Perspektywy wykorzystania biomasy stałej i RDF w ciepłownictwie

Prospects for the utilization of solid biomass and RDF in district heating

RAFAŁ RAJCZYK

DOI 10.36119/15.2024.2.2

W artykule analizowano możliwości zastosowania trzech wybranych paliw w ciepłownictwie. Biomasę stałą reprezentowały pelet ze słomy agro oraz PKS (palm kernel shell), badaniom poddano również paliwo alternatywne – RDF. We wprowadzeniu omówiono ogólnie wykorzystanie biomasy i paliw alternatywnych do wytwarzania ciepła, przedstawiono też sytuację rynkową ze szczególnym uwzględnieniem ilości biomasy wykorzystywanej obecnie w Polsce oraz międzynarodowej wymiany handlowej. Dla paliwa importowanego – PKS omówiono procesy transportu i ich wpływ na uzyskiwane efekty ekologiczne. W dalszej części pracy analizowano własności fizyko-chemiczne badanych paliw oraz ich popiołów. Przedstawiono skład chemiczny, charakterystyczne temperatury popiołu oraz wyznaczono wybrane wskaźniki eksploatacyjne, do których przydatności w prognozowaniu problemów eksploatacyjnych odniesiono się w dalszej części pracy. Paliwa spalane były w technologii fluidalnej, która po technologii rusztowej jest drugą z kolei powszechnie wykorzystywaną w ciepłownictwie, a jedną z jej najważniejszych zalet jest elastyczność paliwowa. Wykonano badania emisyjno-eksploatacyjne na stanowisku laboratoryjnym z warstwą fluidalną. Określono zawartości poszczególnych składników gazów spalinowych, dokonano również analizy procesów aglomeracji materiału warstwy i popiołu dennego. Przeprowadzone badania wykazały, że oba paliwa oparte o biomasę stałą cechują się korzystnymi właściwościami i są predysponowane do wykorzystania w ciepłownictwie. Z kolei przy spalaniu RDF należy zwrócić uwagę na możliwość powstawania problemów eksploatacyjnych, związanych przede wszystkim ze znaczącą zawartością chloru.
Słowa kluczowe: spalanie, biomasa stała, warstwa fluidalna, paliwa alternatywne, ciepłownictwo

The article discusses the possibilities of using three selected fuels in district heating. Solid biomass was represented by agro straw pellets and PKS (palm kernel shell), and an alternative fuel – RDF – was tested as well. The introduction deals with the use of biomass and alternative fuels for heat generation in general, and presents the market situation with particular emphasis on the amount of biomass currently used in Poland and international trade. For the imported fuel – PKS, transport processes and their impact on the achieved ecological effects were discussed. The following section presents the physical and chemical properties of the tested fuels and their ashes. The chemical composition, characteristic temperatures of the ash were presented, and selected operational indices were determined, the usefulness of which in predicting operational problems is referred to later. The fuels were combusted in fluidized bed technology, which, after grate technology, is the second most commonly used in district heating, and one of its most important advantages is fuel flexibility. Emission and operational tests were performed on a laboratory rig with a fluidized bed. The contents of individual components of exhaust gases were determined, and the agglomeration processes of the bed material and bottom ash were analyzed. The conducted research showed that both fuels based on solid biomass have favourable properties and are suitable for use in heating. In turn, when burning RDF, attention should be paid to the possibility of operational problems, primarily related to the significant chlorine content.
Keywords: combustion, solid biomass, fluidized bed, alternative fuels, district heating

Wprowadzenie

W 2015 r. przyjęta została przez Zgromadzenie Ogólne ONZ Agenda na rzecz zrównoważonego rozwoju 2030, zwana w skrócie Agendą 2030. Agenda zawiera m.in. 17 społecznych, gospodarczych i środowiskowych celów zrównoważonego rozwoju, w tym cele takie jak „Czysta i dostępna energia" oraz „Działania w dziedzinie klimatu". Jeszcze ambitniejsze cele stawia sobie Unia Europejska. Fit for 55 to zbiór propozycji legislacyjnych przedstawionych przez Komisję Europejską w lipcu 2021 r. Wpisuje się on w wysiłki Unii Europejskiej zmierzające do dostosowania swojej polityki do celu, jakim jest osiągnięcie do 2030 r. redukcji emisji gazów cieplarnianych o 55% w porównaniu z poziomem z 1990 r. Ochrona klimatu i ograniczanie emisji wszelkiego typu zanieczyszczeń staną się trudnymi wyzwaniami dla wielu sektorów gospodarki, takich jak: wytwarzanie energii elek-

dr hab. inż. Rafał Rajczyk prof. Politechniki Częstochowskiej https://orcid.org/0000-0002-3786-4692 – Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych.
Adres do korespondencji/ Corresponding author: rafal.rajczyk@pcz.pl

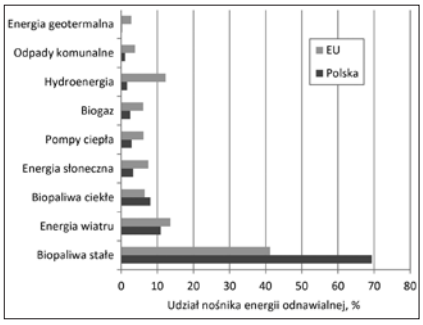
trycznej i ciepła, transport, zaopatrzenie budynków w energię, liczne gałęzie przemysłu np. przemysł cementowy. W odniesieniu do omawianych planów redukcji zużycia paliw kopalnych, w szczególnie niekorzystnej sytuacji znajdują się elektroenergetyka i ciepłownictwo. Z tych dwóch sektorów znacznie lepsze perspektywy ma wytwarzanie energii elektrycznej, gdzie zdecydowana większość instalacji znajduje się w grupach energetycznych, posiadających kapitał konieczny do działań modernizacyjnych. Zakłada się budowę kilku elektrowni jądrowych, elektroenergetyka też może korzystać praktycznie ze wszystkich źródeł OZE z zastrzeżeniem, że źródła pogodozależne wymagają inwestycji towarzyszących w sieci przesyłowe oraz magazynowanie energii. Ciepłownictwo nie jest tak skonsolidowane i wiele przedsiębiorstw ciepłowniczych znajduje się w złej sytuacji finansowej, znacznie mniejszy jest też katalog OZE, które można wykorzystać do wytwarzania wyłącznie ciepła [1]. Modelowe systemy ciepłownicze oparte są zazwyczaj o kilka różnych zintegrowanych technologii jak na przykład ogniwa fotowoltaiczne, pompy ciepła i magazyny ciepła z trójstopniowym magazynowaniem energii, a cała instalacja cechuje się dużym zapotrzebowaniem na miejsce, nie wspominając już o kosztach inwestycyjnych [2]. Tymczasem wzrost kosztów związanych z zakupem uprawnień do emisji CO_2 oraz zakupem paliw powoduje, że rentowność przedsiębiorstw ciepłowniczych jest zbliżona do zera [1]. Plan neutralności klimatycznej dla ciepłownictwa zakłada m.in. uzyskanie do 2030 r. znaczącej redukcji emisji dwutlenku węgla w odniesieniu do roku 2020, co najmniej na poziomie 37%. W związku z powyższymi problemami jednym z możliwych rozwiązań wydaje się wprowadzenie spalania oraz współspalania biomasy na większą skalę, w celu zastąpienia paliw kopalnych. Współsplalanie może być traktowane jako rozwiązanie przejściowe, umożliwiające odbudowanie wartości aktywa węglowego poprzez zmianę paliwa, a nie technologii, co daje możliwości zaproponowania aktywa jako zabezpieczenia do przyszłych inwestycji w bardziej zaawansowane technologicznie układy ciepłownicze. Z kolei inwestycje w nowe moce oparte na spalaniu wyłącznie biomasy są obecnie rozwiązaniami cechującymi się najlepszymi wskaźnikami ekonomicznymi (koszt inwestycji / uzyskany efekt ekologiczny). Z kolei współspalanie odpadów, również jest ciekawą perspektywą, ze względu na możliwości kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów, do energii wytworzonej z OZE, jak również biorąc pod uwagę nadwyżki paliw tego typu na rynku, dla których poza nielicznymi instalacjami głównym odbiorcą jest w chwili obecnej przemysł cementowy. W pracy przedstawiono charakterystykę eksploatacyjną i emisyjną trzech paliw, wydających się perspektywicznymi dla branży ciepłowniczej. Jako paliwa z biomasy stałej wybrano pelet ze słomy agro oraz palm kernel shell (PKS), w badaniach wykorzystano również paliwo z odpadów – RDF.

Energetyczne wykorzystanie biomasy ma w Polsce ciekawą historię. W wielkoskalowej energetyce proces wykorzystania biomasy, szczególnie w postaci współspalania przeżył rozkwit w latach 2005-2012, aby następnie przyczynić się do załamania rynku tzw. zielonych certyfikatów i w rezultacie do przeprowadzania zasadniczych zmian w systemie wsparcia dla wytwarzania energii z OZE. Jednakże z punktu widzenia czysto technicznego, zebrano wtedy wartościowe doświadczenia związane z problematyką wykorzystania biomasy, z których obecnie można czerpać wiedzę na potrzeby eksploatacji mniejszych instalacji wykorzystujących biomasę stałą. Do najważniejszych zagadnień związanych z eksploatacją źródła biomasowego należą następujące obszary:

- kontraktacja i dostarczanie biomasy, oględziny,
- kontrola jakości biomasy, próbkowanie (w przypadku większej ilości i zróżnicowania dostaw będzie to zarządzanie systemem jakości biomasy),
- składowanie i przygotowanie biomasy, podawanie biomasy do kotła, aspekty BHP z tym związane (ochrona przed wybuchem i pożarem, ochrona przed samozapłonem składowisk, ochrona przed pyleniem, zapobieganie gniciu),
- proces spalania w kotle, mitygowanie problemów eksploatacyjnych, oczyszczanie gazów spalinowych i kontrola emisji, utylizacja popiołów.

Żadne z powyższych obszarów nie powinny być marginalizowane w pracy z biomasą; znane są z praktyki przykłady, kiedy nowopowstałe, zaawansowane technicznie instalacje do spalania biomasy nie mogły podjąć produkcji ze względu na problemy z przygotowaniem paliwa (dotyczy przede wszystkim palników pyłowych na biomasę) lub jego podawaniem (dotyczy wszystkich technologii).

Bardzo trudno jest oszacować precyzyjnie rzeczywiste ilości biomasy wytwarzanej w Polsce. Niektóre publikowane



Rys. 1.
Udział poszczególnych nośników energii odnawialnej w Polsce oraz w Unii Europejskiej w 2022 r., opracowanie własne na podstawie [3]
Fig. 1. Share of individual renewable energy carriers in Poland and the EU-27 in 2022

dane dotyczące zużycia biomasy są sprzeczne. Jednak większość źródeł jest zgodna, że biomasa stanowi najważniejsze źródło energii odnawialnej w Polsce, w odniesieniu do energii pierwotnej. Udział poszczególnych nośników energii odnawialnej w Polsce oraz w Unii Europejskiej, według danych GUS przedstawiono na rys. 1 [3].

Jak można zauważyć analizując dane zestawione na rys. 1., biomasa stała pozostaje liderem w dostarczaniu energii odnawialnej zarówno w UE, jak i w Polsce, przy czym w Polsce udział biomasy jest o ok. 30% wyższy niż średnia unijna. Polska pozostaje czwartym największym rynkiem biomasy stałej w UE, po Niemczech, Francji, Szwecji i Finlandii. Pod względem kryterium dostarczania ciepła z biomasy stałej również zajmujemy 4 miejsce identycznie jak w poprzednim zestawieniu, ze zużyciem biomasy na cele ciepłownicze w ilości 7,6 Mtoe rocznie [4]. Z informacji URE wynika, że w 2021 r. w ciepłownictwie dominującym nośnikiem energii był węgiel kamienny (71,4% udział w strukturze paliw w ciepłownictwie, 67,8% w kogeneracji), biomasa stała znajdowała się na drugim miejscu (ciepłownictwo – 8,1%, kogeneracja 8,8%), nieznacznie wyprzedzając w tym zestawieniu gaz ziemny wysokometanowy [5]. Stałe odpady komunalne dostarczyły odpowiednio 1,4% paliw dla ciepłownictwa i 1,8% dla kogeneracji. Podane koszty jednostkowe paliwa sugerują dominujący udział zrębków, w paliwach biomasowych dla ciepłownictwa i kogeneracji [5]. Poza zrębkami, chętnie wybieranym paliwem był pelet. W 2021 r. wyprodukowano w Polsce około 1,1 mln Mg peletu. Według danych FAOSTAT Polska w roku 2021 importowała 215 tys. m^3 i eksportowała 476 tys. m^3 peletu [6]. Struktura importu poza kierunkiem wschodnim obejmuje wiele krajów UE, a nawet Chiny i USA. Natomiast eksport ukierunkowany był przede wszystkim do Niemiec,

Włoch i Danii [7]. Na podstawie przedstawionych danych statystycznych można zaproponować tezę; pomimo dużego udziału biomasy w sektorze OZE jej wykorzystanie w ciepłownictwie pozostaje niewielkie. Z jednej strony sektor ciepłowniczy mógłby zwiększyć udział biomasy w strukturze paliw, z drugiej strony sensowne wydaje się też odejście od zrębków, w świetle promowanej przez UE piramidy postępowania z drewnem, podobnej do piramidy racjonalnego gospodarowania odpadami, gdzie spalanie jest przedostatnim preferowanym działaniem, lepszym tylko od składowania. Interesującymi opcjami dla ciepłownictwa mogą być wykorzystanie paliw rolniczych, zwanych popularnie agro, wykorzystanie biomasy odpadowej jak również współspalanie odpadów.

Pelet z biomasy agro, jest chętnie wykorzystywanym paliwem, które posiada wiele zalet. Przede wszystkim biomasa rolnicza stanowi produkt uboczny produkcji rolnej, zatem wpływ na ekosystemy związany z ewentualnym energetycznym wykorzystaniem jest niewielki. Zaletą jest też dostępność oraz ustabilizowane parametry. W Polsce powierzchnia gruntów rolnych wynosi ponad 14 mln ha, krajowy potencjał produkcji słomy szacuje się na 29-35 mln Mg, z czego tylko ok. 30% wykorzystywane jest na potrzeby utrzymania zwierząt hodowlanych. Pozostała nadwyżka wykorzystana może być do nawożenia (pozostawienia na polach) lub też wykorzystana na cele energetyczne [8,9]. Pelet ze słomy posiada też kolejną zaletę, którą jest zazwyczaj niska zawartość chloru. Chlor jest pierwiastkiem łatwo wymywanym wodą, w warunkach laboratoryjnych możliwe jest przeprowadzenie do odcieku wodnego do 100% chloru z masy roślinnej po jej zmieleniu i wytrząsaniu z wodą. W praktyce duża część chloru usuwana jest z paliwa podczas sezonowania słomy oraz podczas samego procesu peletowania. Z drugiej jednak strony, pierwiastki takie jak sód i potas charakteryzują się dużo mniejszą wymywalnością, zatem w dalszym ciągu będą obecne w substancji popiołowej peletów.

PKS jest produktem ubocznym przemysłu oleju palmowego, jest to łupina zewnętrzna pestki olejowca gwinejskiego. Jest to roślina pochodząca z Afryki i uprawiana obecnie przede wszystkim w regionach tropikalnych, w Azji i Ameryce Południowej. Produkcja oleju palmowego stanowi główną gałąź przemysłu w krajach, takich jak Indonezja i Malezja. Łupiny ziaren palmowych składają się głównie z twardej łupiny zewnętrznej, która chroni nasiona, charakteryzują się przy tym wysoką wartością opałową, jednorodnością, wysoką gęstością i twardością. Parametry techniczne PKS cechują się powtarzalnością w przeciwieństwie do takich popularnych paliw jak np. zrębki czy słoma nie przetworzona. PKS wykorzystywany jest jako paliwo z biomasy w różnych gałęziach przemysłu, szczególnie w energetyce. Ze względu na dostępność PKS, jego powtarzalne własności i skład chemiczny, poszukiwane były liczne możliwości jego zastosowania m.in. jako: bio-nawóz, preparat do oczyszczania wody, toryfikat, węgiel aktywny, dodatek do cementu, materiał na elektrody superkondensatorów. Póki co w największym stopniu wykorzystywany jest jednak jako paliwo biomasowe [10, 11, 12].

Wykorzystaniu biomasy importowanej (w tym również PKS) od wielu lat towarzyszą kontrowersje, związane z samym procesem transportu, które przekładają się dalej na wątpliwości natury ekologicznej, dotyczące sensowności takiego przedsięwzięcia. Oczywiście najlepiej byłoby wykorzystywać biomasę lokalnie, ale nie zawsze jest to możliwe. Na świecie handluje się, wliczając w to handel zamorski, wieloma sortymentami biomasy. Handel dotyczy przede wszystkim biomasy charakteryzującej się dużą gęstością energii i jednocześnie ustabilizowanymi parametrami (niska zawartość wilgoci, wysoka wartość opałowa). Przykładowe paliwa to pelet i toryfikat. W 2018 roku z USA sprowadzono do Europy ok. 4,5 mln Mg peletu (5,5 mln Mg w 2019 według Eurostatu), a handel wewnętrzny pomiędzy państwami UE szacowano na 6,6 mln Mg peletu, natomiast pomiędzy krajami Unii wymiana handlowa toryfikatem (węglem drzewnym) z biomasy wyniosła 895 tys. Mg [13]. Również drewno opałowe jest przedmiotem handlu. Przykładowo w roku 2021 Polska importowała 4,2 mln m^3 i eksportowała 2,5 mln m^3 paliwa drzewnego (wliczając następujące kategorie: paliwo drzewne, wióry cząstki i pozostałości drzewne, pelet, tarcica) [6]. Wiele przesłanek wskazuje, że to nie procesy transportu, ale sposoby pozyskania biomasy mają decydujący wpływ na końcowy efekt ekologiczny. Autorzy pracy [14] dokonali obliczeń oceny cyklu życia LCA (ang. *life cycle assessment*) dla PKS sprowadzanego z Indonezji i Malezji do Japonii, w celach energetycznych. Zastosowana metodyka jest bardzo zbliżona do metodyki zalecanej w Dyrektywie RED II [15]. W obliczeniach emisji gazów cieplarnianych wzięto pod uwagę: emisje związane ze zmianą sposobu użytkowania gruntów, emisje z samego procesu uprawy roślin na plantacji, emisje związane z produkcją oleju palmowego, emisje związane z transportem jak również związane z wykorzystaniem tego paliwa w elektrowni. Rozważano przy tym kilka scenariuszy, różniących się zarówno drogą transportu m.in. (z Malezji lub Indonezji do Shikoku lub Kyushu) jak i zmianami sposobu użytkowania gruntów. Otrzymane wyniki wskazują, że decydujący wpływ na emisje gazów cieplarnianych związanych z energetycznym wykorzystaniem PKS mają ewentualne zmiany użytkowania gruntów. Emisje dla scenariusza, w którym palma olejowa zastąpiła torfowiska wykazały emisje 9-11 kg CO_2 eq/kWh, emisja dla scenariuszy, w których plantacja palmy zastąpiła las tropikalny wynosiła 2,5-3,0 kg CO_2 eq/kWh, natomiast dla scenariuszy, w których palma olejowa uprawiana jest na terenach uprzednio wykorzystywanych pod uprawę (*replanting*) emisje wynosiły poniżej 0,21-0,27 kg CO_2 eq/kWh, co sprawia, że energetyczne wykorzystanie PKS w tym przypadku przyczynia się do obniżenia emisji CO_2, w porównaniu do takich technologii jak spalanie węgla czy spalanie gazu [14]. Odległość na jaką transportowany był PKS miała niewielkie znaczenie dla końcowej emisji, co potwierdzają także wyniki pracy [16], w której również rozważano różne scenariusze związane z transportem PKS.

RDF (ang. *refuse derived fuel*) to paliwo powstałe w wyniku wysortowania frakcji palnej z odpadów komunalnych i może zawierać papier, tworzywa sztuczne, drewno itp.. Na chwilę obecną nie istnieje precyzyjna definicja RDF, poza ogólnym stwierdzeniem, że jest to paliwo powstałe z odpadów, które zostały przetworzone aby spełnić wymagania m.in. przemysłu. W związku z tak przyjętą definicją, paliwo to może różnić się swoim składem w zależności od rodzaju odpadów użytych do przygotowania, miejsca i sposobu wytwarzania. W związku z bardzo szerokimi możliwościami komponowania paliw typu RDF podjęto pewne działania legislacyjne w stosunku do paliw alternatywnych, wprowadzając definicję SRF (ang. *solid recovered fuel)* – paliwa wytworzonego z odpadów innych niż niebezpieczne stanowiącego podgrupę RDF o określonych własnościach, spełniającego wymagania norm [17]. Specyfikację techniczną i sposób podziału na klasy dla paliw SRF przedstawiono w tabeli 1.

Kombinacja numerów tworzy kod paliwa. Parametry mają jednakowe znaczenie, dlatego żaden pojedynczy numer klasy nie decyduje o przynależności do danej klasy. Zamiast tego podaje się kod paliwa SRF np. $NCV_3Cl_2Hg_3$.

Tabela. 1. Specyfikacja techniczna SRF i podział na klasy
Table 1. SRF technical specification and division into classes

Parametr	Miara statystyczna	Jednostka	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5
Wartość opałowa	średnia	MJ/kg st. roboczy	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
Zawartość chloru	średnia	% st. suchy	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Zawartość rtęci	mediana 80 percentyl	mg/MJ st. roboczy	≤0,02 ≤0,04	≤0,03 ≤0,06	≤0,08 ≤0,16	≤0,15 ≤0,30	≤0,5 ≤1,0

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów, do energii wytworzonej z OZE kwalifikuje się część energii wytworzonej w instalacji termicznego przekształcania odpadów odpowiadającą udziałowi energii chemicznej frakcji biodegradowalnych w całkowitej energii chemicznej paliw dostarczonych do procesu spalania. Należy jednocześnie spełnić cztery warunki:

- prowadzone są pomiary masy oraz badania właściwości fizykochemicznych poszczególnych rodzajów współspalanych paliw,
- dokonuje się obliczenia udziału OZE zgodnie z metodyką stanowiącą załącznik do rozporządzenia,
- należy spełnić warunki emisyjne i inne wymagania określone w przepisach dotyczących termicznego przekształcania odpadów,
- prowadzona jest dokumentacja dotycząca ilości energii elektrycznej lub ciepła wytwarzanych w instalacji termicznego przekształcania odpadów oraz wyników badań właściwości fizykochemicznych poszczególnych rodzajów paliw [18].

Praca z RDF podobna jest do energetycznego wykorzystania biomasy trudnej, z pewnymi zastrzeżeniami, przede wszystkim należy pamiętać o spełnieniu czterech ustawowych warunków opisanych powyżej. Poza tym konieczne jest stosowanie nieco innych urządzeń, np. dedykowanych młynów do rozdrabniania RDF. Paliwo to nastręcza też pewnych problemów związanych z niespotykaną w typowych paliwach zawartością metali nieżelaznych, które nie poddają się powszechnie stosowanej separacji magnetycznej. Szacuje się, że spośród powstających odpadów palnych przekształcanych termicznie jest jedynie 24%, a wytworzone paliwa typu RDF zalegają w miejscach gdzie są „tymczasowo składowane" [19].

Badania prowadzono w technologii fluidalnego spalania paliw, która po technologii rusztowej jest drugą, najbardziej rozpowszechnioną w instalacjach ciepłowniczych, szczególnie chętnie wykorzystywana jest w kogeneracji. Kotły fluidalne charakteryzują się równomiernym rozkładem temperatury, dużą powierzchnią wymiany ciepła w układzie ciało stałe-gaz, korzystnymi współczynnikami przenikania ciepła, zaletą jest też możliwość odsiarczania In-situ, szczególnie jeżeli pracują one na mało zasiarczonych paliwach. Ze względu na zaostrzające się wymagania emisyjne, zaleta związana ze stosunkowo niską emisją tlenków azotu związana ze spalaniem w temperaturach rzędu 850°C schodzi obecnie na drugi plan, gdyż i tak wymagane jest dalsze odazotowanie gazów odlotowych. Na pierwszy plan wysuwa się jednak wielopaliwowość, czyli możliwość spalania różnych paliw, w tym trudnych. Technologia ta jest szczególnie predysponowana do spalania paliw biomasowych, jak również odpadowych.

Opis i wyniki badań

Charakterystyka paliw

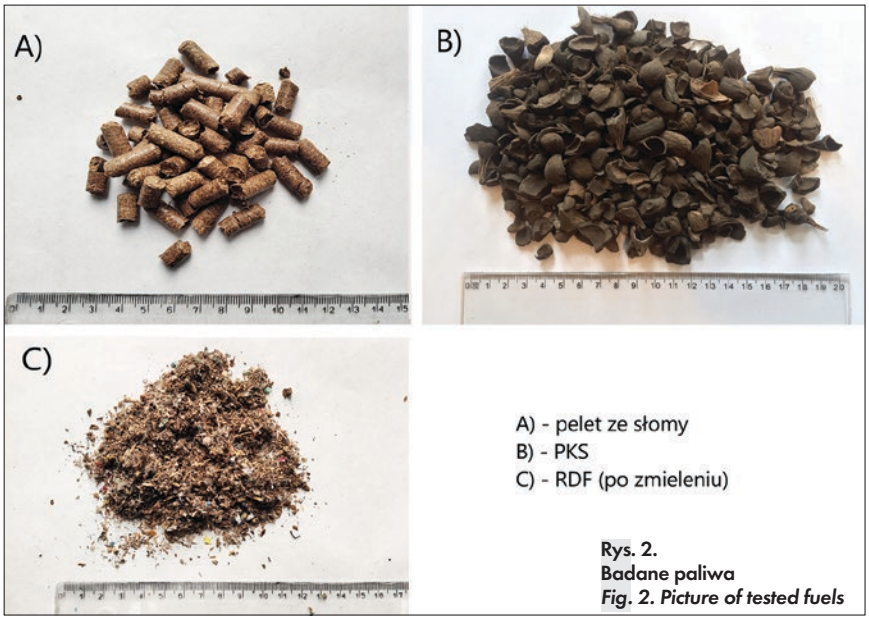
Badania rozpoczęto od wykonania analiz technicznych i fizyko-chemicznych własności wybranych paliw. Badane paliwa przedstawiono na rys. 2, natomiast ich najważniejsze parametry zestawiono w tabeli 2.

Zarówno pelet ze słomy agro, jak również PKS cechowały się korzystnymi własnościami, z punktu widzenia eksploatacji tych paliw. Stosunkowo wysoka była wartość opałowa, przy niskiej zawartości wilgoci i umiarkowanej zawartości popiołu. Oba paliwa biomasowe zawierały niewielkie udziały azotu (0,30-0,35%$_{mas}$), niewielkie ilości chloru (0,03-0,09%$_{mas}$) jak również niewielkie zawartości siarki (0,02-0,05%$_{mas}$). W porównaniu do biomasy stałej, wyraźnie gorszymi parametrami cechowało się paliwo RDF, mające nieco niższą wartość opałową, wyższą zawartość popiołu (11,58%$_{mas}$). W RDF wyższe były również udziały pierwiastkowego azotu, jak również siarki (0,18%$_{mas}$) i chloru (0,36%$_{mas}$), co znalazło odbicie w składzie gazów spalinowych uzyskanych na stanowisku laboratoryjnym. Z drugiej jednak strony badany RDF nie odbiegał od parametrów tego typu paliwa, biorąc pod uwagę wspominaną już we wstępie szeroką definicję paliwa RDF i możliwości komponowania go z różnego typu odpadów. Badany RDF w świetle klasyfikacji paliw SRF znajduje się w klasie 4 w odniesieniu do wartości opałowej oraz w klasie 2

Tabela 2. Parametry badanych paliw w stanie as received
Table 2. Fuel parameters as received

Parametr	Jednostka	Pelet ze słomy agro	PKS	RDF
Wartość opałowa	MJ/kg	15,25	15,50	13,96
Wilgoć	$\%_{mas}$	9,15	10	21,22 (8,00)*
Popiół	$\%_{mas}$	3,91	3,33	11,58
Części lotne	$\%_{mas}$	64,17	63,11	55,20
Koksik	$\%_{mas}$	22,77	23,56	12,00
C	$\%_{mas}$	43,11	45,29	36,70
H	$\%_{mas}$	5,47	5,63	4,97
N	$\%_{mas}$	0,35	0,30	0,91
S	$\%_{mas}$	0,05	0,02	0,18
O	$\%_{mas}$	37,87	35,4	24,08
Cl	$\%_{mas}$	0,09	0,03	0,36
Gęstość nasypowa	kg/m^3	560,0	700,0	194,0

* Przed procesem spalania na stanowisku laboratoryjnym RDF został zmielony i był składowany, co doprowadziło do obniżenia zawartości wilgoci do wartości ok 8%. Pozostałe paliwa nie były dodatkowo przygotowywane.



Rys. 2.
Badane paliwa
Fig. 2. Picture of tested fuels

w odniesieniu do zawartości chloru. Zawartości rtęci nie określono (por. tabela1).

W dalszej kolejności z badanych paliw wytworzono popioły wyprażając paliwa w piecyku laboratoryjnym LMH LAC w temperaturze 815°C, którą przyjęto ze względu na dalsze badania, które prowadzone były na stanowisku z warstwą fluidalną gdzie paliwa spalane są w zbliżonej temperaturze (850°C). Dla wytworzonych popiołów przeprowadzono analizę składu chemicznego (analizę tlenkową) przy użyciu analizatora MiniPal4 firmy PANalytical w oparciu o wzorce Breitlander. Wyniki analizy tlenkowej popiołów zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Analiza tlenkowa popiołów z badanych paliw
Table 3. Oxide analysis of examined fuels ashes

Tlenek	Pelet ze słomy	PKS	RDF
	$\%_{mas.}$	$\%_{mas.}$	$\%_{mas.}$
SiO_2	49,9	62,12	21,9
Al_2O_3	9,67	6,56	8,93
CaO	11,2	5,10	32,55
Fe_2O_3	1,43	4,34	5,14
MgO	3,46	2,20	3,07
P_2O_5	12,1	2,71	1,8
K_2O	4,95	5,02	4,95
Na_2O	1,59	0,46	1,62
TiO_2	0,44	0,5	1,12

Podstawowymi problemami kotłów spalających i współspalających biomasę oraz paliwa alternatywne są żużlowanie (*ang. slagging*) oraz popielenie (*ang. fouling*) [20]. Oba zjawiska są do siebie podobne, gdyż mechanizm ich powstawania jest zbliżony. Żużlowanie definiuje się jako powstawaniem osadów na powierzchniach mających kontakt z promieniowaniem cieplnym, takich jak komora paleniskowa kotła. Popielenie zachodzi z kolei na powierzchniach wymiany ciepła, na których ta wymiana następuje przez konwekcję. W obu przypadkach negatywny wpływ jest rozumiany jako pogorszenie wymiany ciepła, a na powierzchniach występowania żużlowania i popielenia może dochodzić dodatkowo do korozji, o ile w biomasie znajduje się również chlor [21].

Dysponując analizą paliwa można wyznaczyć wiele wskaźników eksploatacyjnych, stosowanych w ocenie czy dane paliwo sprawiać będzie problemy eksploatacyjne. Na podstawie składu chemicznego popiołów, przedstawionego w tabeli obliczono następnie wartości trzech wybranych wskaźników eksploatacyjnych tj. *BAI*, *B/A* oraz *Fu* [22,23].

Podczas spalania biomasy w technologii fluidalnej istotnym problemem są procesy aglomeracji złoża. Z tego powodu opracowano wskaźnik aglomeracji złoża, szacujący powinowactwo składu chemicznego popiołu, do skłonności do powodowania aglomeracji w reaktorach ze złożem fluidalnym (ang. *BAI – bed agglomeration index*).

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{\left(Na_2O + K_2O\right)}, [-] \qquad (1)$$

Interpretacja wskaźnika jest następująca; wartości współczynnika *BAI* poniżej 0,15 wskazują na wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia procesów aglomeracji.

Wskaźnik *B/A* określa stosunek związków zasadowych do kwaśnych (ang. *B/A – base to acidic*). Wskaźnik ten jest wykorzystywany do przewidywania skłonności popiołów do tworzenia osadów. Opiera się na założeniu, że składniki popiołu wyszczególnione w mianowniku (Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O) obniżają temperaturę topliwości popiołu. Występuje tutaj też składnik P_2O_5, który ma skłonność do tworzenia niskotopliwych eutektyk. Natomiast tlenki występujące w mianowniku posiadają wyższe temperatury topliwości. Wskaźnik obliczany jest według wzoru:

$$B/A = \frac{\left(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + Na_2O + P_2O_5\right)}{\left(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2\right)}, [-] \qquad (2)$$

Stosowana jest następująca interpretacja wskaźnika; *B/A*<0,5 – niskie prawdopodobieństwo powstawania *foulingu* i *slaggingu*, 0,5<*B/A*<1,75 – umiarkowane prawdopodobieństwo, *B/A*>1,75 – wysokie prawdopodobieństwo występowania *foulingu* i *slaggingu*.

Wskaźnik fouling index (Fu) opiera się na wskaźniku B/A, przy czym uwzględniono w nim również zawartość tlenków pierwiastków alkalicznych (Na_2O, K_2O) mających tendencje do tworzenia wraz ze związkami krzemu niskotopliwych eutektyk.

$$Fu = \frac{\left(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + Na_2O + P_2O_5\right)}{\left(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2\right)} \cdot \left(Na_2O + K_2O\right), [-] \qquad (3)$$

Dla indeksu *Fu* stosuje się następującą interpretację wyników: *Fu*≤0,6 – paliwo bez skłonności do popielenia, 0,6≤*Fu*≤40 – duża skłonność do popielenia, *Fu*>40 – bardzo duża skłonność [22,23]. Wartości wskaźników *BAI*, *B/A* i *Fu* dla badanych paliw zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wybrane wskaźniki eksploatacyjne dla badanych paliw
Table 4. Selected operational indices of tested fuels

Wskaźnik	Pelet ze słomy	PKS	RDF
	-	-	-
BAI	0,29	0,79	0,59
B/A	0,58	0,29	1,60
Fu	3,78	1,57	13,94

Wszystkie trzy paliwa charakteryzowały się wartościami wskaźnika *BAI* powyżej 0,15 (nie wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo aglomeracji złoża). Wskaźnik *B/A* dla PKS wykazał wartość poniżej 0,5 (niskie prawdopodobieństwo *foulingu*), natomiast dla peletu ze słomy i RDF mieścił się w zakresie 0,5-1,75 co wskazuje na umiarkowane prawdopodobieństwo *foulingu*. Z kolei wskaźnik *Fu* dla wszystkich trzech paliw wskazywał na dużą skłonność do popielenia, przy czym należy też zwrócić uwagę, że pomimo tego, że wartość wskaźnika w ramach tego samego przedziału w interpretacji różniła się znacznie (PKS – 1,57, RDF – 13,94).

Do przewidywania problemów eksploatacyjnych wykorzystywane są również charakterystyczne temperatury popiołu [22], których wartości dla badanych paliw przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Charakterystyczne temperatury popiołów
Table 5. Characteristic temperatures of ashes

Parametr	Jednostka	Pelet ze słomy	PKS	RDF
Temperatura spiekania	°C	860	870	780
Temperatura mięknięcia	°C	1115	1000	975
Temperatura topnienia	°C	1230	1330	1180
Temperatura płynięcia	°C	1290	1400	1210

Jak można zauważyć, analizując dane zestawione w tabeli 5, pomimo stosunkowo niskich zawartości tlenków potasu i sodu (por. tabela 3) charakterystyczne temperatury popiołu były najniższe dla RDF. Co istotne, temperatura spiekania była niższa, niż standardowa temperatura spalania w kotłach z warstwą fluidalną – 850°C. Dla paliw biomasowych temperatura spiekania popiołu była powyżej tej wartości.

Badania zasadnicze

Badania zasadnicze prowadzone były na stanowisku laboratoryjnym z warstwą fluidalną (zwanym CFB100), przedstawionym schematycznie na rys. 3. Stanowisko wyposażone jest w cylindryczną komorę spalania o wysokości 5,7m i wewnętrznej średnicy 0,1m. Stanowisko jest modelem kotła fluidalnego, odwzorowującego w mniejszej skali procesy zachodzące

w kotłach w pełnej skali technicznej. Podstawowym elementem stanowiska jest układ gorącej pętli: komora spalania – cyklon – syfon – rura opadowa. Gazy spalinowe odprowadzane są za pomocą króćca ponad cyklonem. Następnie gazy spalinowe kierowane są do układu odpylania, składającego się z pojedynczego worka filtracyjnego na konstrukcji wsporczej. Po procesie filtracji gazy odprowadzane są do komina za pomocą wentylatora spalin (rys.3).

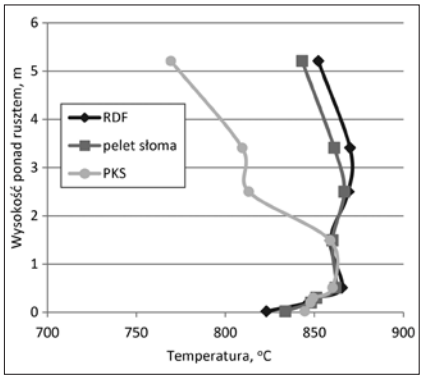
Stanowisko opomiarowane jest za pomocą termopar (T) oraz króćców do pomiaru ciśnienia (P), w miejscach oznaczonych na rys 3. Jako instalacja służąca do rozpalania stanowiska, a także w miarę potrzeb do zachowania wymaganej temperatury, wykorzystywane są trzy sekcje elektrycznych grzałek, o łącznej mocy ok. 50kW, rozłożone równomiernie wzdłuż wysokości komory paleniskowej, przykryte izolacją termiczną, (oznaczone PIEC 1 – 3 na rys 3). Paliwo podawane jest ponad ruszt, za pomocą instalacji składającej się z zasobnika, przenośnika ślimakowego oraz rury, w miejscu oznaczonym jako PALIWO na rys.3. Paliwo podawane jest w sposób ciągły, strumień objętościowy paliwa regulowany jest za pomocą sterowania liczbą obrotów podajnika na minutę. Pelet ze słomy i PKS podawane były podczas badań bezpośrednio w otrzymanym stanie, natomiast dla RDF ze względu na wymiary cząstek tego paliwa, konieczne było uprzednie rozdrobnienie go w młynie tnącym Laarmann CM 1000. Instalacja dostarczania powietrza do spalania składa się z instalacji powietrza pierwotnego (fluidyzującego), dostarczanego pod ruszt oraz instalacji doprowadzenia powietrza wtórnego. Zarówno instalacja powietrza pierwotnego jak i wtórnego wyposażona jest w masowy kontroler przepływu oraz podgrzewacz wstępny powietrza. Powietrze pierwotne podgrzewane może być do temperatury 300°C, natomiast powietrze wtórne do temperatury 150°C. Wstępne podgrzanie powietrza umożliwia utrzymanie zadanych temperatur spalania w kolumnie. Ilość dostarczanego powietrza pierwotnego i wtórnego sterowana była za pomocą masowych kontrolerów przepływu. Rozkład temperatur badany był za pomocą termopar płaszczowych typu K zintegrowanych poprzez skrzynkę pomiarową z komputerem. Lokalizacja termopar T1-T17 przedstawiona została na rys. 3. Pomiary temperatur prowadzone były w sposób ciągły, a ich wartości wyświetlane na monitorze za pomocą komercyjnego oprogramowania DasyLab w wersji 11. Założone temperatury utrzymywane były za pomocą regulacji ilości podawanego paliwa poprzez zmianę obrotów podajnika ślimakowego zadającego paliwo nad ruszt, jak również poprzez podgrzewanie powietrza pierwotnego i wtórnego oraz za pomocą trzech sekcji grzałek otaczających kolumnę spalania. Pomiar rozkładu ciśnień prowadzony był za pomocą króćców zlokalizowanych w całej instalacji (lokalizację portów ciśnienia P1-P13 oznaczono na rys. 3) podłączonych do przetworników różnicy ciśnień APR-2000 ALW z króćcami typu P firmy Aplisens. Sygnały z przetworników różnicy ciśnień kierowane są poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy i przetwarzane przez komercyjne oprogramowanie DasyLab 11. Typowy spadek ciśnienia w kolumnie reaktora fluidalnego podczas badań mieści się w zakresie Δp = (2000 ÷ 2500 Pa). Próbki popiołu dennego pobierane były króćcem znajdującym się poniżej rusztu, natomiast próbki materiału warstwy fluidalnej – króćcem zlokalizowanym pod syfonem.

Badania składu gazów spalinowych prowadzono za pomocą analizatora Gasmet DX 4000, wykorzystującego metodę pomiarową FTIR. Analizator wykalibrowany został przez wyspecjalizowaną firmę OMC Envag. Sonda analizatora umieszczona była ponad króćcem wylotowym z separatora, w pobliżu termopary T14.

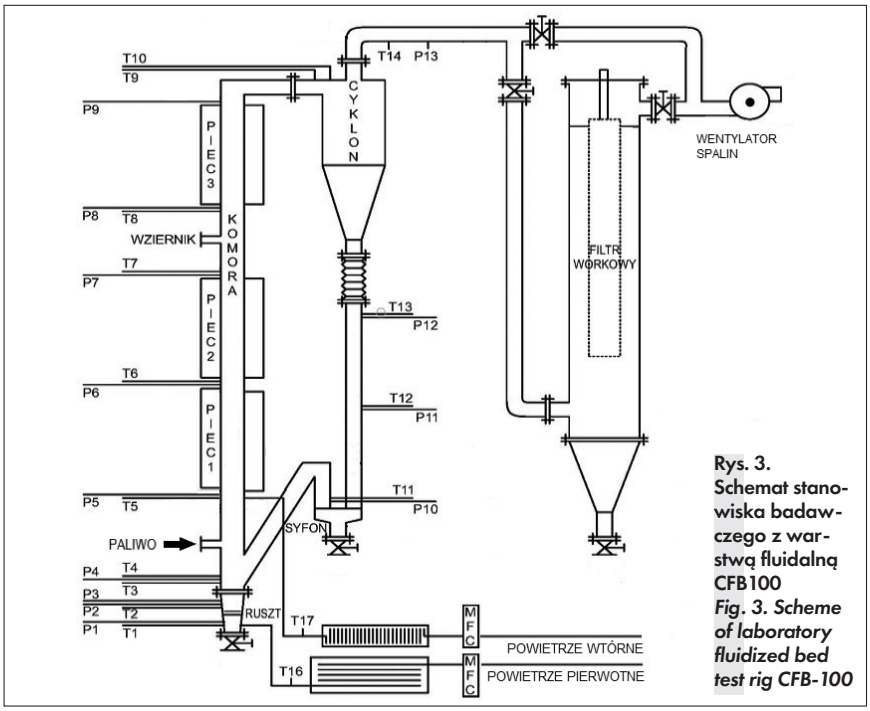
Profil uśrednionych temperatur w kolumnie fluidyzacyjnej podczas prowadzenia badań spalania trzech paliw przedstawiony został na rys. 4.

Jak można zauważyć, analizując rys. 4 dla wszystkich paliw w dobrym (PKS) lub bardzo dobrym stopniu (pelet ze słomy, RDF) udało się w odwzorować temperatury typowe dla spalania w warstwie fluidalnej. Paliwo wprowadzane było powyżej rusztu, gdzie można zaobserwować wyraźny wzrost temperatury, osiągający w strefie gęstej wartości powyżej 850°C. Następnie na wysokości 1,5 m powyżej rusztu uwidacznia się wpływ podawanego powietrza wtórnego w postaci niewielkiego spadku temperatury. Podczas testów z wykorzystaniem PKS występowały awarie grzałek trzeciej sekcji, co w rezultacie przełożyło się na nieco niższe średnie temperatury zarejestrowane w strefie rozrzedzonej, powyżej 1,5 m. Pomimo tego dla wszystkich badanych paliw udało się uzyskać wartości temperatur charakterystyczne dla spalania fluidalnego.

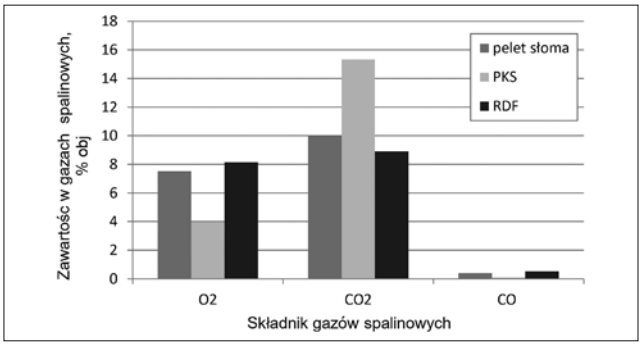
Na rys. 5 przedstawiono zawartości najważniejszych składników gazów spalinowych, uśrednione dla poszczególnych testów spalania.



Rys. 4.
Profile temperatury wzdłuż wysokości kolumny spalania podczas badań
Fig. 4. Temperature profiles along combustion chamber during experiment



Rys. 3.
Schemat stanowiska badawczego z warstwą fluidalną CFB100
Fig. 3. Scheme of laboratory fluidized bed test rig CFB-100

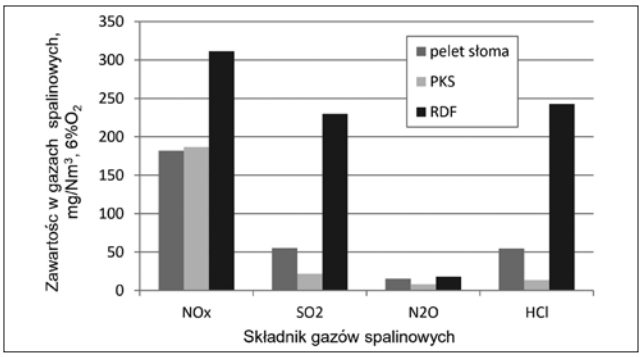


Rys. 5.
Podstawowe składniki gazów spalinowych
Fig. 5. Basic compounds of combustion gases

Jak można zaobserwować na rys. 5 najlepszym stopniem wypalenia cechował się PKS, którego spalaniu towarzyszyły najwyższe zawartości CO_2, przy jednocześnie niskiej zawartości O_2, pomimo tego, że podczas spalania PKS temperatury w górnej części komory paleniskowej były nieco niższe, niż w przypadku dwóch pozostałych paliw. Ponieważ podczas badań zawartości tlenu w gazach spalinowych różniły się (rys. 5) dla poszczególnych paliw, zawartości gazowych substancji zanieczyszczających, przedstawione na rys. 6 przeliczono na standardową zawartość tlenu wynoszącą 6%, zgodnie ze wzorem przedstawionym w Rozporządzeniu w sprawie standardów emisyjnych z instalacji [24].

Zawartości NO_x w gazach odlotowych były bardzo zbliżone dla peletu ze słomy i PKS. Paliwa te cechowały się zawartością azotu pierwiastkowego na poziomach PKS – 0,30%$_{mas}$, pelet ze słomy – 0,35%$_{mas}$. Uzyskane wyniki potwierdzają, że w temperaturach spalania nie przekraczających 900°C dominującym źródłem tlenków azotu był azot zawarty w paliwie, bez udziału mechanizmu termicznego i szybkiego. Tę tezę potwierdzają zawartości NO_x uzyskane dla RDF, w którym zawartość pierwiastkowego azotu wynosiła 0,91%$_{mas}$ (tabela 2), a zarejestrowane zawartości NO_x przekraczały 300 mg/Nm^3. Uzyskano również dobrą korelację pomiędzy zawartościami pierwiastkowej siarki, a poziomami SO_2 zarejestrowanymi w gazach spalinowych (PKS – 0,02%$_{mas}$, pelet ze słomy – 0,09%$_{mas}$ oraz RDF – 0,18%$_{mas}$ – tabela 2). Poziom konwersji siarki pierwiastkowej do SO_2 wynosił dla PKS – 0,49, dla peletu ze słomy 0,39, a dla RDF – 0,45, zatem reszta siarki uległa retencji w złożu fluidalnym. Również zarejestrowane zawartości HCl w gazach spalinowych odzwierciedlają zawartości pierwiastkowego chloru w paliwach. W tym przypadku poziom konwersji chloru do chlorowodoru wynosił dla PKS – 0,35, dla peletu ze słomy – 0,38 i dla RDF – 0,41. Zarejestrowane zawartości HCl dla RDF są wysokie (średnio 243 mg/Nm^3, 6%O_2) i mogą przyczyniać się do procesów korozyjnych, a sama obecność chloru w kotle brać udział w procesach zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych. Zarejestrowane zawartości podtlenku azotu były dla wszystkich trzech badanych paliw niewielkie.

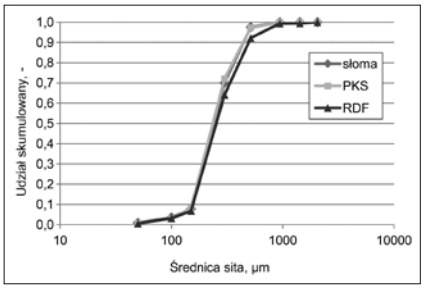
Analizom poddano również pobrane próbki materiału cyrkulującego i popiołu dennego, zebrane podczas badań. Przy każdorazowej zamianie paliwa stanowisko było opróżniane, a materiał złoża fluidalnego wymieniany był na świeży. Analizę sitową materiałów sypkich przeprowadzono przy użyciu wytrząsarki RETSCH AS 200 z zestawem znormalizowanych sit. Wyniki analizy sitowej materiału cyrkulującego przedstawiono na rys. 7, natomiast analizy sitowej popiołu dennego – na rys. 8.



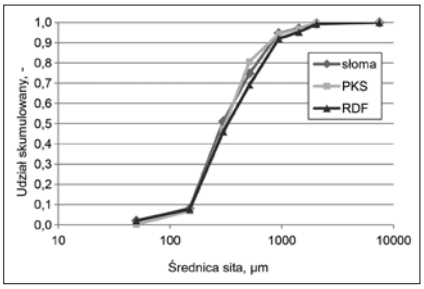
Rys. 6.
Gazowe substancje zanieczyszczające
Fig. 6. Gaseous pollutants

Rozkład wielkości cząstek materiału cyrkulującego dla peletu ze słomy i PKS był niemal identyczny, natomiast w przypadku spalania RDF zaobserwowano niewielki przyrost wielkości cząstek, co jest szczególnie widoczne dla sit 300μm oraz 515μm (rys. 7).

Dla popiołu dennego zaobserwowane różnice w rozkładach cząstek były niewielkie, ale tutaj również można zauważyć niewielki przyrost wielkości cząstek podczas spalania RDF, w zakresach 300, 515 oraz 940μm (rys. 8). Uzyskane wyniki mogą świadczyć o tym, że w przypadku spalania RDF rozpoczęły się procesy aglomeracji materiału warstwy fluidalnej. Ponieważ udział tlenków pierwiastków alkalicznych był bardzo zbliżony w popiołach ze wszystkich trzech paliw (tabela 3), za procesy aglomeracji najprawdopodobniej odpowiedzialny jest udział chloru w RDF, wyższy niż dla pozostałych paliw. W interpretacji wyników należy także wziąć pod uwagę wyniki analizy charakterystycznych temperatur popiołu (tabela 5), która wykazała że popiół otrzymany z RDF ma tendencję do spiekania w temperaturze 780°C, czyli poniżej temperatur, dla których prowadzono proces spalania (rys. 4). Natomiast paliwa z biomasy cechowały się temperaturą spiekania powyżej 850°C. Biorąc pod uwagę wyznaczone w pracy wskaźniki eksploatacyjne, najniższą wartością indeksu *BAI* (*bed agglomeration index*) cechował się pelet ze słomy, nie osiągając jednak wartości poniżej 0,15 co interpretowane jest jako możliwość aglomeracji materiału złoża. W świetle przeprowadzonych badań największą przydatnością wykazał się indeks *Fu* (*fouling index*), który co prawda dla wszystkich paliw pozostawał w tym samych przedziale interpretacji (istnieje skłonność do powstawania foulingu), jednakże jego wartości różniły się znacznie w ramach tego przedziału. Paliwa, które nie wykazały przyrostu rozmiarów cząstek materiału cyrkulującego i popiołu lotnego posiadały wartości *Fu* odpowiednio; pelet ze słomy – 3,78, PKS – 1,57, natomiast RDF, dla którego zaobserwowano niewielki przyrost w rozmiarach cząstek szczególnie materiału cyrkulującego, posiadał indeks *Fu*=13,94 (tabela 4).



Rys. 7.
Analiza sitowa materiału warstwy fluidalnej
Fig. 7. Sieve analysis of the fluidized bed material



Rys. 8.
Analiza sitowa popiołów dennych
Fig. 8. Sieve analysis of the bottom ash

Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy wykonano charakterystykę trzech wybranych paliw (pelet ze słomy agro, PKS, RDF) jak również przeprowadzono proces spalania na laboratoryjnym stanowisku z warstwą fluidalną. Zarówno pelet ze słomy agro jak i PKS cechowały się korzystnymi własnościami, stosunkowo wysoką wartością opałową przy jednoczesnej, niskiej zawartości wilgoci, umiarkowanymi zawartościami popiołu., jak również niskimi zawartościami pierwiastkowej siarki jaki i chloru, co miało odzwierciedlanie w przeprowadzonych w dalszej kolejności badaniach emisyjnych, które wykazały niewielkie zawartości SO_2 i HCl w gazach spalinowych ze spalania tych biomas. Analiza popiołów z badanych paliw wykazała, że wszystkie trzy paliwa, łącznie z RDF cechowały się niewielkimi zawartościami tlenków pierwiastków alkalicznych (Na_2O + K_2O nie przekraczało 7% masy popiołu dla żadnego z paliw). W przypadku RDF paliwo to posiadało zarówno wyższą zawartość pierwiastkowego azotu oraz siarki i chloru w porównaniu do paliw z biomasy.

W odniesieniu do PKS można założyć, że paliwo to będzie się cechowało zbliżonymi własnościami, ponieważ powtarzalność składu chemicznego paliwa podkreślana była przez wielu autorów publikacji związanych z energetycznym wykorzystaniem PKS. Podobnych wniosków nie należy wysnuwać jednak ani dla peletu ze słomy agro, ani tym bardziej dla RDF. Co prawda proces sezonowania słomy, jej suszenia i peletyzacji umożliwia ustabilizowanie podstawowych parametrów i pozbycie się części chloru, jednak nie chroni przed możliwą zawartością pierwiastków alkalicznych w popiele. Na skład chemiczny słomy ma wpływ wiele czynników, takich jak chociażby gatunek uprawianej rośliny, intensywność nawożenia, rodzaj gleby, odległość od źródeł zanieczyszczeń, czas i technika zbioru, zanieczyszczenia np. glebą, kurzem, które mogą przedostać się do słomy podczas jej przechowywania i przetwarzania. Jeszcze bardziej skomplikowana sytuacja ma miejsce w przypadku paliw alternatywnych, gdzie ze względu na możliwe różnice w składzie chemicznym, zastosowanie paliwa powinno być poprzedzone dokładną analizą jego własności, w tym także uwzględniającą sezonowość.

Wykonane badania emisyjne wykazały, że zarówno pelet ze słomy agro jak i PKS cechowały się niskimi zawartościami gazowych substancji zanieczyszczających, w warunkach odniesienia przeliczonych na 6% tlenu. Dla obu paliw zawartość NO_x wynosiła poniżej 200 mg/Nm^3, dla peletu ze słomy zawartość SO_2 wynosiła 55 mg/Nm^3 i HCl – 54 mg/Nm^3, dla PKS zawartości obu tych gazów były jeszcze niższe (SO_2 – 22 mg/Nm^3, HCl – 13,5 mg/Nm^3). Z kolei podczas spalania RDF zarejestrowano zarówno wyższe zawartości NO_x – 331 mg/Nm^3, jak i SO_2 – 230 mg/Nm^3 oraz HCl – 242 mg/Nm^3, na co należałoby zwrócić szczególną uwagę w kontekście możliwych problemów eksploatacyjnych. Analizy sitowe pobranych próbek materiału cyrkulującego jak również popiołu dennego wykazały niewielki przyrost średnicy cząstek tych materiałów sypkich podczas spalania RDF, co może sygnalizować początki procesów aglomeracji materiału warstwy fluidalnej. W przypadku spalania paliw biomasowych nie zaobserwowano istotnych różnic w rozkładach ziarnowych próbek sypkich. Wyznaczone wskaźniki eksploatacyjne, w szczególności charakterystyczna temperatura spiekania popiołu oraz indeks *Fu* znalazły odzwierciedlenie w wynikach badań, co świadczy o ich pewnej przydatności, ale wymagałoby to dalszych analiz, dla większej ilości spalanych paliw.

Podsumowując, przeprowadzone badania dla peletu ze słomy agro oraz PKS wskazują, że mogą one stanowić wartościowe paliwo dla ciepłownictwa. W przypadku RDF zalecane jest ostrożne podejście, poprzedzone analizą właściwości danego typu paliwa alternatywnego, ze względu na możliwe duże różnice w składzie tego paliwa. Podczas spalania lub współspalania RDF należy również wziąć pod uwagę możliwość pojawienia się problemów korozyjnych, procesów aglomeracji warstwy jak również zanieczyszczania powierzchni ogrzewalnych.

Podziękowanie: pracę współfinansowano z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej.

WYKAZ LITERATURY

[1] Pronobis M., Kalisz S., Majcher J., Wasylów J., Sołtys J., Możliwości zastosowania biomasy w ciepłownictwie ze szczególnym podkreśleniem biomasy AGRO jako paliwa zastępującego węgiel z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych i technicznych, Instal, 2020, 3, s.17-25, DOI: 10.36119/15.2020.3.2

[2] Walczak T., Ciepłownia przyszłości czyli system ciepłowniczy z OZE – projekt realizowany z udziałem NCBR w Lidzbarku Warmińskim, XX Konferencja Techniczna Izby Gospodarczej Ciepłownictwo Polskie, Warszawa 16-17 listopada 2023

[3] Energia ze źródeł odnawialnych w 2022r. Główny Urząd Statystyczny, Rzeszów 2023

[4] Solid biofuels barometer 2023, Eur'observer, www.eurobserv-er.org

[5] Energetyka cieplna w liczbach, Opracowanie URE, Warszawa 2022, www.ure.gov.pl

[6] FAOSTAT, www.faostat.org

[7] www.futuremetrics.com

[8] Gradziuk P., Gradziuk B., Trocewicz A., Jendrzejewski B., Potential of Straw for Energy Purposes in Poland—Forecasts Based on Trend and Causal Models, Energies, 2020, 13(19), DOI: 10.3390/en13195054

[9] Jamrożak P., Potencjał Rynku biomasy w Polsce, Magazyn Biomasa – Raport Biomasa w Polsce 2022/2023, s.26-33, www.magazynbiomasa.pl

[10] Ikubanni P.P., Oki M., Adeleke A.A., Adediran A.A., Adesina O.S., Influence of temperature on the chemical compositions and microstructural changes of ash formed from palm kernel shell, Results in Engineering, 2020, 8, DOI:10.1016/j.rineng.2020.100173

[11] Ikumapayi O.M., Akinlabi E.T., Composition, characteristics and socioeconomic benefits of palm kernel shell exploitation-an overview, Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 11, s. 220-232, DOI: 10.3923/jest.2018.220.232

[12] Hardjasaputra H., Fernando I., Indrajaya J., Cornelia M., Rachmansyah R., The Effect of Using Palm Kernel Shell Ash and Rice Husk Ash on Geopolymer Concrete, MATEC Web of Conferences, 2018, 251, DOI: 10.1051/matecconf/201825101044

[13] Poskurina S., Junginger M., Heinimö J., Tekinel B., Vakkilainen E.K., Global biomass trade for energy – Part 2: Production and trade streams of wood pellets, liquid biofuels, charcoal, industrial roundwood and emerging energy biomass: biomass trade for energy, Biofuels Bioproducts and Biorefinering, 2018, 13(9), DOI:10.1002/bbb.1858

[14] Sato I., Aikawa T., Goh C.S., Kayo C., Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions in Power Generation Using Palm Kernel Shell, GCB Bioenergy, 2022, 14, s.875-892, DOI: 10.1111/gcbb.12950

[15] 19. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych

[16] Rajczyk R., Import biomasy z krajów pozaeuropejskich, Magazyn Biomasa, 2015, 4(11), s. 9-13

[17] Bień J., Production and use of waste-derived fuels in Poland: current status and perspectives, Production Engineering Archives, 2021, 7, s. 36-41, DOI: 10.30657/pea.2021.27.5

[18] Dz.U. z dn. 14 czerwca 2016r. poz. 847, Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 czerwca 2016r. w sprawie warunków technicznych kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów, do energii wytworzonej z OZE, www.isap.sejm.gov.pl

[19] Smorąg H., Stelmach S.: Ciepłownie na RDF. Czy to się opłaca? Nowa Energia, 2021, 2 (78), s. 12-16

[20] Sobieraj J., Kalisz S., Wpływ dodatków paliwowych na emisję tlenków azotu przy spalaniu biomasy agrarnej, Instal, 2021, 3, s. 22-15, DOI: 10.36119/15.2021.3.2

[21] Rybak W. Spalanie i współspalanie biopaliw stałych, 2006, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

[22] García-Maraver A., Mata-Sanchez J., Carpio M., Jiménez J.A P., Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency, Journal of The Energy Institute, 2017, 90, s. 214-228, DOI: 10.1016/j.joei.2016.02.002

[23] Kaniowski W., Taler J., Wang X., Kalemba-Rec I., Gajek M., Mlonka-Mędrala A., Nowak-Woźny D., Magdziarz A., Investigation of biomass, RDF and coal ash-related problems: Impact on metallic heat exchanger surfaces of boilers, Fuel, 2022, 326, DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125122

[24] Dz.U. z dn. 22 października 2020r., Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 24 września 2020 r. w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów, www.isap.sejm.gov.pl

■