

Kocioł niskotemperaturowy opalany biomasa rolniczą

Low temperature boiler fired with agriculture biomass

TOMASZ GOLEC, GRZEGORZ NEHRING

DOI 10.36119/15.2021.3.1

Artykuł jest próbą podsumowania prac badawczych jakie zostały przeprowadzone przez Instytut Energetyki (IEn) w ramach projektu BioCHP, którego celem było opracowanie oraz przygotowanie do wdrożenia instalacji kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną oraz ciepło z odpadowej biomasy poddanej mikronizacji i utylizowanej w ciśnieniowej komorze spalania zasilającej bezpośrednio turbinę gazową.

IEn jako partner tego projektu miał za zadanie opracowanie technologii kotła, który może być zasilany zarówno dużym strumieniem gazów spalinowych o niskiej temperaturze z turbiny, jak i małym strumieniem spalin o wysokiej temperaturze powstałych w wyniku spalania biomasy w komorze paleniskowej tegoż kotła. W konsekwencji zaprojektowano i wybudowano kocioł hybrydowy z przedpaleniskiem wyposażonym w niskotemperaturową komorę spalania eliminującą ryzyko szlakowania kotła przy spalaniu biomasy o niskiej temperaturze topienia popiołu.

W artykule opisano metody jakie towarzyszyły procesowi projektowania kotła począwszy od budowy modelu palnika na biomase, a skończywszy na projekcie technicznym palnika biomasowego, niskoemisyjnej komory paleniskowej i całego kotła o mocy cieplnej 10 MW. Dużo uwagi poświęcono sposobom organizacji procesu spalania w komorze przedpaleniska oraz metodom uzyskania stabilnego zapłonu mieszanki pyłowo-powietrznej. W pracy przetestowano zarówno startowy palnik olejowy jak i zapalarki plazmowe.

Ostatecznym efektem prac jest działająca instalacja demonstracyjna zlokalizowana na terenie ciepłowni w Karczewie, gdzie przeprowadzono badania kotła, które potwierdziły, że zapewnia on stabilną produkcję ciepła z rozdrobnionej biomasy i spełnia obowiązujące obecnie standardy emisyjne.

Słowa kluczowe: kogeneracja, kocioł, palnik, biomasa, szlakowanie, emisja

The article is a summary attempt of the research work carried out by the Institute of Power Engineering (IEn) as part of the BioCHP project. The purpose of the project was to develop and prepare for the implementation of a CHP installation producing electricity and heat from waste micronized biomass burned in a pressure combustion chamber and supplying the gas turbine directly

IEn, as a partner of this project, was tasked with developing a boiler technology that can be powered both by a large stream of low-temperature exhaust gases from the turbine and by a small stream of high-temperature exhaust gases resulting from the combustion of biomass in the furnace chamber of that boiler. As a result, a hybrid boiler was designed and built with a pre-combustor equipped with a low temperature combustion chamber eliminating the risk of boiler slagging when burning biomass with a low ash melting point.

The article describes the methods that accompanied the boiler design process from the construction of the biomass burner model to the technical design of the biomass burner, low-temperature furnace chamber and the entire boiler with a heat output of 10 MW.

Much attention has been paid to how the combustion process is organized in the pre-combustor chamber and the methods of obtaining a stable ignition of the dust-air mixture. Both the starting oil burner and plasma igniters were tested at work.

The final result of the work is a working demonstration plant located on the premises of the heating plant in Karczew, where the boiler tests were carried out, which confirmed that it ensures stable heat production from micronized biomass and meets the current emission standards.

Keywords: cogeneration, boiler, burner, biomass, slagging, emission

Wprowadzenie

W ostatnim czasie rośnie zapotrzebowanie na małe układy kogeneracyjne zasilane biomasa. Dodatkowym czynnikiem powodującym wzrost zainteresowania takimi układami są rosnące opłaty za emisję

CO₂ pogarszające ekonomikę wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w oparciu o paliwa kopalne. Generacja rozproszona stoi jednak przed dużym problemem, ponieważ rozwiązania zdecentralizowane nie są w stanie konkurować z elektrowniami zawodowymi, gdyż koszty wytwarza-

nia energii elektrycznej w generacji rozproszonej są wyższe niż w tradycyjnych rozwiązaniach.

Jako potencjalnie atrakcyjne ekonomicznie rozwiązanie można rozważyć zastosowanie turbin gazowych do bezpośredniego wytwarzania energii elektrycznej

dr inż. Tomasz Golec <https://orcid.org/0000-0001-9090-9899> – Instytut Energetyki, Pion Ciepły e-mail: tomasz.golec@ien.com.pl, mgr inż. Grzegorz Nehring <https://orcid.org/0000-0002-5726-4061> – Instytut Energetyki – Zakład Procesów Ciepłych; Politechnika Warszawska – Instytut Techniki Ciepłej, e-mail: grzegorz.nehring@ien.com.pl

z pominięciem układów parowych. Szczególnie korzystny wydaje się układ ze spalaniem pyłu biomasy w ciśnieniowej komorze spalania i podawanie spalin bezpośrednio do komory spalania turbiny, przy czym popiół ze spalania biomasy może być separowany przed turbiną lub kierowany wraz ze spalinami do turbiny. Dostępne są analizy teoretyczne dla takich rozwiązań, np. [1], ale doniesienia na temat badań czy wdrożeń instalacji są bardzo ograniczone [2, 3]. Separacja popiołu w wysokiej temperaturze i ciśnieniu komplikuje i podraża układ, tak że rozwiązania z prostą komorą spalania bezpośrednio przed turbiną są bardziej atrakcyjne, zwłaszcza że zawartość popiołu w biomase jest niewielka.

W Polsce pierwsze badania, które potwierdziły taką możliwość wykonano po raz pierwszy w ramach projektu More Energy (<http://life-moreenergy.eu/o-imbigs-2/>). Prace nad bezpośrednim wykorzystaniem pyłu biomasowego w turbinie gazowej były następnie realizowane w ramach projektu BioCHP (<http://biochp.pl/>). Celem projektu było opracowanie oraz przygotowanie do wdrożenia kogeneracyjnej kotłowni bazującej na turbinie gazowej i produkującej energię elektryczną oraz ciepło z odpadowej biomasy, np. ze słomy. Idea rozwiązania polega na zastosowaniu jako paliwa biomasy zmikronizowanej, tj. o rozmiarach ziaren <200 µm i połączeniu zespołu do mikronizacji z zespołem turbiny gazowej oraz zespołem kotła hybrydowego, co pozwala na bezpośrednią, w ramach jednej linii, przemianę biomasy na energię elektryczną i ciepło.

Rysunek 1 przedstawia schemat technologiczny instalacji, której głównymi elementami są: zespół mikronizacji, zespół energetyczny, kocioł oczyszczania spalin hybrydowy oraz

instalacja oczyszczania spalin. Więcej informacji na temat opracowanego w ramach projektu układu technologicznego siłowni pyłowej można znaleźć w [4].

Ważnym elementem składowym opracowanego i zbudowanego w ramach projektu MikroCHP układu jest kocioł hybrydowy opalany rozdrobnioną biomasą. Ze względu na możliwość różnych przyszłych zastosowań przyjęto, że kocioł hybrydowy będzie składał się z dwóch współpracujących modułów tj. przedpaleniska współpracującego z kotłem odzysknicowym, będącym typowym kotłem wodnym lub parowym w zależności od lokalizacji instalacji i potrzeb odbiorców.

Kocioł hybrydowy zaprojektowano tak, aby mógł pracować zarówno samodzielnie jak i współpracując z turbiną gazową odzyskując ciepło ze spalin za turbiną. Zbudowany w projekcie MikroCHP kocioł uzyskuje moc cieplną na poziomie 10 MW, jednak specjalnie opracowane niskotemperaturowe przedpalenisko może być skalowane zarówno do mniejszych jak i większych mocy w zakresie mocy 2-50 MW.

Metodologia

Przy opracowaniu konstrukcji kotła hybrydowego zastosowano metodologię łączącą prace projektowe z modelowaniem numerycznym oraz badaniami w skali półtechnicznej.

W pierwszym etapie, przy użyciu oprogramowania Aspen Plus, opracowano wielowariantowe modele układu zasilania kotła uwzględniające ciepło (spaliny) z turbiny oraz zmikronizowaną biomasę w celu ustalenia konfiguracji całego układu i jego kluczowych parametrów technicznych.

Następnym etapem było opracowanie palnika biomasowego wraz z układem

rozpalania tak, aby spełniał wymagania ww. układu, przy czym w pierwszej kolejności konstrukcja palnika i jego współpraca z zapalarką została przebadana w skali półtechnicznej na stanowisku Instytutu Energetyki umożliwiającym badania modeli palników o mocy w paliwie do 0,5 MW. W oparciu o uzyskane wyniki i zebrane doświadczenia opracowany został palnik dla instalacji docelowej.

Kolejnym etapem prac było opracowanie konstrukcji kotła hybrydowego wyposażonego w nowy palnik, gdzie większość wysiłków skupiła się na dobraniu optymalnej konstrukcji komory spalania wykorzystując do tego celu wielowariantowe modelowanie numeryczne 3D, do czego wykorzystano oprogramowanie Ansys Fluent. Wynikiem tego etapu było określenie docelowej geometrii komory spalania wraz z wymiarami oraz szczegółami rozmieszczenia kanałów i dysz doprowadzających czynniki robocze do kotła (paliwo, powietrze, spaliny). Część konwekcyjną kotła zaprojektowano wykorzystując standardowe obliczenia cieplne i dopasowując ją do szerokiego zakresu parametrów pracy wynikających z konfiguracji całego układu.

Następnie został opracowany projekt wykonawczy kotła hybrydowego wraz z automatyką, dopasowany do specyfiki lokalizacji, gdzie miała powstać instalacja demonstracyjna. Po jej wybudowaniu wykonane zostały badania sprawdzające kotła i przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych.

Wszystkie analizy, badania modelowe i prace projektowe wykonano dla paliwa projektowego, jakim była zmikronizowana słoma o parametrach jak w tab. 1 i stopniu rozdrobnienia poniżej 200 µm.

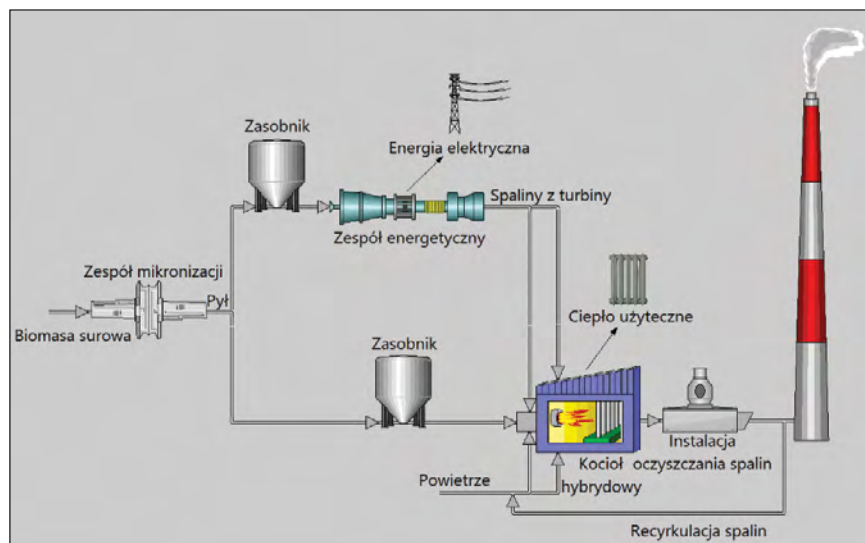
Tab. 1 Własności paliwa przyjęte do analiz i projektowania

Oznaczenie	Jedn.	Słoma zbożowa	
		Stan roboczy	Stan suchy
Wilgość, W	%	6,9	
Popiół, A	%	2,4	2,6
Substancja palna	%	90,6	97,4
Ciepło spalania	kJ/kg	17 685	19 002
Wartość opałowa	kJ/kg	16 269	17 662

Palnik modelowy

Przyjęto, że biomasowy kocioł hybrydowy będzie zasilany jednym, silnie stabilizującym palnikiem wirowym o mocy cieplnej 10 MW opracowanym w oparciu o wcześniejsze doświadczenia Instytutu Energetyki w tym zakresie [5],[6].

W pierwszym etapie, w celu przeprowadzenia testów na stanowisku do badań spalania o mocy do 0,5 MW, wykonano



Rys. 1 Schemat technologiczny biosiłowni pyłowej

model palnika o średnicy zewnętrznej 0,1 m, co oznacza przeskalowanie mocy palnika w stosunku 1:20. Przy opracowaniu palnika założono możliwość zamiennego stosowania jako palnika startowego samodzielnego palnika olejowego (potencjalna dwupaliwowość) lub zapalarki plazmowej. Badania ukierunkowano m.in. na sprawdzenie możliwości rozruchu (tzw. „zimnego startu”) palnika pyłowego. Zagadnienia niezawodności palnika startowego i pewność zapłonu płomienia pyłowego są bardzo istotne w przypadku małych komór wyposażonych w jeden palnik pyłowy i jedną zapalarkę. Palnik pyłowy potrzebuje znacznej energii do zapłonu, a jego stabilna praca uzależniona jest od spalania paliwa, kształtu komory spalania oraz w znacznym stopniu od wstępnego rozgrzania komory paleniskowej.

Pewnym problemem okazało się znalezienie na rynku startowego palnika olejowego o odpowiednio małej mocy i średnicy zewnętrznej pozwalającej na jego zamontowanie w osi palnika modelowego. Po przeprowadzeniu rozpoznania rynku okazało się, że najmniejsze standardowe palniki olejowe, z własnym systemem zapalania i kontroli płomienia, produkuje firma Hegwein. Najmniejszy z nich o średnicy 70 mm dostarcza moc w paliwie ciekłym w granicach 250 – 350 kW. Cechą charakterystyczną tych palników są dysze paliwowo-powietrzne, zasilane dodatkowo sprężonym powietrzem, wspomagającym rozpylenie paliwa. Palniki te pracują z niskim współczynnikiem nadmiaru powietrza na poziomie 0,5, co ułatwia zapłon mieszanki z jednej strony, a z drugiej wymaga dostarczenia powietrza dodatkowym strumieniem (powietrza wtórnego) z palnika pyłowego. Komplikuje to trochę algorytmy startowe o dodatkowy przedmuch powietrza sprężonego, lecz zaletą takiego rozwiązania jest dobre rozpylenie paliwa i całkowite opróżnianie kanałów olejowych po zakończeniu procesu rozruchu.

Po dobraniu palnika startowego zaprojektowano pozostałe dwa kanały palnika pyłowego. Kanał pierwotny mieści się pomiędzy rurą montażową palnika olejowego, a ścianką kanału wtórnego i służy do transportu pyłu biomasy. Natomiast kanał powietrza wtórnego jest prowadzony zewnętrznie i służy do wyrównania niedoborów powietrza dla palnika olejowego i pyłowego. Wszystkie kanały są koncentryczne względem siebie. W palniku tym zarówno powietrze wtórne jak i pierwotne jest zawirowywane.

Na rys. 2 pokazano model palnika i palnik startowy przed montażem jak rów-



Rys. 2
Palniki olejowy i biomasy gotowe do montażu (u góry) oraz, palnik biomasy z palnikiem olejowym na stanowisku badawczym 0,5MW (na dole)



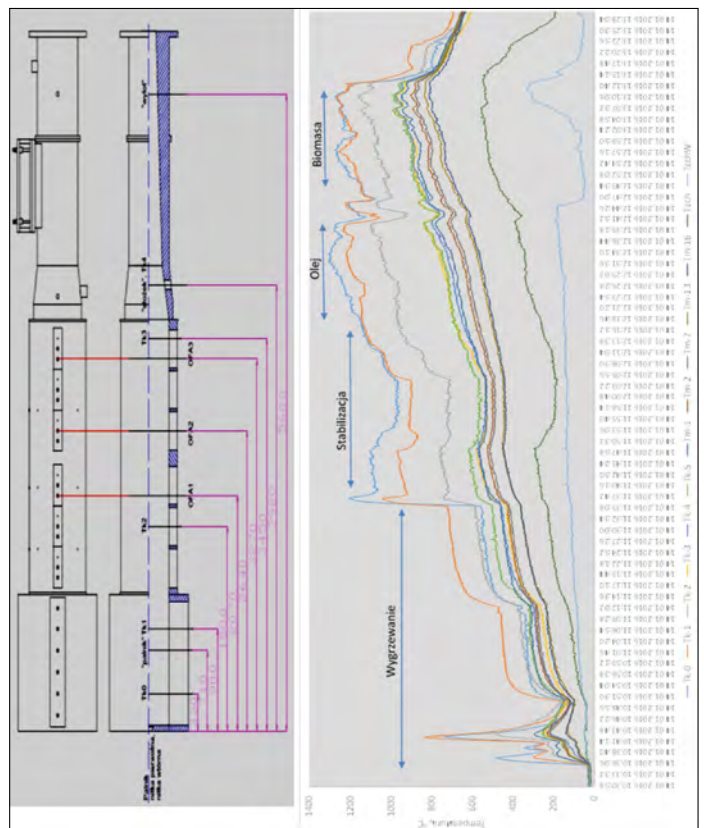
Rys. 3
Zapalarka plazmowa (u góry) oraz palnik biomasy z zapalarką plazmową na stanowisku badawczym 0,5MW (na dole)

nież po montażu w trakcie badań na stanowisku 0,5MW.

Zapalarkę plazmową o mocy 17 kW elektrycznej mocy przetworzonej (w plazmie) opracował Państwowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Zapalarka składa się z głowicy, również o średnicy 70 mm umieszczonej wymiennie z palnikiem olejowym w centralnej części palnika pyłowego; zasilacza oraz chłodnicy z wymuszonym

obiegim cieczowym. Wytworzenie plazmy wymaga dostarczenia napięcia o zmiennym potencjale i regulowanej wartości prądu w zależności od zapotrzebowanej mocy urządzenia. Nośnikiem plazmy w przypadku zastosowanego urządzenia było sprężone powietrze. Do chłodzenia głowicy zastosowano wodę z możliwością zamiany na czynnik niezamarzający. W przypadku urządzeń małej mocy jak ww. można jako zasilacze elektryczne

Rys. 4
Geometria komory paleniskowej, rozmieszczenie termopar oraz przebieg zmian temperatury w komorze z zaznaczeniem charakterystycznych etapów



wykorzystywać elementy z przecinarek i spawarek plazmowych. Rysunek 3 pokazuje zapalarkę plazmową przed montażem oraz zabudowaną na stanowisku badawczym.

Na rys.4 pokazano typowy przebieg procesu narastania temperatury w komorze paleniskowej dla jednodniowego cyklu pomiarowego na stanowisku 0,5 MW. W tym przypadku jest to przebieg z użyciem zestawu palników biomasa/olej. Na rysunku zaznaczono charakterystyczne etapy pracy palnika: wygrzewanie; stabilizacja; praca na palniku olejowym; praca na palniku biomasowym (po odstawieniu oleju). Na rysunku pokazana została również geometria komory stanowiska 0,5 MW i rozmieszczenie poszczególnych termopar pomiarowych, z których pomiar widoczny jest obok w postaci wykresu.

Przykładowe zdjęcia stanowiska w trakcie testów z użyciem palnika olejowego pokazane zostały na rys. 5. Zakres regulacji mocy palnika olejowego (250-350 kW) nie pozwalał na bezpośredni start na zimnym stanowisku, ze względu na ryzyko uszkodzenia komory przy zbyt szybkim wygrzewaniu elementów ceramicznych, dlatego stanowisko wygrzewano wstępnie gorącym powietrzem (oznaczone na rys. 4. jako wygrzewanie) i dwoma palnikami gazowymi o mocy 50kW każdy (stabilizacja). Następnie włączano palnik olejowy, którego moc regulowana była przez zwiększenie ciśnienia oleju z 2,8 do 6,5 bara i zmianę stosunku ciśnienia oleju do ciśnienia powietrza, które ostatni odcinek przed dyszą przebiegają wspólnym kanałem. Zbytne podnoszenie ciśnienia powietrza powodowało zmniejszenie przepływu oleju; roz-



Rys. 5
Testy palnika olejowego

ciąganie mieszanki i w konsekwencji zgaśnięcie płomienia. Dużą skuteczność startu uzyskiwano przy znacząco wyższym ciśnieniu oleju do ciśnienia powietrza w stosunku 1,5-2.

Po włączeniu podawania biomasy występował jej natychmiastowy zapłon, palnik olejowy był wyłączany i następowała stabilna praca palnika biomasowego bez konieczności wspomaganie olejem.

W trakcie przeprowadzonych testów na stanowisku 0,5MW udało się potwierdzić założenia obliczeniowe w stosunku do konstrukcji jak i zakładanej mocy palnika. Zaobserwowano przy tym duży wpływ średnicy palnika startowego zainstalowanego osiowo w rdzeniu w stosunku do pozostałych średnic powietrza pierwot-



Start 0s



0,5s



1s



1,5s

Rys. 6
Sekwencja zdjęć przedstawiająca zimny start palnika biomasowego z zastosowaniem plazmotronu

nego i wtórnego palnika pyłowego, co nie pozostało bez wpływu na kształt i wielkość strefy spalania. Problem ten został rozwiązany w palniku docelowym (10MW), w którym stosunek mocy palnika olejowego, do mocy palnika biomasowego, uległ radykalnej zmianie na korzyść palnika pyłowego.

Kolejnym etapem testów była ocena możliwości rozruchu palnika za pomocą energii plazmy niskotemperaturowej oraz zastosowanie plazmotronu do stabilizacji płomienia pod kątem zabezpieczenia paleniska przed zanikiem płomienia. Skuteczny rozruch palnika pyłowego za pomocą zapalarki plazmowej został potwierdzony eksperymentalnie – rys. 6. Do rozruchu palnika biomasowego wystarczyła moc plazmotronu na poziomie 5%, nominalnej mocy palnika pyłowego. Zastosowanie plazmotronu umożliwia wyeliminowanie znacznych strumieni oleju lub gazu stosowanego w konwencjonalnych układach palników startowych. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne zabudowy plazmotronu wewnątrz palnika biomasowego zostały pozytywnie zweryfikowane podczas eksperymentów gdzie pomimo wysokiej temperatury plazmy żaden z elementów palnika nie uległ zniszczeniu. W testach zapłonu uzyskano bardzo zadowalające wyniki, przede wszystkim szybką ekspansję płomienia, który w 1,5 s osiągnął rozwiniętą strukturę – rys 6.

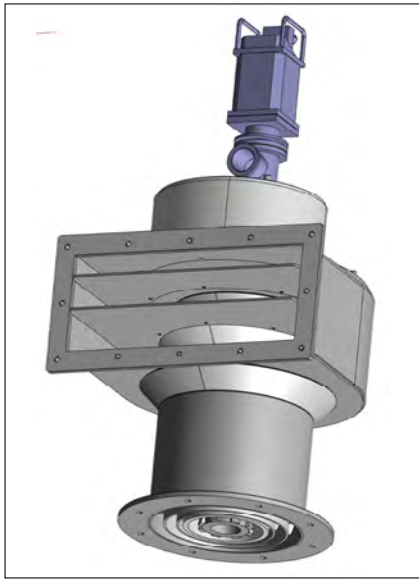
Palnik 10 MW i instalacja rozpalania

Założono, że palnik docelowy będzie pracował stabilnie bez konieczności stabilizacji źródłem zewnętrznym w zakresie regulacji od 20% do 110% jego mocy nominalnej. Przy opracowaniu konstrukcji palnika uwzględniono m.in.:

- generację silnej strefy recyrkulacji stabilizującej spalanie, co w efekcie dało stabilną pracę palnika nawet w okolicach 20% mocy nominalnej;
- regulację stabilizacji płomienia umożliwiającą dostosowanie ustawień palnika do rodzaju spalanej paliwa;
- możliwości pracy na gorących spalinach z turbiny o temperaturze 420°C i zawartości tlenu na poziomie 16%;
- dużą uniwersalność pozwalającą na spalanie zróżnicowanej biomasy o różnym stopniu rozdrobnienia, wilgotności i różnej wartości opałowej.

Tak duża uniwersalność i elastyczność wiąże się z pewną komplikacją konstrukcji palnika. Palnik ten oprócz kanału powietrza rdzeniowego (pierwotnego) będącego jednocześnie kanałem zasilania palnika

pyłem, posiada jeszcze trzy regulowane kanały powietrza wtórnego, które dodatkowo może być również mieszane ze spaliniami – rys. 7.



Rys. 7
Widok opracowanego palnika biomasowego

Palniki projektowane w IEn charakteryzują się wysoką stabilizacją płomienia opartą o silną strefę nawrotu wirującego strumienia spalin, co wymagało centralnego umieszczenia palnika startowego i niezbyt dużej ingerencji w średnice kanałów pyłowo-powietrznych. Dlatego istotnym założeniem było ograniczenie docelowej mocy palników startowych i maksymalne ograniczenie czasu ich działania do czasu niezbędnego do uzyskania stabilnego płomienia pyłowego.

W związku z powyższym w docelowym palniku 10 MW zdecydowano się na zastosowanie tego samego palnika olejowego firmy Hegwein (typ ZAEL1) o mocy 350 kW co w modelu na stanowisku 0,5 MW, zasilanego olejem ze standardowej instalacji zasilającej, wg schematu produ-

centa palnika. W rozwiązaniu docelowym zrezygnowano z oryginalnych kontrolerów producenta, a sterowanie palnikiem przejął sterownik PLC kotła w oparciu o opracowane algorytmy sterujące przygotowane w IEn.

Zapalarkę plazmową podobnie jak do palnika testowego zaprojektował i wykonał Państwowy Instytut Automatyki i Pomiarów. Moc urządzenia zwiększono do 50 kW energii przetworzonej, co wymagało całkowitego przeprojektowania głowicy. W celu zwiększenia efektywności chłodzenia głowicy zastosowano niezależny układ chłodniczy. Zasilacz plazmy o parametrach:

- wejście – 3x400V AC;
- napięcie pracy 100-250V DC;
- prąd pracy 100-250A DC;
- napięcie biegu jałowego minimum 350V DC

wymagał indywidualnego złożenia z komponentów dostępnych na zamówienie. Medium roboczym było sprężone powietrze a gwarantowana trwałość elektrod wynosiła 150 godzin. Moc zapalarki plazmowej stanowiła zaledwie 0,5% mocy palnika głównego. Maksymalna długość przewodów zasilających nie pozwalała na montaż szaf sterowniczych na poziomie „0” dlatego przy palniku zbudowano specjalny podest na poziomie 14 m pokazany dalej na rys. 10.

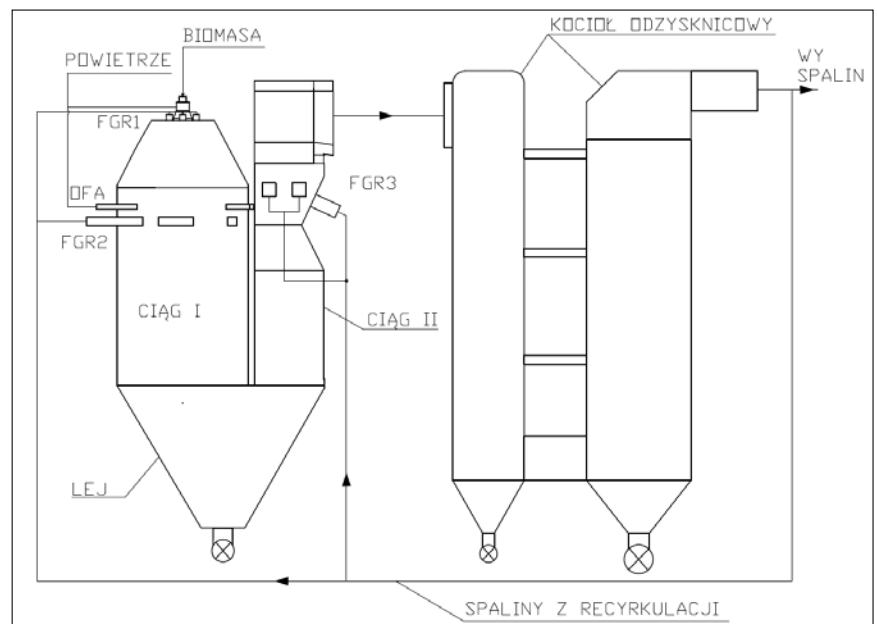
Kontrolę obecności płomienia w docelowej instalacji realizowano przy pomocy skanera płomienia firmy Fireye (Paragon typ 105F1-1), który łączy możliwości dyskryminacji z pomiarem temperatury płomienia, pozwalając na ocenę jakości spalania. Skaner oparty jest całkowicie na

technologii mikroprocesorowej i ma bardzo szybką obróbkę cyfrową sygnału umożliwiającą skanowanie charakterystyk częstotliwościowych płomienia w czasie rzeczywistym, porównywanie ze wzorcem, automatyczne dostrajanie się skanera oraz wyznaczanie parametrów oceny jakości płomienia. Dzięki komunikacji przez wyjście szeregowo RS, parametry te są dostępne w nadrzędnym systemie sterowania.

Kocioł hybrydowy

Na rys. 8 pokazano schemat opracowanego kotła hybrydowego, na którym po lewej stronie widoczne jest przedpalenisko wyposażone w niskotemperaturową komorę spalania, a po prawej wodny kocioł odzysknicowy.

Głównym problemem do rozwiązania były duże różnice w przepływie oraz temperaturach gazów spalinowych przez kocioł odzysknicowy pomiędzy wariantami, gdy biomasa spalana jest tylko w układzie turbiny (bardzo duży nadmiar powietrza i przepływ spalin oraz ich niska temperatura) oraz gdy biomasa spalana jest tylko w kotle (mały przepływ spalin i wysoka temperatura). Ponadto kocioł powinien pracować w sposób ciągły z maksymalnym odzyskiem ciepła, również w przypadku postoju, czy awaryjnego wypadnięcia turbiny. Dlatego założono, że w czasie pracy turbiny palnik pyłowy pracuje na minimum wydajności (20%), a zamiast powietrza do spalania dostarczana jest do niego część spalin z turbiny o wysokiej zawartości tlenu (16,6%). Palnik ten jednocześnie podnosi temperaturę



Rys. 8
Schemat kotła hybrydowego

spalin z turbiny przed kotłem. W przypadku odstawienia turbiny, moc palnika pyłowego zwiększana jest do 100% i żeby zachować zbliżoną temperaturę i ilość spalin przed kotłem zastosowano recyrkulację spalin FGR z za kotła. Cały układ może również pracować we wszystkich stanach pośrednich i z obniżoną mocą.

Specyficzną i innowacyjną cechą przedpaleniska jest przystosowanie do spalania paliw o niskiej temperaturze topliwości popiołu, zwłaszcza biomasy pochodzenia rolniczego, a w szczególności słomy zbożowej. Większość rodzajów biopaliw stałych wykazuje stosunkowo niskie temperatury mięknięcia i topnienia popiołu w porównaniu z węglem, głównie z powodu dużej zawartości związków metali alkalicznych, co wymaga obniżania temperatury spalania w celu zapobieżenia szlakowaniu. Zastosowanie w przedpalenisku niskotemperaturowej komory spalania pozwala na zmniejszenie ryzyka szlakowania jej ścian oraz powierzchni ogrzewalnych znajdujących się za nią kotła odzyskującego ciepło z gorących spalin opuszczających komorę paleniskową. Z tego względu przyjęto, że temperatura spalin na wejściu do kotła odzyskującego nie powinna przekraczać 850°C. Podobna temperatura powinna być również zachowana w pobliżu ścian komory spalania przedpaleniska (stąd określenie niskotemperaturowa komora spalania). Przyjęto, że stosunkowo chłodne spaliny z turbiny będą wykorzystywane również jako powietrze dopalające OFA, schładzające dodatkowo od wewnątrz ściany komory spalania. W przypadku postępu lub braku turbiny rolę tę przejmuje część powietrza wtórnego i spaliny recyrkulacji.

Przedpalenisko jest dwuciągowym piecem zasilanym palnikiem stropowym. Stanowiąca pierwszy ciąg cylindryczna niskotemperaturowa komora spalania opalana jest przez jeden, specjalnie zaprojektowany wirowy palnik pyłowy, dla którego przewidziano dwa sposoby rozpalania – przy użyciu dodatkowego palnika na olej lekki oraz przy użyciu plazmotronu.

Konstrukcja palnika pyłowego umożliwia jego stabilną pracę w szerokim zakresie wydajności cieplnej od 20% do 110%, przy czym dopuszczalne jest zasilanie zarówno pyłem zmikronizowanym w przypadku współpracy z turbiną, jak i biomasą rozdrobnioną poniżej 1 mm w przypadku samodzielnej jednostki kotłowej.

Konstrukcja i sposób działania niskotemperaturowej komory spalania zapewnia zarówno odpowiednie warunki do stabilnego zapłonu i spalania biomasy, jak i niską temperaturę ścian komory spalania oraz

spalin w ich pobliżu, tj. poniżej temperatury topliwości popiołu spalanej biomasy.

Geometria komory spalania oraz ukształtowanie przepływu gazów w jego wnętrzu zapewniają nie tylko niskie temperatury spalin w pobliżu ścian oraz separację popiołu w leju, ale umożliwiają również ograniczenie emisji tlenków azotu metodą pierwotną do poziomu wymaganego przepisami bez konieczności stosowania metod wtórnych (SNCR lub SCR). Wspomniane wyżej efekty uzyskano przez utworzenie w obrębie przedpaleniska kilku stref spalania i mieszania spalin.

Bezpośrednio za wylotem palnika, w górnej stożkowej części komory spalania znajduje się strefa spalania w atmosferze redukcyjnej, z niedomiarem powietrza zapewniająca ograniczenie emisji tlenków azotu metodą pierwotną. Aby nie dopuścić do nadmiernego wzrostu temperatury w tym rejonie komory spalania, do strefy tej doprowadzone są dodatkowo chłodne spaliny przez dysze FGR1 ułożone na stopie kotła w pobliżu palnika pyłowego.

Reszta powietrza dopalającego niezbędnego do spalania pyłu zapewniająca jego całkowite dopalenie doprowadzana jest przez dysze OFA usytuowane na bocznych ścianach komory spalania i wylotach skierowanych prostopadłe do jej ścian, tak aby powietrze dopalające penetrowało do głównej strefy spalania usytuowanej w pobliżu osi niskotemperaturowej komory spalania.

Niska temperatura spalin w komorze spalania, a w szczególności strefie w pobli-

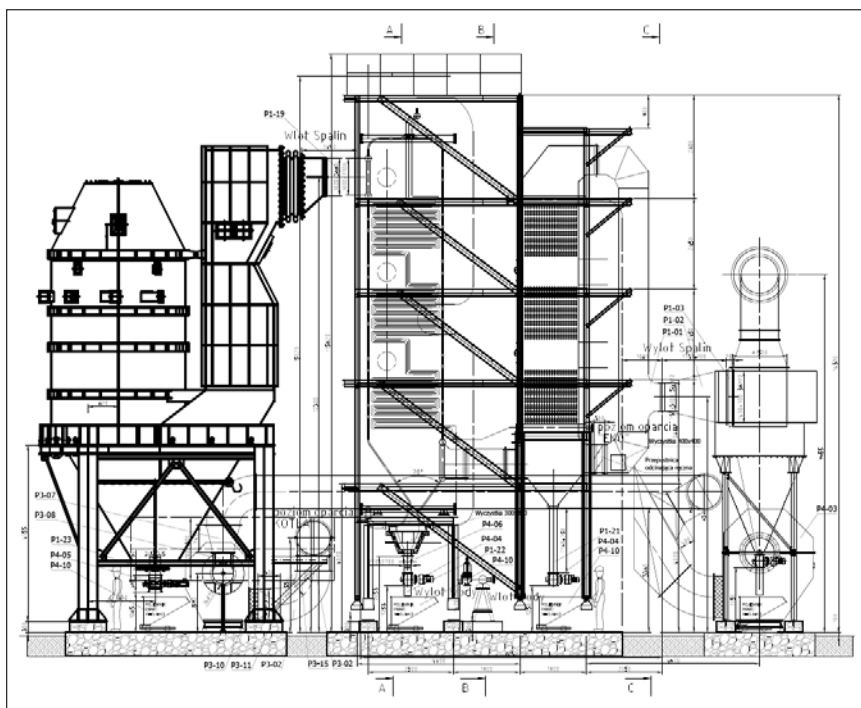
żu jej ścian, a także możliwość jej regulacji zapewniona jest przez specjalnie dobrany układ dysz FGR2 usytuowanych poniżej dysz OFA i wprowadzających spaliny recyrkulacji do komory spalania obwodowo i styecznie do jej ścian.

Trzeci zestaw dysz spalin FGR3 umieszczony jest na ścianach komory mieszania usytuowanej za przewężeniem na wylocie drugiego ciągu przedpaleniska i ma za zadanie końcowe obniżenie w strefie mieszania temperaturę spalin opuszczających przedpalenisko do wartości 750-850°C. Pozwala to na wprowadzenie spalin z przedpaleniska do standardowego kotła, który pozwala na odzyskanie ciepła bądź w postaci gorącej wody wykorzystywanej np. do celów komunalnych lub gorącej pary wykorzystywanej w procesach technologicznych.

Cechą charakterystyczną niskotemperaturowej komory spalania jest także ukształtowanie strefy nawrotu spalin do drugiego ciągu z przewężeniem, aby zapewnić maksymalne aerodynamiczne wytrącanie popiołu ze spalania pyłu na dno leja, skąd może być systematycznie odbierany, np. podajnikiem celkowym. Dzięki temu mniej popiołu wraz ze spalinami wprowadzane jest do kotła odzyskującego, co zmniejsza ryzyko zalepania popiołem jego powierzchni ogrzewalnych.

Modelowanie i optymalizacja

Wariantowe symulacje numeryczne procesu spalania w przedpalenisku zostały



Rys. 9
Rysunek projektowy kotła hybrydowego

przeprowadzone przy wykorzystaniu komercyjnego programu Ansys Fluent z uwzględnieniem wszystkich najważniejszych zjawisk i procesów fizycznych, zachodzących w komorze spalania, tj. przepływu czynników gazowych oraz cząstek biomasy, turbulencji przepływu, spalania cząstek biomasy, reakcji spalania w fazie gazowej, wymiany ciepła przez konwekcję i radiację, oddziaływania cząstek materiału stałego z gazem, a także tworzenia się szkodliwych zanieczyszczeń (CO, NO).

Głównym celem prowadzenia obliczeń ciepło-przepływowych było uzyskanie równomiernego obciążenia cieplnego komory paleniskowej zasilanej jednym palnikiem wirowym. Obliczenia numeryczne wskazały obszary o podwyższonej temperaturze co umożliwiło wprowadzenie zmian konstrukcyjnych i ponowne przeliczanie modelu. Kryterium granicznym była tu temperatura ścianki wynikająca z temperatury mięknięcia popiołu. W wyniku kolejnych modyfikacji modelu określono odpowiednie kształty i rozmieszczenie dysz FGR1, FGR2 i FGR3 oraz wielkości przepływających przez nie strumieni a także określono kształt i położenie dysz OFA. Dobry układ ww. dysz pozwolił na wymagane ukształtowanie pola temperatur w komorze spalania oraz uzyskanie wysokiego stopnia wypalenia paliwa i niskiego stężenia tlenków azotu oraz tlenku węgla w spalinach.

Kolejnym istotnym wynikiem modelowania było określenie pola prędkości przepływu cząstek spalanego paliwa oraz wskazanie martwych stref i zawirowań. Umożliwiło to takie ukształtowanie dolnej części komory paleniskowej, aby prędkości spalin i cząstek stałych były w tej części jak najniższe, co pozwala na wstępną separację popiołu w leju. Dzięki modelowaniu obliczono również grubość izolacji wewnętrznej i zewnętrznej komory paleniskowej.

Po zoptymalizowaniu wszystkich ww. parametrów można było przystąpić do wykonania projektu technicznego. W wyniku przeprowadzonych w IEn prac projektowych powstał projekt techniczny kotła hybrydowego przystosowanego do pracy na sieć ciepłowniczą w lokalizacji Karczew pokazany na rys. 9.

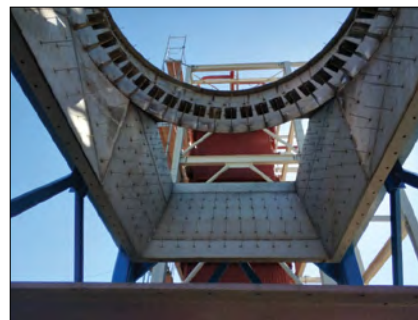
Budowa i rozruch kotła

Instalacja demonstracyjna biosiłowni pyłowej powstała na terenie KPEC Karczew, który udostępnił swoją sieć ciepłowniczą, komin i wstępne źródło energii elektrycznej do budowy i rozruchu układu BioCHP.

Projekt techniczny kotła hybrydowego wraz z układem sterowania wykonał Instytut Energetyki, zaś wykonawcą części kotłowej była firma ZUK Stąporków, będąca jednocześnie jednym z partnerów w projekcie. ZUK wykonał siłami własnymi dwa ciągi komory spalania wraz z obmurzem ceramicznym, kanały powietrza, kanały recyrkulacji i odprowadzania spalin oraz instalację oczyszczania spalin, a także dokonał montażu i wstępnego uruchomienia tej części siłowni. Kocioł odzysknicowy wybudowała firma SEFAKO.



Rys. 10
Montaż kotła odzysknicowego (u góry); montaż szaf sterowniczych i palnika plazmowego oraz palnika biomasowego z kanałami dolotowymi i przepustnicami (na dole)

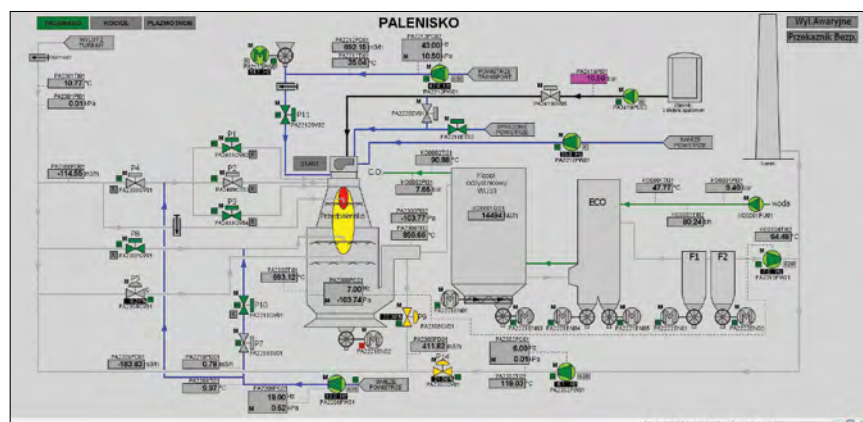


Rys. 11
Komora paleniskowa w budowie (u góry) i kocioł hybrydowy gotowy do testów (na dole)

Układ sterowania kotła opracował Instytut Energetyki, który prowadził również nadzór autorski nad wykonaniem i montażem kotła. Wykonaniem układu sterowania części kotłowej zajęła się firma ZUK. Ostateczny montaż i uruchomienie palników: plazmowego, olejowego i pyłowego wykonał IEn.

Prace budowlane zostały rozpoczęte na przełomie 2018 i 2019 roku. W roku 2019, w okresie letnim zostało wykonane przyłącze do sieci ciepłowniczej DN150 umożliwiające podłączenie kotła. Ukończenie robót montażowych nastąpiło pod koniec października 2019 r. a w listopadzie i grudniu przeprowadzono uruchomienie i badania kotła. Na rys. 10 i 11 pokazano wybrane zdjęcia z budowy kotła hybrydowego.

Sterowanie pracą kotła hybrydowego umożliwił kontrolno-sterujący panel operatorski (rys. 12) w postaci wizualizacji



Rys. 12
Panel operatorski sterowania częścią kotłową instalacji BioCHP w trakcie badań

graficznej instalacji, zawierający zarówno elementy sterowania automatycznego jak i możliwość ręcznej zmiany parametrów. Realizacja sterowania odbywała się automatycznie poprzez program na sterowniku PLC. Sterownik PLC komunikował się z systemem SCADA na komputerze poprzez protokół OPC.

W czasie rozruchu i badań kotła wykorzystano biomasowe paliwa mikronizowane jakie zapewnił partner w projekcie – firma Egovita – o parametrach podanych w tab.2.

sprawdzono możliwości pracy palnika wielopaliwowego w różnych konfiguracjach otwarcia kłap regulacyjnych. Dzięki tej metodzie udało się potwierdzić poprawność propagacji płomienia oraz zakładaną przy projektowaniu odległość czoła płomienia od wylotu palnika.

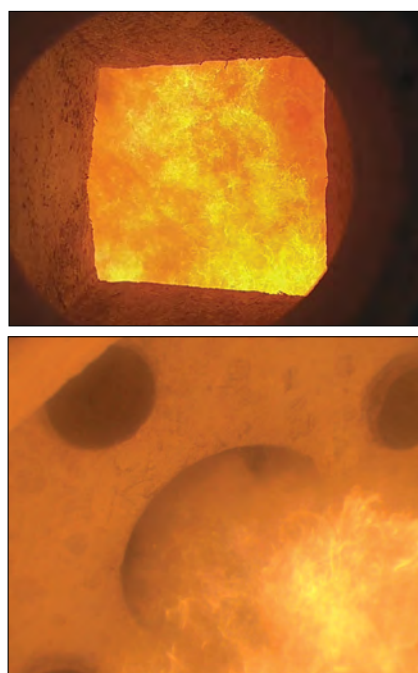
Przeprowadzono również próby startu zimnego palnika pyłowego (niewygrzana komora spalania) z użyciem plazmotronu w miejsce palika olejowego. Ze względu na niskie temperatury otoczenia w okoli-

Tab. 2 Właściwości paliw użytych do badań kotła hybrydowego

Oznaczenie	Jednostka	Odpad z marchwi		Odpad z aronii	
		Stan roboczy	Stan suchy	Stan roboczy	Stan suchy
Wilgość, W	%	8,9	-	6,8	-
Popiół, A	%	3,3	3,7	1,9	2,1
Substancja palna	%	68,03	74,72	73,88	75,43
Ciepło spalania	kJ/kg	15 394	16 906	20 023	21 492
Wartość opałowa	kJ/kg	13 977	15 591	18 611	20 155

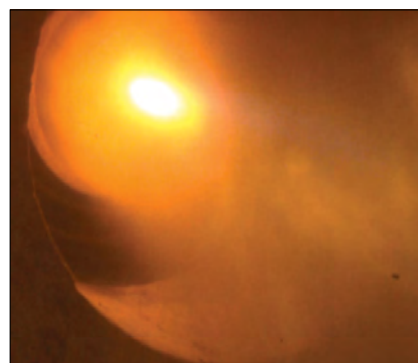
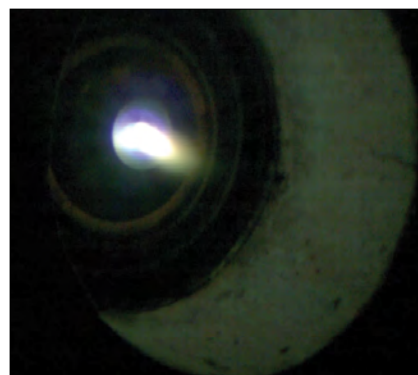
Uruchomienie kotła rozpoczęto od wygrzania części ceramiczno-betonowej przedpaleniska za pomocą startowego palnika olejowego zintegrowanego z palnikiem pyłowym. Pierwsze palenie (suszenie wymurówki) trwało 24 h przed uruchomieniem palnika głównego. Przy kolejnych uruchomieniach wygrzewanie przedpaleniska trwało zwykle 4 do 6 godzin. Następnie do palnika podawano zmikronizowaną biomasę wraz z powietrzem pierwotnym palnika pyłowego, zwiększając stopniowo jej ilość aż do osiągnięcia temperatury w komorze 300-350°C. Wygrzewanie ceramicznej komory przedpaleniska realizowano właśnie w trybie pracy palnika pyłowego z obniżoną poniżej nominalnej mocy i stabilizacją palnikiem olejowym. Po wygrzaniu komory następowało zwiększenie mocy palnika pyłowego i odstawienie palnika olejowego. Badania były realizowane w zakresie temperatur 650-850°C na włocie do kotła odzysknicowego.

W pierwszym etapie badań przeprowadzono ocenę wizualną pracy palnika, która polegała na obserwacji procesu spalania za pomocą zaprojektowanych okien dostępowych i rejestracji obrazu płomienia za pomocą kamery Basler ace acA1300-200uc podłączonej do boroskopu wysokotemperaturowego HT038 – rys 13. W boroskopie HT038 kamera umieszczona jest na końcu chłodzonej wodą sondy, z optyką chłodzoną, a jednocześnie czyszczoną przy użyciu sprężonego powietrza, co umożliwia przeprowadzenie obserwacji płomienia bezpośrednio w palenisku. W trakcie obserwacji, wykorzystując możliwość nagrywania kamery acA1300-200uc w przyspieszonym tempie (do 200 klatek na sekundę),



Rys. 13 Widok płomienia z mikronizowanej biomasy przez okno dostępne (u góry) oraz z użyciem boroskopu (na dole) gdzie obok wylotu palnika widoczne są również wyloty dysz FGR 1

cach zera stopni i poniżej, czynnik chłodniczy w postaci wody zastąpiono glikolem. Po uruchomieniu plazmotronu podawano pył biomasy do strumienia powietrza pierwotnego. Zapłon następował niemal natychmiast po pojawieniu się pyłu w strumieniu powietrza pierwotnego. Płomień z palnika biomasowego był stabilny w zimnej komorze paleniskowej nawet po wyłączeniu palnika plazmowego, co dowodzi występowania dobrej strefy recyrkulacji stabilizującej płomień palnika pyłowego. Przebieg zapłonu z użyciem palnika plazmowego



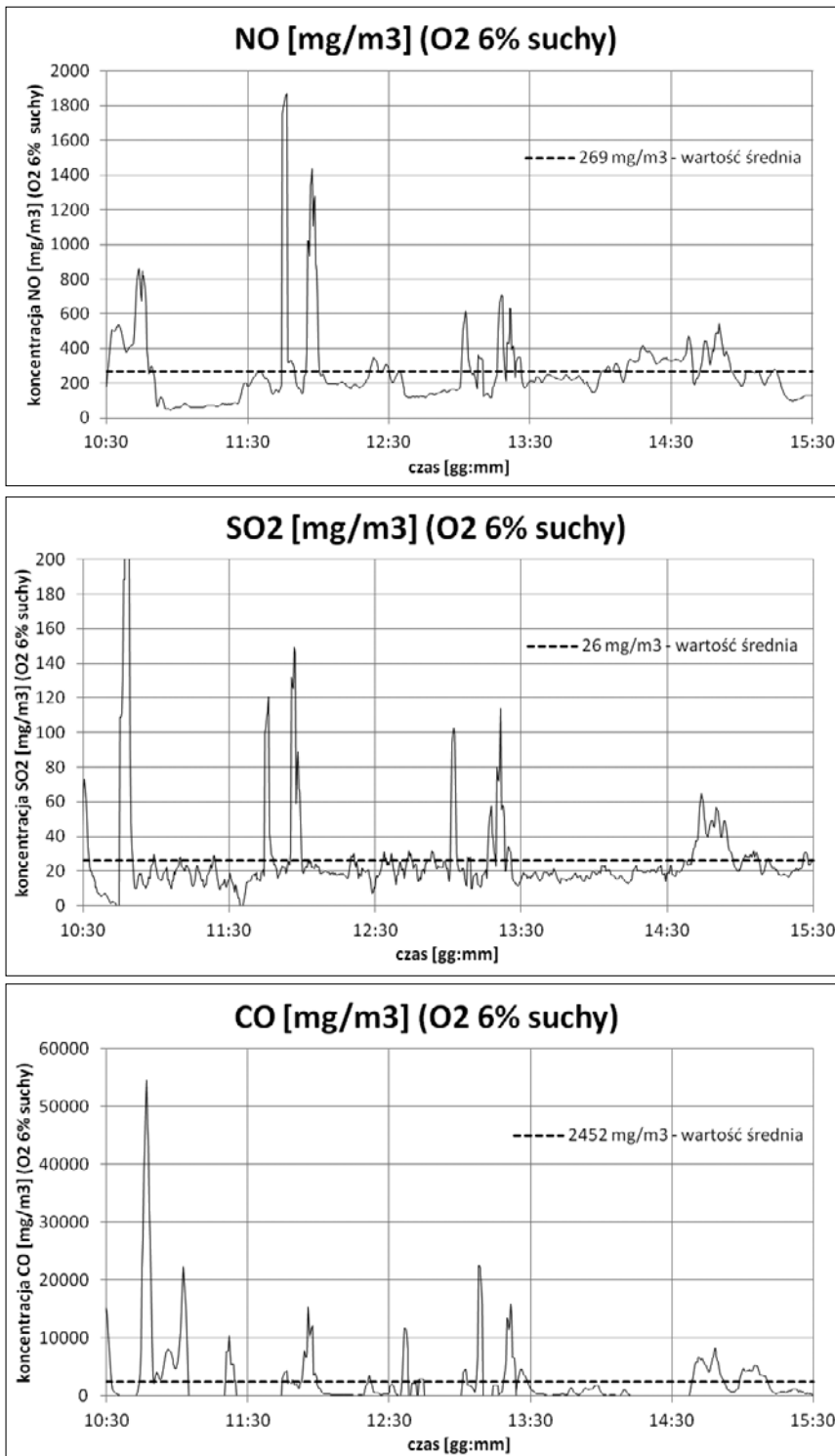
Rys. 14 Fazy rozruchu palnika pyłowego przy zapłonie plazmowym, od góry: sam palnik plazmowy; początek podawania pyłu; zapłon pyłomieszanki

przedstawiają zdjęcia na rys. 14 wykonane z użyciem boroskopu.

Pomiary

Podstawowe badania obejmowały pomiary składu spalin na wlocie z kotła. Pomiar składu spalin wykonano metodą FTIR (Fourier Transform Infrared) przy użyciu analizatora GASMET DX-4000. Przykładowe wyniki składu spalin przy wydajności kotła równej 4MW pokazano na rys. 15.

Na wykresach można rozróżnić okresy ustabilizowanej pracy kotła charakteryzujące się niskim poziomem emisji mierzonych składników spalin oraz momenty podwyższonej emisji odpowiadające okresom pracy instalacji z niesprawnymi urządzeniami oraz w okresach przerw w dostarczaniu odpowiedniej jakości paliwa. W okresach stabilnej pracy emisja tlenków azotu



Rys. 15
Zarejestrowane stężenia NO, SO₂ i CO w spalinach za kotłem

NO była na poziomie ok. 200 mg/m³, przy średniej wartości emisji NO w czasie testu na poziomie 269 mg/m³. W okresach stabilnej pracy nie było praktycznie emisji CO, co przy zastosowanym stopniowaniu procesu spalania, świadczy o jego poprawnej organizacji. Emisja SO₂ była na poziomie tylko 20 mg/m³, ale wynika to z bardzo niskiej zawartości siarki w spalonym paliwie co jest typowe dla większości paliw biomasowych.

W trakcie badań pobrano również popiół ze spalin na wylocie z kotła. Zawartość części palnych w uśrednionych próbkach określono metodą wagową wg. PN-77 G-04528/02 i wynosiła ona 2,09% co jest dobrym wynikiem potwierdzającym poprawny przebieg procesu spalania biomasy.

Analizując wyniki wszystkich przeprowadzonych badań instalacji kotłowej pod kątem dotrzymania norm emisji zanie-

czyszczeń do środowiska przyjęto następujące założenia:

- instalacja działa w sposób komercyjny – nie jest to instalacja laboratoryjna ani badawcza;
- moc cieplna instalacji (rozumiana, jako ilość energii wprowadzonej w paliwie do źródła spalania paliw, instalacji, albo urządzenia w jednostce czasu) wynosi 10MW;
- jest to instalacja jednopaliwowa, a paliwem jest biomasa, definiowana w rozporządzeniu emisyjnym jako produkty składające się z substancji pochodzących z rolnictwa lub leśnictwa, które mogą być wykorzystywane jako paliwo, w celu odzyskania zawartej w nich energii oraz niektóre rodzaje odpadów;
- instalację rozpatrujemy jako źródło nowe, średniego spalania, oddane do użytkowania po dniu 19 grudnia 2018 r.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska [7] ograniczenia emisyjne dla takiej instalacji to:

- NO_x < 300 mg/m³,_v
- SO₂ < 200 mg/m³,_v
- pył < 30 mg/m³,_v

zaś CO nie podlega klasyfikacji.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że kocioł hybrydowy w pełni spełnia te wymagania. Wprawdzie podczas pracy instalacji nie mierzono emisji pyłu, oszacowano jednak, że dla dwóch spalanych paliw wartość ta nie przekraczała 3 mg/m³,_v, a więc była o rząd wielkości poniżej wymagań, co wynikało z bardzo niskiej zawartości popiołu w paliwie.

Podsumowanie

Zadaniem Instytutu Energetyki w wyżej opisanym projekcie BioCHP było opracowanie technologii kotła hybrydowego, czyli takiego, który będzie z jednej strony wykorzystywał (odzyskiwał) ciepło spalin z produkcji energii elektrycznej w turbinie gazowej zasilanej zmikronizowaną biomasą, a z drugiej zapewni możliwość stabilnej produkcji ciepła lub pary dla odbiorcy końcowego, przy założeniu, że priorytetem jest produkcja energii elektrycznej, a ciepło lub para jest produktem dodatkowym. Zadanie to zostało wykonane w postaci kotła o mocy 10MW w lokalizacji KPC Karczew.

Zbudowany kocioł hybrydowy zapewnia stabilną produkcję ciepła z mikronizowanej biomasy uniezależniając ją od możliwych chwilowych wahań w produkcji energii elektrycznej przez turbinę. Komora spalania może pracować zarówno z wykorzystaniem spalin z turbiny jak

i na powietrzu z otoczenia (palnik i dysze OFA) z wykorzystaniem recyrkulacji spalin.

W trakcie badań nie zaobserwowano nadmiernych wzrostów temperatur w profilach poprzecznych i przy ścianach komory paleniskowej, zaś temperatura wlotowa do kotła odzysknicowego nie przekraczała 860°C (przy założonych 850°C). Predysponuje to opracowaną konstrukcję do spalania paliw biomasowych o niskiej temperaturze topienia popiołu. Dodatkowo taką predyspozycję potwierdza fakt, że na powierzchniach ogrzewalnych kotła odzysknicowego nie zaobserwowano odkładania się osadów popiołów. Części palne w popiele oscylowały w granicach 2% co jest w pełni akceptowalne. Zaprojektowany kocioł hybrydowy z łatwością spełnia również obowiązujące obecnie standardy emisyjne.

W ramach projektu powstał także biomasowy palnik pyłowy mogący poprawnie pracować w szerokim zakresie obciążeń 20-110 % z możliwością spalania biomas również w warunkach podstechiometrycznych, z dwoma alternatywnymi sposobami rozpalania, tj. zapalarką olejową i plazmową.

Startowy palnik plazmowy i olejowy różnią się swoją funkcjonalnością. Palnik plazmowy należy traktować raczej jako szybką zapalarkę w sytuacji zaniku płomienia, tudzież szybkiego (zimnego) startu palnika pyłowego. Jego zaletą jest brak dodatkowych instalacji paliwowych w okolicy kotła czy paleniska. Natomiast palnik olejowy może, w zależności od zastosowanej mocy w stosunku do mocy palnika głównego, spełniać funkcje stabilizacyjne dla pracy palnika głównego (pyłowego) poniżej mocy nominalnej lub też być pełnoprawnym alternatywnym źródłem cie-

pła w palniku dwupaliwowym przy stosunku mocy 1:1.

Palnik plazmowy dużej mocy jest bardzo kosztowny. Dużo tańszy jest palnik olejowy. Certyfikowana zapalarka małej mocy razem z instalacją olejową powinna się zamknąć kwotą ok. 4 razy niższą niż dla zapalarki plazmowej. Dodatkowo trwałość elektrod plazmotronu wynosi zwykle 80-200h. Jeśli jednak przyjmujemy dla bezpieczeństwa czas rozruchu ok. 1 minuty i trwałość elektrod 100 h to dla jednych elektrod możemy otrzymać ok. 6000 zimnych rozruchów kotła. Start palników olejowych zwłaszcza dużej mocy i nie pracujących w reżimie zapalarki palnika głównego nie jest taki szybki jak plazmotronu, natomiast typowe palniki olejowe z typoszeregu wyposażone są we własne zapalarki iskrowe i przystosowane są do setki tysięcy startów i odstawiń.

Mała zapalarka plazmowa jest na pewno interesującą alternatywą dla małych i średniej wielkości palników pyłowych zasilanych biomasą ze względu na niski koszt i brak dodatkowych instalacji, oprócz chłodzenia głowicy.

Podziękowanie



Praca była realizowana w ramach projektu BIOSTRATEG1/270684/1/NCBR/2015 pn. "Badanie oraz przygotowanie do wdrożenia technologii wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w kotlewni zasilanej zmikronizowaną biomasą BioCHP" (<http://biochp.pl/>) dofinansowanego przez NCBiR w ramach programu BIOSTRATEG i realizowanego

przez Konsorcjum w składzie: Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Egovita Sp. z o. o., Instytut Energetyki, Zakłady Urządzeń Kofłowych STA-PORKÓW S.A., Instytut Techniczno-Przyrodniczy, Politechnika Warszawska.

LITERATURA

- [1] Aline Doherty, Eilin Walsh, Kevin P. McDonnell, THE DIRECT USE OF POST-PROCESSING WOOD DUST IN GAS TURBINES, *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2012, 2, 60-64.
- [2] Joseph T. Hamrick, BIOMASS FUELED GAS TURBINE DEVELOPMENT, Aerospace Research Corporation. 5454 Aerospace Road. Roanoke, Virginia 24014.
- [3] Sam H. Powell, Joseph T. Hamrick, WOOD-FIRED GAS TURBINE PLANT, *Proceedings from the Eighth Annual Industrial Energy Technology Conference*, Houston, TX, June 17-19, 1986.
- [4] Tomasz Golec, Beata Glot, Grzegorz Nehring, Marcin Razum, Bartosz Świątkowski, BIOSIŁOWNIA PYŁOWA, Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłowni: Międzynarodowa XIII Konferencja Kofłowa ICBT. Poland 2018: Szczryk, CKiR Orle Gniazdo, 23-26 października 2018, Prace Naukowe, Monografie, Konferencje – Politechnika Śląska. Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, ISSN 1506-9702.
- [5] Tomasz Golec, Krzysztof Remiszewski, Bartosz Świątkowski, Marcin Błesznowski – PALNIKI PYŁOWE NA BIOMASĘ –*Energetyka* nr 5, 2007, str. 375-382.
- [6] Tomasz Golec, Bartosz Świątkowski, PALNIKI PYŁOWE DO SPALANIA BIOMASY, rozdział w monografii – „Nowe technologie spalania i oczyszczania spalin”, redakcja W. Nowak, M. Pranobis, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [7] Załącznik do obwieszczenia Ministra Środowiska z dnia 12 sierpnia 2019r. (poz. 1806) – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 marca 2018r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów

