

PALNIKI WIROWE NA BIOMASĘ STOSOWANE W KOTŁACH ENERGETYCZNYCH

APPLICATION OF BIOMASS SWIRL BURNERS IN HIGH-POWER BOILERS

Maciej Cholewiński

Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Technologii Energetycznych, Turbin
i Modelowania Procesów Ciepłno-Przepływowych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

Wojciech Pospolita

Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Zakład Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: wojciech.pospolita@pwr.edu.pl

Abstract: Solid biomass (both forest and agricultural) is recognized as a valuable source of chemical energy, that can be transformed into electricity or heat. Biofuels are very popular in small scale energy systems, but they can also be utilized in medium and high capacity municipal and industrial power units. Therefore, dynamic development of various machines and devices, designed for efficient biomass energy conversion, is observed. One of the possible application of solid biofuels in power industry, dedicated in particular to water-tube boilers, uses individual swirl burners fed by the biomass dust. They can be used as peak load or quick stop/start devices in stoker furnaces and primary burner in flue and smoke-tube boilers as well. In this article the implementation of swirl biomass burners in high capacity power boilers was presented and described. Both technical problems, closely related with biomass co-firing in coal-fired power plants, and design methodology of mentioned burners were discussed. Finally, the 3D visualization of proprietary solution of swirl burner and its description were provided.

Keywords: biomass, swirl burners, power boilers, solid fuel combustion.

Wprowadzenie

Spalanie biomasy stałej w energetyce zawodowej stanowi ważny element obecnie realizowanej polityki proekologicznej Unii Europejskiej. Dzieje się tak ze względu na szereg zidentyfikowanych, możliwych do uzyskania dzięki jej implementacji korzyści środowiskowych oraz gospodarczych. Idea spalania, jak i współspalania wspomnianej grupy paliw z węglami kamiennymi i brunatnymi w kotłach energetycznych dużej mocy opiera się na pozytywnym wpływie biopaliw na zmniejszenie emisji takich związków jak CO₂, SO₂ oraz NO_x z instalacji kotłowych. Odpowiednio wdrożona i zoptymalizowana kosztowo, pozwala również na wykorzystanie lokalnego potencjału energetycznego różnych źródeł materiałów organicznych, przyczyniając się do dynamicznego rozwoju sektora leśnego oraz

rolniczego. Co istotne, biomasa może stanowić źródło energii cieplnej tak w nowych, jak i już istniejących blokach węglowych [1].

Wzrost zainteresowania biopaliwami stałymi przyczynił się w ostatnich latach do intensywnych poszukiwań technologii i urządzeń energetycznych umożliwiających efektywną i ekonomiczną konwersję zakumulowanej w ich obrębie energii chemicznej na inne formy użytkowe – ciepło, elektryczność, chłód. W przypadku procesów spalania realizowanych w skali przemysłowej, zasadniczą kwestią poruszaną przez ekspertów stała się potrzeba zagwarantowania odpowiednich warunków ruchowych oraz wysokiej dyspozycyjności instalacji kotłowych zasilanych waloryzowaną biomasą. Bogate doświadczenia ze spalania węgla energetycznych oraz olejów ciężkich sprawiły, iż w pierwszej kolejności weryfikowano przydatność poszczególnych palników

oraz palenisk węglowych i olejowych do spalania za ich pośrednictwem nowych mieszanek paliwowych (przede wszystkim węgla i biomasy) [2]. Zidentyfikowano szereg sposobów oraz konfiguracji zasilania palenisk stałym materiałem palnym. Ich ewentualne zastosowanie w zadanym przypadku (m.in. ze względu na spodziewaną moc cieplną, posiadaną infrastrukturę techniczną, dostępność paliwa w skali roku) zależy głównie od wymaganej intensywności procesu (reżimu) spalania, właściwości stosowanego paliwa oraz, co najważniejsze, strony ekonomicznej realizowanego przedsięwzięcia energetycznego, rzutującej na koszty generacji danej formy użytkowej energii. W przypadku spalania lub też współspalania biomasy stałej wraz z węglem w istniejących kotłach energetycznych przede wszystkim skłania się do wyboru jednego z trzech zasadniczych typów palenisk: rusztowego, pyłowego lub fluidalnego [3]. Wykazały to doświadczenia z polskich elektrowni i elektrociepłowni, wykorzystujących zarówno biomasę leśną (drewno – m.in. w elektrowniach Dolna Odra, Połaniec, Stalowa Wola), jak i agro (elektrownie: Siersza, Konin, elektrociepłownia we Wrocławiu). Relatywnie najprostszą z technologii spalania biopaliw stałych w kotłach energetycznych jest wykorzystywanie palenisk rusztowych (np. z rusztem płaskim, pochyłym, posuwisto-zwrotnym, wibracyjnym). Biomasa jest w nich grawitacyjnie podawana na ruszt (razem z węglem lub oddzielnie) za pośrednictwem zasuwy regulacyjnej. Proces spalania opiera się na samoczynnym zapłonie masy paliwa przemieszczającego się na ruszcie w głąb rozgrzanej komory paleniskowej – bez wykorzystania dedykowanych palników czy też turbulizatorów płomienia. W ten sposób możliwe jest spalanie biomas o dużej zawartości wilgoci i popiołu oraz relatywnie dużych rozmiarach ziaren. Kotły rusztowe, ze względu na swoją konstrukcję, mają jednak ograniczoną wydajność i są stosowane głównie w lokalnym ciepłownictwie lub w energetyce przemysłowej (np. kotły typu OR-35). Drugim typem paleniska, w obrębie którego możliwa jest realizacja spalania i współspalania biomasy, jest układ fluidalny (pęcherzykowy lub cyrkulacyjny). Wykorzystując efekt fluidyzacji materiałów sypkich technologie te pozwalają na utylizację biomasy o relatywnie dużych ziarnach, także niskokalorycznej i mocno zawilgoconej. Biomasa w ich przypadku podawana jest w obręb złoża za pomocą odpowiednich podajników, natomiast proces spalania realizowany jest przez nagrzewanie nowej porcji paliwa przez intensywnie fluidyzowane złożo sypkie o temperaturze 600-900°C i dużej bezwładności termicznej. Co jednak istotne, sprawność spalania biomasy we dwóch wspomnianych rodzajach palenisk (rusztowym i fluidalnym) może być niezadawalająca. Skuteczność spalania wilgotnych trocin oraz słabo rozdrobnionej biomasy w przypadku kotłów rusztowych wynosić może jedynie 50-55%, natomiast we fluidalnych – 65-75% [3]. Wskaźnik ten koreluje z kosztami paliwa, wskaźnikami emisji oraz możliwościami utylizacji generowanych popiołów.

Problem niedostatecznego wypalenia paliwa biomasowego mogą rozwiązać paleniska pyłowe – trzeci zasadniczy typ palenisk do spalania paliw stałych. Jako że wysuszenie paliwa poniżej poziomu 20% wilgoci oraz dostateczne rozdrobnienie ziaren biomasy prowadzi do wzrostu sprawności spalania biopaliwa powyżej 80%, implementacja kotłów zasilanych paliwem w postaci pyłu korzystnie wpływa na stopień utylizacji podawanego materiału. Poza wspomnianą zaletą technologii pyłowych, systematyczny rozwój idei spalania paliw stałych, także biomasy, to również efekt [3]:

- sukcesywnie wdrażanych modyfikacji bloków węglowych skierowanych na podwyższanie sprawności cieplnej istniejących kotłów pyłowych m.in. poprzez wejście w stany nadkrytyczne czynników obiegowych,
- zwiększania wymagań sieciowych co do elastyczności ruchowej bloków węglowych (m.in. z racji tworzenia układów energetycznych opartych na siłowniach wiatrowych oraz słonecznych),
- realizacji polityki proekologicznej, nastawionej na redukcję emisji zanieczyszczeń stałych i gazowych w dużych elektrowniach zawodowych, wzrost efektywności energetycznej oraz ograniczanie składowania odpadów paleniskowych,
- długoletniej praktyki stosowania palenisk pyłowych w energetyce węglowej.

Uzyskanie wspomnianych korzyści w postaci ograniczenia strat niedopału czy też wyższej elastyczności pracy kotła wymaga jednak poniesienia dodatkowych kosztów związanych ze zużyciem energii na niezbędne w tym celu procesy waloryzacji paliwa (obejmujących suszenie oraz mielenie). Częściowo kompensuje się je dzięki zwiększonemu wykorzystaniu przestrzeni paleniska oraz lepszemu dopalaniu paliwa. Co jednak ważne, proces spalania oraz przemiału w przypadku kotłów pyłowych uzależniony jest od sposobu i wymagań dotyczących podawania mieszaniny paliwowo-powietrznej do komory paleniskowej, a więc także od samej konstrukcji oraz konfiguracji palników (determinujących zapłon oraz dynamikę spalania podawanego paliwa). Wymaga się także odpowiedniej organizacji pracy układów młynowych – tak, aby podawane do nich paliwo, także to o odmiennej strukturze wewnętrznej oraz właściwościach fizyko-chemicznych w przypadku współspalania, było utylizowane przy możliwie niskiej stracie niedopału, w stabilnym płomieniu pyłowym oraz bez generowania zagrożeń pożarowo-wybuchowych (począwszy od fazy składowania).

W przypadku dodawania biomasy do węgla, zagadnienie spalania pyłowego było do tej pory realizowane poprzez jej mieszanie z paliwem węglowym (przed lub za instalacjami młynowymi) oraz wprowadzanie tak powstałej mieszanki przez istniejące palniki węglowe. Stosunkowo nową koncepcją dotyczącą efektywnego wykorzystania biomasy w kotłach dużej mocy stała się w ostatnich latach idea implementacji w obrębie komór paleniskowych różnych zestawów palników nastawionych na spalanie jednego rodzaju paliwa. Wśród nich szczególną uwagę zwrócono na palniki wirowe [2, 9]. Dotychczasowe analizy numeryczne i doświadczenia

eksploatacyjne z bloków energetycznych wyposażonych w tego typu urządzenia pozwalają na wysunięcie tezy, iż w najbliższej przyszłości mogą one stanowić o wzmocnieniu pozycji biomasy jako ekonomicznie i technicznie uzasadnionego paliwa stałego dedykowanego energetyce zawodowej wysokich mocy wytwórczych.

Spalanie i współspalanie biomasy w dużych jednostkach energetycznych

W przypadku zawodowych siłowni ciepłych dużych mocy, energetyczne wykorzystanie biomasy zbiega się głównie do procesu jej współspalania (bezpośredniego lub pośredniego) z węglem lub innymi paliwami kopalnymi. Fakt małej liczby dużych bloków energetycznych opalanych w 100% biomasą wiąże się z jej ograniczoną podażą w ujęciu lokalnym i krajowym. Ze względu na bariery ekonomiczne i środowiskowe (transport paliw o niskiej gęstości nasypowej na dalekie odległości), dostępny na cele energetyczne strumień biomasy predysponuje jedynie do traktowania jej jako paliwa dodatkowego w jednostkach powyżej 100-200 MW_{el}. Wyjątkiem jest tzw. Zielony Blok w Elektrowni Połaniec o mocy elektrycznej 205 MW, wyposażony w kocioł

fluidalny, opalany w 100% biomasą leśną i agro (ok. 1,5 mln ton rocznie). Co jednak ważne, moc ta, w porównaniu do nowopowstających bloków o mocy 900-1100 MW_{el} (Kozienice, Jaworzno, Opole), jest wciąż relatywnie niska. Z tego względu, w celu zadośćuczynieniu normom środowiskowym, konkretny energetyczny decydują się w pierwszej kolejności na realizację współspalania, szczególnie iż jest ono możliwe do wdrożenia po niewymagających modernizacjach istniejących kotłów opalanych węglem energetycznym.

Pierwszym krokiem w przypadku projektowania dowolnego elementu kotłowego jest poznanie właściwości fizykochemicznych oraz użytkowych paliwa, które ma być spalane w obrębie analizowanej instalacji. Jeżeli byłyby one zbliżone do węgla energetycznych, możliwe stałoby się wykorzystanie istniejących już koncepcji stosowanych w obrębie kotłów opalanych właśnie stałymi paliwami kopalnymi. Do oceny ewentualnych skutków technicznego kojarzenia ze sobą (lub też zamiany) węgla energetycznych i przykładowej biomasy stałej, porównano wyniki analiz: technicznej i pierwiastkowej obejmujących oba wspomniane nośniki energii (tab. 1).

Tab. 1. Analiza techniczna i elementarna różnych paliw stałych (stan analityczny) [4, 5, 6].

paliwo	wilgoć	popiół	części lotne	ciepło spalania	C	H ₂	N ₂	S	O ₂
	%			MJ·kg ⁻¹	%				
węgiel kamienny	3,1	8,6	32,7	24,7	75,5	4,3	1,2	1,2	5,9
węgiel brunatny	4,4	16,1	44,4	18,9	55,2	4,5	0,6	1,8	17,4
drewno sosnowe	8,5	1,4	63,0	15,8	49,3	5,3	0,4	0,03	35,1
pellet słomiany	2,9	5,8	74,8	16,8	49,4	5,6	0,6	0,1	35,7

Porównując uzyskane wartości z przytoczonych prób fizykochemicznych, na pierwszy plan wysuwa się znaczna dysproporcja zawartości części lotnych oraz popiołu w przypadku biomasy stałej oraz węgla energetycznych. Co także zauważalne, biomasa zawiera w swojej strukturze mniej węgla, azotu oraz siarki, natomiast więcej wodoru i tlenu. Literatura specjalistyczna wskazuje ponadto na istotne różnice obu nośników energii w przypadku kinetyki odgazowania czy też składu części palnych. Paliwa o wyższej reaktywności oraz większej zawartości części lotnych (np. biomasa) charakteryzują się niższym stopniem niedopału w generowanym popiele [5], co w przypadku współspalania biopaliw z węglem może zaburzyć pracę układów odpyłania oraz zredukować intensywność wymiany ciepła w obrębie kotła, a tym samym wymagać

reorganizacji pracy kotła pod kątem nowych warunków ciepłno-przepływowych rzutujących m.in. na pracę instalacji ochrony atmosfery (odsierczanie, odazotowanie, odpylanie, wychwytywanie związków rtęci). Dodatek biomasy do węgla w dużej ilości znacząco zmienia skład tlenkowy generowanych popiołów, intensyfikując zjawisko żużlowania i popielenia i przyczyniając się do spadku dyspozycyjności bloku [7].

Przytoczone fakty skłaniają do tezy, iż bezpośrednie wykorzystanie rozwiązań technicznych zaprojektowanych do spalania pyłu węgla energetycznych staje się w przypadku biomasy - w większości przypadków - niemożliwe lub nieuzasadnione ekonomicznie. Co więcej, przytoczone dane oraz literatura [3], w przypadku własności fizykochemicznych różnych rodzajów biomas (leśnej, agro, pochodzącej z różnych

upraw), wskazują co prawda na możliwość wystąpienia szeregu podobieństw (mała zawartość popiołu i duża części lotnych, zbliżona kaloryczność), jednak wykazują także na występowanie istotnych różnic (zróżnicowana morfologia, wilgotność, możliwe do uzyskania stopnie rozdrobnienia). Powoduje to, iż również w obrębie samej biomasy stałej rozwiązania konstrukcyjne m.in. palników będą silnie uzależnione od jakości podawanego pyłu. Z tego względu każde przedsięwzięcie polegające na implementacji palnika pyłowego zasilanego biomasą powinno być traktowane indywidualnie.

Poza zamieszczonymi w tab. 1 parametrami, węgle oraz biomasa stała cechują się odmiennym charakterem struktury wewnętrznej, bezpośrednio rzutującym na własności przemiałowe w różnych systemach mielących. W przypadku polskich węgla energetycznych stosuje się głównie średniobieżne młyny kulowo-misowe i rolkowo-misowe (węgle kamienne) oraz szybkobieżne młyny wentylatorowe (węgle brunatne). W momencie dodatku biomasy do mieliwa węglowego, wzrasta energochłonność procesu przemiału oraz powstaje ryzyko wybuchu – odgazowanie biopaliw ma miejsce przy niższych temperaturach aniżeli ma to miejsce w przypadku węgla. Potencjalnym skutkiem tego typu zabiegów przeciwdziała się poprzez ograniczanie udziału biomasy w łącznym strumieniu mieliwa trafiającym do kotła (uznaje się, iż dodatek biomasy do węgla energetycznego w ilości nieprzekraczającej 5% udziału energii chemicznej wprowadzanej do paleniska nie niesie ze sobą nadmiernych zmian w przypadku warunków cieplno-przepływowych po stronie czynnika obiegowego oraz spalin), jednakże nawet nieznaczny dodatek paliwa o odmiennych właściwościach mechanicznych w stosunku do materiału gwarancyjnego jeszcze przed wprowadzeniem mieszanki do młyna wpływa niekorzystnie na pracę tego typu urządzeń. Oddzielny przemiał oraz wspólne spalanie mieszanki biomasy i węgla w istniejących palnikach może przyczynić się z kolei do pogorszenia stabilności płomienia oraz wymagać dodatkowych nakładów inwestycyjnych na modyfikacje wszystkich istniejących palników w obrębie komory paleniskowej.

Ze względu na problemy eksploatacyjne towarzyszące współmieleniu i współspalaniu mieszanin wielopaliwowych w palnikach węglowych rozpoczęto prace zmierzające do opracowania nowych, mniej problematycznych w ujęciu technik spalania pyłu, rozwiązań konstrukcyjnych. Stosunkowo nowym rozwiązaniem współspalania biomasy z węglem w jednym kotle pyłowym jest nadbudowa istniejących układów palnikowych o palniki zaprojektowane do spalania 100% biomasy. Ich zasilanie przez oddzielne młyny (np. bijakowe) gwarantuje lepsze efekty przemiału aniżeli wspólne rozdrabnianie z węglem w instalacjach średniobieżnych. O ile wspólny przemiał rozwiązanie nie wymaga co prawda nadmiernych nakładów inwestycyjnych, jednakże cechuje się szeregiem wspomnianych wad (m.in. niedostateczny przemiał i generowanie wysokiego niedopału w popiele lotnym, zagrożenie wybuchowe ze względu na odmienną charakterystykę zapłonu obu paliw, zaleganie żywicy z

biomasy w młynach). Wzrost kosztów inwestycyjnych (rozdział układów magazynowych, transportowych, młynowych oraz palnikowych dla węgla i biomasy) winien być jednak rekompensowany przez obniżenie nakładów finansowych w związku z okresami postojuymi bloku i remontami kotłów.

Palniki wirowe na biomasę

Palniki pyłowe dzieli się na strumieniowe oraz wirowe. Obie grupy, po uprzednich modyfikacjach, pozwalają na spalanie i współspalanie z węglem biomasy stałej. Prawdłowa praca palników strumieniowych, o relatywnie prostszej konstrukcji aniżeli wirowe, wymaga odpowiedniego ich rozmieszczenia w obrębie komory (mającym na celu generowanie stref recyrkulacji dopiero w komorze paleniskowej), a każda zmiana parametrów eksploatacyjnych (przede wszystkim paliwa) może nieść ze sobą wyraźne pogorszenie pracy kotła. Cechą konstrukcji wirowych jest z kolei generowanie silnej strefy recyrkulacji wewnętrznej (przez gorące spaliny), a tym samym stabilizacja zapłonu podawanego pyłu, już w obrębie samego palnika. Jednostki wirowe są urządzeniami samopodtrzymującymi [2], których charakter pracy, w przeciwieństwie do narożnych (tangencjalnych) palników strumieniowych, nie wymaga kosztocłonych zmian aerodynamiki komory oraz reorganizacji procesu spalania w momencie zamiany jakości paliwa. O ile rozwiązania narożne uznaje się za dominujące w dużych kotłach energetycznych, o tyle konstrukcje wirowe można stosować także w układach średnich mocy.

W przypadku dostępnych na rynku palników wirowych, spotyka się zarówno urządzenia projektowane pod kątem współspalania biopaliw stałych z węglem (w postaci mieszaniny lub też za pośrednictwem oddzielnych dysz), jak i rozwiązania monopaliwowe, dedykowane w 100% biomasie lub węglem energetycznym [12]. Wprowadzanie w obręb kotła specjalnych palników pyłowych na biomasę dotyczy więc może zarówno jednostek węglowych (współspalanie), jak i biomasowych (np. kotły parowe opalane w 100% biomasą). Mogą one również stanowić palniki dodatkowe (szczytowe) i być stosowane w kotłach pyłowych, olejowych i gazowych (np. włączane w momencie potrzeby doraźnego zwiększenia mocy bloku) bądź też znaleźć zastosowanie w paleniskach rusztowych (zwiększających elastyczność bloku oraz dynamikę jednostek z rusztem) [2]. Przykład współspalania biomasy z węglem w kotle pyłowym, z wykorzystaniem palników RI-JET oraz RI-BIO (konstrukcje wirowe), przedstawił autor [9]. Z kolei w pracy [10] zaprezentowano wyniki analiz wykorzystania podobnych palników wirowych na biomasę ze strumieniowymi palnikami węglowymi w kotle BP-1150, w których uwzględniono także różne rodzaje biomasy.

Przed przystąpieniem do projektowania oraz stopniowego wdrażania koncepcji biomasowego palnika wirowego w obrębie kotła energetycznego niezbędne jest określenie szeregu zmiennych dotyczących zarówno

paliwa, jak i jego wpływu na proces spalania. Do ważniejszych z nich zalicza się [9]:

- właściwości fizykochemiczne biomasy (matryca pierwiastkowa, skład tlenkowy generowanych popiołów, kaloryczność, dynamika spalania),
- udział biomasy w łącznym strumieniu paliwa (ze względu na wpływ na proces spalania oraz stronę ekonomiczną przedsięwzięcia, związaną z lokalnym potencjałem biomasy w skali roku),
- intensywność procesów zużłowania i popielenia po dodaniu biomasy do spalanej mieszanki paliwowej,
- zmiany w pracy wentylatorów ciągu i podmuchu po reorganizacji układu palników,
- możliwości techniczne współmielenia biomasy w młynach węglowych.

O ile kształt palników wirowych zasilanych biomasą zasadniczo nie różni się od rozwiązań na pył węglowy, o tyle sama geometria poszczególnych profili przepływowych czy też elementów zawirowujących może wyraźnie odbiegać od wartości opisujących konstrukcje projektowanych na potrzeby stałych paliw kopalnych. Ze względu na różnice fizykochemiczne, każdy nowy palnik wirowy zasilany biomasą podlegać powinien oddzielnym analizom oraz badaniom.

Zasady projektowania palników wirowych na biomasę

Projektanci przystępujący do opracowywania koncepcji oraz budowy palników wirowych na biomasę, chcąc wykorzystać doświadczenia z prac nad urządzeniami dedykowanymi węglom energetycznym muszą w pierwszej kolejności uwzględnić szereg różnic we właściwościach fizykochemicznych obu paliw (zawartość wilgoci, parametry mechaniczne, matryca pierwiastkowa – tab. 1) oraz opracować taką konstrukcję, która umożliwi powstawanie stabilnego płomienia – np. poprzez odpowiednie ukształtowanie geometrii kanałów przepływowych za pośrednictwem łopatek zawirowujących – oraz możliwie niską emisję zanieczyszczeń (głównie tlenków azotu) – na drodze stopniowania powietrza oraz paliwa w obrębie palnika. Wiąże się to z potrzebą podejmowania prac laboratoryjnych na palnikach pilotażowych, poprzedzonych wielowariantowym modelowaniem matematycznym (np. w komercyjnych programach numerycznych) obejmującym analizy ważniejszych zjawisk fizykochemicznych i cieplno-przepływowych spodziewanych w obrębie spalane w płomieniu pyłowym paliwa. Podczas projektowania palników należy każdorazowo uwzględnić i przeciwdziałać m.in. ryzyku przesunięcia się strefy spalania w górę komory paleniskowej – poza strefy wysokich temperatur (skutkującym zwiększeniem emisji NO_x oraz intensyfikacją zjawisk zużłowania i popielenia, erozji oraz korozji) [5]. Co istotne, każda instalacja kotłowa (w zależności od mocy, przeznaczenia, parametrów pracy układu młynowego) oraz spalane w niej paliwo (jego jakość) w postaci pyłu wymagają indywidualnego doboru stopnia zawirowania mieszanki

pyłowo-powietrznej oraz strumieni powietrza wtórnego i trzeciego (o ile takowe występuje) w konstrukcji palnika. Projektowanie palników wirowych na biomasę podzielić można na kilka zasadniczych etapów. Przykładowy algorytm prac został zaproponowanych m.in. przez warszawski Instytut Energetyki i przedstawiony przez autorów [6]. Ważniejsze jego etapy to w kolejności:

- analiza fizyczna i pierwiastkowa paliwa gwarancyjnego
- określenie matrycy pierwiastkowej biomasy, zawartości popiołu, części lotnych, wilgoci, określenie kinetyki odgazowania, zapłonu oraz spalania koksiku, przyjęcie modelu dotyczącego przebiegu poszczególnych zjawisk fizykochemicznych zachodzących podczas spalania pyłu biopaliwa,
- określenie parametrów eksploatacyjnych modernizowanego/budowanego kotła w obrębie układu młynowego, paleniska (stabilność płomienia, skład spalin, zagadnienia kinetyki procesów chemicznych) oraz zagadnień cieplno-przepływowych realizowanych w kanałach spalinowych instalacji zawierającej palnik (prędkości przepływu),
- opracowanie koncepcji palnika (kształt, wymiary, rozwiązania konstrukcyjne) w celu realizacji przyjętego modelu oraz przy uwzględnieniu parametrów pracy układów młynowych i paleniskowych w zadanym kotle,
- symulacja numeryczna pracy palnika oraz zawierającej go komory paleniskowej z wykorzystaniem komputerowych kodów numerycznych (np. ANSYS FLUENT, COMSOL), weryfikacja wstępnej koncepcji palnika, skalowanie do zadanego poziomu mocy cieplnej, budowa palnika dla potrzeb laboratoryjnych
- badania działania stworzonego modelu palnika na stanowisku laboratoryjnym,
- opracowanie konstrukcji pośredniej, badania na obiekcie przemysłowym, weryfikacja wyników z danymi otrzymanymi podczas modelowania oraz działań laboratoryjnych,
- ostateczna optymalizacja konstrukcji i wdrożenie przemysłowe wraz z rozruchem na potrzeby pracy zawodowej bloku.

Projekt palnika wirowego opiera się m.in. na doborze odpowiedniej geometrii palnika oraz związanej z nią aerodynamiką procesu spalania. Co istotne, wybór takich parametrów jak przekroje poszczególnych dysz (powietrza rdzeniowego, mieszanki pyłowo-powietrznej, tzw. powietrza drugiego i trzeciego), kąty pochylenia łopatek zawirowujących czy też sama wydajność cieplna palnika, przed zasadniczym etapem konstruowania stanowią obiekt wielowariantowych analiz numerycznych z wykorzystaniem modeli matematycznych i obliczeń komputerowych. Analizuje się m.in. kształt i długość płomienia, jego stabilność, stopień wypalenia paliwa oraz rozkład temperatur w pobliżu wylotu palnika (rys. 1). Niejednokrotnie palniki projektuje się na pewien zakres zmienności np. właściwości paliwa czy też jego rozdrobnienia. Przykładowe badania [6] wykazały, iż wysoki stopień zawilgocenia biomasy wyraźnie ogranicza możliwość uzyskania stabilnego płomienia przy zadanej konstrukcji palnika. W takim przypadku niezbędne staje się np. wstępne suszenie biomasy (np.

w rurosuszarkach - na wzór kotłów na węgle brunatne), jej dodatkowe rozdrobnienie lub też zmiana stopnia zawirowania powietrza w palniku. Co istotne, stosowanie biopaliw stałych w palnikach wirowych stanowi wyzwanie także ze strony układów młynowych oraz pozostałych odpowiedzialnych za wstępne przygotowanie paliwa (wałoryzację).

W trakcie postępujących prac laboratoryjnych analizowana jest konstrukcja wstępnie zweryfikowana za pomocą obliczeń numerycznych. Dzięki zestawom analizatorów składu spalin, systemów archiwizacji danych, układów kontroli stabilności spalania i pulsacji płomienia możliwa staje się ocena przyjętego rozwiązania pod kątem prowadzenia procesu spalania w

warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Rejestracji podlegają m.in. strumienie objętości poszczególnych strumieni powietrza, ich prędkości oraz temperatury w różnych miejscach. Dobre stanowisko badawcze umożliwia także określanie wpływu jakości i rodzaju paliwa oraz mieszanin i dodatków funkcyjnych (np. poprawiających właściwości generowanych popiołów ze względu na procesy żużlowania i popielenia [7]) na pracę przyjętej konstrukcji palnika. Tak wykonana weryfikacja wyników obliczeń komputerowych stanowi podstawę do zatwierdzenia lub też weryfikacji założeń konstrukcyjnych (np. zasadności zawirowywania strumieni powietrza) oraz rozpoczęcia prac w skali półtechnicznej.



Rys. 1. Model laboratoryjny palnika wirowego na biomasę (po lewej) oraz wyniki analiz numerycznych rozkładu temperatur w okolicy płomienia dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych (a – wariant bez zawirowania; b i c – kąt zawirowania powietrza pierwotnego, kolejno, 40° i 25°; d, e, f – stosowanie stabilizatorów mechanicznych na powietrzu pierwotnym) [2].

Do poznania procesów spalania paliwa w obrębie zarówno pojedynczego palnika, jak i całego paleniska (układu palników), niezbędne staje się badanie rzeczywistych (na etapie rozruchu urządzenia na obiekcie przemysłowym) rozkładów prędkości, temperatur, koncentracji składników gazowych (spalin) i pyłu spalanego paliwa, kształtu i długości płomienia itd. Istotne jest określenie wpływu wahań właściwości biomasy (m.in. udziału części lotnych, wilgotności, matrycy pierwiastkowej) oraz obciążenia cieplnego palnika pod kątem poprawności realizacji zagadnienia ekologicznego, bezpiecznego, stabilnego spalania biomasy. Ważną kwestią jest również odpowiednie umiejscowienie palników w obrębie komory (wskazuje się przykładowo, iż poprawy stopnia sturbulizowania płomienia spodziewać się można w momencie usytuowania palników wirowych naprzeciwko siebie, np. na ścianie przedniej i tylnej kotła [8]).

W ramach niniejszej pracy autorzy podjęli próbę stworzenia koncepcji palnika wirowego na biomasę. Wizualizację 3D rozwiązania przedstawiono na rys. 2, z kolei na rys. 3 zawarto stosowny opis poszczególnych jego elementów oraz strumieni powietrza oraz paliwa.

Podział powietrza na różne strumienie ma za zadanie zagwarantować stabilny zapłon pyłu węglowego przy minimalnej emisji tlenków oraz gwarantować odpowiednią turbulizację płomienia w celu wysokiego stopnia dopalenia rozdrobnionego biopaliwa. Realizacja

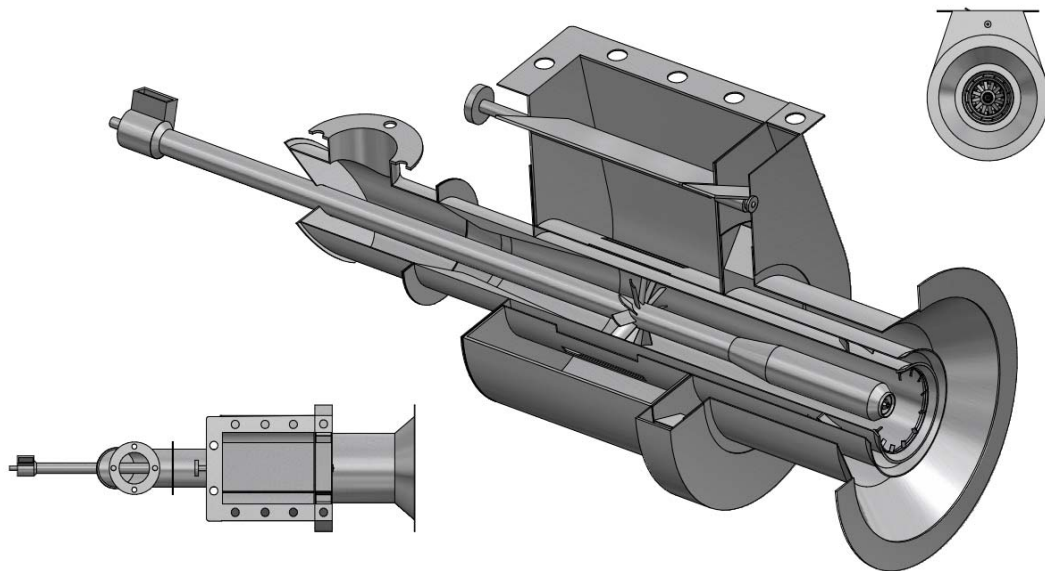
technik spalania niskoemisyjnego odbywa się w tym przypadku na drodze stopniowanie powietrza (celem obniżenia temperatury i ograniczenia współczynnika nadmiaru powietrza) oraz paliwa (m.in. poprzez zawirowywanie mieszaniny pyłowo-powietrznej na koncentratorze i wzbogacanie o paliwo zewnętrznych krawędzi przekroju przepływowego).

W osi palnika, poza rozpałkowa lancą tłoczącą mazut lub gaz ziemny, znajduje się kanał tzw. powietrza centralnego (rdzeniowego). Służy ono do realizacji procesu spalania paliwa rozruchowego (mazutu, paliwa gazowego). Powietrze pierwotne z kolei stanowi zasadniczym czynnikiem transportującym pył - przez palnik do komory spalania – jest jednak strumień powietrza pierwotnego. Ze względu na własności zapłonu biomasy, jego ilość musi uniemożliwiać zajście samoczynnego zapłonu paliwa w otoczeniu gorącego utleniacza. Co jednak ważne, dopiero poprzez kontakt z powietrzem wtórnym osiąga się warunki do zajścia procesu spalania pyłu.

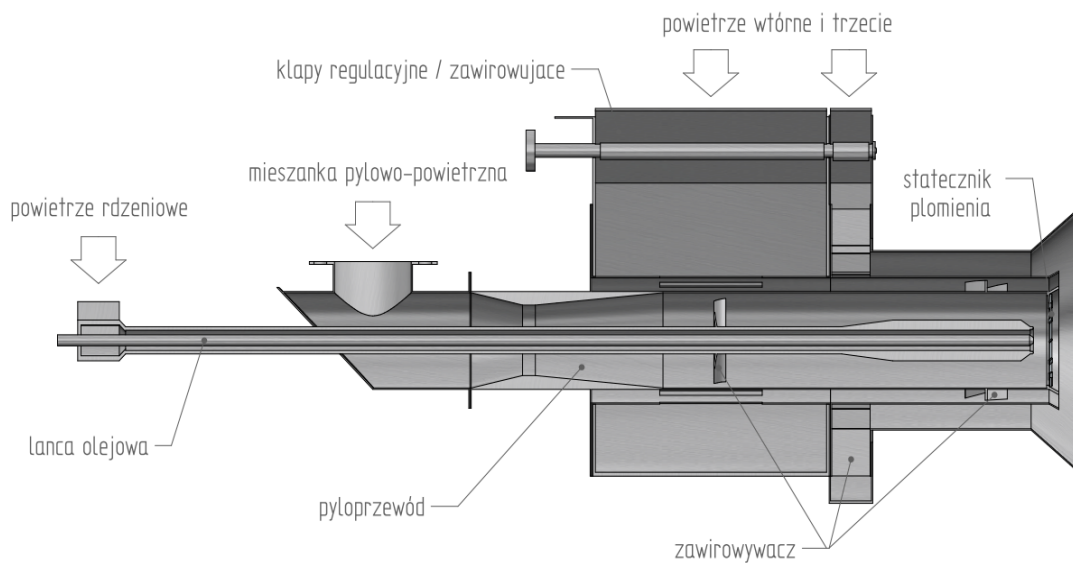
Intensywna turbulizacja strug poszczególnych strumieni powietrza (dzięki wykorzystaniu zawirowywaczy) umożliwia powstawanie struktur wirowych oraz stref recyrkulacji spalin i powietrza, przyczyniających się do stabilizacji płomienia oraz ograniczania zjawiska powstawania tlenków azotu. Wzajemny wpływ poszczególnych strumieni powietrza stanowi zasadniczy element gwarantujący poprawną pracę palnika, stąd też

jest obiektem szeregu badań i optymalizacji konstrukcji na etapie projektowania nowego palnika. Rolę zawirowywacza, poza specjalnym układem łopatek, stanowić może sama geometria dopływu czynnika do palnika (np. stycznie do osi palnika, poprzez przepływ przez dyszę czy też za pośrednictwem miejscowych oporów przepływu, np. kłap i kolanek) lub też przewężenia kanałów. Rozwiązania te wpływają ponadto na tworzenie stref spalania bogatych i ubogich, dzięki

czemu możliwa staje się realizacja niskoemisyjnych technik spalania bazujących na kontrolowanym tworzeniu stref redukcyjnych i utleniających. Rozdział powietrza wtórnego na tzw. drugie i trzecie, poza samą aerodynamiką procesu spalania, ma na celu zwiększenie elastyczności pracy palnika (np. poprzez zadany stosunek prędkości obu strumieni) przy różnych obciążeniach cieplnych kotła.



Rys. 2. Projekt koncepcyjny palnika wirowego na biomasę na bazie istniejących rozwiązań dedykowanych do spalania pyłu węglowego.



Rys. 3. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjne w koncepcji palnika wirowego na biomasę – średnice poszczególnych kanałów przepływowych oraz geometria zawirowywacza winny uwzględnić charakterystykę danego paliwa pod kątem stabilności procesu spalania.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono zagadnienie spalania biomasy stałej w postaci pyłu w palnikach wirowych dużej mocy. Zaakcentowano wady i zalety współspalania biomasy stałej z węglem oraz wskazano na problemy techniczne i ruchowe związane z zagadnieniem spalania i mielenia mieszanki obu paliw w młynach i palnikach węglowych. Zaproponowano jeden z kierunków rozwoju techniki kojarzenia bloków opalanych paliwami kopalnymi z infrastrukturą biomasową. Wskazano także na złożoność procesu projektowania i wdrażania rozwiązań palników pyłowych, wykazując narzędzia niezbędne do wykorzystania w celu budowy wysokosprawnego urządzenia kotłowego jakim bez wątpienia jest wspomniana grupa urządzeń.

W najbliższej przyszłości można spodziewać się intensyfikacji prób współspalania biomasy w kotłach pyłowych dużej mocy. Paleniska te uznawane są bowiem za przyszłościowe ze względu na korzystną dynamikę pracy, wysoką sprawność procesu spalania oraz elastyczne obciążenia. O ile współspalanie w nich biomasy z węglem z wykorzystaniem istniejących młynów oraz palników wymaga mniejszych nakładów inwestycyjnych, o tyle implementacja oddzielnych instalacji biomasowych (składowisk, młynów, pyłoprzewodów, palników) pozwala na zwiększanie udziału biomasy w łącznym strumieniu paliwa podawanego do kotła oraz przyczynia się do poprawy parametrów technicznych i, przy dłuższej eksploatacji bloku, także ekonomicznych pracy bloku. Do realizacji tego zagadnienia w skali przemysłowej wykorzystane zostać

mogą właśnie konstrukcje palników wirowych opalanych w 100% biomasą.

Interesującym rozwiązaniem zagadnienia współspalania biomasy z węglem są niskoemisyjne palniki biomasowo-węglowe bazujące na wprowadzaniu do komory paleniskowej kotła wspomnianych paliw za pomocą oddzielnych dysz ulokowanych w obrębie jednego palnika. Konstrukcja taka wyposażona jest w dwa współosiowe kanały podawcze (transportujące mieszaniny pyłowo-powietrzne: biomasy i węgla), wspólne kanały powietrza wtórnego i trzeciego oraz rozdzielacze. Oddzielnie mielone paliwa mieszają się ze sobą dopiero w strefie spalania tuż za palnikiem. Odpowiedni projekt tego typu urządzenia pozwala na doraźne ograniczanie zużycia węgla w stanach normalnej eksploatacji bloku [12].

Opisane w pracy palniki wirowe mogą stanowić element zarówno kotłów dużej mocy stosowanych w elektrowniach i elektrociepłowniach (zawodowych i przemysłowych), jak i mniejszych blokach ciepłowniczych wyposażonych w kotły rusztowe. Cechują się one wysokim stopniem automatyzacji, zwiększając komfort pracy operatorów bloku. Mogą także towarzyszyć spalaniu biopaliw płynnych i gazowych [11]. Dzięki temu powstające konstrukcje wirowe winny napotkać w najbliższej przyszłości na szersze grono odbiorców, a tym samym posiadać znaczący potencjał do zwiększania popytu na biomasę stałą ze strony sektora energetycznego oraz przyczynić się do systematycznego rozwoju technologii pyłowej w energetyce zawodowej.

Literatura

1. Błasiak, W., Techniczne możliwości współspalania węgla z dużą ilością biomasy w kotłach energetycznych – technologia i zastosowanie. Międzynarodowe Targi Poznańskie i redakcja miesięcznika Czysta Energia „Kogeneracja i współspalanie-kierunki rozwoju energetyki”, 12 maj 2008, Poznań, 2008.
2. Golec, T., Remiszewski, K., Świątkowski, B., Błesznowski, M., Palniki pyłowe na biomasę. *Energetyka*, 2007, nr 5, s. 375-382.
3. Rybak, W., Spalanie i współspalanie biopaliw stałych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
4. Moroń, W., Modelowanie i badania procesu zapłonu chmury pyłowo-powietrznej. *Zeszyty Energetyczne Tom II. Problemy współczesnej energetyki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015, s. 31-41.
5. Król, K., Wpływ biomasy na stratę niedopału oraz emisję NO_x i SO₂. *Zeszyty Energetyczne Tom I. Problemy współczesnej energetyki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2014, s. 101-112.
6. Dudek, M., Zawartość rtęci w biomasach drugiej generacji. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno Energetyczny, Wrocław, 2013.
7. Szydełko, A., Urbanek, B., Wybrane związki mineralne w aspekcie dodatków do paliw stałych zmniejszających skutki procesów żuźlowych i popielenia, *Dokonania Młodych Naukowców*, 2014, nr 2, s. 351-356.
8. Petela, R., Paliwa i ich spalanie. Cz. IV. Palniki. Wydanie II, Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1983.
9. Oravainen, H., Experiences of biomass co-firing in Finland. IEA Biomass Combustion and Cofiring Workshop, Netherlands, 21 October 2008
10. Bocian, P., Golec, T., Low emission pulverized biomass fuel combustion systems. ERA-NET Bioenergy – Project “FutureBio Tec” Technologies for clean biomass combustion, 20th September 2012, Graz, Austria, 2012.
11. Materiały firmy PETROKRAFT AB (www.petrokraft.com.pl/pylki.html) (dostęp 22.03.2016).
12. Materiały firmy Ecoenergia (<http://www.ecoenergia.com.pl/spalanie.html>) (dostęp 22.03.2016).