W 116125 z dnia 2006.05.15.
- Przywarska B.: Odpady komunalne źródłem energii odnawialnej. Recykling 2009 Nr 7-8 (103-104).
- Pająk T.: Spalanie odpadów komunalnych – potrzeby, realia, perspektywy budowy. Termiczne unieszkodliwianie odpadów. Restrukturyzacja procesów termicznych. Praca zbiorowa pod redakcją J.W. Wandrasza. Wyd. Futura Poznań 2007.
- Sciążko M., Zawada J., Pronobis M.: Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. Energetyka i ekologia 2006 Nr 43.
- Kruczek St.: Kotły. Oficyna wydawnicza Polít. Wrocław 2001.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 21 marca 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów (dz.U. nr 37 z 2002 r, poz 339 + zmiana Dz.U. Nr 1 z 2004 r. poz.2).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji (Dz.U. Nr 260 z 2005 r. poz. 2181)
- Głąbik R., Rzepa K., Modliński Z., Sikorski QW., Kosiorek-Herbuś A., Karcz H.: Obliczenia cieplne kotła OP-150 dla różnych udziałów energetycznych biomasy w paliwie. Międzynarodowa X Konferencja Kottłowa 2006 pt. „Aktualne Problemy Budowy i Eksploatacji Kottłów” Szczyrk „Orle Gniazdo” 17-20 październik 2006. Prace naukowe JM i UE Pol. Śląska 10 th International Conference on Boiler Technology. Seria Monografie, Konferencje 2006, Z 16, t 1, s 215-235.
- Karcz H., Zembrzusi M., Tracz B., Ładogórski P., Garncarz T., Jodkowski W., Borowik Zb., Wosik W.: Patent nr 164172 z dnia 01.10.1990 r. Pt.: „Palnik do spalania paliwa ciekłego”.
- Karcz H.: Patent nr 181624 z dnia 18.01.1997 r. pt.: „Układ zapłonu ciężkich paliw płynnych w komorze spalania kotła energetycznego”.
- Karcz H.: Patent nr 351191 z dnia 14.12.2001 r. pt.: „Zespół dozoru płomienia”.
- Peters W.: Kinetik heterogener Reaktionen bei der Verbrennung fester Brennstoffe. VDI Berichte, 1970 Nr 146, s 10-14.
- Loison R., Chauvin T.: Pyrolyse rapide du charbon. Chimie et Ind. 91, 1964 s. 269-275.
- Badzioch S., Hawksley P.G.W.: Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles, Inc. Eng. Chem. Process Des Develop. Vol 9, 1970, Nr 4 s. 521-530.
- Nsakala Ya Nsakala, Essenhigh R.H., Walker P.L. Jr.: Studies on Coal Reactivity: Kinetics of Lignite Pyrolysis in Nitrogen at 800°C. Combustion Science and Technology, Vol. 16, 1977, s. 153-163.
- Mastalerz P.: Chemia organiczna, Wyd. PWN Warszawa 1986.
- Kupryszewski G.: Wstęp do chemii organicznej. Wydanie PWN Warszawa 1977, 1988.
- Ścierański W., Nadziatkiwicz J.: Zapłon paliw odpadowych w warstwie usypanej na ruszcie stałym. Książka Wandrasz J.W., Nadziatkiwicz J.: „Paliwa z odpadów” Tom II Gliwice 2000.
- Schaeft A.: Verfahrenstechnischer Stand der Triocknung Und Verbrennung von Klaerschlam KABV Komunaler Abfallbeseitigung Saar. Zbiór mat. 7 abfallwirtschaftlichen Technologium Saarbrücken 1987 ref. 13.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Dno sitowe w komorach kotłów fluidalnych. Wzór użytkowy do zgłoszenia W 117184 z dnia 2007.12.24.
- Karcz H., Butmankiewicz T.: Dno sitowe kotła fluidalnego. Wzór użytkowy 63257 z dnia 2004.07.29. □