



# Pirolityczno – fluidalna technologia termicznej utylizacji odpadów

## Fluidized bed pyrolysis in thermal treatment of wastes

dr inż. Henryk KARCZ, mgr inż. Marcin KANTOREK

dr inż. Karcz Henryk  
mgr inż. Kantorek Marcin  
Zakład Kotłów i Turbin,  
Wydział Mech.-Energ Poli-  
techniki Wrocławskiej  
Komorowski Wojciech  
Energetyczny Recykling  
Odpadów Główno



### W KILKU SŁOWACH

Biomasa stanowi obecnie największe źródło energii odnawialnej w Polsce. Problem energetycznego wykorzystania biomasy z odpadów jest szczególnie istotny w aspekcie zobowiązań Polski wynikających z członkostwa w UE. W artykule przedstawiono technologię typu K umożliwiającą energetyczny recykling odpadów i zapewniającą całkowite, zupełne spalanie bez powstawania odpadów i emisji substancji szkodliwych do otoczenia, a uzyskany w procesie popiół może być cennym surowcem do produkcji nawozów.



### SUMMARY

Currently, biomass is the major source of renewable energy in Poland. The use of biomass as an energy resource is of crucial importance relative to the environmental laws introduced in Poland after its accession to the EU. This article describes the type-K technology that allows for waste-to-energy recycling and ensures complete incineration of waste material that produces no residuals or environmentally hazardous substances, simultaneously generating slag that can be used in the production of fertilizers.

### 1. Wstęp

**P**olska wchodząc do Unii zobowiązała się do ograniczenia odpadów na wysypiskach. Zobowiązaliśmy się, że do 2010 roku ograniczymy o 25% ilość śmieci, które wyrzucane są na wysypiska. Na składowiska miało trafić nie więcej niż 75% masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji. W 2013 roku miało to być już nie więcej jak 50%, a w 2020 roku maksymalnie 35%. Pozostało jeszcze kilkadziesiąt miesięcy, ale eksperci są zgodni, będziemy musieli zapłacić kary, nawet 250 tys. Euro dziennie. W tym momencie nie ma już żadnych szans na spełnienie naszych zobowiązań w dziedzinie gospodarki odpadami. To oznacza, że opóźnienie może kosztować nas nawet 400 mln zł rocznie.

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 spełnia 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.

Odpady ulegające biodegradacji nie są składowane lecz są przekształcane w alternatywne

paliwa energetyczne (APE) zaliczane do odnawialnych źródeł energii (OZE), które poddane zostają energetycznemu recyklingowi w elektrociepłowni pracującej w hybrydowym systemie kogeneracji turbozespołu parowego i turbozespołu olejowego z turbiną OZC.

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.

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 turbogeneratorski parowego i turbogeneratorski 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 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 umożliwia oddzielenie uciążliwych wysypisk, składowisk i sortowni odpadów od elektrociepłowni opalanych wy-

tworzonym FAPE, usytuowanych w ośrodkach zurbanizowanych w których istnieje możliwość odbioru wyprodukowanej energii cieplnej bez przykrych i uciążliwych konsekwencji dla miejscowej ludności.

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

Przy spalania 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.

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. Podczas spalania wydzielane są gazy spalinowe, które zawierają większość dostępnej energii paliw w postaci ciepła. Substancje organiczne zawarte w odpadach ulegną spalaniu po osiągnięciu temperatury zapłonu oraz wejściu w kontakt z tlenem. Właściwy proces spalania ma miejsce w fazie gazowej w ułamkach sekund i jednocześnie doprowadza do powstania energii. Tam, gdzie wartość kaloryczna odpadów i ilość tlenu jest wystarczająca, może to doprowadzić do termicznej reakcji łańcuchowej i samoczynnego spalania, bez potrzeby dodawania paliw wspomagających.

Aby proces spalania paliwa odpadowego przebiegał samoistnie, bez wspomaganie musi być zapewniona odpowiednia technologia procesu. W palenisku fluidalnym można spalać odpad o zawartości popiołu nawet do 80% [1-3]

Podczas procesu spalania odpadów powstają produkty gazowe, głównie CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, produkty stałe, popiół i żużel w ilościach zależnych od spa-





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

Ze względu na konieczność wytwarzania w najbliższym czasie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych przynajmniej do 10% ogólnej ilości, nakazem dla wszystkich elektrowni stała się konieczność poszukiwania takich źródeł paliw odnawialnych i takich technologii ich spalania, aby wymóg ten został spełniony. Dodatkowym dopingiem dla producentów energii elektrycznej z tzw. "zielonych źródeł" jest pewność, że cała wyprodukowana energia elektryczna zostanie zakupiona przez Zakład Energetyczny po wyższych cenach. Powstała więc sytuacja, która z jednej strony ułatwia sprzedaż wyprodukowanej energii po dogodnych cenach, a z drugiej strony stwarza problem z wyborem odpowiedniego rodzaju biopaliwa i odpowiedniej technologii jego spalania. Główny problem przy obecnym stanie wiedzy na temat spalania tkwi jednak nie w technologii spalania, lecz w wyborze takiego rodzaju biopaliwa, które zapewni w sposób stabilny i długotrwały dostawę źródła energii chemicznej dla wytwarzania ciepła, a w dalszej kolejności energii elektrycznej. Jest oczywistym, że w dalszym ciągu należy skupić się również na podnoszeniu sprawności termicznej i ekologicznej spalania biopaliw. Doświadczenia jednak ostatnich lat wykazały zarówno w skali światowej jak i w skali krajowej, że głównym hamulcem wzrostu energii elektrycznej wyprodukowanej z biopaliw są same biopaliwa. Różnego rodzaju postacie drewna, które jeszcze 10 lat temu znajdowały się przy ówczesnej ocenie w ilościach nieprzebranych, obecnie są już na wyczerpaniu. W ostatnim dziesięcioleciu powstało szczególnie w Państwach Unii wiele urządzeń i wiele technologii przygotowania odpadów z drewna do termicznego spalania. W obecnej chwili urządzenia te są powoli bezużyteczne z uwagi na brak surowca. Wprost para-

dokalną stała się sytuacja z przywozem "zręb-ków" drewna z Kanady do Austrii i Niemiec.

Z dotychczasowych doświadczeń można stwierdzić, że w obecnych uwarunkowaniach biologicznych, ekonomicznych i ustawodawczych Polski nie ma praktycznie gatunku rośliny, która zapewniłaby z zielonej masy dostawę surowca energetycznego, który wystarczyłby na zaspokojenie tylko i wyłącznie wymogów wynikających z Dyrektyw Unijnych odnośnie produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. W warunkach botanicznych Polski praktycznie tylko pięć gatunków roślin w tym dwa gatunki roślin w dalszej perspektywie mogą w jakimś stopniu spełnić wymogi Unijne odnośnie produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Jedną z tych roślin jest wierzba, drugą zaś jest topola. Kilkuletnie próby z pozyskaniem drewna z wierzby energetycznej oraz w mniejszym stopniu z topoli dają nadzieję, że w jakimś stopniu może być zaspokojone zapotrzebowanie na surowiec energetyczny. Szacunkowo są to jednak znikome ilości w stosunku do potrzeb i na pewno nie przekroczą 20% zapotrzebowania na biopaliwo dla elektrowni i elektrociepłowni. Wydaje się, że dużo większe nadzieje można pokładać w roślinach oleistych. Rośliny te dają bowiem olej o wysokiej wartości energetycznej i masę zieloną, która z dużym powodzeniem może być wykorzystywana w postaci słomy. Wartości energetyczne olei roślinnych są porównywalne z ciężkimi olejami ropopochodnymi, a wartościami ekologicznymi znacznie je przewyższają np. poprzez znikomą zawartość siarki. Należy rozważyć również bardziej kontrowersyjny ze społecznego punktu widzenia problem używania jako OZE ziaren żyta i owsa. Z energetycznego, ekologicznego i ekonomicznego punktu widzenia ziarno żyta i owsa jest bardzo przydatne do wykorzystania w planowanej elektrociepłowni. Zawartość pierwiastków Na, K, P, Cl niekorzystnie wpływających na proces spalania w instalacji kotłowej jest niekiedy dwukrotnie mniejsza niż w pozostałych rodzajach biomasy. Jeżeli załatwiony zostanie problem społeczny "spalania ziarna zbożowego" to ten rodzaj biomasy może rozwiązać problem. Może zostać w ten sposób rozwiązany również ekonomiczny problem gospodarstw rolnych, gospodarujących na ziemiach 5 i 6 kla-



sy. Długotrwałe i pewne kontrakty zapewniłyby stabilność rynkową gospodarstw wiejskich na terenach rolniczych z ziemią 5 i 6 klasy, które w Polsce przeważają. Z punktu widzenia logistyki jest to również wariant bardzo korzystny zarówno dla dostawców jak i odbiorców ziarna jakim będzie elektrownia. Obecnie rynkowe ceny żyta wynoszą około 170- 200 zł/t, a owsa około 200 - 230 zł/t. Ekonomicznie przeliczając na jednostkę energii, jest to bardzo tanie paliwo. Aby zrealizować ten kierunek należy zmienić jednak istniejące dotychczas stereotypy społecznego pojmowania realiów obecnych czasów, że ziarna zbóż "nie można palić".

Pozyskiwać biomasa można również z zakładów przetwórstwa rolno-spożywczego. Przykładowo przy produkcji mączki ziemniaczanej powstaje duża masa tzw. "wycierki ziemniaczanej", którą można wykorzystać jako OZE w elektrociepłowni wyposażonej w technologię energetycznego recyklingu typu "K". Analizując realia krajowe pod względem upraw, wielkości dostępnego arealu, botanicznych gatunków roślin rolniczych i technologii wytwarzania olei, można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że olej rzepakowy, pomijając względy ekonomiczne jest głównym biopaliwem roślinnym, które w znacznej mierze może spełnić wymogi Unijnych Dyrektyw odnośnie produkcji energii elektrycznej z biopaliw. Olej rzepakowy jest szczególnie przydatny do spalania w kotłach dużej mocy i podtrzymywania ich pracy przy obniżonym obciążeniu. Przydatność do opalania wielkich kotłów wynika stąd, że proces spalania pod względem sprawności termicznej i ekologicznej jest korzystniejszy od spalania mazutu. Oleju rzepakowego nie powinno się raczej stosować w małych kotłach parowych, ponieważ uzyskuje się zaniżoną sprawność termiczną spalania, obniżenie mocy kotła i pogorszenie warunków ekologicznych po stronie spalin. Bardzo duży potencjał paliwowy tkwi we wszelkiego rodzaju odpadach organicznych, roślinnych i zwierzęcych oraz w osadach ściekowych i odpadach komunalnych. W przypadku tego rodzaju paliwa, elektrownie zawodowe będą miały potrójną korzyść:

- wypełnią wymóg produkcji energii ze źródeł odnawialnych
- będą miały zapewnione źródło dopływu

surowca paliwowego

- będą miały dodatkowe źródło finansowe za utylizację odpadów.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że produkcja energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych opierać się powinna głównie o bazę upraw zbożowych, oleju rzepakowego oraz odpadów organicznych pochodzenia roślinnego i zwierzęcego oraz osadów ściekowych i odpadów komunalnych. Technologia termicznego przetwarzania tych paliw na dzień dzisiejszy znajduje się na zadowalającym poziomie sprawności technicznej i ekologicznej i może być stosowana na skalę przemysłową.

Występują jednak pewne utrudnienia technologiczne, które muszą być uwzględnione przy projektowaniu instalacji dla energetycznego recyklingu biomasy i odpadów (alternatywnych paliw energetycznych APE). Utrudnienia te występują z uwagi na budowę fizykochemiczną i skład chemiczny biomasy i APE, a szczególnie jej części mineralnej. Bardzo ważnym problemem występującym przy spalaniu biomasy i APE w kotłach energetycznych w tym również we fluidalnych jest zawarty w niej chlor oraz pierwiastki grupy 6 metali ziem alkalicznych takich jak: wapń i magnez, grupy azotowców: fosfor i azot, grupy chlorowców: chlor, grupy litowców: sód i potas.

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

Aby prawidłowo zaprojektować proces spalania biomasy należy "bezwzględnie" określić





jej własności fizykochemiczne i kinetyczne zarówno substancji organicznej i nieorganicznej. Szczególnie duże znaczenie ma znajomość zachowania się popiołu w wysokich temperaturach jakie występują w komorze kotła. Informacja o kinetyce suszenia, termicznego rozkładu i spalania gazu pirolitycznego, karbonizatu oraz przemian jakie występują w popiele w trakcie spalania mają decydujące znaczenie dla zaprojektowania instalacji o maksymalnej sprawności termicznej i całkowicie bezpiecznej ekologicznie. Znajomość podstawowych własności biomasy ma tu decydujące znaczenie [2,6-10].

## 2. Instalacja kotłowa do spalania biomasy i alternatywnych paliw energetycznych.

Polska wchodząc do Unii zobowiązała się do ograniczenia odpadów na wysypiskach. Zobowiązaliśmy się, że do 2010 roku ograniczymy o 25% ilość śmieci, które wyrzucane są na wysypiska. Na składowiska miało trafić nie więcej niż 75% masy odpadów komunalnych ulegających biodegradacji. W 2013 roku miało to być już nie więcej jak 50%, a w 2020 roku maksymalnie 35%. Pozostało jeszcze około kilkadziesiąt miesięcy, ale eksperci są zgodni, będziemy musieli zapłacić kary, nawet 250 tys. Euro dziennie. W tym momencie nie ma już żadnych szans na spełnienie naszych zobowiązań w dziedzinie gospodarki odpadami. To oznacza, że opóźnienie może kosztować nas nawet 400 mln zł rocznie.

Spełnienie zobowiązań akcesyjnych wymaga podjęcia kompleksowych, systemowych rozwiązań i skutecznych działań: budowy zakładów przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych i 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 sortowni, spalarni czy kompostowni. Dotychczas podstawę postępowania odpadami stanowił recykling organiczny – kompostowanie i fermentacja. Zaostrzenie jednak wymagań dla produkowanych kompostów pociąga za sobą konieczność

zagospodarowania wytworzonych kompostów, które nie spełniają ustalonych norm, w inny sposób. Alternatywą, która w inny sposób może przekształcić biomasę z odpadów komunalnych jest przekształcenie termiczne.

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

Jako źródło napędu generatora w małych elektrociepłowniach (wykorzystywane 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 wprowadzania 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 osiągnięta w dużych instalacjach energetycznych. Mamy jednak do czynienia z instalacjami ciepłowniczymi małej mocy, opalanymi specyficznym paliwem, jakim są paliwa odpadowe.

Wysoki powyżej 95% stopień niezawodności eksploatacyjnej całego układu wymusza ostre wymagania wobec właściwości fizyko-chemicznych spalanych odpadów. Ich jakość i skład chemiczny trzeba utrzymać w wąskich granicach tolerancji, a w dodatku przy niezawodnym systemie usuwaniu wszelkich wtrąceń metalowych, ceramicznych i ponadwymiarowych [3-6].

Źródło energii dla elektrociepłowni parowej z turbosespołem kondensacyjno-upustowym i olejowym układem ORC stanowi instalacja kotłowa z układem komory obrotowej i komory fluidalnej opalanej paliwami odpadowymi. Jako instalacje do spalania odpadów proponuje się układ technologiczny typu „K” składający się z komory obrotowej, w której zrealizowany jest proces suszenia i odgazowania odpadów oraz z komory fluidalnej, w której w górnej części spalane są gazy pirolityczne, a w dolnej części spalany jest karbonizat pozostały po odgazowaniu odpadów [11-12]. Powstałe w komorze flu-



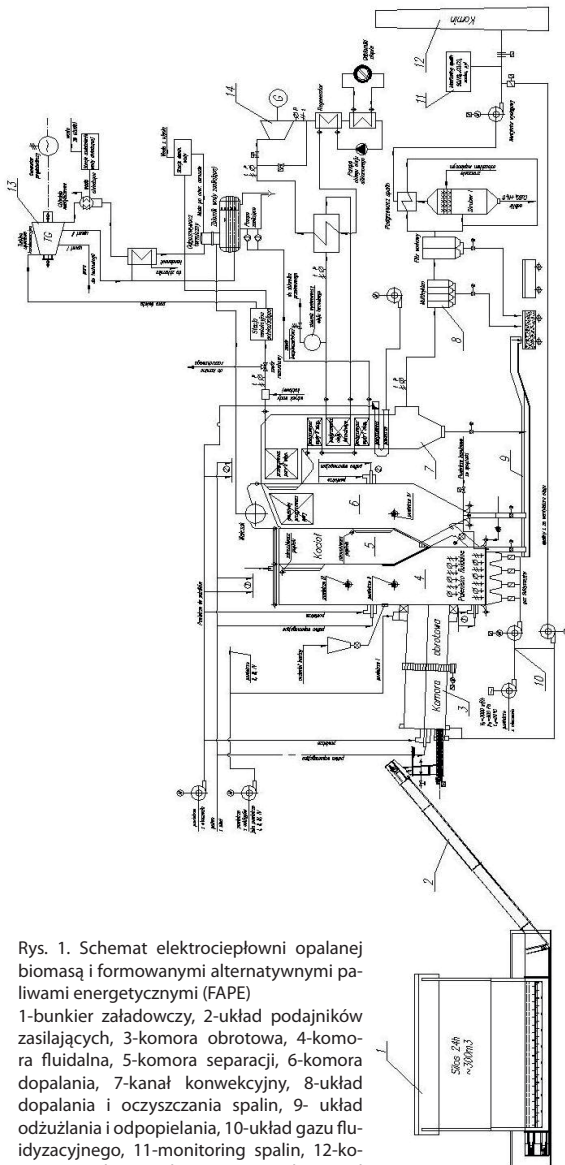


idealnej spaliny oczyszczane są z lotnego popiołu i lotnego koksiku w komorze separacji i są dopalane w komorze dopalania kotła [6-12]. Schemat instalacji przedstawiony jest na rys. 1

Ogólny widok instalacji do termicznego recyklingu biomasy o mocy 12MW, 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 odpadów ( brak zawartości części palnych w żużlu i lotnym popiele oraz gazów palnych w spalinach) oraz niższą od dopuszczalnych przez stosowne normy emisyjne substancji szkodliwych do atmosfery ( NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl).

Pośród zenergetycznych recyklingu pocho-



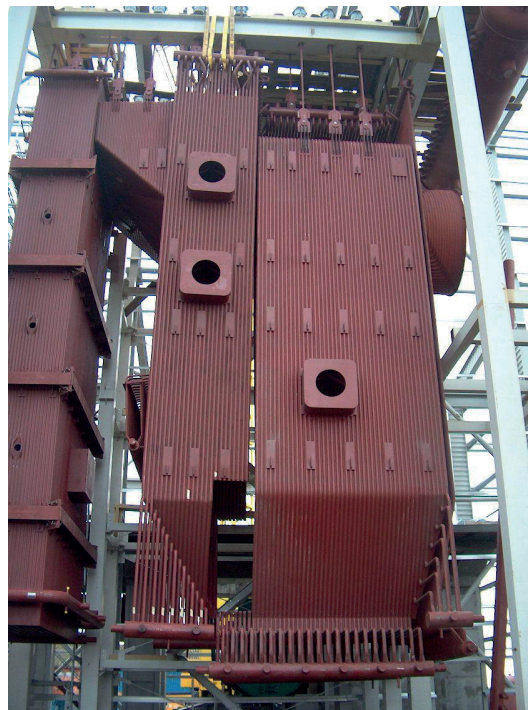
Rys. 1. Schemat elektrociepłowni opalanej biomasą i formowanymi alternatywnymi paliwami energetycznymi (FAPE)  
 1-bunkier załadowczy, 2-układ podajników zasilających, 3-komora obrotowa, 4-komora fluidalna, 5-komora separacji, 6-komora dopalania, 7-kanal konwekcyjny, 8-układ dopalania i oczyszczania spalin, 9- układ odżuliania i odpopielania, 10-układ gazu fluidyzacyjnego, 11-monitoring spalin, 12-komin, 13-turbozespół parowy, 14-turbozespół olejowy ORC.



Rys. 2. Ogólny widok instalacji o mocy 12MW.



Rys. 3. Widok komory obrotowej do suszenia i pirolizy podczas wstępnego montażu w wytwórni.



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

dzący z odpadów organicznych stanowi cenny surowiec do produkcji nawozów fosforowych, potasowych i wapniowo-magnezowych. Zawartość tzw. „fosfatów” w popiele, które 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 surow-





cem z powodu dużej zawartości  $P_2O_5$  oraz śladowych zawartości niedopału w postaci koksu 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 stanowi cenny surowiec do produkcji nawozów sztucznych.

Musi spełniać jeden ważny warunek, musi 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 jest uniwersalną technologią, przy pomocy której można samodzielnie termicznie utylizować dowolne odpady lub spalać w dowolnych mieszankach różne rodzaje biomasy i paliwa konwencjonalne. Technologia typu „K” umożliwia termiczną utylizację dowolnych rodzajów odpadów oraz spalania dowolnej biomasy i paliw konwencjonalnych 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 normach krajowych oraz dyrektywach unijnych.

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

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

Struktura fizyczna spalanych odpadów może być w postaci stałej jak i w postaci „pulpy” 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 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 pochodzące 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.

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  $850^{\circ}C$  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.

#### 4. Proces suszenia i odgazowania odpadów lub paliw alternatywnych

Proces suszenia i odgazowania odpadów i paliw alternatywnych przebiega w komorze pieca obrotowego. Komora pieca wyposażona jest w specjalne półki zgarniające. Komora wykonana jest z rury stalowej z wewnętrzną wymurówką termo i żaroodporną. Od przodu komora zamknięta jest płytą czołową. Poprzez płytę czołową podawane jest podajnikiem paliwo podstawowe w postaci odpadów lub paliwa alternatywnego z dodatkiem preparatu wapiennego w ilości zależnej od zawartości siarki i chloru w podawanych odpadach. W płycie czołowej znajduje się palnik zasilany paliwem wspomagającym. 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 odpadów była zbliżona do zera (atmosfera redukcyjna). W zależności od zawartości  $O_2$  w odpadach, regulowana jest ilość doprowadzonego powietrza do palnika. Proces (suszenia i odgazowania) prowadzony jest w atmosferze redukcyjnej (beztlenowej) w celu wytłumienia procesu spalania i wydzielania ciepła w komorze obrotowej. Komora obrotowa po-

łączona jest z komorą fluidalną aparatem zawirowującym powietrze „pierwotne” niezbędne do częściowego spalania gazów pirolitycznych.

#### 5. Proces spalania odpadów lub paliw alternatywnych

Proces spalania produktów termicznego rozkładu odpadów lub paliw alternatywnych odbywa się w komorze fluidalnej połączonej bezpośrednio z wylotem 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.

Proces spalania gazów pirolitycznych w komorze spalania jest rozciągnięty 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 [13-20].

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 [21-22] do spalania karbonizatu powstałego w czasie odgazowania biomasy. 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 recyrkulacji, tworzą złożo fluidalne, które zapala się od promieniowania płomienia palników zapłonowych 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<sub>2</sub>) w spalinach do 6%. Temperatura złoża fluidalnego wynosi 750-900°C i określona zostaje w oparciu o charakterystyki mięknięcia popiołu otrzymanego w procesie termicznej spalania. Współczynnik nadmiaru powietrza w złożu fluidalnym, odniesiony do całkowitej ilości powietrza wynosi 0,2 – 0,4, a zawartość O<sub>2</sub> w gazie fluidyzacyjnym zawiera się w przedziale 6-8%. Czas przebywania gazów pirolitycznych w komorze fluidalnej w temperaturach 1200-1300°C wynosi 6-10s. Czas przebywania stałej pozostałości po odgazowaniu karbonizatu w złożu fluidalnym w temperaturach 750-900°C wynosi około 5 minut.

**6. Własności fizykochemiczne spalanych odpadów.**

Do opalania kotła elektrociepłowni użyta była mieszanina odpadów organicznych składająca się z osadów ściekowych, odpadów organicznych pochodzących z odpadów komunalnych, odpadów zwierzęcych, wysłodków, melasy, trocin, odpadów z produkcji pasz zwierzęcych, krwi i rozdrobnionej słomy. Odpady podawane były do komory obrotowej częściowo wymieszane w bunkrze załadowniczym i w układzie podajników ślimakowych. Podawana mieszanina miała strukturę gęstej pulpy. Uśrednione własności fizyko-chemiczne spalanej mieszaniny przedstawione są w tabeli nr 1.

L.p.	Nazwa materiału	Symbol	Wymiar	Stan substancji		
				roboczy	suchy	bezw. bezp.
1	Wilgość	W <sub>r</sub>	%	25,02	-	-
2	Popiół	A <sub>r</sub>	%	13,00	17,34	-
3	Części lotne	V <sub>r</sub>	%	38,60	51,76	62,23
4	Wartość opałowa	Q <sub>r</sub> <sub>i</sub>	$\frac{kJ}{kg}$	6975	9302	11075
5	Węgiel	C	%	31,51	42,02	52,03
6	Wodór	H	%	6,62	8,83	10,51
7	Azot	N	%	1,21	1,61	2,56
8	Siarka	S	%	0,21	0,28	0,33
9	Tlen	O	%	22,33	29,78	34,46
10	Chlor	Cl	%	0,097	0,13	0,15

Tabela nr 1. Analiza techniczna i elementarna spalanej substancji.

**7. Wskaźniki eksploatacyjne instalacji**

**7.1. Straty ciepłne instalacji kotłowej**

Straty ciepłne instalacji kotłowej obejmują straty:

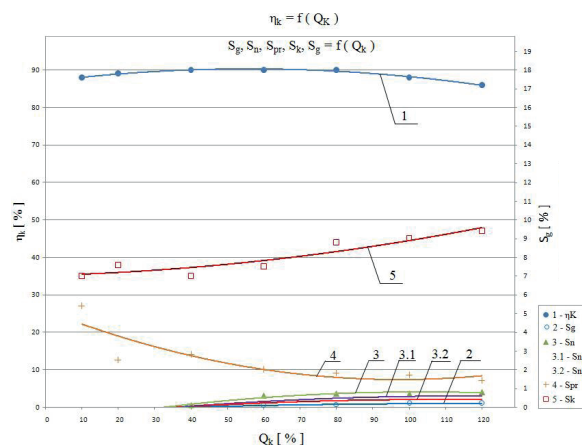
- niepełnego spalania obejmującego nie-spalone gazy palne (Sg)
- niecałkowitego spalania obejmującego nie-spalone części palne w karbonizacie zawartym w żużlu leja żużlowego (Snz) oraz w karbonizacie zawartym w lotnym popiele (Snp)
- stratę promieniowania zewnętrznych powierzchni gabarytowych instalacji kotłowej (Spr)
- stratę kominową obejmującą entalpię spalin wynoszonych z kanału wylotowego kotła (Sk).

Straty w zależności od obciążenia cieplnego przedstawiono na wykresie rys 5.

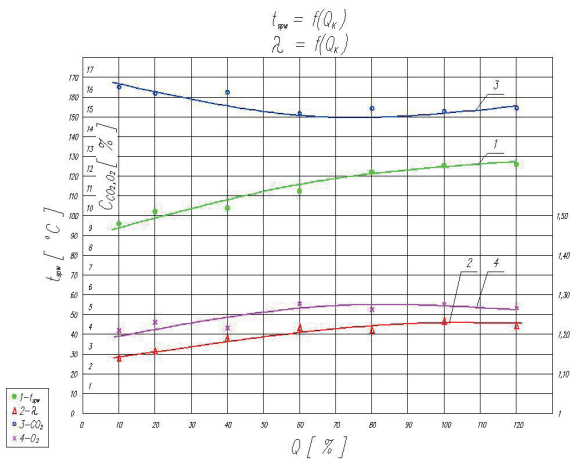
Strata niepełnego spalania (Sg) występuje wskutek lokalnego braku tlenu lub niedokładnego wymieszania gazowych produktów termicznego rozkładu paliwa głównie CO i CH<sub>4</sub> z tlenem. W gazach spalinowych opuszczających komorę dopalania nie stwierdzono obecność H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> lub innych węglowodorów a jedynie śladowe ilości CO pojawiające się przy obciążeniach zbliżonych do obciążenia nominalnego (Qn).

Z tego względu stratę niepełnego spalania gazów pirolitycznych Sg~0,3% - krzywa 2) można praktycznie pominąć.

Strata niecałkowitego spalania (Sn – krzywa 3) obejmuje stratę wynikającą z niespalonych części palnych znajdujących się w żużlu (Snz – krzywa 3.1) oraz lotnym popiele (Snp – krzywa 3.2).



Rys. 5. Sprawność(η<sub>k</sub>), straty ciepłne (Sk) kotła w zależności od obciążenia cieplnego instalacji kotłowej (Q<sub>k</sub>) opalanej biomasą



Rys. 6. Zależność temperatury wylotowej spalin ( tspw) oraz liczby nadmiaru powietrza (λ) i zawartości O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> w spalinach wylotowych od obciążenia cieplnego kotła (Qk)

Strata kominowa rośnie ze wzrostem obciążenia cieplnego układu kotłowego, co spowodowane jest wzrostem temperatury spalin wylotowych (tspw - krzywa 1 na rys 6) i liczby nadmiaru powietrza (λ - krzywa 2 na rys. 2). 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 obciążeń cieplnych 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 4 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 doprowadzonego 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 (Sk < 15%).

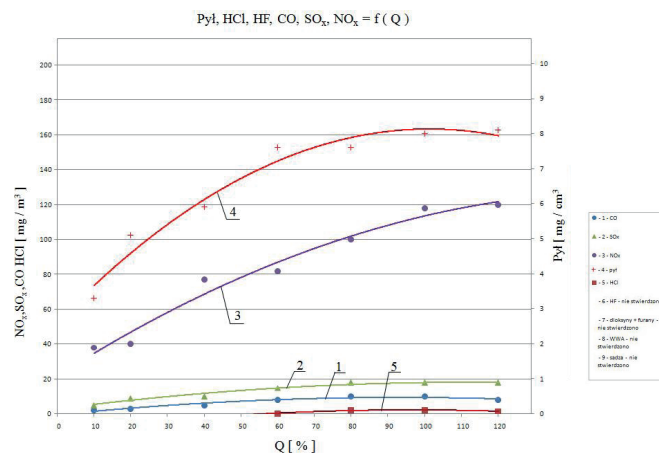
### 7.2. Sprawność układu

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 η<sub>k</sub> ~ 90%. Krzywa sprawności ( krzywa 1 na rys 5) 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 η<sub>k</sub> = f(Q<sub>k</sub>) jest bardzo dogodny przy eksploatacji, co pozwala osiągać optymalnie wysokie wskaźniki ekonomiczne i minimalną emisję substancji szkodliwych do otoczenia.

### 7.3. Emisja substancji do otoczenia

Zawartość składników gazowych w spalinach w kanale wylotowym kotła, które niekorzystnie wpływają na otoczenie przedstawia wykres na rys. 7.



Rys. 7. Zawartość niektórych składników gazowych i lotnego popiołu w spalinach opuszczających instalację kotłową w zależności od obciążenia cieplnego (Qk)

W spalinach opuszczających instalację nie stwierdzono obecności fluorowodoru (HF), wielopierścieniowych węglowodórów aromatycznych (WWA), sadzy oraz dioksyn i furanów. Chlorkowódór (HCl) pojawia się dopiero dla obciążeń wyższych od 60% (krzywa 5). Zawartość CO jest niewielka i utrzymuje się na poziomie 4-5 mg/m<sup>3</sup>, prawie w całym zakresie obciążeń cieplnych instalacji (krzywa 1).

Pierwotne metody wiązania siarki zawartej w biomase w procesie pirolizy w komorze obrotowej i w procesie spalania w komorze fluidalnej przy pomocy gazowych i stałych produktów rozkładu „kamienia wapiennego” podawanego do komory obrotowej dają zadowalające rezultaty



taty, w zakresie redukcji  $\text{SO}_2$  w spalinach wylotowych z kotła. Obniżenie zawartości  $\text{SO}_2$  w spalinach wylotowych z kotła do poziomu  $20 \text{ mg/m}^3$  jest bardzo dobrym rezultatem uzyskanym przy temperaturze pirolizy około  $800^\circ\text{C}$  i temperaturze spalania w złożu fluidalnym  $820\text{--}830^\circ\text{C}$ . Stopień redukcji siarki zawartej w biomase w tych warunkach termicznych wynosił około 93%. Zawartość  $\text{SO}_2$  w spalinach na poziomie  $20 \text{ mg/m}^3$  jest kilkakrotnie mniejsza od wartości dopuszczalnych i nie wymaga stosowania dodatkowych metod oczyszczania spalin z  $\text{SO}_2$  w układzie odprowadzania spalin do atmosfery.

Spśród wielu reakcji zachodzących w czasie spalania paliw, bez względu na fazę w jakiej występują, mechanizm tworzenia się tlenków azotu jest najbardziej skomplikowany. Zależy od różnych, często nakładających się czynników charakteryzujących właściwości paliwa i warunki spalania. Głównym składnikiem ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) powstających w trakcie spalania jest  $\text{NO}$  powstały przez utlenianie  $\text{N}_2$  i  $\text{O}_2$  z powietrza w wysokiej temperaturze.

Ograniczenie temperatury spalania w komorze dopalania poniżej  $1200^\circ\text{C}$  oraz w złożu fluidalnym poniżej  $900^\circ$  całkowicie wyeliminowało mechanizm powstawania  $\text{NO}_x$  w trakcie spalania karbonizatu w złożu fluidalnym i dopalania gazów oraz lotnego koksiku w komorze dopalania.

Zawartość  $\text{NO}_x$  poniżej  $100 \text{ mg/m}^3$  w gazach spalinowych opuszczających kocioł w pełni spełnia wszelkie rozporządzenia dotyczące emisji substancji szkodliwych do otoczenia i jest prawie dwukrotnie mniejsza od wartości dopuszczalnych przy pracy instalacji w zakresie maksymalnych obciążeń cieplnych. Zawartość lotnego popiołu w spalinach opuszczających układ kotłowy w zależności od obciążenia cieplnego przedstawia krzywa 4 na rys. 7. Zawartość lotnego popiołu w spalinach rośnie ze wzrostem obciążenia od 4 do  $8 \text{ mg/m}^3$  przy obciążeniach wyższych od 80%. Niska zawartość popiołu w kanale wylotowym kotła spowodowana jest trzykrotną separacją cząstek lotnego popiołu na elementach wychwytyjących zainstalowanych na festonie „górnym” na wylocie z komory fluidalnej, na festonie „dolnym” na wylocie z komory separacji i na rurach festonu

„wylotowego” z komory dopalania. Wytrącony na półkach ceowników przymocowanych do rur festonu popiół strącany jest do lejów zsypanych i odprowadzany na składowisko. Popiół powstały w trakcie spalania biomasy ma strukturę „kłaczkowatą” zbliżoną do bezpostaciowej o bardzo rozwiniętej powierzchni zewnętrznej i małej gęstości pozornej, dzięki czemu bardzo dobrze pochłania pary metali ciężkich i metali alkalicznych, które łatwo kondensują na unoszonych przez spaliny ziarenkach fazy stałej. Odseparowany ze spalin popiół charakteryzuje się znacznym pokryciem powierzchni przez skondensowane pary metali ciężkich i alkalicznych.

Spaliny na wyjściu z kanału wylotowego kierowane są do multicyklona dla oczyszczenia zgrubnego oraz do filtra workowego, w którym następuje doczyszczanie spalin z najmniejszych cząstek fazy stałej. Koncentracja pyłu na wejściu do komina jest mniejsza od  $8 \text{ mg/nm}^3$ .

## 8. WNIOSKI

1. Energetyczny recykling odpadów pochodzących z Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) oraz z innych odpadów w postaci Formowanych Alternatywnych Paliw Energetycznych (FAPE) w elektrociepłowni przy pomocy technologii typu „K” zapewnia całkowite i zupełne spalanie bez powstawania odpadów i emisji substancji szkodliwych do otoczenia.

2. Uzyskany w trakcie procesu spalania popiół nie zawiera substancji palnych w postaci karbonizatu składającego się z pierwiastka C, lecz stanowi cenny surowiec do produkcji nawozów fosforowych, potasowych i wapniowo – magnezowych.

3. Energetyczny recykling odpadów przy pomocy technologii typu „K” zapewnia proces spalania, w którym gazy spalinowe metodami „pierwotnymi” osiągają ograniczone wartości:

- $\text{NO}_x$  poniżej  $150 \text{ mg/m}^3$
- $\text{SO}_x$  poniżej  $100 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}$  poniżej  $10 \text{ mg/m}^3$
- śladowe ilości sadzy
- popiół poniżej  $8 \text{ mg/m}^3$
- dioksan i furanów nie stwierdzono

