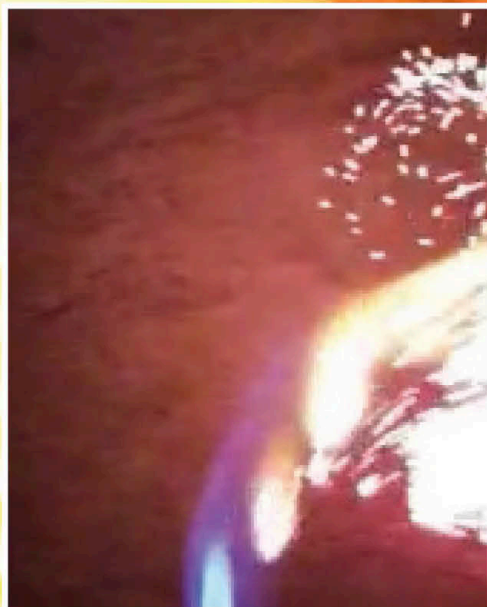


Seminarium

**Innowacyjne technologie
spalania paliw stałych
w transformacji przemysłu i energetyki**



Gliwice, kwiecień 2026



WYDAWNICTWO
POLITECHNIKI
POZNAŃSKIEJ

**Seminarium –
Innowacyjne technologie
spalania paliw stałych
w transformacji przemysłu i energetyki
– Gliwice kwiecień 2026**

**Seminarium –
Innowacyjne technologie
spalania paliw stałych
w transformacji przemysłu i energetyki
– Gliwice kwiecień 2026**

Projekt typograficzny, okładka, skład i łamanie
Maciej Torz

Grafika na okładce
z zasobów firmy KMB Catalyst

Książka została wydana bez redakcji językowej, a teksty opublikowano w formie
dostarczonej przez autorów.



CC-BY-SA, Poznań 2026

Zezwala się na korzystanie na warunkach licencji Creative Commons – uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 (znanej również jako CC-BY-SA) dostępnej pod adresem <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> lub innej wersji językowej tej licencji, lub którejkolwiek późniejszej wersji tej licencji opublikowanej przez organizację Creative Commons.

Wydanie 1

ISBN 978-83-7775-900-4

e-ISBN 978-83-7775-901-1

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1>

Poszczególne artykuły mają własne DOI.

Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5
61-138 Poznań
tel. 61 665 35 16
e-mail: office_ed@put.poznan.pl
wydawnictwo.put.poznan.pl

Spis treści

Wprowadzenie do monografii	7
D. Choiński, T. Hardy, M. Kozak Wykorzystanie metody Coats-Redfern dla określania energii aktywacji paliw stałych z modyfikatorami procesu spalania	13
P. Garbacz, R. Wejkowski, M. Tymoszuć Możliwości wykorzystania pyłowej komory opadowej jako modelu rzeczywistego kotła pyłowego w badaniach naukowych	21
T. Hardy, P. Bojarski, D. Choiński, S. Włodarczak, A. Krupińska, M. Ochowiak, Z. Bielecki Analiza techniczna oraz minimalna temperatura zapłonu paliw stałych zawierających modyfikatory procesu spalania.	27
K. Jagiełło, R. Lewtak, Z. Bielecki, D. Choiński, L. Maśniak Badania laboratoryjne, w skali ćwierć-technicznej, symulacje numeryczne, badania na obiektach przemysłowych – ścieżka realizacji badań przemysłowych i prac rozwojowych na przykładzie projektu „Modyfikator spalania” (POIR.04.01.02-00-0068/17)	35
R. Koteras, D. Choiński, J. Koteras Sprzęt i oprogramowanie dla klasyfikacji widma samoistnego promieniowania towarzyszącego procesom spalania	43
A. Krupińska, M. Ochowiak, S. Włodarczak, Z. Bielecki, M. Tymoszuć, T. Hardy Synergia hiperaddycyjna w układach katalitycznego wspomagania procesu spalania paliw stałych.	51
P. Lewiński, J. Sobieraj, Z. Bielecki Adaptacja kotła z podajnikiem dwutłokowym jako modelu kotła rusztowego do badań naukowych w skali półtechnicznej.	55

M. Ochowiak, Z. Bielecki, O. Ochowiak, S. Włodarczak, A. Krupińska, M. Matuszak Synergiczne modyfikatory spalania jako narzędzie intensyfikacji procesu spalania pyłu węglowego	63
M. Odziomek, P. Lewiński, Z. Bielecki, D. Choiński Badania procesu atomizacji dla otrzymywania metodą suszenia rozpyłowe- go dodatków biomasy do paliw stałych	67
M. Pronobis Perspektywy wykorzystania paliw stałych w energetyce i ciepłownictwie w świetle nadchodzących wyzwań	77
J. Smyła, M. Wojtas Technologia wytwarzania kwalifikowanego paliwa kompozytowego bazują- cego na węglu kamiennym oraz biomasie	85
J. Sobieraj, T. Maciejewski, W. Kurpas Optymalizacja procesu spalania i waloryzacja ubocznych produktów spala- nia dla wypełnienia założeń gospodarki o obiegu zamkniętym	93
S. Włodarczak, M. Ochowiak, A. Krupińska, D. Choiński, Z. Bielecki Charakterystyka spalania pyłu węglowego z dodatkiem biomasy otrzymanej metodą suszenia rozpyłowego	99

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.0>

Wprowadzenie do monografii

Niniejsza monografia naukowa stanowi opracowanie oparte na materiałach z seminarium naukowego *Innowacyjne technologie spalania paliw stałych w transformacji przemysłu i energetyki*, które odbyło się w Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w dniu 10 kwietnia 2026 roku. Wydarzenie zostało zorganizowane przez dra hab. inż. Dariusz Choiński prof. PŚ Dariusza Choińskiego koordynatora Podobszaru POB 6.5 „Innowacyjne technologie i zrównoważony rozwój” w ramach Priorytetowego Obszaru Badawczego „Ochrona klimatu i środowiska, nowoczesna energetyka” oraz firmę KMB Catalyst Sp. z o.o.. Seminarium zgromadziło przedstawicieli licznych ośrodków naukowych oraz instytucji badawczo-przemysłowych. W trakcie seminarium zaprezentowano kilkanaście referatów ukazujących zarówno jego założenia teoretyczne, jak i aspekty aplikacyjne. Obejmowały szerokie spektrum dotychczasowych badań realizowanych w ramach projektu *Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych*, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24). W spotkaniu uczestniczyli reprezentanci takich jednostek, jak Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska, Politechnika Poznańska, KMB Catalyst Sp. z o.o., Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Sztucznej Inteligencji i Cyberbezpieczeństwa, Centrum Naukowo-Przemysłowe EMAG, Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Procesów Ciepłych oraz Kuncar S.A.

Wystąpienie inicjujące naświetliło perspektywy wykorzystania paliw stałych w energetyce i ciepłownictwie w świetle nadchodzących wyzwań. Temat ten jest istotny, ponieważ często pojawiają się opinie, że badanie zjawisk zachodzących w kotłach na stałe paliwa kopalne nie ma już sensu. Wykazano jednak, że dalszy rozwój Krajowego Systemu Elektroenergetycznego KSE w sytuacji braku energetyki jądrowej musi uwzględniać klasyczne elektrownie jako niezbędny składnik chroniący parametry elektryczne systemu i zabezpieczający przed blackoutem w sytuacji dużego udziału niesterowalnych odnawialnych źródeł energii OZE (farmy wiatrowe

FW i fotowoltaika PV). Także w ciepłownictwie odejście od węgla ma sens, jeżeli jest on zastępowany biomasą Agro, natomiast substytucja gazem ziemnym jest dyskusyjna z uwagi na duży ślad węglowy tego paliwa. Wykazano ponadto, że domknięcie cyklu produkcyjnego energetyki w postaci utylizacji popiołu lotnego i żużla stwarza przestrzeń dla wprowadzania będących przedmiotem Projektu dodatków do spalania, ułatwiających spełnienie specyficznych wymagań dla takich Ubocznych Produktów Spalania (UPS).

Paliwa stałe w dalszym ciągu odgrywają istotną rolę w funkcjonowaniu KSE, a ich znaczenie w perspektywie krótkoterminowej pozostaje wysokie. Równocześnie UPS stanowią ważny strumień materiałowy, którego właściwe zagospodarowanie może ograniczać zużycie surowców pierwotnych i wspierać rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym. Warunkiem zwiększenia skali ich wykorzystania jest jednak dalszy rozwój badań, dostosowanie ram prawnych, poprawa jakości materiału oraz efektywna współpraca pomiędzy wszystkimi uczestnikami rynku. Szczęólnego znaczenia nabiera przy tym rozwój technologii waloryzacji UPS pochodzących ze spalania biomasy, które obecnie charakteryzują się relatywnie niższym poziomem zagospodarowania.

Modyfikatory katalityczne dodawane do węgla kamiennego dają możliwość optymalizacji procesu spalania pyłu węglowego. W ramach Projektu przeprowadzono analizę techniczną oraz badania minimalnej temperatury zapłonu MTZ paliw stałych zawierających szeroką gamę takich modyfikatorów. Uzyskano wyniki potwierdzające, że dodatki katalityczne mogą znacząco obniżyć MTZ obłoku pyłowego (nawet o ok. 80 K), poprawiając reaktywność węgla i potencjalnie efektywność spalania w kotłach energetycznych. Modyfikatory mogą także wpływać korzystnie na niektóre parametry techniczne węgla, np. zwiększając wydzielanie części lotnych, niektóre z nich mogą podnosić wartość opałową, co potwierdza ich potencjał w zastosowaniu do optymalizacji procesu spalania węgla.

Współspalanie biomasy z węglem stanowi efektywną i szeroko stosowaną technologię, pozwalającą ograniczyć zużycie paliw kopalnych, zmniejszyć emisję zanieczyszczeń oraz zwiększyć udział energii odnawialnej przy niewielkich modyfikacjach istniejącej infrastruktury. Proces ten daje efekt synergiczny, poprawiając reaktywność paliwa i parametry spalania. Celem kolejnych badań było sprawdzenie, czy zastosowanie maltodekstryny o kontrolowanej morfologii i rozmiarze cząstek może poprawić parametry spalania. Wyniki badań pirolizy wykazały, że obecność biomasy wpływa na przebieg rozkładu termicznego paliwa. Zaobserwowano zwiększone wydzielanie CO, co wskazuje na intensyfikację reakcji związanych z rozkładem grup tlenowych obecnych w strukturze węgla. Badania temperatury zapłonu wyka-

zały wyraźną poprawę właściwości zapłonowych mieszanin zawierających biomasę. Czysty węgiel zapalał się w temperaturze ok. 570°C, natomiast mieszanina z dodatkiem biomasy ulegała zapłonowi już w ok. 520°C. Dodatkowo odnotowano wzrost zawartości części lotnych o ok. 9%, co sprzyja łatwiejszemu inicjowaniu spalania.

Ponieważ w literaturze opisano dziesiątki modyfikatorów spalania, istotne jest wytypowanie takich, które w warunkach panujących w kotłach energetycznych działałyby najskuteczniej. Dlatego po analizie literaturowej wybrano kilkanaście potencjalnie najkorzystniejszych substancji oraz ich układów wieloskładnikowych, jak m.in. związki niklu, miedzi, sodu, potasu, żelaza, manganu, ceru oraz wapnia. Wspólną cechą większości analizowanych układów jest obecność związków o właściwościach utleniających, w szczególności soli nieorganicznych oraz tlenków metali przejściowych. W wielu przypadkach obserwuje się synergiczny efekt działania układów wieloskładnikowych, zwłaszcza tych zawierających azotan wapnia czterowodny w połączeniu z tlenkami metali.

Jedną z metod umożliwiających wytwarzanie dodatków do paliw stałych na bazie biomasy, wykazujących potencjalne właściwości poprawiające proces spalania, jest suszenie rozpyłowe. Umożliwia ono przekształcenie biomasy z formy ciekłej - najczęściej roztworu lub zawiesiny zawierającej modyfikatory spalania w proszek, który może stanowić dodatek do paliw stałych. Dla potrzeb Projektu badano suszenie maltodekstryny.

Konieczność zapewnienia efektywności energetycznej oraz ograniczania emisji substancji szkodliwych z kotłów przemysłowych wymaga precyzyjnej kontroli procesów zachodzących w komorze paleniskowej. Jest to szczególnie istotne podczas stosowania katalizatorów spalania, które modyfikują mechanizm utleniania węgla. Obiecującą propozycją jest tu diagnostyka optyczna oparta na analizie chemiluminescencji wzbudzonych rodników gazowych, która umożliwia bezkontaktowe wyznaczenie stosunku nadmiaru powietrza oraz monitorowanie stabilności frontu płomienia. W kolejnej prezentacji przedstawiono system diagnostyczny, który integruje wielospektralną akwizycję danych z sensorów pracujących w szerokim paśmie od 200 nm do 14 μm z zaawansowanym przetwarzaniem sygnałowym w celu precyzyjnej klasyfikacji stanów procesu spalania.

Innowacyjne systemy diagnostyczne wymagają badań zarówno w skali laboratoryjnej jak i przemysłowej. Przykładem badań w skali ćwierćtechnicznej są próby na stanowisku Instytutu Energetyki z komorą spalania o mocy 0,5 MW. Ich wyniki posłużyły do walidacji modelu numerycznego procesu spalania. Badania te kontynuowano w pełnej skali technicznej w kotle pyłowym OP-430 EC Siewierki oraz w kotle rusztowym WR-25 w PEC Gliwice.

Kolejnym stanowiskiem testowym wykorzystywanym w ramach Projektu jest Pyłowa Komora Badawcza (PKB) Politechniki Śląskiej o maksymalnej mocy 50 kW. Głównym elementem PKB jest pionowy reaktor ze stali żarowytrzymałej i kwasoodpornej, o średnicy wewnętrznej 300 mm i długości 4000 mm. PKB zapewnia wysoki stopień kontroli parametrów procesowych oraz możliwość odwzorowania kluczowych zjawisk fizykochemicznych.

Spalanie węgla kamiennego to złożony proces obejmujący reakcje w fazie gazowej i w stanie stałym. Dodanie modyfikatorów spalania w postaci biomasy dodatkowo komplikuje ten proces. Przedstawione w kolejnej prezentacji badania energii aktywacji wykazały, że dodatek biomasy obniża wartość energii aktywacji dla fazy spalania. Dla fazy rozkładu termicznego dodatek biomasy podwyższa wartość energii aktywacji, przy czym impregnacja węgla powoduje większy wzrost niż dodanie biomasy w postaci pyłu.

Jedną z form współspalania biomasy z węglem są paliwa kompozytowe w postaci mikrobrykietów. Przedstawiona technologia pozwala zagospodarować nieprzydatną dotąd frakcję węgla drobną do 5 mm. Badania wykazały, że paliwo w postaci brykietów spala się znacznie lepiej niż węgiel kawałkowy. Większa reaktywność brykietu względem węgla kawałkowego pozwala ograniczyć strumień powietrza o ok. 10%, co zmniejsza objętość spalin i stratę wylotową. Ograniczenie prędkości unoszenia pyłu prowadzi natomiast do obniżenia emisji.

Seminarium *Innowacyjne technologie spalania paliw stałych w transformacji przemysłu i energetyki* stanowiło interdyscyplinarne forum wymiany wiedzy i doświadczeń pomiędzy przedstawicielami środowiska naukowego, jednostek badawczych oraz przemysłu. Program wydarzenia obejmował szeroki zakres zagadnień – od podstaw teoretycznych procesów spalania, poprzez badania eksperymentalne i modelowanie numeryczne, aż po rozwiązania aplikacyjne wdrażane w warunkach rzeczywistych. Wydarzenie stworzyło przestrzeń do prezentacji aktualnych kierunków badań oraz dyskusji nad wyzwaniami stojącymi przed sektorem energetycznym i przemysłowym w warunkach transformacji technologicznej. Udział przedstawicieli wielu ośrodków akademickich i instytucji badawczo-przemysłowych sprzyjał konfrontacji różnych podejść badawczych, wymianie doświadczeń oraz identyfikacji obszarów wymagających dalszych wspólnych działań. Istotnym elementem spotkania była możliwość bezpośredniego dialogu pomiędzy środowiskiem nauki a praktyką gospodarczą, co pozwalało na lepsze dostosowanie kierunków badań do realnych potrzeb przemysłu. Seminarium stanowiło również platformę do budowania i wzmacniania relacji międzyinstytucjonalnych, sprzyjając inicjowaniu nowych projektów badawczych oraz rozwijaniu istniejącej

współpracy. Wymiana poglądów i doświadczeń umożliwiła szersze spojrzenie na kierunki rozwoju nowoczesnych technologii oraz ich potencjalne zastosowania w różnych obszarach gospodarki.

Komitet Organizacyjny i Naukowy

Komitet Organizacyjny i Naukowy
(w kolejności alfabetycznej)

Dr inż. Zdzisław Bielecki

Dr hab. inż. Dariusz Choiński prof. PŚ

Dr hab. inż. Tomasz Hardy prof. PWr

Mgr inż. Krzysztof Jagiełło

Dr inż. Andżelika Krupińska

Prof. dr hab. inż. Marek Ochowiak

Dr inż. Marcin Odziomek

Prof. dr hab. inż. Marek Pronobis

Dr inż. Sylwia Włodarczak

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.1>

Wykorzystanie metody Coats-Redfern dla określania energii aktywacji paliw stałych z modyfikatorami procesu spalania

DARIUSZ CHOIŃSKI^{1*}, TOMASZ HARDY², MICHAŁ KOZAK³

¹ Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

² Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny

³ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

* dariusz.choinski@polsl.pl

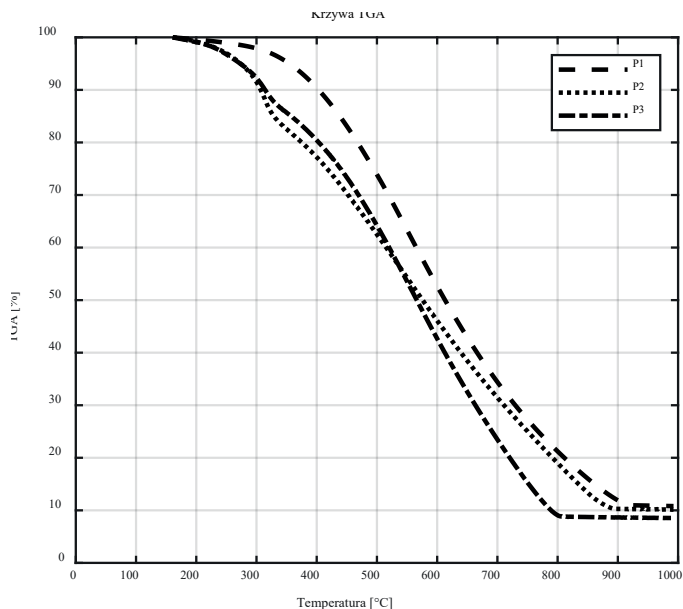
Słowa kluczowe: współspalanie, modyfikatory spalania, energia aktywacji

Spalanie węgla kamiennego to złożony proces obejmujący reakcje w fazie gazowej i w stanie stałym. Proces ten dodatkowo komplikuje dodanie modyfikatorów procesu spalania w postaci biomasy [1]. Prezentowane badania odnoszą się do biomasy będącej złożonymi węglowodanami o długości od 3 do 14 merów.

Zaprezentowano wyniki badań trzech próbek: P1- węgiel kamienny, P2 i P3 – węgiel z modyfikatorem osadzonym dwoma metodami. Próbką P1 zawierała wyłącznie sam pył węgla kamiennego o rozmiarze ziarna 70-90 μm . Wykorzystano węgiel z kopalni Janina. Próbkę P2 i P3 zawierają pył węgla zgodny z próbką P1 oraz ten sam modyfikator, tylko przygotowany w innej technologii. Badania przeprowadzono na analizatorze termogravimetrycznym PerkinElmer TGA 8000 o dokładności lepszej niż 0.02%. Wyniki tych badań przedstawiono na Rys. 1.

Celem badań było sprawdzenie wpływu modyfikatora oraz jak się zmienia jego oddziaływanie w zależności od sposobu jego przygotowania i połączenia z paliwem. W próbkach P2 i P3 modyfikator stanowi 1: 32 masy węgla. Próbką 2 to efekt impre-

gnacji cząstek węgla roztworem modyfikatora. Wykorzystano fakt, że węglowodany są łatwo rozpuszczalne w wodzie. Próbka 3 to mieszanina pyłu węgla kamiennego i pyłu modyfikatora o wymiarach 10-20 μm uzyskanego z suszarki rozpyłowej.



Rys. 1. Wynik pomiaru termograwimetrycznego dla trzech próbek

W Tabeli 1 zostały przedstawione wyniki analizy technicznej i elementarnej badanych próbek. W tabeli podano zawartość wilgoci w próbce analitycznej (M) oraz dla substancji suchej zawartość części lotnych (V), popiołu (A), węgla (C), wodoru (H), siarki (S) oraz ciepło spalania (Q_s).

Tabela 1. Analiza techniczna i elementarna badanych próbek

Próbka	M^a , %	V^d , %	A^d , %	Q_s^d , kJ/kg	C^d , %	H^d , %	S^d , %
P1	5,08	35,54	11,63	26 253	66,15	4,90	1,14
P2	6,79	43,75	10,67	24 414	61,16	5,46	0,93
P3	5,81	44,59	8,77	25 167	63,77	5,705	0,913

Próbki P2 i P3 zawierające biomasę charakteryzują się niższą zawartością węgla oraz niższą wartością ciepła spalania. Jednocześnie udział biomasy skutkuje wyższą zawartością części lotnych, w tym wodoru, a jednocześnie niższą zawartością popiołu oraz siarki.

Analiza termogravimetryczna pozwala określić stabilność termiczną każdej z próbek. Badanie przeprowadzono w atmosferze powietrza syntetycznego (mieszania tlen/azot) z ustalonym przepływem 35 ml/min. Szybkość ogrzewania próbek, których masa wynosiła od 14 do 19 mg, była ustalona na 30°C na minutę. Charakter rozkładu lepiej jest widoczny na wykresie DTG (Rys. 2), czyli przebiegu ujemnej pochodnej utraty masy w trakcie rozkładu termicznego. Na obydwu wykresach (TGA i DTG) pominięto fazę odparowania próbek, a także przyrost masy związany z utlenianiem. Widoczne są fazy rozkładu termicznego, spalania i wypalenia próbek. Na fig. 3 są zdjęcia pozostałości poszczególnych próbek. Różnice dotyczące pozostałości są także widoczne w masie próbek po wypaleniu na wykresie TGA. Dla próbki P1 pozostałość procentowo wynosiła 10.9 %, dla P2 10.2%, a dla P3 8.5%, co także pokrywa się z zawartością popiołu określoną przy analizie technicznej (Tabela 2).

Wykresy TGA i DTG wykazują wpływ zawartości biomasy i jej szybszego rozkładu termicznego, a także różną kinetykę procesu spalania. Dla określenia parametrów kinetycznych można posłużyć się równaniem Arrheniusa:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A e^{\frac{-E_a}{RT}} f(\alpha), \quad (1)$$

gdzie: t jest czasem, A - czynnik częstości, E_a - energia aktywacji, R - stała gazowa, T - temperatura bezwzględna, a $f(\alpha)$ jest określone przez mechanizm reakcji. Natomiast α jest współczynnikiem konwersji masy wrażonym wzorem:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_T}{m_0 - m_f}, \quad (2)$$

gdzie: m_0 - masa początkowa, m_T - masa dla temperatury T , m_f - masa końcowa. Jeżeli przyjąć stałą szybkość nagrzewania $\beta = dT/dt$, w prezentowanych badaniach wynosiła 30K/min, to równanie (1) może być przedstawione w postaci:

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T -e^{\frac{E}{RT}} dT, \quad (3)$$

gdzie $g(\alpha)$ jest funkcją mechanizmu reakcji konwersji. Przy założeniu reakcji pierwszego rzędu można przyjąć $g(\alpha) = -\ln(1 - \alpha)$. Metoda Coatsa-Redferna jest szeroko stosowana do obliczania parametrów kinetycznych węgla i biomasy podczas współspalania [2]. Stosując tą transformację i całkując równanie (3) otrzymujemy:

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left[\frac{AR}{\beta E_a} \left(1 - \frac{2RT}{E_a}\right)\right] - \frac{E_a}{RT}, \quad (4)$$

oraz stosując uproszczenie, że $2RT/E_a \ll 1$, można otrzymać:

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E_a}\right) - \frac{E_a}{RT}. \quad (5)$$

Podstawiając:

$$y = \ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right), \quad (6)$$

$$x = \frac{1}{T}, \quad (7)$$

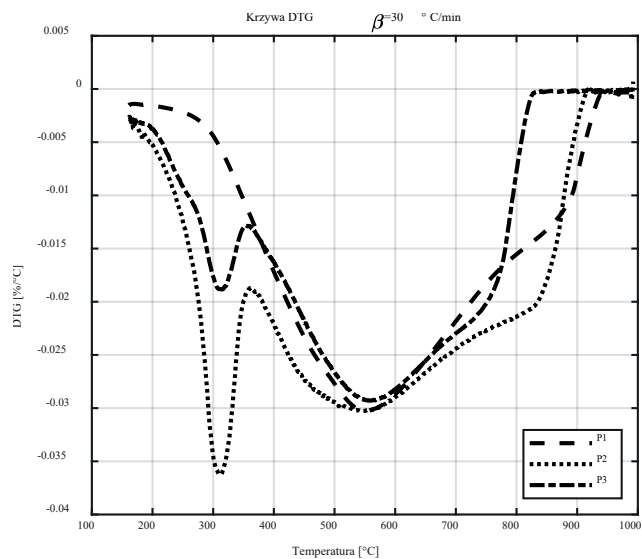
oraz aproksymując wykres $y = f(x)$ wielomianem $y = ax + b$, można wyliczyć:

$$E_a = -aR, \quad (8)$$

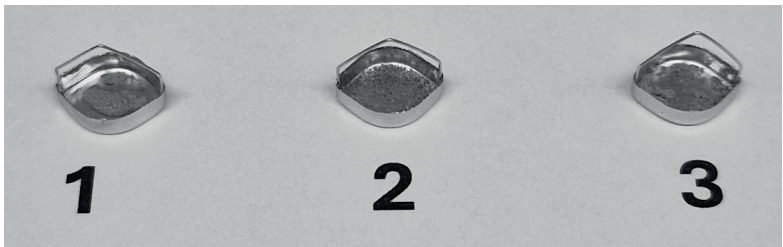
$$A = \frac{E_a \beta}{R} e^b. \quad (9)$$

Danymi wejściowymi są wartości masy próbki w czasie analizy termogravimetrycznej TGA (Rys. 1) dla obliczenia przebiegu współczynnika konwersji α według wzoru (2). Charakter przebiegu DTG (Rys. 2) wskazuje, że dla próbek P2 i P3 (węgiel z biomasą) początkowe fazy rozkładu przebiegały odmiennie w stosunku do próbki P1 (wyłącznie węgiel). Dlatego obliczenia energii aktywacji przeprowadzono dla dwóch zakresów temperatury [4]. Dla fazy spalania przyjęto zakres od 340°C do 800°C, a dla fazy rozkładu termicznego zakres od 200°C do 340°C [3].

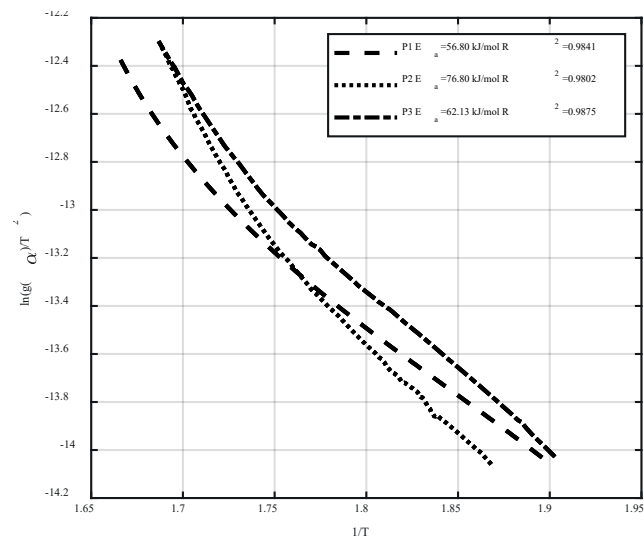
W tych zakresach temperatur wyniki analizy TGA posłużyły do wyznaczenia przebiegu funkcji mechanizmu konwersji (równanie 3) na podstawie wartości konwersji α zgodnie z równaniem 4. Dla zapewnienia liniowości, do obliczeń przyjęto α w zakresie 0.2-0.8. Na Rys. 4 zostały przedstawione wykresy funkcji zgodnej z wzorem (6) i (7) oraz aproksymacje energii aktywacji z wykorzystaniem wzoru (8) dla pierwszego zakresu temperatur od 200°C do 340°C, a na Rys. 5 analogicznie dla drugiego zakresu temperatur od 340 °C do 800 °C. Energia aktywacji została wyliczona z nachylenia wykresu wraz z kontrolą współczynnika liniowości, obie wartości są podane na wykresach.



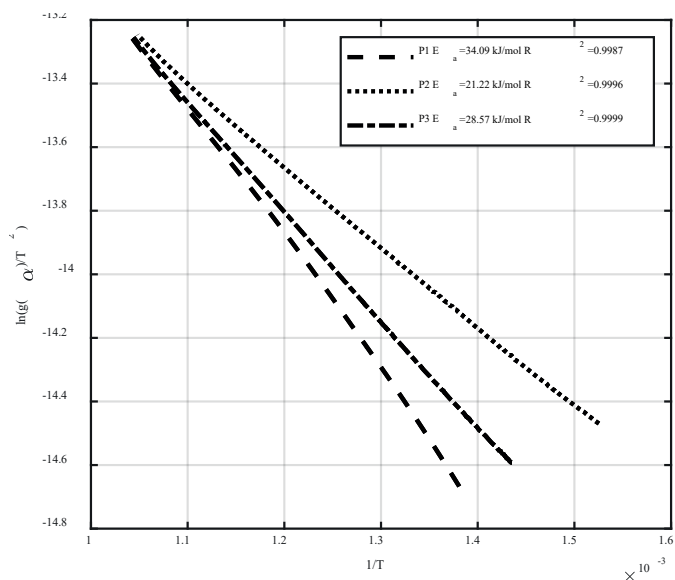
Rys. 2. Przebieg DTG dla poszczególnych próbek



Rys. 3. Pozostałości trzech próbek po badaniu TGA



Rys. 4. Aproksymacja energii aktywacji dla pierwszego zakresu temperatur



Rys. 5. Aproksymacja energii aktywacji dla drugiego zakresu temperatur

Tabela 2 przedstawia zbiorczo wyliczone wartości energii aktywacji wraz z rzeczywistymi zakresami temperatur uwzględniającymi liniowy zakres współczynnika konwersji α oraz współczynnik liniowości. Można zauważyć, że w badanych zakresach liniowość nie była gorsza niż 98%. Przedstawione badania wykorzystały jako biomasę węglowodony, co umożliwiło wyeliminowanie wpływu rozmiaru i kształtu cząstek biomasy oraz pozostałości jej spalania. Dzięki temu można sformułować wnioski o wpływie biomasy tylko na poziomie kinetyki reakcji wynikającej ze zmiany składu chemicznego. Dodatek biomasy obniża wartość energii aktywacji dla fazy spalania. Dla fazy rozkładu termicznego dodatek biomasy, a co za tym idzie rozkład dwóch typów substancji podwyższa wartość energii aktywacji, przy czym impregnacja węgla powoduje większy wzrost niż dodanie biomasy w postaci pyłu.

Tabela 2. Energia aktywacji

Próbka	Energia aktywacji	R ²	Zakres temperatur dla 0.2< α <0.8
P1	56.80 kJ/mol	0.9841	254°C do 328°C
P2	76.80 kJ/mol	0.9802	262°C do 319°C
P3	62.13 kJ/mol	0.9875	252°C do 320°C
P1	34.09 kJ/mol	0.9987	451°C do 686°C
P2	21.22 kJ/mol	0.9996	382°C do 681°C
P3	28.57 kJ/mol	0.9999	424°C do 685°C

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Guo, F., et al., *Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal*, Energy 197 (2020) 117147.
- [2] Monir M. U., et al., *Comprehensive characterization and kinetic analysis of coconut shell thermal degradation: Energy potential evaluated via the Coats-Redfern method*, Case Studies in Thermal Engineering 55 (2024) 104186.
- [3] Huang, X.-J., et al. *Pyrolysis kinetic analysis of sequential extract residues from Hefeng subbituminous coal based on the Coats-Redfern method*, Acs Omega 7.25 (2022): 21397-21406.
- [4] Agacayak, T., *Investigation of Combustion Kinetic with Coats-Redfern Method by Using Thermogravimetric Data of Different Lignite Samples*, Journal of Mining Science 58.5 (2022): 776-782.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.2>

Możliwości wykorzystania pyłowej komory opadowej jako modelu rzeczywistego kotła pyłowego w badaniach naukowych

**PRZEMYSŁAW GARBACZ¹, ROBERT WEJKOWSKI¹,
MATEUSZ TYMOSZUK¹**

¹ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

* przemyslaw.garbacz@polsl.pl

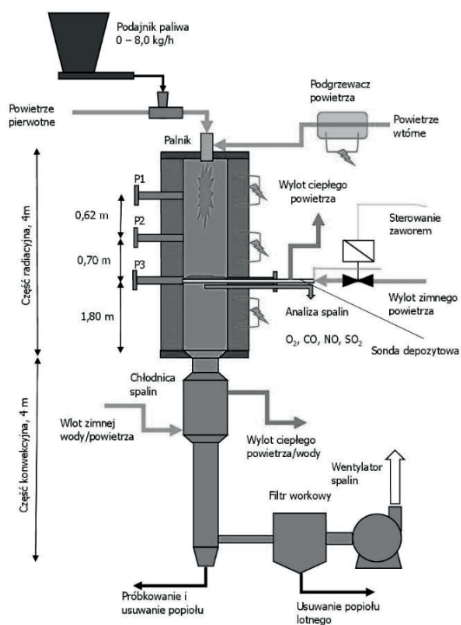
Słowa kluczowe: spalanie, paliwa stałe, modyfikatory spalania,

W obliczu postępującej transformacji energetycznej oraz zaostrzających się regulacji środowiskowych obserwuje się nieustającą intensyfikację badań nad technologiami umożliwiającymi ograniczenie emisji zanieczyszczeń powstających w procesach spalania paliw stałych. Dążenie do redukcji emisji gazów cieplarnianych, tlenków azotu, tlenków siarki oraz metali ciężkich, przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności konwersji energii chemicznej paliwa, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej energetyki. Szczególnego znaczenia nabierają rozwiązania pozwalające na optymalizację procesów spalania w istniejących instalacjach, co umożliwia ich dalszą eksploatację w sposób bardziej przyjazny środowisku, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa energetycznego.

W tym kontekście istotną rolę odgrywają badania eksperymentalne prowadzone w warunkach kontrolowanych, umożliwiające analizę mechanizmów powstawania zanieczyszczeń oraz ocenę skuteczności metod ich ograniczania. Rozwój technologii pierwotnych i wtórnych redukcji emisji, zastosowanie dodatków paliwowych, współspalanie biomasy oraz wykorzystanie materiałów katalitycznych stanowią kluczowe kierunki badań wpisujące się w strategię dekarbonizacji sektora energetycznego.

Wchodząca w skład laboratorium konwersji termicznej paliw stałych na Politechnice Śląskiej, Pyłowa Komora Badawcza (PKB) stanowi wysokotemperaturowy reaktor

przepływowy przeznaczony do badań procesów spalania paliw stałych, w szczególności węgla kamiennego oraz biomasy (Rys. 1). Głównym elementem instalacji jest pionowy reaktor rurowy wykonany ze stali żarowytrzymałej i kwasoodpornej, o średnicy wewnętrznej 300 mm i długości 4000 mm. Układ grzania elektrycznego, złożony z trzech niezależnych sekcji grzewczych o łącznej mocy 30 kW, umożliwia prowadzenie eksperymentów w warunkach wysokotemperaturowych, przy maksymalnej temperaturze pracy ciągłej wynoszącej 1050°C. Reaktor wyposażony jest w palnik pyłowy zlokalizowany w jego górnej części, umożliwiając spalanie paliw w postaci pyłów. Do palnika doprowadzane jest powietrze pierwotne (w postaci mieszaniny pyłowo-powietrznej) oraz powietrze wtórne, co pozwala na kontrolę warunków stechiometrycznych i kinetyki spalania przy założeniu spalania niskoemisyjnego. System dozowania paliwa oparty na podajniku grawimetrycznym K-TRON umożliwia precyzyjne podawanie materiału w zakresie 0–8,0 kg/h, z wysoką precyzją podawania paliwa rzędu $\pm 0,0001$ kg/h, co zapewnia powtarzalność warunków eksperymentalnych. Komora paleniskowa (reaktor) wyposażona jest w 7-punktowy pomiar temperatury gazu oraz możliwość analizy widma płomienia przez trzypoziomowy układ króćców wziernikowych (P1 – P3). Na poziomie wziernika P3 ulokowany jest lustrzany wziernik, który umożliwia pobór próbek pyłu odpowiadającego osadowi gromadzącemu się na powierzchniach ogrzewalnych przegrzewacza na wylocie z komory paleniskowej w rzeczywistym kotle przemysłowym.



Rys. 1. Pyłowa komora badawcza

W dolnej, konwekcyjnej części reaktora zainstalowano układ chłodzenia spalin oraz system poboru próbek stałych o cięższej frakcji (żużla), umożliwiający analizę produktów spalania. Na wylocie gazów zastosowano filtr workowy do separacji popiołu lotnego. Całość instalacji zintegrowana jest z systemem sterowania i akwizycji danych, pozwalającym na ciągły monitoring oraz archiwizację parametrów procesowych.

Stanowisko daje możliwość uzyskania quasi-liniowego rozkładu temperatury wzdłuż osi reaktora oraz kontroli parametrów operacyjnych, co umożliwia odwzorowanie warunków pracy przemysłowych kotłów pyłowych w skali technicznej.

Stanowisko znajduje zastosowanie w badaniach obejmujących m.in.: wpływ dodatków paliwowych na przebieg spalania, charakterystykę emisji zanieczyszczeń gazowych (w tym metali ciężkich), mechanizmy pierwotnej redukcji tlenków azotu poprzez stopniowanie powietrza, wtórne metody redukcji NO_x z wykorzystaniem procesów katalitycznych (np. SCR) [1], efektywność konwersji NO do N_2 oraz dezaktywację katalizatorów, współspalanie biomasy z węglem i paliwami alternatywnymi [2], wpływ rozdrobnienia paliwa na stopień dopalenia cząstek, a także zjawiska korozji wysokotemperaturowej i trwałość powierzchni ogrzewalnych z wykorzystaniem sond depozytowych [3]. Analiza współspalania paliw z haloizytem na PKB była przedmiotem badań numerycznych przedstawionych w [4].

Odwzorowanie procesu spalania w kotle pyłowym na PKB

W procesie odwzorowania spalania w kotle pyłowym na stanowisku laboratoryjnym kluczowym wymaganiem jest zachowanie podobieństwa zjawisk fizykochemicznych oraz ich dynamiki w skali modelowej względem obiektu rzeczywistego. Oznacza to konieczność spełnienia kryteriów podobieństwa geometrycznego, kinematycznego i dynamicznego. Istotne jest odwzorowanie charakterystyki przepływu mieszaniny pyłowo-powietrznej, czasu przebywania cząstek w strefie spalania oraz kinetyki reakcji utleniania, gdyż to one determinują stabilność płomienia i efektywność konwersji paliwa. Niespełnienie warunków podobieństwa może prowadzić do istotnych rozbieżności w przebiegu procesu, co ogranicza wiarygodność wyników badań i ich możliwość ekstrapolacji do warunków przemysłowych.

Stanowisko PKB zostało zaprojektowane w sposób umożliwiający odzwierciedlenie spalania pyłu węglowego o maksymalnej mocy 50 kW, co oznacza skalę od stu do nawet kilku tysięcy razy mniejszą niż w przypadku obiektów przemysłowych. Analiza wykazuje, że pomimo ograniczeń wynikających ze skali laboratoryjnej, stanowisko PKB umożliwia odwzorowanie dominujących mechanizmów

spalania zachodzących w kotłach pyłowych. Możliwe jest odtworzenie procesu zapłonu i spalania części lotnych, utleniania koksiku oraz formowania produktów spalania. Jednocześnie należy podkreślić, że pełne zachowanie podobieństwa dynamicznego nie jest możliwe, co wynika m.in. z różnic w skali turbulencji, rozkładach pól prędkości oraz intensywności wymiany ciepła przez promieniowanie. Ograniczenia te należy uwzględnić przy interpretacji wyników i ich ekstrapolacji do warunków przemysłowych.

Metodyka badań prowadzonych na stanowisku obejmuje kompleksową charakterystykę paliwa, wyznaczenie warunków spalania oraz analizę ubocznych produktów spalania (UPS). W pierwszym etapie wykonywana jest analiza elementarna paliwa (pierwiastki C, H, N, O, S), określana jest jego wartość opałowa oraz rozkład ziarnowy. Na tej podstawie obliczane jest zapotrzebowanie powietrza do spalania oraz ustalany współczynnik nadmiaru powietrza. Następnie prowadzone jest wygrzewanie reaktora do temperatury roboczej oraz stabilizacja warunków przepływowych. Proces spalania realizowany jest przy kontrolowanym rozdziale powietrza pierwotnego i wtórnego, co umożliwia symulację warunków spalania niskoemisyjnego.

W trakcie eksperymentów prowadzony jest ciągły pomiar parametrów procesowych, w tym temperatury i składu gazów spalinowych. Równocześnie analizowane są produkty spalania w postaci popiołu lotnego i żużła, co pozwala na ocenę stopnia dopalenia paliwa oraz identyfikację zjawisk związanych z tworzeniem osadów. Aktualnie szczególne znaczenie mają badania naukowe nad wpływem zastosowania dodatków paliwowych, mających zdolność do modyfikacji przebiegu spalania.

Ocena wpływu dodatków paliwowych powinna obejmować m.in:

- wpływ zastosowania dodatków paliwowych na ograniczenie nadmiaru stechiometrycznego powietrza do spalania,
- zawartość części palnych w popiele/żużlu poprzez analizę ilości niedopalonej materii oraz wpływu dodatków na intensyfikację wypalenia cząstek paliwa,
- emisję NO_x obejmującą ciągły monitoring stężenia NO i NO_2 oraz analizę wpływu dodatków na mechanizmy tworzenia i redukcji tlenków azotu,
- skłonność do tworzenia osadów, badana przy użyciu sondy depozytowej, w tym tempo narastania, masę oraz własności osadów na powierzchniach ogrzewalnych.

Badania laboratoryjne powinny mieć przede wszystkim charakter porównawczy, tj. odniesienie zmierzonych parametrów procesu podczas spalania paliwa z modyfikatorem do parametrów zmierzonych w trakcie spalania paliwa surowego (bez dodatków). Podobne podejście należy zastosować dla analizowanych laboratoryjnie parametrów dotyczących żużla i popiołu lotnego.

Rezultaty badań umożliwiają identyfikację efektywnych dodatków paliwowych poprawiających jakość spalania i ograniczających negatywne oddziaływanie procesu na środowisko. Wyniki stanowią podstawę do opracowania zaleceń dla ich praktycznego zastosowania w instalacjach energetycznych oraz do dalszego rozwoju technologii niskoemisyjnego spalania.

Podsumowanie

Pyłowa Komora Badawcza stanowi zaawansowane narzędzie umożliwiające prowadzenie badań nad spalaniem paliw stałych w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Pomimo ograniczeń wynikających ze skali laboratoryjnej, stanowisko zapewnia wysoki stopień kontroli parametrów procesowych oraz możliwość odwzorowania kluczowych zjawisk fizykochemicznych. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do opracowania i wdrażania rozwiązań technologicznych ukierunkowanych na poprawę efektywności energetycznej oraz ograniczenie negatywnego oddziaływania procesów spalania na środowisko.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Pronobis M., Kalisz S., Mroczek K., Walewski A., Wejkowski R., Wojnar W., Gądek W., Kress T., Tymoszek M., Maj I., *Studies on the effectiveness of SCR catalysts during combustion of pulverized coal*, E3S Web Conf. 82 (2019) 01014.
- [2] Wnorowska J., Gądek W., Kalisz S., *Statistical model for prediction of ash fusion temperatures from additive doped biomass*, Energies 13 (2020) 6543.
- [3] Kalisz S., Gądek W., Wnorowska J., Maj I., Ciukaj S., Plaza P., Mack A., Maier J., *Investigation of deposits formation in steam superheaters during combustion of halloysite doped biomass*, 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27 - 30 May 2019, Lisbon, Portugal.
- [4] Hernik B., Wnorowska J., *Numerical research on combustion processes and deposit formation on the deposition probe in the pulverized drop chamber*, Renew. Energy 187 (2022).

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.3>

Analiza techniczna oraz minimalna temperatura zapłonu paliw stałych zawierających modyfikatory procesu spalania

**TOMASZ HARDY^{*1}, PIOTR BOJARSKI¹, DARIUSZ CHOIŃSKI²,
SYLWIA WŁODARCZAK³, ANDŻELIKA KRUPIŃSKA³,
MAREK OCHOWIAK³, ZDZISŁAW BIELECKI⁴**

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny

²Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

³Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej

⁴KMB Catalyst Sp. z o.o.

^{*}tomasz.hardy@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: pył węglowy, temperatura zapłonu, modyfikatory spalania

Stosowanie modyfikatorów katalitycznych dodawanych do węgla kamiennego wydaje się celowe ze względu na możliwość optymalizacji procesu spalania pyłu węglowego, w tym obniżenie minimalnej temperatury zapłonu, poprawę reaktywności paliwa i efektywności jego wypalenia. Wśród wykorzystywanych modyfikatorów wymienić można między innymi związki metali alkalicznych, zwłaszcza potas i sód, a także miedź oraz niektóre związki wapnia, przy czym efekt zależy silnie od typu węgla i formy chemicznej dodatku [1][2][3]. Dodatki do paliwa mogą ułatwić zarówno obniżenie temperatury zapłonu węgla [3][4], skutecznie obniżają redukcję emisji NO jak i poprawić stopień wypalenia paliwa [5][6].

Niniejsza praca wstępnie analizuje wpływ wybranych modyfikatorów na wyniki analiz technicznych i elementarnych oraz na minimalną temperaturę zapłonu (MTZ) pyłu węgla kamiennego, weryfikując ich potencjał zastosowania w energety-

ce. Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłowego jest krytycznym parametrem bezpieczeństwa (dot. ryzyka eksplozji pyłu) ale także optymalizacji procesu spalania w kotłach pyłowych, gdyż określa próg inicjacji reakcji spalania, minimalizując ryzyko niedopału paliwa. Analizę techniczną paliw (wilgotność, popiół, części lotne) wykonano na analizatorze ELTRA Thermostep (Rys.1) zgodnie z normami ISO 18134-3, ISO 18122 i ISO 18123. Ciepło spalania oznaczono za pomocą kalorymetru IKA C5000, zgodnie z ISO 1928:2020. Skład pierwiastkowy paliw określono natomiast za pomocą analizatora Eltra CHS-580, zgodnie z normami ISO 16948 (C, H) oraz ISO 15178 (S).



Rys.1. Stanowiska laboratoryjne wykorzystane do wykonania analizy technicznej i elementarnej badanych paliw

W pierwszym etapie badaniom poddano próbki węgla kamiennego z KWK Janina (próbka P1) oraz węgla z modyfikatorem wprowadzonym dwoma metodami (próbki P2 i P3) i czystego modyfikatora. Wyniki przedstawiono w Tabeli 1. W przypadku tych próbek zaobserwowano między innymi wyraźne różnice w wartości opałowej spowodowane dodaniem do węgla modyfikatora i niższej kaloryczności niż węgiel.

Tabela 1. Analiza techniczna i elementarna paliw - czystego węgla kamiennego (P1), węgla z modyfikatorem (P2, P3) oraz czystego modyfikatora (M)

Próbka	M ^a , %	V ^d , %	A ^d , %	Q _s ^d , kJ/kg	Q _i ^d , kJ/kg	C ^d , %	H ^d , %	S ^d , %
P1	5,08	35,54	11,63	26 253	24 997	66,15	4,90	1,14
P2	6,79	43,75	10,67	24 414	22 956	61,16	5,46	0,93
P3	5,81	44,59	8,77	25 167	23 674	63,77	5,71	0,91
M	8,02	98,12	1,41	16 560	14 677	46,24	7,65	0,11

W kolejnym etapie badaniom poddano próbki węgla kamiennego z modyfikatorami opracowanymi w Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. Próbki J01–J17 (J oznacza węgiel kamienny z KWK Janina, a liczba – kolejną próbkę) stanowią zestaw badanych układów z różnymi dodatkami nieorganicznymi i organicznymi, zastosowanymi pojedynczo lub w kombinacjach, co pozwala na ocenę wpływu rodzaju substancji, ich stężenia oraz obecności izopropanolu na właściwości układów. Szczegółowy skład poszczególnych próbek jest następujący: J01 zawiera 1% tlenku miedzi(II) oraz 1% azotanu wapnia czterowodnego; J02 – 1% chlorku potasu i 1% azotanu wapnia czterowodnego; J03 – 1% tlenku manganu oraz 1% tlenku miedzi(II); J04 – 1% tlenku ceru i 1% azotanu wapnia czterowodnego; J05 – 1% nadmanganianu potasu, 1% tlenku żelaza(III) oraz 1% azotanu wapnia czterowodnego; J06 – 1% tlenku manganu; J07 – 1% azotanu wapnia czterowodnego; J08 – 1% chlorku potasu; J09 – 1% tlenku miedzi(II); J10 – 1% tlenku ceru(IV); J11 – 1% niklu Raneya z dodatkiem izopropanolu; J12 – 1% nanomiedzi z dodatkiem izopropanolu; J13 – 0,5% tlenku miedzi(II) oraz 0,5% azotanu wapnia czterowodnego; J14 – 0,5% tlenku manganu i 0,5% tlenku miedzi(II); J15 – 0,5% tlenku ceru oraz 0,5% azotanu wapnia czterowodnego; J16 – węgiel; natomiast J17 – węgiel z dodatkiem izopropanolu. Próbki J01–J17 sporządzono w ilości 50 g, natomiast próbkę JD1 w ilości 1 kg, co miało na celu przeprowadzenie próby skalowania procesu oraz określenie wpływu warunków mieszania na jednorodność uzyskanych próbek oraz wyniki badań.

W Tabeli 2 przedstawiono wyniki analiz technicznych i elementarnych wybranych próbek paliw. W tym przypadku niewielki dodatek różnych modyfikatorów nie powodował istotnych zmian w podstawowych parametrach paliwa co świadczyć może między innymi o niewielkich udziałach wagowych modyfikatorów w próbkach paliwa.

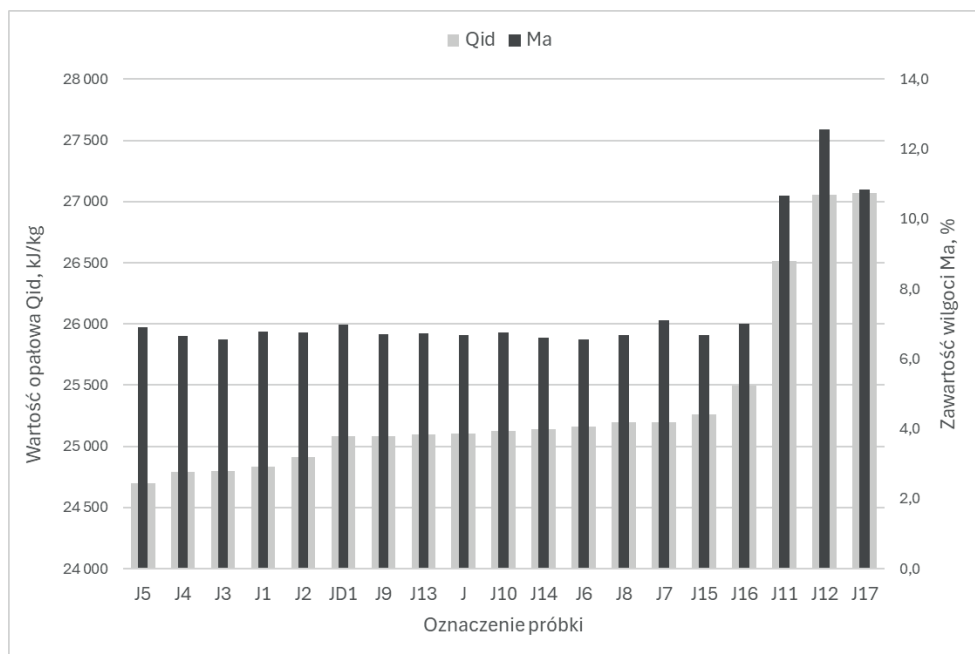
Tabela 2. Analiza techniczna i elementarna węgla kamiennego z wybranymi modyfikatorami

Próbka	M ^a , %	V ^d , %	A ^d , %	Q _s ^d , kJ/kg	Q _i ^d , kJ/kg	C ^d , %	H ^d , %	S ^d , %
J	6,69	30,14	16,11	26 429	25 105	68,89	5,26	1,55
JD1	6,99	30,51	16,88	26 430	25 082	68,44	5,34	1,44
J1	6,79	30,24	16,77	26 198	24 834	69,07	5,43	1,29
J2	6,74	30,68	15,98	26 275	24 913	69,17	5,43	1,35
J3	6,55	30,22	16,99	26 130	24 801	68,52	5,30	1,35
J4	6,66	30,23	16,68	26 149	24 794	68,96	5,41	1,47
J5	6,90	30,76	17,22	26 062	24 696	69,22	5,43	1,38
J6	6,56	30,70	15,70	26 514	25 162	69,67	5,41	1,38

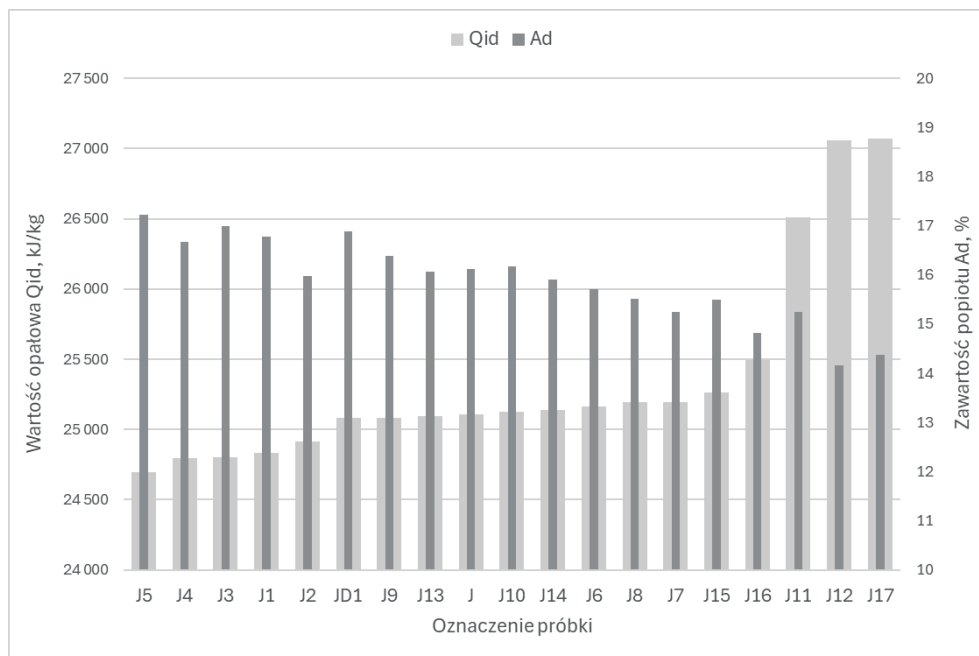
Tabela 2 (cd.)

Próbka	M ^a , %	V ^d , %	A ^d , %	Q _s ^d , kJ/kg	Q _i ^d , kJ/kg	C ^d , %	H ^d , %	S ^d , %
J7	7,10	30,59	15,25	26 578	25 198	70,15	5,47	1,41
J8	6,67	31,18	15,52	26 545	25 195	69,48	5,38	1,38
J9	6,71	30,44	16,39	26 449	25 082	69,17	5,46	1,42
J10	6,75	30,26	16,17	26 499	25 129	69,21	5,44	1,42
J11	10,67	32,76	15,24	28 174	26512	72,23	6,28	1,33
J12	12,56	33,07	14,15	28842	27055	73,56	6,58	1,37
J13	6,73	30,40	16,07	26 464	25 097	69,48	5,46	1,42
J14	6,61	31,00	15,91	26507	25 138	69,25	5,48	1,40
J15	6,69	30,89	15,49	26 636	25 263	69,26	5,39	1,40
J16	7,00	30,64	14,82	26 873	25 495	70,42	5,47	1,54
J17	10,86	33,06	14,38	28 767	27 072	72,84	6,40	1,41

Na Rys. 2 przedstawiono zależność między kalorycznością i zawartością wilgoci w próbkach węgla modyfikowanego wybranymi dodatkami, a na Rys. 3 przedstawiono zależność między kalorycznością i zawartością substancji mineralnej w próbkach węgla modyfikowanego wybranymi dodatkami



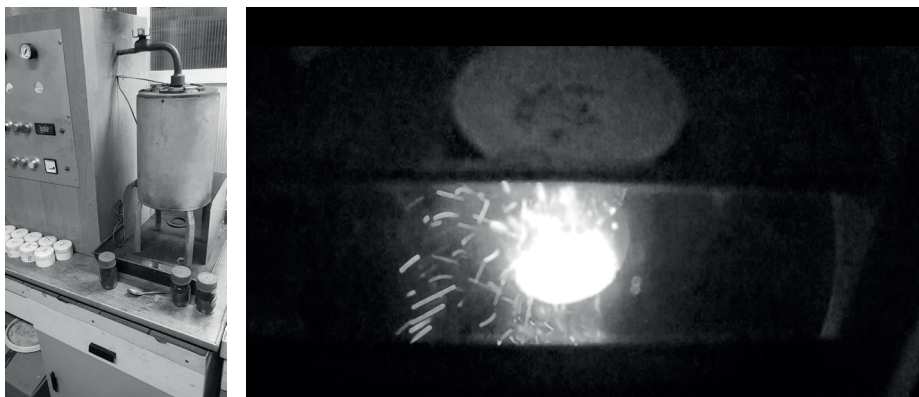
Rys. 2. Zależność między kalorycznością i zawartością wilgoci w próbkach węgla modyfikowanego wybranymi dodatkami



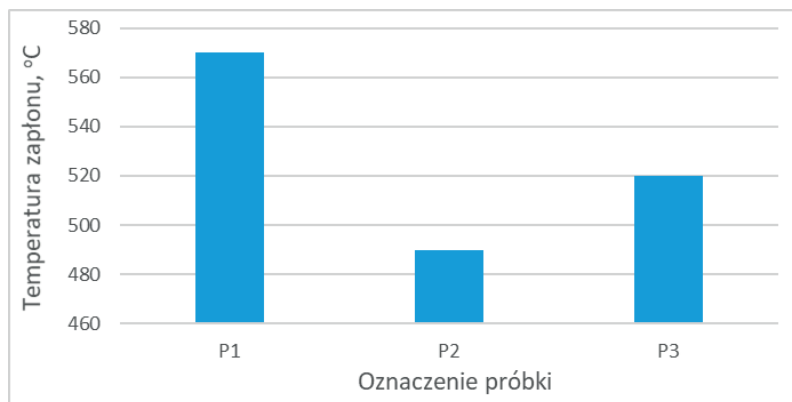
Rys.3. Zależność między kalorycznością i zawartością substancji mineralnej w próbkach węgla modyfikowanego wybranymi dodatkami

Badania minimalnej temperatury zapłonu MTZ obłoku pyłu węgla kamiennego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 50281-2-1:2002 (metoda B) w piecu typu Godbert-Greenwald (Rys. 4). Próbki pyłu wdmuchiwało impulsowo sprężonego powietrza, zwiększając temperaturę pieca co 10 K do momentu obserwacji zapłonu w postaci wyrzutu płomienia), zwracając następnie skok temperatury do 5 K. Minimalną temperaturę, przy której następował zapłon, oznaczono na podstawie pięciu kolejnych powtórzeń z widocznym zapłonem, wykluczając pojawiające się same iskry bez wyraźnego płomienia.

Z uwagi na porównawczy charakter badań w prezentowanych wynikach badaniach jako minimalną temperaturę zapłonu przedstawiono najniższą temperaturę pieca, przy której zapłon zachodził. Nie obniżano tej temperatury o 20K jak podaje norma i starano się wychwycić różnicę z dokładnością do 5°C. Wyniki badań dla próbek P1, P2 i P3 przedstawiono na Rys. 5. Najniższą wartość MTZ uzyskano dla próbki węgla modyfikowanego P2 (ok. 490°C), natomiast najwyższą dla czystego węgla P1 (ok. 570°C).



Rys. 4. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu (PN-EN 50281-2-1) - po prawej widok zapłonu próbki paliwa



Rys. 5. Wyniki oznaczenia minimalnej temperatury zapłonu węgla (P1) oraz węgla modyfikowanego maltodekstryną (P2, P3)

Także w przypadku badań próbek paliwa z szeregiem modyfikatorów oznaczonych symbolami 1-56 oraz J1-J17 uzyskane wyniki wskazują na istotne różnice w temperaturach zapłonu w zależności od użytego modyfikatora. W skrajnym przypadku różnice między paliwami o najwyższej i najniższej temperaturze zapłonu wyniosły 85°C (Rys.6).

Uzyskane wyniki wskazują, że dodatki katalityczne mogą znacząco obniżyć MTZ obłoku pyłowego (nawet o ok. 80°C), poprawiając reaktywność węgla i potencjalnie efektywność spalania w kotłach energetycznych. Modyfikatory mogą także wpływać korzystnie na niektóre parametry techniczne węgla, np. zwiększając wydzielanie części lotnych, niektóre z nich mogą podnosić wartość opałową, co potwierdza ich potencjał w zastosowaniu do optymalizacji procesu spalania węgla.



Rys. 6. Wyniki badań MTZ węgla kamiennego z dodatkiem różnych modyfikatorów

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Cheng J., et al., *Comparison of the catalytic effects of eight industrial wastes rich in Na, Fe, Ca and Al on anthracite coal combustion*, Fuel 187 (2017) 398-402.
- [2] Cheng J., et al., *Cascade chain catalysis of coal combustion by Na-Fe-Ca composite promoters from industrial wastes*, Fuel 181 (2016) 820-826.
- [3] Nguyen T.T.P., et al., *Studies on Red Mud Material to Use for Combustion of Vietnam Pulverized Coal*, Inorganics 10 (2022) 58.
- [4] Di H., et al., *Reactivity and catalytic effect of coals during combustion: Thermogravimetric analysis*, Energy 291 (2024) 130353.
- [5] Wang S., et al., *Effect of Co-combustion of Multiple Additives with Coal on NO Removal*, ACS Omega 6 (2021) 33676-33684.
- [6] Daood S.S., et al., *Fuel additive technology – NO_x reduction, combustion efficiency and fly ash improvement for coal-fired power stations*, Fuel 134 (2014) 293-306.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.4>

Badania laboratoryjne, w skali ćwierć- technicznej, symulacje numeryczne, badania na obiektach przemysłowych – ścieżka realizacji badań przemysłowych i prac rozwojowych na przykładzie projektu „Modyfikator spalania” (POIR.04.01.02-00-0068/17)

**KRZYSZTOF JAGIEŁŁO^{1*}, ROBERT LEWTAK¹, ZDZISŁAW BIELECKI²,
DARIUSZ CHOIŃSKI³, LESZEK MAŚNIAK⁴**

¹ *Instytut Energetyki – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Procesów Ciepłych*

² *KMB Catalyst Sp. z o.o.*

³ *Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki*

⁴ *Kuncar S.A.*

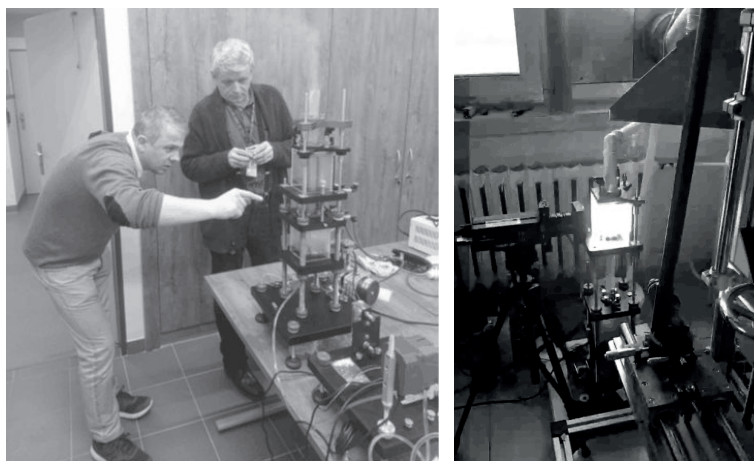
* krzysztof.jagiello@ien.com.pl

Słowa kluczowe: spalanie, modyfikatory spalania, symulacje numeryczne spalania

W połowie drugiej dekady naszego wieku wymogi systemu elektroenergetycznego, związane ze zwiększającym się w tamtym czasie udziałem energetyki odnawialnej w bilansie energii elektrycznej w Polsce i Europie, powodowały konieczność poszukiwania i wdrażania rozwiązań ukierunkowanych na zwiększenie elastyczności bloków węglowych, pełniących coraz częściej funkcję regulacyjną w systemie. Rozumiana jest ona jako obniżenie minimum technicznego, zwiększenie dynamiki przyrostu i obniżania mocy, stosowanie paliw o różnej jakości i zapewnienie dużej dyspozycyjności, przy jednoczesnym nie pogorszeniu sprawności, jakości ubocznych

produktów spalania i wielkości emisji zanieczyszczeń gazowych. Firma KMB Catalyst wspólnie z Politechniką Śląską w tym czasie rozpoczęła prace badawcze związane opracowaniem układu podawania do komory spalania modyfikatora spalania, którego celem było zwiększenie elastyczności bloku węglowego. Zaproponowała Instytutowi Energetyki oraz firmie Kuncar S.A. złożenie wspólnego projektu w ramach programu Regionalne Agendy Naukowo-Badawcze/2017. Konsorcjum złożone z Instytutu Energetyki (lider), Politechniki Śląskiej, firm KMB Catalyst sp. z o.o. oraz Kuncar S.A. otrzymało dofinansowanie na realizację projektu badawczego pod nazwą „Rozwój i wdrożenie do produkcji innowacyjnego sposobu intensyfikacji spalania paliw stałych” (akronim „Modyfikator spalania”) – projekt dofinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu krajowego – prace rozwojowe i komercjalizacja B+R – Regionalne Agendy Naukowo-Badawcze/2017 na podstawie umowy numer POIR.04.01.02-00-068/17.

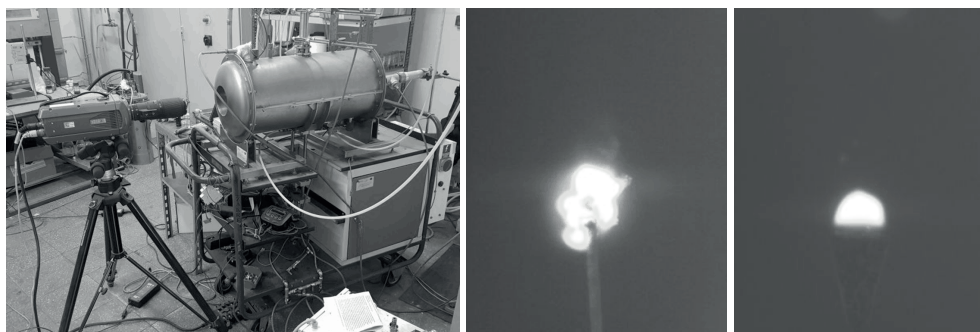
Projekt ten był realizowany w latach 2019 – 2023, z czego znaczna część przypadała na okres obowiązywania obostrzeń związanych ze stanem pandemii COVID-19, co w znacznym stopniu wpływało na możliwość prowadzenia prac badawczych. Pomimo tych trudności, w trakcie realizacji projektu bardzo dużą uwagę przywiązywano do bliskiej współpracy pomiędzy konsorcjantami, w tym na ile to możliwe wspólne prowadzenie badań (Rys. 1).



Rys. 1. Wstępne testy prototypu układu podawania modyfikatora spalania w laboratorium Politechniki Śląskiej z udziałem pracownika KMB Catalyst (po lewej); badania tego układu w Instytucie Energetyki z laserowym układem pomiarowym PIV (po prawej).

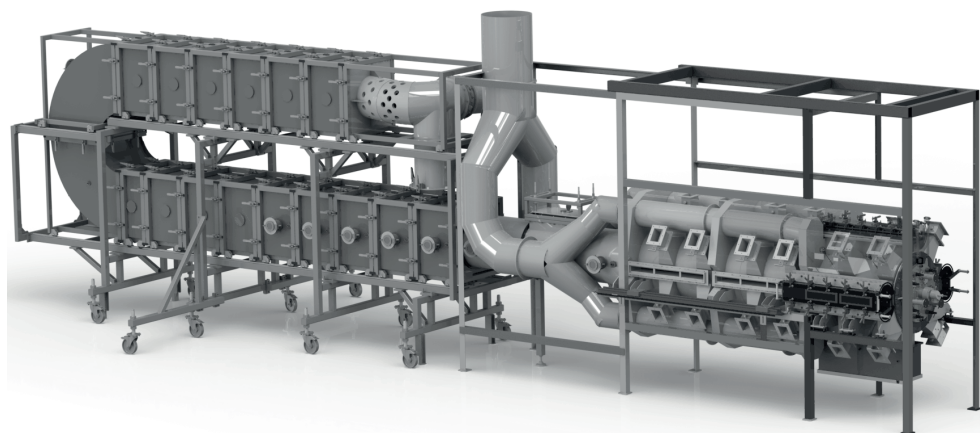
Jednym z podstawowych problemów napotkanych podczas prowadzenia badań przemysłowych na stanowiskach laboratoryjnych Instytutu Energetyki była

kwestia dostosowania tych stanowisk do podawania próbek modyfikatora spalania w oczekiwanych bardzo niskich stężeniach (masowo poniżej 1 %). Także w tej sprawie miała miejsce bliska współpraca pomiędzy konsorcjantami (przykład na Rys. 2).

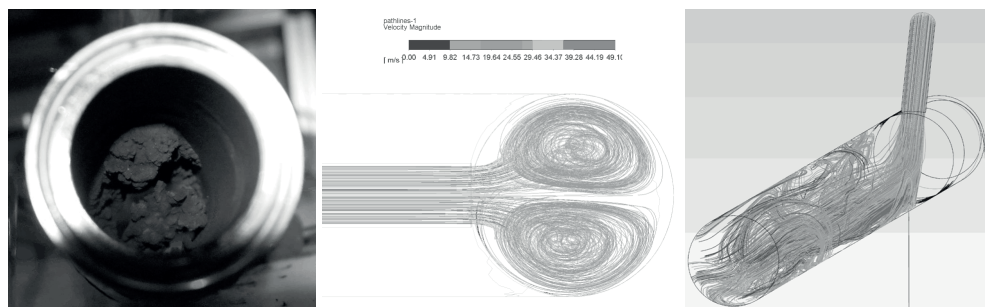


Rys. 2. Badania w Instytucie Energetyki na stanowisku spalania pojedynczej cząstki (SPC – po lewej); spalająca się próbka paliwa zatopiona wraz z modyfikatorem spalania w kulce polimerowej wykonanej przez Politechnikę Śląską (po środku); próbka paliwa wymieszanego z modyfikatorem spalająca się na tytanowym talerzyku dostarczonym przez KMB Catalyst.

Kolejnym etapem realizacji badań przemysłowych było prowadzenie badań w skali ćwierć-technicznej na stanowisku Instytutu Energetyki – komorze spalania o mocy 0,5MW (Rys. 3). Wyzwaniem było jego dostosowanie do podawania modyfikatora spalania w taki sposób, aby nie dochodziło do sklejanía pyłu węgla transportowanego przez tzw. powietrze pierwotne. W analizie tego zagadnienia posłużono się symulacjami numerycznymi prowadzonymi z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent (Rys. 4).

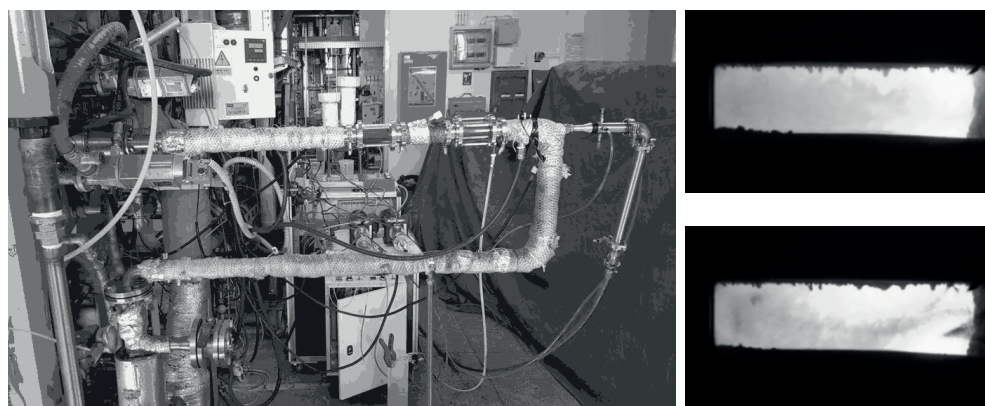


Rys. 3. Stanowisko badawcze Instytutu Energetyki – komora spalania o mocy 0,5MW.



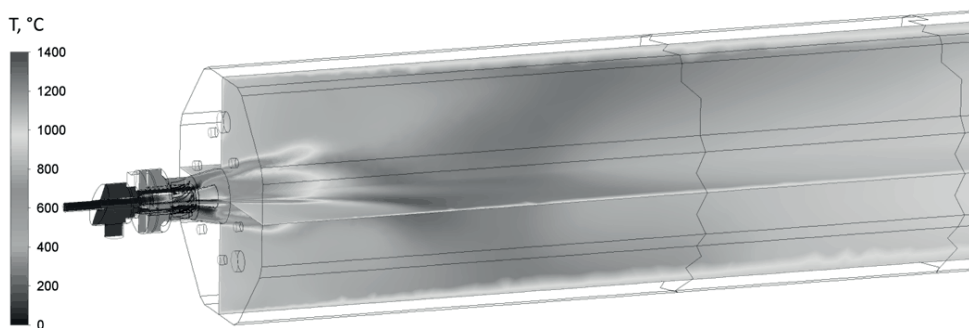
Rys 4. Pyłoprzewód stanowiska 0,5MW z zaturem zagregowanego pyłu węglowego (po lewej); modelowaniem numerycznym CFD różnych wariantów połączenia dozowania modyfikatora spalania do pyłoprzewodu stanowiska 0,5MW (po środku i po prawej).

Na podstawie symulacji numerycznych wybrano i zrealizowano trzeci wariant połączenia układu dozowania modyfikatora spalania z rurociągiem czynnika pierwotnego (pyłoprzewodem) stanowiska 0,5MW (Rys. 5). Z jego wykorzystaniem przeprowadzono badania porównawcze spalania pyłu węgla w skali ćwierć-technicznej z podawaniem modyfikatorów spalania wybranych na podstawie wcześniejszych testów przeprowadzonych na stanowiskach w mniejszej skali (Rys. 5).



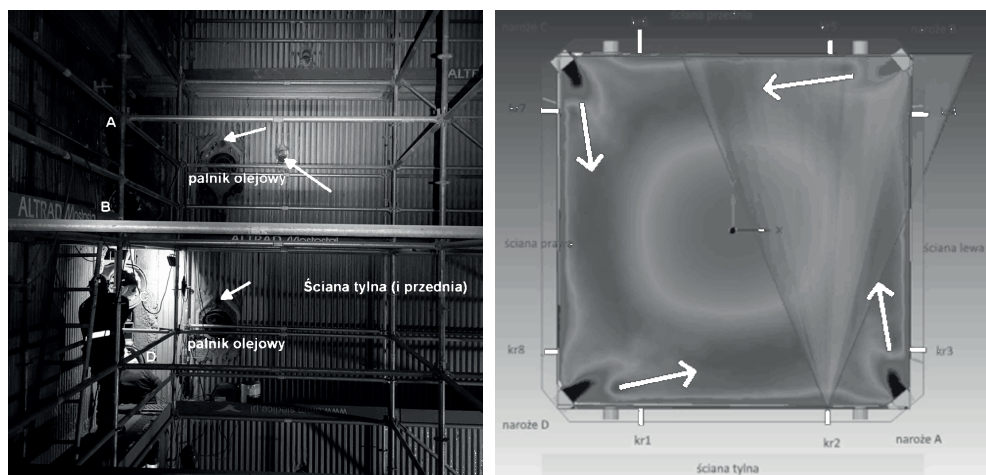
Rys. 5. Trzeci (ostateczny) wariant połączenia układu dozowania modyfikatora spalania do pyłoprzewodu stanowiska 0,5MW (po lewej); po prawej: obraz płomienia uzyskany jako klatka sumaryczna z maksymalną jasnością dla filmów nagranych podczas spalania bez modyfikatora spalania (powyżej) oraz z modyfikatorem (poniżej).

Dane uzyskane podczas badań w skali ćwierć-technicznej posłużyły do walidacji modelu numerycznego procesu spalania opracowanego z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent (Rys. 6).



Rys. 6. Modelowanie numeryczne procesu spalania z modyfikatorem spalania – na podstawie danych badań w skali ćwierć-technicznej na stanowisku 0,5MW.

W ramach prac rozwojowych projektu „Modyfikator spalania” przewidziane były badania na dwóch obiektach przemysłowych. Tematyką projektu udało się zainteresować przedstawicieli PGNiG Termika, która zgodziła się udostępnić na potrzeby badań jeden ze swoich największych kotłów – OP-430 K15 w Elektrociepłowni Siekierki (Warszawa). Wizja lokalna w trakcie okresowego remontu kotła, oględziny wnętrza jego komory spalania, wsparte modelowaniem numerycznym umożliwiły wskazanie miejsc podawania modyfikatora spalania oraz montażu specjalistycznej aparatury pomiarowej (w tym także rozwijanej w ramach projektu) – Rys. 7.



Rys. 7. Wybór króćców do zamontowania optycznej aparatury pomiarowej na podstawie wizji lokalnej (po lewej) oraz przy wsparciu modelowania numerycznego.

Pomimo ograniczeń związanych ze stanem pandemii COVID-19 przeprowadzono prace montażowe instalacji dozowania modyfikatora spalania przy kotle OP-430 w EC Siekierki (Rys. 8).



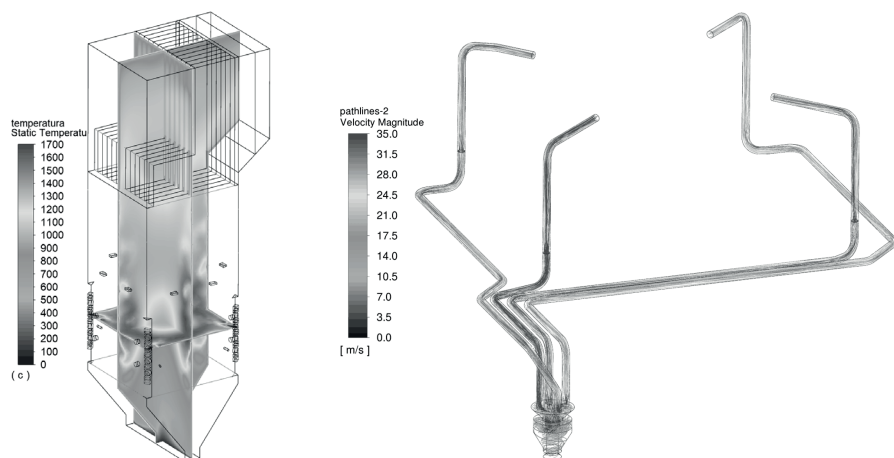
Rys. 8. Prace montażowe okablowania (po lewej) oraz głównej szafy sterowniczej (po środku) systemu dozowania modyfikatora spalania do kotła OP-430 w EC Siekierki, prowadzone w rygorach stanu pandemii, wspólnie przez pracowników KMB Catalyst, Kuncar S.A. oraz Instytutu Energetyki; układ wtrysku modyfikatora spalania do pyłoprzewodu wraz z kolektorem podczas montażu (po prawej).

Po zakończeniu prac montażowych przeprowadzono szereg badań kilku wersji modyfikatora spalania do pyłoprzewodów kotła OP-430 K-15 w EC Siekierki, obserwując wpływ na parametry pracy kotła, uzyskiwane emisje paliw, zawartość części palnych w popiele lotnym i żużlu (Rys. 9).



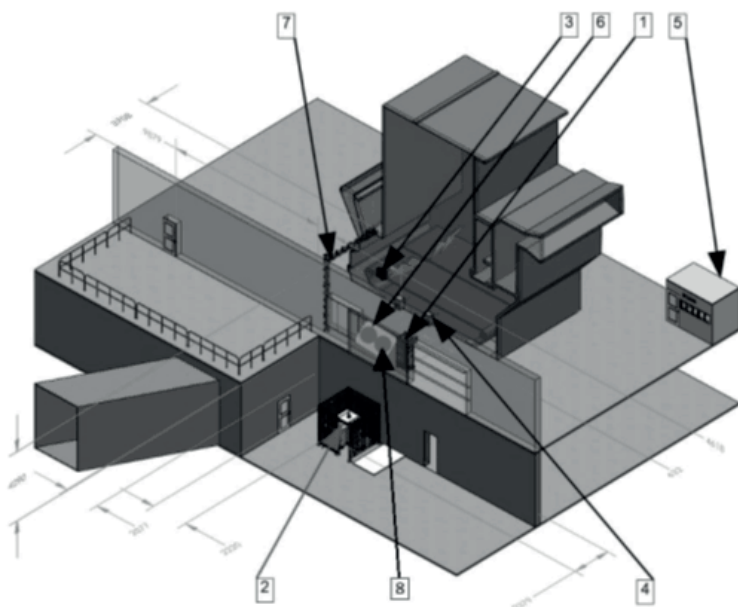
Rys. 9. Układ zasilania w modyfikator spalania (po lewej); sonda optyczna Politechniki Śląskiej (po środku); analizatory spalin Instytutu Energetyki (po prawej) podczas badań na kotle OP-430 w EC Siekierki.

Dane uzyskane podczas badań na kotle OP-430 K-15 w EC Siekierki zostały wykorzystane podczas weryfikacji modelu numerycznego spalania z udziałem modyfikatora spalania. Symulacje numeryczne CFD układu młynowego i pyłoprzewodów zostały także wcześniej wykorzystane do optymalizacji wtrysku modyfikatora spalania do pyłoprzewodów kotła OP-430 (Rys. 10).

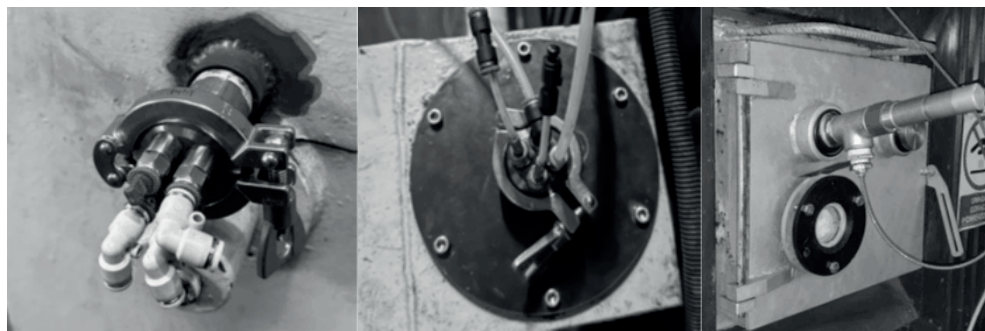


Rys. 10. Modelowanie numeryczne CFD spalania w kotle OP-430 (po lewej) oraz wypływu pyłomieszanki z młyna do palników kotła (po prawej).

Drugim obiektem przemysłowym, na którym prowadzono badania w trakcie realizacji etapów prac rozwojowych był kocioł rusztowy WR-25 w PEC Gliwice. Firma Kuncar S.A. przy współpracy z KMB Catalyst opracowała projekt układu dozowania modyfikatora spalania do kotła WR-25 (Rys. 11). Następnie przeprowadzono prace montażowe układu wtrysku oraz systemu kontrolno-pomiarowego (Rys. 12).



Rys. 11. Projekt rozmieszczenia elementów systemu dozowania modyfikatora spalania do kotła WR-25 w PEC Gliwice.



Rys. 12. Elementy układu wtrysku modyfikatora oraz systemu pomiarowego zamontowane na kotłach WR-25 w PEC Gliwice: układ wtrysku do powietrza pod ruszt (po lewej); układ wtrysku do powietrza OFA (w środku); sonda optyczna Politechniki Śląskiej (po prawej).

Przeprowadzone zostały testy obiektowe wtrysku modyfikatora spalania przy różnych rozdziałach reagenta pomiędzy poszczególne sekcje powietrza pod ruszt oraz powietrza OFA w kotłach WR-25.

W trakcie realizacji projektu „Rozwój i wdrożenie do produkcji innowacyjnego sposobu intensyfikacji spalania paliw stałych” przeprowadzono szeroko zakrojone badania wpływu wtrysku modyfikatora spalania na proces spalania węgla, obejmujące zarówno badania przemysłowe, jak i prace rozwojowe. W trakcie prowadzenia badań przemysłowych w dużym stopniu wykorzystano bogatą bazę laboratoryjną partnerów naukowych projektu (Instytutu Energetyki oraz Politechniki Śląskiej), dostosowaną do zakresu prowadzonych badań, posiłkując się modelowaniem numerycznym, ale także rozwijano nową aparaturę pomiarową (np. skaner płomienia pracujący w zakresie UV rozwijany przez Politechnikę Śląską). Partnerzy przemysłowi (KMB Catalyst Sp. z o.o. oraz Kuncar S.A.) zdobywali doświadczenie w realizacji prac badawczych blisko współpracując z partnerami naukowymi. Prace rozwojowe obejmujące badania na dwóch dużych kotłach ciepłowniczych pozwoliły na weryfikację działania układu dozowania modyfikatora spalania w warunkach rzeczywistych.

Podziękowania

Projekt „Rozwój i wdrożenie do produkcji innowacyjnego sposobu intensyfikacji spalania paliw stałych” (akronim „Modyfikator spalania”), numer umowy POIR.04.01.02-00-068/17 został dofinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu krajowego – prace rozwojowe i komercjalizacja B+R – Regionalne Agendy Naukowo-Badawcze/2017.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.5>

Sprzęt i oprogramowanie dla klasyfikacji widma samoistnego promieniowania towarzyszącego procesom spalania

ROMAN KOTERAS^{2*}, DARIUSZ CHOIŃSKI¹, JAKUB KOTERAS²

¹ Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

² Mechatronika

*roman.koteras@polsl.pl

Słowa kluczowe: diagnostyka płomienia, chemiluminescencja, sensory SiC

Wstęp

Współczesna dbałość o efektywność energetyczną oraz rygorystyczne ograniczanie emisji substancji szkodliwych w kotłach przemysłowych wymagają precyzyjnej kontroli procesów kinetycznych zachodzących bezpośrednio w komorze paleniskowej. Jedną z obiecujących metod optymalizacji jest stosowanie katalizatorów spalania, które modyfikują mechanizm utleniania węgla. Diagnostyka optyczna, oparta na analizie chemiluminescencji wzbudzonych rodników gazowych, umożliwia bezkontaktowe wyznaczenie stosunku nadmiaru powietrza oraz monitorowanie stabilności frontu płomienia. Niniejsza praca prezentuje autorski system diagnostyczny zaprojektowany do pracy w trudnych warunkach geometrycznych, który integruje wielospektralną akwizycję danych z sensorów pracujących w szerokim paśmie od 200 nm do 14 um wraz z zaawansowanym przetwarzaniem sygnałowym w celu precyzyjnej klasyfikacji stanów procesu spalania.

Architektura sprzętowa

Obecna konstrukcja głowicy diagnostycznej stanowi zintegrowany system wielospektralny, zaprojektowany do jednoczesnej analizy procesów spalania w domenach wizyjnej, UV oraz IR. System jest osadzony w obudowie o średnicy wewnętrznej ok. 35 mm, co wymusza dużą gęstość upakowania komponentów.

Spektrometria światłowodowa (Avantes AvaSpec-ULS2048CL-OEM)

Rdzeniem analizy chemicznej jest spektrofotometr w wersji OEM, który pozwala na precyzyjną identyfikację rodników gazowych. Ława optyczna wykorzystuje symetryczny układ Czerneho-Turnera o ogniskowej 75 mm (ULS - Ultra-low Stray light). Detektor liniowy sensor CMOS o rozdzielczości 2048 pikseli, pracujący w szerokim zakresie od 200 do 1100 nm. Spektrofotometr Wyposażony w 16-bitowy przetwornik A/D (6 MHz) i szybki interfejs USB 3.0 pozwala na minimalny czas integracji rzędu 9 μ s. Sygnał z komory spalania dostarczany jest poprzez kolimator i światłowód zakończony złączem SMA-905.

Obrazowanie termowizyjne (Boston Electronics / Heimann Sensor HTPA32x32d) - LWIR od 8 μ m do 14 μ m.

Detektor podczerwieni służy do przestrzennej analizy temperatury i stabilności płomienia (IR). Matryca jest o rozdzielczości 32x32 piksele, zintegrowana soczewka zapewniająca pole widzenia (zbyt szerokie) (FOV) wynoszące 34° x 34°. Całość zamknięta jest w standardowej metalowej obudowie TO-39. Detektor komunikuje się poprzez cyfrowy interfejs I2C, umożliwiając przesyłanie danych z częstotliwością 8.3 Hz. Maksymalna temperatura mierzona obiektu to około 1000 C.

Obecna szybka z kwarcu syntetycznego (JGS1), transparentna dla UV, stanowi barierę transmisyjną dla pasma LWIR (8-14 μ m), co wyznacza kierunek modernizacji toru optycznego

Detekcja punktowa UV (UV-TIAMO/BL)

Sensor ten pełni rolę głównego monitora natężenia promieniowania UV w jego maksimum czułości 280 nm (pasmo od 221 do 358 nm) - 280 mV/nW/cm². Zastosowana fotodioda z węgla krzemu (SiC) charakteryzuje się niemal idealną ślepotą na promieniowanie widzialne (Visible Blindness na poziomie 10⁻¹⁰), co pozwala na całkowitą eliminację zakłóceń pochodzących od żaru ścianek paleniska czy oświetlenia zewnętrznego. Fotodioda jest zintegrowanym z wzmacniaczem o bardzo dużym wzmocnieniu. Moduł ten cechuje się wysoką czułością, lecz jego pasmo przeniesienia jest ograniczone do ok. 15 Hz, co przy relatywnie wolnym czasie odpowiedzi skokowej (182 ms) predysponuje go do pomiarów statycznych mocy płomienia.

Obrazowanie widzialne (Kamera CMOS)

Standardowy tor wizyjny zoptymalizowany pod kątem pracy w wąskiej rurze. Wykorzystano moduł kamery inspekcyjnej o wysokiej rozdzielczości.

Integracja mechaniczna

Wszystkie komponenty są zamontowane wewnątrz rury 5/4 cala (ok. 35 mm netto). Na Rys. 1 i 2 przedstawiono głowicę.



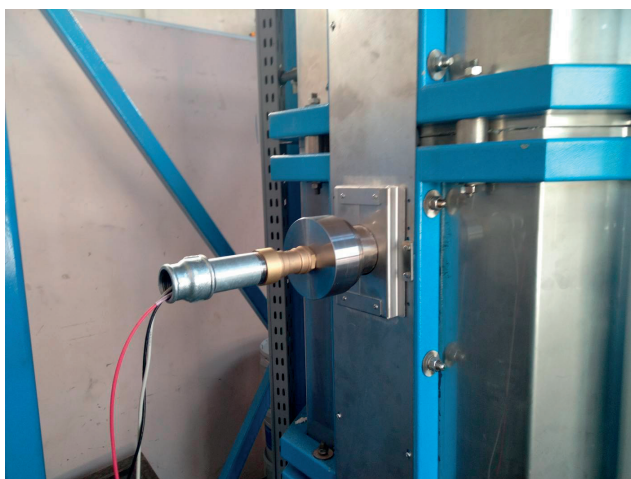
Rys. 1. Głowica - widok od strony pomiarowej

Q1: Obiektyw kamery

Q2: Kolimator SMA spektrometru.

Q3: UV-TIAMO-BL

Q4: Sensor Boston Electronics HTPA32x32d



Rys. 2. Widok zamocowanej głowicy na piecu

System akwizycji, transmisji i zdalnej kontroli (Backend)

Surowe dane z głowicy pomiarowej przesyłane są wiązką kablową oraz światłowodem do dedykowanej Jednostki Sterującej – skrzyni docelowo w przemysłowej, pyłoszczelnej obudowie umieszczonej w bezpośrednim sąsiedztwie rury inspekcyjnej.

Wewnątrz jednostki zintegrowano kluczowe komponenty odpowiedzialne za komunikację i obliczenia:

Komputer przemysłowy (IPC): Jednostka klasy Industrial PC pracująca pod kontrolą systemu Windows. Stanowi ona centralny węzeł obliczeniowy systemu.

Spektrofotometr (Avantes AvaSpec-ULS2048CL): Umieszczony wewnątrz szafy połączony przez USB z komputerem. Jest połączony z głowicą poprzez światłowód o wysokiej transmisji UV/VIS.

Router przemysłowy (Teltonika RUT951): Zapewnia stabilną łączność bezprzewodową (LTE/4G) oraz kablową, umożliwiając budowę lokalnej sieci pomiarowej oraz dostęp do sieci rozległej (WAN).

Układ zasilania - dostarcza wymagane zasilania dla pozostałych modułów.

Architektura oprogramowania (Server-Side)

Na komputerze przemysłowym pracuje autorskie oprogramowanie serwerowe, które realizuje procesy wielowątkowe:

Sterowanie spektrometrem: Serwer zarządza parametrami pracy ławy optycznej AvaSpec (czas integracji, uśrednianie widm) poprzez dedykowane biblioteki DLL producenta.

Agregacja pomiarów: System w czasie rzeczywistym pobiera i synchronizuje dane z pozostałych sensorów (UV-TIAMO, matryca IR HTPA32x32d, kamera).

Logowanie i redundancja danych: Każdy cykl pomiarowy jest zapisywany lokalnie na dysku SSD oraz symultanicznie przesyłany do chmury obliczeniowej (Google Drive). Zapewnia to pełną redundancję i dostęp do danych historycznych z dowolnego miejsca.

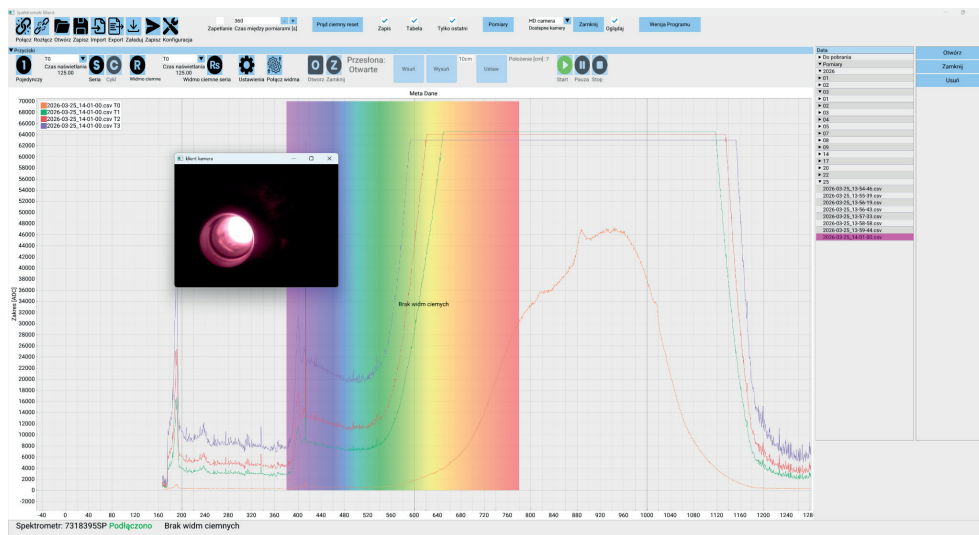
Zdalny dostęp i Interfejs Użytkownika (Client-Side)

Architektura systemu umożliwia podłączenie Zdalnego Klienta – dedykowanej aplikacji (Rys. 3) pracującej na dowolnym komputerze w sieci. Klient zdalny pozwala m. in. na:

Konfigurację parametrów: zdalną zmianę nastaw wzmocnienia, czasów integracji spektrometru oraz progów alarmowych itp..

Wizualizację wyników: podgląd na żywo obrazu z kamery, wykresów z danymi spektralnymi i termowizyjnymi.

Diagnostykę systemu: Monitorowanie stanu pracy routera RUT951 oraz obciążenia procesora IPC.



Rys. 3. Widok aplikacji klienckiej

Zdalny dostęp i Interfejs Użytkownika (Client-Side)

Architektura systemu umożliwia połączenie Zdalnego Klienta – dedykowanej aplikacji pracującej na dowolnym komputerze w sieci. Klient zdalny pozwala m. in. na:

Konfigurację parametrów: zdalną zmianę nastaw wzmacnienia, czasów integracji spektrometru oraz progów alarmowych itp..

Wizualizację wyników: podgląd na żywo obrazu z kamery, wykresów z danymi spektralnymi i termowizyjnymi.

Diagnostykę systemu: Monitorowanie stanu pracy routera RUT951 oraz obciążenia procesora IPC.

Perspektywy rozwoju i modernizacji systemu

Dalsza ewolucja opisywanego systemu koncentruje się na przełamaniu barier częstotliwościowych oraz czułości w głębokim ultrafiolecie, co pozwoli na przejście od statycznej obserwacji płomienia do zaawansowanej analizy dynamiki spalania w czasie rzeczywistym.

Szybka detekcja punktowa UV i analiza częstotliwościowa

Obecnie stosowane moduły UV-TIAMO-BL, mimo wysokiej czułości, posiadają ograniczone pasmo przenoszenia (15Hz) oraz relatywnie długi czas odpowiedzi skokowej, co uniemożliwia detekcję zjawisk szybkozmiennych. Planowana modernizacja zakłada opracowanie dedykowanego, dwustopniowego wzmacniacza trans-impedancyjnego (TIA) opartego na układzie OPA928 ($I_b = 5 \text{ fA}$).

Celem takiej zmiany jest uzyskanie pasma pomiarowego powyżej 400 Hz przy współpracy z dyskretną fotodiodą SiC (np. SIC01M-5LENS). Taka konfiguracja pozwoli na prowadzenie analizy częstotliwościowej (FFT) migotania płomienia (flame flicker), co jest kluczowe dla diagnostyki stabilności spalania i wczesnego wykrywania zjawiska zdmuchnięcia płomienia.

Wysokoczęstotliwościowa analiza obrazowa (Global Shutter)

Kolejnym krokiem jest zastąpienie obecnych sensorów wizyjnych kamerami z migawką globalną (Global Shutter), takimi jak IMX900. W przeciwieństwie do systemów Rolling Shutter, matryce Global Shutter naświetlają wszystkie piksele jednocześnie, co eliminuje artefakty geometryczne przy obserwacji turbulentnych struktur płomienia. Integracja sensora IMX900 pozwoli na akwizycję obrazu z częstotliwością powyżej 200 Hz (a być może przy ograniczonej rozdzielczości powyżej 400 Hz), co w połączeniu z algorytmami analizy przepływu (np. PIV - Particle Image Velocimetry) umożliwi wizualną analizę częstotliwościową struktur wirów wewnątrz płomienia.

Detekcja UV-BSI i modyfikacja toru optycznego

W celu bezpośredniej wizualizacji rodników (OH 310 nm) planowane jest wykorzystanie matryc wykonanych w technologii BSI (Back-Side Illuminated), np. wspomnianego sensora IMX900. Dzięki odwróconej strukturze warstw, fotony uderzają bezpośrednio w krzem, co drastycznie zwiększa wydajność kwantową (QE) w zakresie UV, gdzie standardowe sensory wykazują niemal całkowitą ślepotę. Niezbędnym elementem modernizacji jest zastąpienie standardowego szkła ochronnego matrycy szkłem kwarcowym (fused silica), które zachowuje wysoką transmisję dla fal poniżej 300 nm.

Specjalistyczna optyka i filtracja UV

Dla pełnego wykorzystania potencjału matryc BSI, planowane jest wykonanie autorskiego prostego obiektywu UV w standardzie M12 o ogniskowej około $f = 25 \text{ mm}$. Układ optyczny zostanie oparty na soczewkach ze szkła kwarcowego (np. soczewka płasko-wypukła UV-grade Fused Silica firmy Thorlabs lub Edmund Optics), co zapewni minimalną aberrację chromatyczną w paśmie UV. Obiektyw zostanie zintegrowany

z wąskopasmowym filtrem interferencyjnym o szerokości połówkowej (FWHM) 10 nm scentrowanym na 310nm (np. filtr typu BP310). Pozwoli to na uzyskanie obrazów prezentujących wyłącznie obszary emisji rodników hydroksylowych, co jest bezpośrednim wskaźnikiem intensywności reakcji chemicznych w jądrze płomienia, przy całkowitym odcięciu światła widzialnego pochodzącego od żaru ścianek kotła.

Połączenie ultraszybkich pomiarów punktowych z kamerą UV pracującą w trybie wysokoczęstotliwościowym pozwoli na stworzenie unikalnego w skali przemysłowej systemu diagnostycznego, zdolnego do pełnej klasyfikacji widmowej i dynamicznej procesów spalania w czasie rzeczywistym.

Skalowalność systemu i synchronizacja wielopunktowa

W przypadku wielkogabarytowych kotłów energetycznych pojedynczy punkt pomiarowy może nie być wystarczający do pełnej charakterystyki procesów zachodzących w całej komorze paleniskowej. W związku z tym rozważana jest rozbudowa architektury do pracy w układzie wielogłowicowym.

Monitorowanie rozproszone - system umożliwi jednoczesną pracę kilku identycznych głowic pomiarowych rozmieszczonych w różnych oknach inspekcyjnych kotła. Pozwoli to na przestrzenną analizę frontu płomienia oraz badanie korelacji między poszczególnymi palnikami.

Precyzyjna synchronizacja czasowa - kluczowym wyzwaniem w układzie wielopunktowym jest zapewnienie deterministycznej synchronizacji danych. Planowane jest wdrożenie protokołów np. PTP — Precision Time Protocol wg IEEE 1588 lub sprzętowych linii wyzwalających (hardware trigger), aby umożliwić korelację zdarzeń szybkozmiennych (migotania) rejestrowanych przez różne głowice z dokładnością mikrosekundową.

Analiza czasowo-przestrzenna - dzięki synchronizacji możliwe będzie badanie propagacji niestabilności spalania oraz rekonstrukcja rozkładu rodników i temperatur w formacie 3D (tomografia optyczna). Dane z wielu terminali będą agregowane przez centralny serwer IPC, co umożliwi także w późniejszym etapie na stworzenie „cyfrowego bliźniaka” procesów kinetycznych zachodzących wewnątrz obiektu.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Gaydon A. G., *The Spectroscopy of Flames*. Chapman and Hall – London 1974.
- [2] Roithner Lasertechnik GmbH, *SIC01M-5LENS: Broadband UVA+UVB+UVC SiC photodiode for very weak radiation*. Datasheet v 6.0[3]
- [3] Avantes BV, *AvaSpec-ULS2048CL-OEM Ultra-low Stray-light CMOS Spectrometer*. Technical Manual
- [4] Boston Electronics / Heimann Sensor GmbH, *HTPA32x32d: Digital Thermopile Infrared Array Sensor*. Datasheet
- [5] Texas Instruments, *OPA928: Ultra-Low Bias Current, Low-Noise, Precision Operational Amplifier*. Datasheet
- [6] Teltonika Networks, *RUT951 Industrial Cellular Router User Manual*.
- [7] Roithner Lasertechnik GmbH, *UV-TIAMO-BL: SiC photodiodes with integrated amplifier*. Datasheet.
- [8] Sony Semiconductor Solutions Corporation, *IMX900: Global Shutter CMOS Image Sensor Technical Specification*.
- [9] Roithner Lasertechnik GmbH, *SIC01S-18: Broadband UVA+UVB+UVC SiC photodiode*. Datasheet v 6.0

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.6>

Synergia hiperaddycyjna w układach katalitycznego wspomagania procesu spalania paliw stałych

**ANDŻELIKA KRUPIŃSKA^{1*}, MAREK OCHOWIAK¹,
SYLWIA WŁODARCZAK¹, ZDZIŚŁAW BIELECKI²,
MATEUSZ TYMOSZUK³, TOMASZ HARDY⁴**

¹ Politechnika Poznańska, Wydział *Technologii Chemicznej*

² KMB Catalyst Sp. z o.o.

³ Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

⁴ Politechnika Wrocławska, Wydział *Mechaniczno-Energetyczny*

* andzelika.krupinska@put.poznan.pl

Słowa kluczowe: pył węglowy, modyfikatory spalania, temperatura zapłonu

Pył węglowy ma kluczowe znaczenie w energetyce dzięki wysokiej wartości opałowej i dużej powierzchni właściwej, co umożliwia szybkie i efektywne spalanie nawet węgla niższej jakości. Technologia ta polega na spalaniu mieszaniny drobno rozdrobnionego węgla z powietrzem, a jej skuteczność zależy m.in. od stopnia rozdrobnienia oraz odpowiedniego doboru powietrza pierwotnego i wtórnego [1].

Stosowanie modyfikatorów w procesie spalania węgla odgrywa istotną rolę w poprawie dynamiki procesu oraz ograniczaniu emisji szkodliwych produktów ubocznych do środowiska. Ich obecność wpływa na optymalizację przebiegu procesów chemicznych, prowadząc do bardziej kontrolowanego i ekologicznego wykorzystania paliw stałych [2]. Można wyróżnić wiele typów modyfikatorów, których dobór jest uzależniony od specyfiki procesu spalania oraz oczekiwanych rezultatów końcowych.

Celem pracy jest wytypowanie skutecznych modyfikatorów – zarówno opartych na pojedynczych substancjach, jak i ich kompozycjach – dla procesów spalania bio-

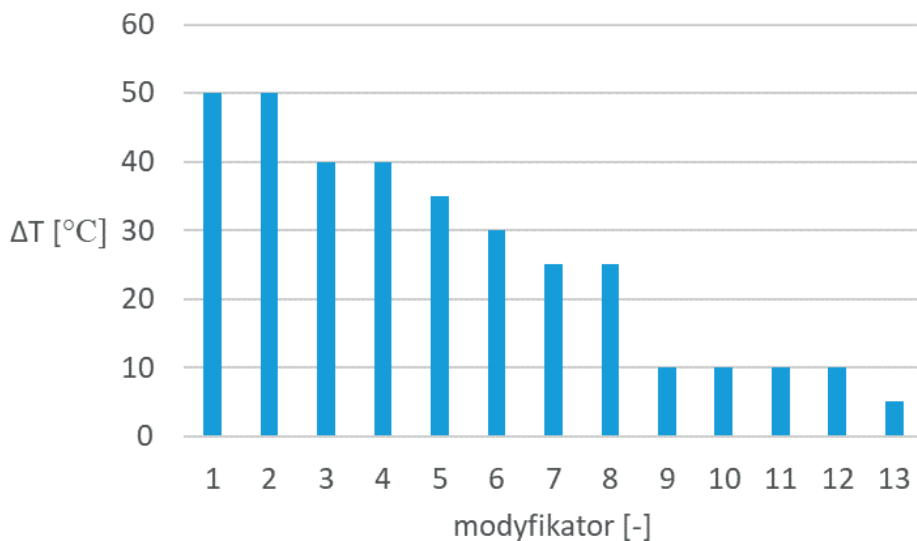
masy i węgla kamiennego, przeznaczonych dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych. Szczególną uwagę poświęcono układom wieloskładnikowym aby wykazać efekt synergii, polegający na uzyskaniu wyższej aktywności katalitycznej w porównaniu do działania poszczególnych komponentów stosowanych oddzielnie. Weryfikacja skuteczności działania danego układu modyfikującego została określona na podstawie badań temperatury zapłonu.

W oparciu o przeprowadzony przegląd literaturowy wytypowano potencjalne modyfikatory oraz ich układy wieloskładnikowe, obejmujące m.in. związki niklu, miedzi, sodu, potasu, żelaza, manganu, ceru oraz wapnia.

W pierwszym etapie opracowano metodykę przygotowania próbek, które następnie poddano badaniom wyznaczenia temperatury zapłonu. Do testów wykorzystano dwa odmienne rodzaje pyłów. Zastosowanie zróżnicowanego materiału badawczego wynikało z trudności w pozyskaniu docelowego węgla pochodzącego z kopalni Janina, co uniemożliwiło zachowanie pełnej jednorodności próbek. Pył węglowy wykorzystany w analizach przygotowano w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, gdzie eksperymentalnie dobrano parametry procesu mielenia. Uzyskany materiał nie był poddawany procesowi klasyfikacji sitowej. Zastosowane modyfikatory występowały zarówno w postaci proszkowej, jak i ciekłej, a ich udział w mieszaniu z pyłem węglowym wynosił od 1 do 5% masowych. Zdefiniowano i wdrożono metodykę homogenizacji układów, zapewniającą satysfakcjonujący stopień zmieszania. Proces homogenizacji realizowano etapowo – poprzez mieszanie ręczne oraz dalsze ujednorodnienie w wytrząsarce, co zapewniło równomierne rozprowadzenie modyfikatorów w objętości pyłu węglowego. Aby zapewnić powtarzalność wyników ustalono czas mieszania oraz częstotliwość drgań.

Badania temperatury zapłonu wykonano w Katedrze Inżynierii Konwersji Energii Politechniki Wrocławskiej. Na rysunku 1 i w tabeli 1 przedstawiono zestawienie 13 układów modyfikatorów, które wykazały najkorzystniejsze działanie, rozumiane jako największe obniżenie temperatury zapłonu mieszaniny w porównaniu z czystym węglem.

Wspólną cechą większości analizowanych układów jest obecność związków o właściwościach utleniających, w szczególności soli nieorganicznych (np. azotan wapnia czterowodny, chlorek potasu, nadmanganian potasu) oraz tlenków metali przejściowych (m.in. żelaza, manganu, miedzi, ceru). W wielu przypadkach obserwuje się synergiczny efekt działania układów wieloskładnikowych, zwłaszcza tych zawierających azotan wapnia czterowodny w połączeniu z tlenkami metali.



Rys. 1. Zestawienie najkorzystniejszych układów modyfikatorów z wartościami obniżenia temperatury zapłonu mieszaniny dla każdego układu względem czystego węgla

Tabela 1. Zestawienie najkorzystniejszych układów modyfikatorów

Lp.	Modyfikator	Udział masowy w mieszaninie [%]
1	azotan wapnia 4 hydrat	1
2	tlenek ceru + azotan wapnia 4 hydrat	2
3	tlenek manganu (II), + azotan wapnia 4 hydrat	2
4	nadmanganian potasu + tlenek żelaza (III) + azotan wapnia 4 hydrat	3
5	chlorek potasu + azotan wapnia 4 hydrat	2
6	azotan wapnia 4 hydrat + tlenek miedzi (II)	2
7	wodorotlenek sodu	1
8	(20%Cu ₂ O+80%Fe ₂ O ₃)	5
9	1 % nanomiedź + izopropanol	5
10	tlenek żelaza (III)	1
11	tlenek manganu (IV)	1
12	tlenek miedzi (II) + azotan wapnia 4 hydrat	2
13	1 % nikiel Raneya + izopropanol	5

Obniżenie temperatury zapłonu węgla o wartość przekraczającą 20°C można uznać za efekt satysfakcjonujący, świadczący o wyraźnym wpływie zastosowanego modyfikatora na poprawę jego reaktywności. Należy zaznaczyć, że do holistycznej oceny przydatności danego układu modyfikatora konieczne jest wykonanie analizy wielokryterialnej. Temperatura zapłonu mieszaniny jest jednym z wielu mierzalnych wskaźników odnoszącym się do początkowego stadium spalania. Nie uwzględnia jednak dalszego przebiegu reakcji.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Włodarczak, S., et al., *Perspectives on cleaner-pulverized coal combustion: the evolving Role of combustion modifiers and biomass co-firing*, *Energies* 19 (2026) 633.
- [2] Tic, W.J., *System poprawy efektywności energetycznej i ekologicznej spalania paliw stałych*. *CHEMIK*, 68, 10 (2014) 850-855.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.7>

Adaptacja kotła z podajnikiem dwutłokowym jako modelu kotła rusztowego do badań naukowych w skali półtechnicznej

PAWEŁ LEWIŃSKI¹, JAKUB SOBIERAJ¹, ZDZISŁAW BIELECKI¹

¹ KMB Catalyst, Sp z o.o.

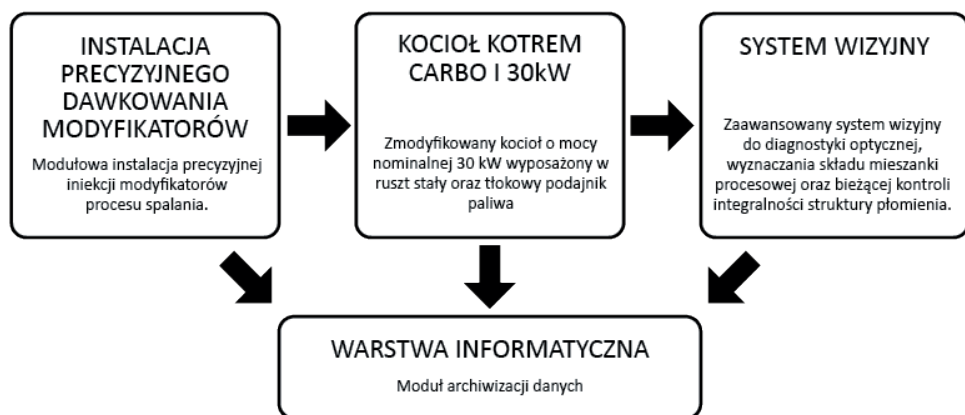
Słowa kluczowe: spalanie paliw stałych, kocioł rusztowy, modyfikatory procesu spalania,
diagnostyka optyczna płomienia, automatyka przemysłowa

Sektor energetyki zawodowej oraz sektor ciepłowniczy w Polsce charakteryzuje się strukturalną zależnością od paliw stałych, w szczególności węgla kamiennego, co w obliczu zaostrzających się rygorów środowiskowych wymusza intensyfikację badań nad optymalizacją procesu pozyskania energii na drodze procesu spalania [1,4]. Jedną z możliwości stanowi implementacja katalizatorów i modyfikatorów procesowych, które m.in. obniżają energię aktywacji dopalania węglowodorów. Dodatki mogą także wpływać na wyższą sprawność instalacji, redukcję emisji CO oraz NO_x, a także ograniczenie problematycznego zjawiska żużlowania i depozycji osadów na powierzchniach ogrzewalnych, co podnosi dyspozycyjność i sprawność jednostki [2,5]. Ekonomiczna efektywność wdrożenia takich rozwiązań jest także ściśle skorelowana z redukcją opłat emisyjnych oraz wydłużeniem żywotności elementów konstrukcyjnych kotła.

Należy jednak wskazać, iż wdrożenie zaawansowanych systemów modyfikacji procesu spalania bezpośrednio do instalacji wielkoskalowych napotyka istotne bariery w postaci trudności technologicznych, wysokiej kapitałochłonności wdrożeń przemysłowych oraz ryzykiem występowania niekontrolowanego negatywnego wpływu na proces. Warto również nadmienić, iż w kotłach przemysłowych

dużej mocy mierzymy się ze znaczącą bezwładnością cieplną i procesową. Stąd wyizolowanie wpływu konkretnego katalizatora/modyfikatora na parametry procesu spalania pośród szumu informacyjnego wynikającego ze zmiennej jakości paliwa czy wahań zapotrzebowania na moc jest niezwykle trudne. Skala półtechniczna pozwala na pracę w warunkach laboratoryjnych, gdzie w dużo większym stopniu można kontrolować niemal każdy parametr procesu, a bezwładność jest znacząco niższa.

W obliczu powyższego, za zasadną uznaje się implementację projektowanych rozwiązań w mniejszej skali, co pozwala na precyzyjną weryfikację założeń teoretycznych przy zminimalizowanym ryzyku inwestycyjnym. Konsekwencją takiego podejścia jest adaptacja kotła z podajnikiem dwutłokowym jako modelu kotła rusztowego, stanowiącego platformę do prowadzenia kompleksowych badań naukowych w skali półtechnicznej, umożliwiających walidację założeń oraz ekstrapolację wyników na układy o wyższej mocy (Rys. 1).

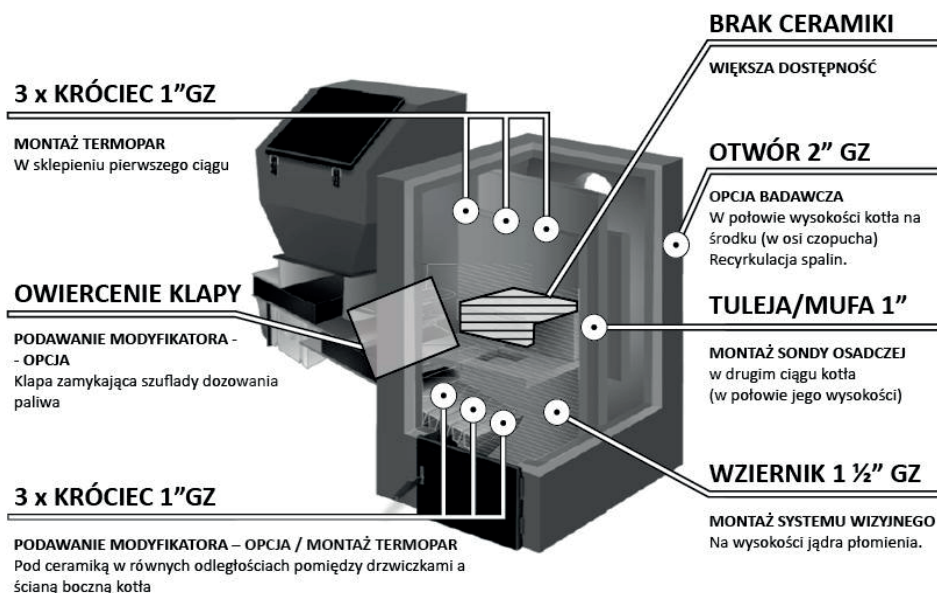


Rys. 1. Diagram funkcjonalny projektowanego stanowiska badawczego

Fundament stanowiska badawczego stanowi seryjny kocioł Kotrem Kłobuck Carbo I o mocy nominalnej 30 kW wyposażony w ruszt stały oraz tłokowy podajnik paliwa (Rys. 2). Wybór ten podyktowany został możliwością efektywnej adaptacji tego typu kotła do pełnienia funkcji modelu fizycznego kotła rusztowego. Zasobnik paliwa oraz sposób podawania go do komory pozwalają na użycie różnych typów paliw stałych o sortymencie do ok. 40 mm.

Na potrzeby badań w projekcie wprowadzone zostały modyfikacje, które pozwolą zaimplementować dotychczas opracowane technologie KMB Catalyst na stanowisku rusztowym, a także w jeszcze dokładniejszy sposób monitorować

proces spalania. Najważniejszym celem modyfikacji pozostaje jednak dostosowanie go do badania dodatków/modyfikatorów spalania, które w tym przypadku mogą być dozowane przed procesem spalania lub podane bezpośrednio do komory spalania.



Rys. 2. Rysunek poglądowy zmodyfikowanego kotła Kotrem Kłobuck Carbo I o mocy 30 kW

Proces stabilizacji parametrów termicznych jest oparty na algorytmie sterowania sekwencyjno-częstotliwościowego, którego implementacja deterministyczna zostanie zrealizowana w strukturze programowalnego sterownika logicznego (PLC). Algorytm ten operuje w czasie rzeczywistym na dwóch kluczowych, sprzężonych podukładach: systemie cyklicznego dawkowania paliwa stałego oraz systemie podawania oraz dystrybucji powietrza.

Podstawę układu podawania paliwa stanowi system dwutłokowy napędzany motoreduktorem o mocy znamionowej $P_n = 180\text{W}$, pracujący w reżimie dyskretnym typu praca-pauza. Regulacja strumienia masowego paliwa jest realizowana poprzez precyzyjną modulację dwóch zmiennych czasowych w domenie dyskretniej. Czas aktywacji podajnika (t_{on}) jest poddawany nastawie w przedziale od 3,8 do 4,8 s, przy czym wartość nominalna, gwarantująca optymalny skok tłoka dla założonej gęstości nasypowej paliwa, została ustalona na poziomie ok. 4,2 s. Drugą zmienną decyzyjną stanowi interwał czasowy pomiędzy kolejnymi cyklami podawania (t_{off}), którego długość jest uzależniona od bieżącego zapotrzebowania na moc cieplną jed-

nostki oraz wartości opałowej paliwa. Zakres regulacji tego parametru został zdefiniowany w przedziale od 100 do 500 s, natomiast w stanach ustalonych, odpowiadających pracy z mocą nominalną, przyjmuje on wartości z zakresu 160–180 s.

Równolegle do systemu dozowania paliwa funkcjonuje układ dystrybucji powietrza, złożony z dwóch niezależnych jednostek wentylatorowych o mocy 83 W każda. Regulacja strumienia objętościowego powietrza odbywa się w sposób ciągły za pośrednictwem przemienników częstotliwości sprzężonych ze sterownikiem nadrzędnym. Po zainicjowaniu procesu spalania i osiągnięciu wymaganej stabilizacji termicznej w komorze, układ przechodzi w tryb regulacji częstotliwościowej, w którym nastawa wydajności wentylatorów jest definiowana jako bezwymiarowy wskaźnik procentowy w pełnym zakresie roboczym charakterystyki urządzeń, wynoszącym od 5% do 100%.

Nadzór nad przebiegiem procesów oraz realizacja logiki sterowania zostały zintegrowane z warstwą wizualizacji w postaci panelu operatorskiego HMI (Human-Machine Interface). Warstwa komunikacji umożliwia pełną wizualizację parametrów procesowych, w tym bieżących odczytów temperatury, statusu pracy elementów wykonawczych oraz stanów alarmowych. Za pośrednictwem panelu HMI dokonywana jest nastawa zmiennych decyzyjnych algorytmu, co pozwala na elastyczne definiowanie warunków pracy instalacji w zależności od aktualnego scenariusza badawczego.

Kluczowy element warstwy informatycznej systemu stanowi moduł archiwizacji danych, w którym wszystkie parametry operacyjne zapisywane są w celu późniejszej analizy post-procesowej. Ze względu na konieczność korelacji zdarzeń procesowych, czas akwizycji parametrów został precyzyjnie zsynchronizowany z bazowym zegarem systemowym sterownika PLC dedykowanego instalacji dozowania modyfikatorów spalania. Synchronizacja ta obejmuje również system wizyjny, wykorzystywany do klasyfikacji widma samoistnego promieniowania towarzyszącego procesom spalania. Spójność czasowa wszystkich podukładów (Kocioł-Iniekcja-Wizja) pozwala na precyzyjne przypisanie zmian w charakterystyce promieniowania płomienia oraz fluktuacji temperatury do konkretnych dawek modyfikatora oraz impulsów podawania paliwa.

Integralną częścią stanowiska badawczego jest instalacja precyzyjnego dawkowania modyfikatorów procesu spalania. Centralnym elementem układu iniekcyjnego jest modułowa szafa sterowniczo-wykonawcza, wewnątrz której zintegrowane są podzespoły automatyki oraz sekcje hydrauliczne i pneumatyczne. Architektura modułowa jednostki centralnej przewiduje zabudowę trzech niezależnych kaset technologicznych, z których jedna jest dedykowana dla modułu sterowania, natomiast

pozostałe są obsadzone modułami pompowymi odpowiadającymi za tłoczenie modyfikatorów. W celu kompleksowej diagnostyki procesów konwersji termochemicznej, stanowisko jest wyposażone w zaawansowany system wizyjny, który służy do diagnostyki optycznej, wyznaczania składu mieszanki procesowej oraz bieżącej kontroli integralności struktury płomienia. Analiza charakterystyk spektralnych w czasie rzeczywistym umożliwić ma bowiem identyfikację korelacji pomiędzy składem chemicznym i ilością podawanego modyfikatora a kinetyką i stabilnością procesów spalania, stanowiąc kluczowe narzędzie walidacji prowadzonych badań [3,6].

Jednostkę centralną systemu iniekcyjnego stanowi hermetyczna obudowa w standardzie RACK 19" 12U, pełniącą funkcję zintegrowanego węzła sterowniczego-rozdzielczego. Architektura wewnętrzna urządzenia została podzielona na trzy funkcjonalne sekcje: hydrauliczną, pneumatyczną oraz przedział modułów procesowych. W sekcji pneumatycznej zaimplementowano zespół precyzyjnych regulatorów ciśnienia, których zadaniem jest stabilizacja parametrów medium roboczego w dwóch niezależnych obwodach:

- Obwodzie atomizacji: odpowiedzialnym za proces rozpylenia modyfikatora w dyszy iniekcyjnej.
- Obwodzie sterowania siłownikiem iglicy: zapewniającym poprawną pracę mechanizmu czyszczącego (przetykającego) dyszę wtryskową.

Kluczowym założeniem projektowym jest pełna modularyzacja układu. Konstrukcja pozwala na szybką wymianę całych bloków funkcjonalnych, co w warunkach eksploatacyjnych minimalizuje czas przestoju instalacji (MTTR – Mean Time To Repair) poprzez zastąpienie uszkodzonego modułu jednostką sprawną, bez konieczności prowadzenia prac naprawczych wewnątrz obudowy. Gabaryty szafy, wynoszące 800 x 760 x 1000 mm (odpowiednio: szerokość, wysokość, głębokość), zostały zdefiniowane charakterystyką geometryczną zespołów pompowych, stanowiących krytyczny komponent modułów wykonawczych. W celu zapewnienia wysokiego stopnia ochrony komponentów sterowniczo-wykonawczych przed negatywnym wpływem środowiska o wysokim zapyleniu (charakterystycznego dla obiektów energetycznych), zastosowano obudowę o podwyższonej szczelności. Front szafy wyposażono w szybę, umożliwiającą bezinwazyjny monitoring parametrów pracy bez konieczności rozszczelnienia wnętrza szafy. Ergonomię i kompaktowy charakter rozwiązania podnosi wsuwana konstrukcja dedykowana do montażu zbiorników z modyfikatorami procesowymi, co optymalizuje przestrzeń roboczą stanowiska badawczego.

Zaprojektowany moduł sterowania stanowi jednostkę nadrzędną układu iniekcyjnego (Rys. 3), charakteryzującą się wysoką skalowalnością architektury. System został zaprojektowany do obsługi maksymalnie 24 sekcji wykonawczych (modu-

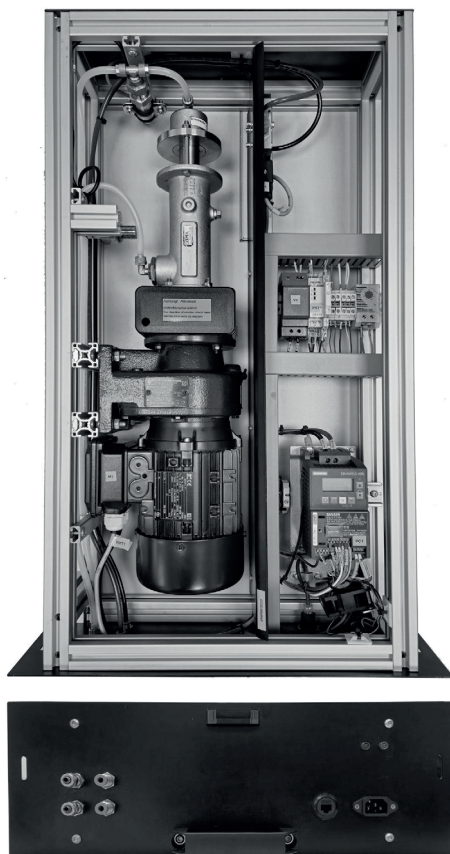
łów pompowych), rozmieszczonych w strukturze klastrowej obejmującej do 4 szaf sterowniczo-rozdzielczych. Elastyczność konfiguracji pozwala również na pracę w układzie minimalnym, obejmującym pojedynczą pompę w obrębie jednej jednostki obudowy. Transmisja danych pomiędzy jednostką centralną a modułami pompowymi realizowana jest z wykorzystaniem przemysłowego protokołu szeregowego Modbus RTU. Na panelu frontowym modułu zintegrowano interfejs operatora HMI, służący do bieżącej wizualizacji parametrów operacyjnych oraz interaktywnej nastawy zmiennych procesowych.



Rys. 3. Zdjęcie modułu sterowania instalacji iniekccyjnej.

Konstrukcja modułu pompowego (Rys. 4) opiera się na dwusekcyjnej architekturze wewnętrznej, zaprojektowanej z uwzględnieniem separacji układów sterowania od strefy roboczej medium płynnego. Pierwsza sekcja – sterownicza – integruje komponenty automatyki, w tym przemiennik częstotliwości odpowiedzialny za modulację prędkości obrotowej jednostki napędowej oraz elektrozawór sterujący pracą siłownika iglicy czyszczącej dyszę iniekcyjną. Druga sekcja, zawierająca komponenty hydrauliczne, została odizolowana od części elektronicznej za pomocą fizycznej przegrody ochronnej. Implementacja tej bariery ma na celu zabezpieczenie obwodów elektrycznych przed skutkami potencjalnej awarii układu przesyłowego (np. nie-

kontrolowanego wycieku reagentu na skutek przerwania przewodów). W strefie roboczej zaimplementowano wysokowydajną progresywną pompę wężkową SEEPEX MD 003-12, dedykowaną do precyzyjnego dozowania modyfikatorów o zróżnicowanej lepkości. Układ diagnostyczny sekcji hydraulicznej obejmuje pojemnościowy czujnik detekcji suchobiegu oraz przetwornik ciśnienia medium tłoczonego.



Rys. 4. Zdjęcie modułu pompowego instalacji iniekcyjnej.

Podsumowując, opisywany tutaj układ stanowi innowację, która w obecnej chwili implementowana jest na stanowisku badawczym w skali półtechnicznej. Docelowo układ ten jest technologicznie zdolny do pracy w skali przemysłowej, a potencjalną barierę stanowi potwierdzenie w mniejszej skali hipotez badawczych, które wskazują na poprawę procesu spalania oraz m.in. ubocznych produktów spalania w wyniku stosowania modyfikatorów paliwowych. Układ ten jest wynikiem procesu projektowego, wcześniejszych badań i prób stanowiskowych, w wyniku którego

został on dopracowany w kwestii niezawodności, automatyzacji oraz kompaktowości. Układ ten nadaje się do pracy w trudnych warunkach, co zostało potwierdzone innymi badaniami w przeszłości.

Podziękowania

This research was supported by the project “Combustion catalysts for pulverized, grate, and fluidized bed boilers,” co-financed under Priority I of the European Funds for a Modern Economy 2021–2027 (FENG), funding agreement no. FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Wielgoński G., Zarzycki R., Technologie spalania paliw stałych. Wydawnictwo Naukowe PWN 2018.
- [2] Wandrasz J. W., Wandrasz A. J., Paliwa formowane. Biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych. Wydawnictwo Seidel-Przywecki 2006.
- [3] Kalisz S., Diagnostyka procesów spalania w kotłach energetycznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2012.
- [4] Bhattacharya S.C., Solid Fuel Combustion and Gasification. CRC Press 2016.
- [5] Normann F., Andersson K., Leckner B., Catalytic additives for the reduction of emissions in solid fuel combustion. Fuel Processing Technology 2015.
- [6] Huang Y., Yan Y., Riley G., Vision-based measurement of flame characteristics in a coal-fired laboratory furnace. Measurement Science and Technology 2002.
- [7] Dokumentacja techniczno-ruchowa, PPUH „KOTREM” model Carbo 1, <https://www.kotrem.pl/pdf/CARBO-1-DTR.pdf>

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.8>

Synergiczne modyfikatory spalania jako narzędzie intensyfikacji procesu spalania pyłu węglowego

**MAREK OCHOWIAK^{1*}, ZDZISŁAW BIELECKI², OSKAR OCHOWIAK³,
SYLWIA WŁODARCZAK¹, ANDŻELIKA KRUPIŃSKA¹,
MAGDALENA MATUSZAK¹**

¹ Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej

² KMB Catalyst Sp. z o.o.

³ UPJP2, Wydział Nauk o Komunikacji

* marek.ochowiak@put.poznan.pl

Słowa kluczowe: biomasa, pył węglowy, modyfikatory spalania

Spalanie pyłu węglowego w kotłach energetycznych pozostaje jednym z kluczowych procesów wytwarzania energii na świecie, jednak jego efektywność jest ograniczona przez złożoną kinetykę reakcji utleniania, zjawiska transportu masy i ciepła oraz niejednorodność paliwa. Dodatkowo proces ten wiąże się z emisją zanieczyszczeń, takich jak CO, NO_x, SO₂ oraz pyły zawierające niedopalone cząstki węgla. W odpowiedzi na rosnące wymagania środowiskowe oraz potrzebę zwiększenia sprawności energetycznej, intensywnie rozwijane są metody modyfikacji procesu spalania z wykorzystaniem dodatków o charakterze katalitycznym. Modyfikatory spalania, wprowadzane bezpośrednio do paliwa lub do strefy spalania, umożliwiają obniżenie temperatury zapłonu, przyspieszenie reakcji utleniania oraz poprawę stopnia wypalenia części stałych [1].

Szczególnie obiecującym kierunkiem badań są układy wieloskładnikowe, w których obserwuje się wyraźny efekt synergii. Oznacza on, że łączny efekt działania dwóch substancji katalitycznych jest istotnie większy niż suma efektów ich oddziel-

nego stosowania [1]. Zjawisko to ma fundamentalne znaczenie dla projektowania nowoczesnych dodatków do spalania, ponieważ pozwala na osiągnięcie wysokiej efektywności przy relatywnie niskim udziale poszczególnych składników. W praktyce często analizowane są układy zawierające kombinacje związków metali alkalicznych (np. potasu lub sodu) z tlenkami metali przejściowych (takich jak żelazo, miedź czy mangan), a także układy oparte wyłącznie na różnych tlenkach metali o właściwościach redoks. Jako przykład układu wykazującego efekt synergii można wskazać kombinację tlenku miedzi(II) (CuO) oraz azotanu wapnia ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) [2]. Azotan wapnia, ulegając rozkładowi termicznemu, dostarcza reaktywnych form tlenu oraz inicjuje procesy utleniania w początkowej fazie spalania, co sprzyja szybszemu zapłonowi i intensyfikacji reakcji w fazie lotnej. Równocześnie powstający tlenek wapnia może wpływać na strukturę układu, poprawiając dyspersję fazy aktywnej. Z kolei CuO pełni funkcję katalizatora redoks, uczestnicząc w cyklach utleniania i redukcji, które ułatwiają transfer tlenu do powierzchni reagujących cząstek węgla. Współobecność produktów rozkładu $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ może dodatkowo wspierać regenerację aktywnych form miedzi oraz zwiększać efektywność wykorzystania dostępnego tlenu. W efekcie dochodzi do przyspieszenia utleniania zarówno części lotnych, jak i koksu.

Mechanizmy odpowiedzialne za efekt synergii są złożone i wieloaspektowe. Jednym z kluczowych czynników jest poprawa dyspersji fazy aktywnej na powierzchni cząstek paliwa, co zwiększa dostępność centrów aktywnych dla reakcji utleniania. Obecność jednego składnika może również modyfikować strukturę drugiego, prowadząc do powstawania nowych, bardziej reaktywnych faz lub defektów sieci krystalicznej sprzyjających aktywacji tlenu. Dodatkowo obserwuje się, że w układach synergicznych jeden ze składników może pełnić funkcję promotora strukturalnego lub stabilizatora, zapobiegając aglomeracji i dezaktywacji drugiego składnika w warunkach wysokotemperaturowych. Ma to szczególne znaczenie w środowisku spalania pyłu węglowego, gdzie obecność popiołu, związków siarki oraz wysokie temperatury sprzyjają dezaktywacji katalizatorów. Synergia może także wpływać na przebieg reakcji ubocznych, ograniczając tworzenie się produktów niecałkowitego spalania oraz zmniejszając emisję zanieczyszczeń gazowych. Należy jednak podkreślić, że efekt synergii jest silnie uzależniony od wielu czynników technologicznych oraz warunków prowadzenia procesu spalania [1].

Wyniki badań eksperymentalnych i analiz literaturowych wskazują, że zastosowanie odpowiednio dobranych układów binarnych prowadzi do wyraźnego obniżenia temperatury zapłonu pyłu węglowego, zwiększenia szybkości spalania oraz skrócenia czasu całkowitego utlenienia cząstek. Obserwuje się również poprawę stabilności płomienia oraz bardziej jednorodny przebieg procesu spalania [1].

W kontekście środowiskowym istotne jest zmniejszenie emisji CO oraz ograniczenie zawartości niespalonego węgla w popiele, co przekłada się na wyższą sprawność energetyczną oraz mniejsze straty paliwa. Rozwój synergicznych modyfikatorów spalania stanowi zatem perspektywiczny kierunek badań w obszarze technologii energetycznych.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Włodarczak, S., et al., *Perspectives on cleaner-pulverized coal combustion: the evolving role of combustion modifiers and biomass co-firing*, *Energies* 19 (2026) 633.
- [2] Ochowiak, M., et al., *Badania temperatury zapłonu pyłu węglowego z dodatkiem CuO i Ca(NO₃)₂*. Materiały nieopublikowane. Poznań 2026.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.9>

Badania procesu atomizacji dla otrzymywania metodą suszenia rozpyłowego dodatków biomasy do paliw stałych

**MARCIN ODZIOMEK^{1*}, PAWEŁ LEWIŃSKI², ZDZISŁAW BIELECKI²,
DARIUSZ CHOIŃSKI³**

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej

² KMB Catalyst, Sp z o.o.

³ Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

* marcin.odziomek@pw.edu.pl

Słowa kluczowe: atomizacja, suszenie rozpyłowe, biomasa, rozkład wielkości kropel

Jedną z metod umożliwiających wytwarzanie dodatków do paliw stałych na bazie biomasy, wykazujących potencjalne właściwości poprawiające proces spalania, jest suszenie rozpyłowe [1,2]. Suszenie rozpyłowe jest procesem umożliwiającym przekształcenie biomasy z formy ciekłej — najczęściej roztworu lub zawiesiny, zawierającej ewentualne modyfikatory spalania — w proszek, który może stanowić dodatek do paliw stałych [3]. Proces ten obejmuje kilka etapów, których przebieg determinuje właściwości otrzymywanego produktu, w szczególności rozkład wielkości oraz morfologię cząstek. Parametry te mogą istotnie wpływać na skuteczność otrzymanego produktu jako dodatku poprawiającego spalanie [4]. Kluczowym etapem suszenia rozpyłowego jest atomizacja cieczy, prowadząca do wytworzenia kropel i rozwinięcia powierzchni kontaktu pomiędzy cieczą będącą nośnikiem biomasy a gazem suszącym. W wyniku intensywnej wymiany ciepła i masy zachodzącej w komorze suszenia dochodzi do odparowania rozpuszczalnika z powierzchni kropel, wzrostu stężenia substancji rozpuszczonej, a następnie — po przekroczeniu stężenia krytycznego — do utworzenia stałej otoczki i powstania cząstek proszku [1]. Wielkość kropel wytwarzanych podczas

atomizacji wpływa bezpośrednio na wielkość otrzymywanych cząstek, przy czym istotne znaczenie ma również stężenie substancji rozpuszczonej. Ze względu na fakt, że wielkość kropeł, a właściwie szerokość rozkładu wielkości kropeł może decydować również o wydajności procesu suszenia, parametr ten powinien być dostosowany do budowy suszarki rozpyłowej oraz oferowanych przez nią parametrów procesowych. Kluczowe znaczenie ma w tej kwestii przede wszystkim czas przebywania kropeł w komorze suszenia. W suszarkach o krótkim czasie przebywania może dochodzić do niecałkowitego odparowania rozpuszczalnika z kropeł o zbyt dużej, niedostosowanej średnicy, co zwykle prowadzi do depozycji materiału na ściankach suszarki [5]. Kolejnym, istotnym elementem układu jest również etap separacji produktu ze strumienia gazu suszącego, realizowany zazwyczaj w cyklonach. Skuteczność wydzielania cząstek zależy zarówno od geometrii cyklonu, jak i od przepływu gazu suszącego. Cyklony powinny zapewniać jednocześnie niskie opory przepływu oraz wysoką sprawność separacji. W praktyce obserwuje się jednak kompromis pomiędzy tymi wymaganiami — wraz ze wzrostem wydajności suszarki często maleje efektywność wydzielania najdrobniejszych cząstek co również powinno być uwzględnione na etapie ustalania warunków atomizacji cieczy będącej nośnikiem biomasy.

Powyższe uwarunkowania uzasadniają konieczność prowadzenia badań nad procesem atomizacji w celu zapewnienia pożądanych właściwości produktu oraz wysokiej wydajności jego otrzymywania [1]. W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych ukierunkowanych na analizę czynników wpływających na przebieg procesu otrzymywania dodatków biomasy do paliw stałych w suszarkach rozpyłowych o różnej wydajności oraz na jakość uzyskiwanego produktu.

Metodyka badań

Badania atomizacji zostały przeprowadzone z użyciem wodnego roztworu przygotowanego na bazie maltodekstryny o niskim stopniu hydrolizy skrobi (równoważnik dekstrozowy - DE w zakresie 10-13) i stężeniu 20% mas. (PEPEES).

Zakres prac obejmował badania procesu atomizacji w dyszach dwupłynowych, z których:

- jedna dysza stanowiła wyposażenie seryjne laboratoryjnej suszarki rozpyłowej BUCHI B-290 zapewniającej według danych producenta maksymalny przepływ powietrza suszącego - $35\text{ m}^3/\text{h}$, maksymalną temperaturę powietrza suszącego - 220°C , czas przebywania w komorze suszenia - 1,1-1,5 s oraz maksymalną zdolność odparowania wody - $1\text{ dm}^3/\text{h}$. Dysza była zasilana pompką perystaltyczną wbudowaną w suszarkę B-290 zapewniającą przepływ cieczy na poziomie $0,36\text{ dm}^3/\text{h}$

- (przy ustawieniu pompki - 20%) oraz 1,44 dm³/h (przy ustawieniu pompki - 80%). Przepływ gazu regulowany był przy użyciu wbudowanego w urządzenie rotametu.
- dysza 2850 (Spraying Systems) występowała zarówno w wariantcie z wewnętrznym mieszaniem faz, jak i z mieszaniem zewnętrznym. Dysza współpracowała ze zmodyfikowaną suszarką rozpyłową Mobile Minor (Niro/GEA) charakteryzującą się przepływem powietrza suszącego – ok. 100 m³/h, maksymalną temperaturą powietrza suszącego - 350°C, czasem przebywania w komorze suszenia – od kilku do kilkunastu sekund oraz maksymalną zdolnością odparowania wody do 7 dm³/h. Ciecz była podawana do dyszy z pompy śrubowej pracującej w sterowanym falownikiem zakresie natężenia przepływu cieczy od 1 do 5 dm³/h. Ciśnienie powietrza atomizującego doprowadzanego do dysz było kontrolowane przez regulator pneumatyczny Metal Work, natomiast jego przepływ wskazywany był przez przepływomierz masowy SMC.

Badania objętościowego rozkładu wielkości kropeł uwalnianych z dysz zostały wykonane przy użyciu dyfrakcyjnego spektrometru aerozolowego Spraytec (Malvern Panalytical) pracującego w konfiguracji otwartej oraz w trybie ciągłym, tzn. pojedynczy pomiar trwał 1 minutę, a częstotliwość próbkowania była równa 1Hz. Badanie każdego wariantu pomiarowego przeprowadzono z zachowaniem trzykrotnego powtórzenia. Na podstawie danych pochodzących ze wszystkich punktów pomiarowych wyznaczono uśrednione parametry charakteryzujące jakość badanego aerozolu (oraz odchylenia standardowe), tzn.: średnice odpowiadające kolejnym percentylom objętościowego rozkładu wielkości kropeł – Dv10, Dv50, Dv90, średnicę objętościowo-powierzchniową (średnica Sautera – D₃₂) oraz SPAN charakteryzujący szerokość rozkładu cząstek aerozolowych względem mediany (Dv50):

$$SPAN = \frac{Dv90 - Dv10}{Dv50} \quad (1)$$

Badania rozkładu wielkości cząstek proszków otrzymanych w wyniku suszenia rozpyłowego i pochodzących zarówno z komory suszenia (K), jak i z pojemnika na produkt (P) przeprowadzono według zmodyfikowanej metodyki stosowanej w badaniach aerozoli inhalacyjnych, tzn. z użyciem spektrometru aerozolowego Spraytec pracującego z częstotliwością próbkowania 1kHz oraz w konfiguracji zamkniętej. W konfiguracji zamkniętej używana jest tzw. cela inhalacyjna, do której podłączana jest pompa próżniowa generująca przepływ powietrza na poziomie 300 dm³/min. Badany proszek zostaje umieszczony w kapsułkach przeznaczonych do stosowania w inhalatorach DPI, które po przebicciu, pod wpływem przepływającego powietrza uwalniają zawartość do celi inhalacyjnej sprężonej z urządzeniem pomiarowym.

Po zbadaniu warunków atomizacji cieczy zapewniających pożądany rozkład wielkości kropeł przeprowadzono w suszarce BUCHI B-290 proces wytwarzania proszku z 20% (mas.) roztworu wodnego maltodekstryny z dodatkiem (1% mas.) zawiesiny nanocząstek Cu. Proces prowadzony był w następujących warunkach: przepływ powietrza suszącego – ok. 25 m³/h, temperatura powietrza suszącego w zakresie 200-220°C, temperatura powietrza wylotowego w zakresie 85-95°C, przepływ powietrza atomizującego w zakresie 600-650 dm³/h, przepływ roztworu w zakresie 1,2 - 1,44 dm³/h.

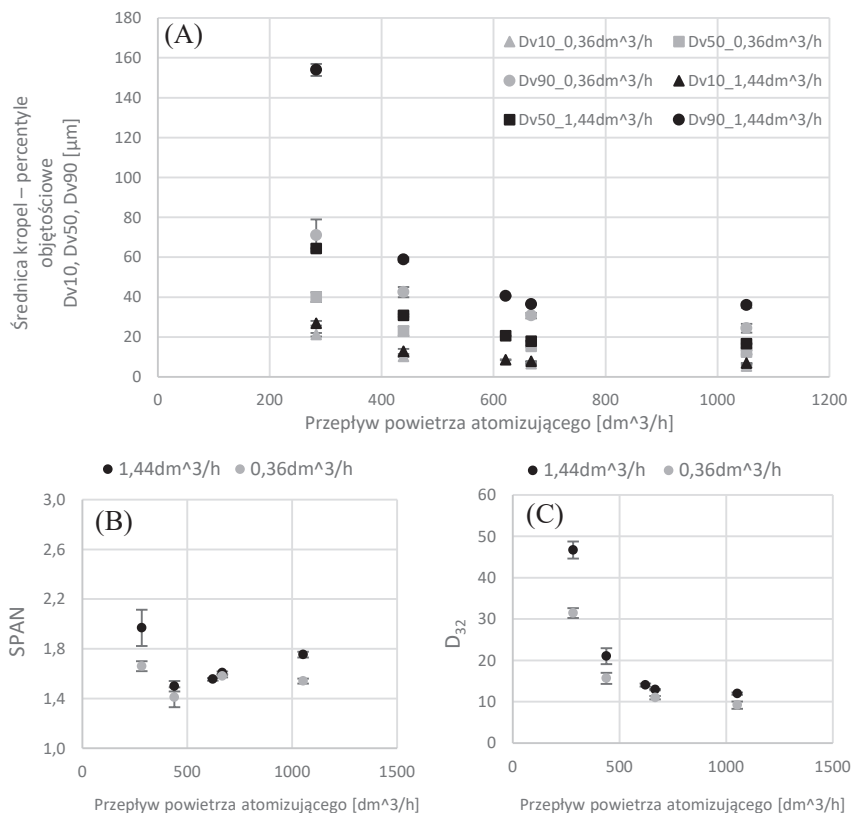
Suszenie rozpyłowe w suszarce Mobile Minor (Niro/GEA) przeprowadzono w następujących warunkach: przepływ powietrza suszącego w zakresie 85-95 m³/h, temperatura powietrza suszącego w zakresie 290-300°C, temperatura powietrza wylotowego w zakresie 90-100°C, ciśnienie powietrza atomizującego doprowadzanego do dyszy z mieszaniem zewnętrznym – 1,7 bar, przepływ powietrza atomizującego ok. 2700 dm³/h, przepływ 20% roztworu wodnego maltodekstryny 3 dm³/h.

Obserwację morfologii proszków przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego HITACHI TM-1000 (Hitachi Ltd., Japonia). Analizy wykonywano przy powiększeniu x1200. Mikroskop pracował przy stałym napięciu przyspieszającym wynoszącym 15 kV w trybie niskiej próżni. W celu zapewnienia odpowiedniego odprowadzania ładunku elektrycznego próbki były mocowane na stoliku pomiarowym przy użyciu przewodzącej taśmy węglowej. Dodatkowo, aby ograniczyć efekt gromadzenia ładunku elektrostatycznego i poprawić jakość obrazu powierzchnię próbek pokrywano cienką warstwą złota o grubości około 20 nm. Proces napyłania przeprowadzany był przy użyciu napyłarki K550X (Quorum Technologies, Wielka Brytania) w atmosferze argonu.

Wyniki badań

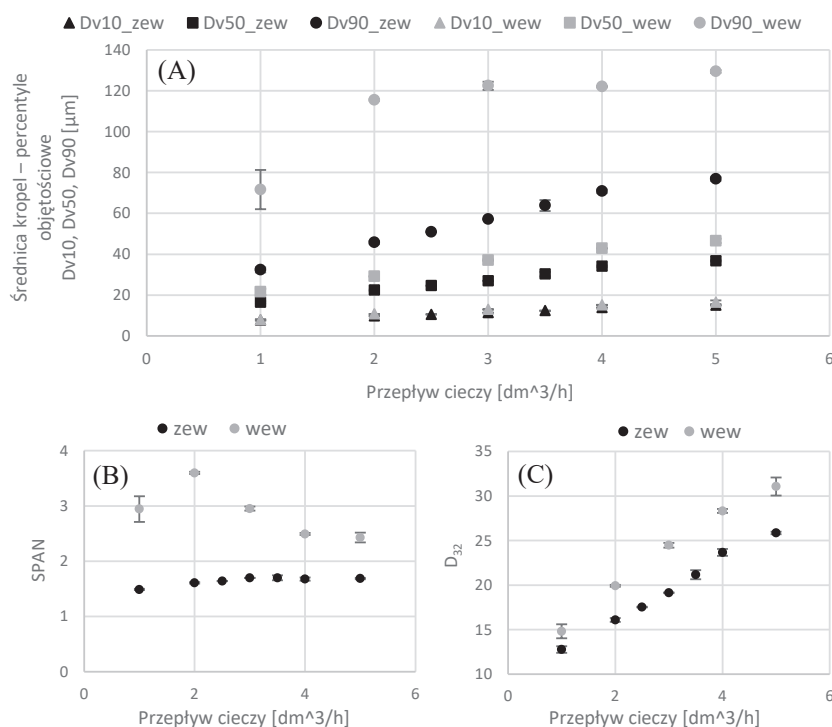
Wyniki badań dotyczących procesu atomizacji wodnego roztworu maltodekstryny (20% mas.) prowadzonego z użyciem dyszy używanej w suszarce rozpyłowej BUCHI B-290 zostały przedstawione na Rys. 1 (A, B, C). Badania zostały przeprowadzone przy dwóch różnych wartościach natężenia przepływu cieczy, tzn. 0,36 dm³/h (pompka perystaltyczna pracująca przy nastawie 20%) oraz 1,44 dm³/h (pompka perystaltyczna pracująca przy nastawie 80%). Mniejsze obciążenie cieczą suszarki umożliwia wytworzenie proszku na bazie 20% roztworu wodnego maltodekstryny w warunkach niskiej temperatury powietrza suszącego, tzn. 80-120°C, a więc w warunkach symulujących podawanie cieczy bezpośrednio do pyłoprzewodu. Obciążenie cieczą na poziomie 1,44 dm³/h odpowiada natomiast maksymalnej, wynikającej z bilansu cieplnego suszarki, wydajności przetwarzania cieczy w proszek, która ma miejsce w warunkach

temperatury powietrza suszącego na poziomie 200-220°C oraz przy maksymalnym dostępnym przepływie powietrza suszącego (25 m³/h). Analiza zebranych danych wskazuje, że różnice w obciążeniu cieczą dyszy atomizującej zyskują na znaczeniu w warunkach niskiego przepływu powietrza atomizującego. Rozkład wielkości kropeł wytwarzanych przy przepływie 1,44 dm³/h charakteryzuje się w takich warunkach zarówno wyższą medianą rozkładu, jak i wyższą wartością Dv90. Wraz ze zwiększaniem przepływu powietrza atomizującego dochodzi do zbliżenia się parametrów charakteryzujących jakość aerozolu uwalnianego przy dwóch rozpatrywanych przepływach cieczy. Po przekroczeniu przepływu powietrza atomizującego na poziomie 600 dm³/h dochodzi do ustabilizowania wartości rozpatrywanych parametrów, w tym średnicy Sautera (d_{32}), która ma największe znaczenie w kontekście suszenia rozpyłowego, gdyż opisuje stopień rozwinięcia powierzchni cieczy.



Rys. 1. Zestawienie parametrów charakteryzujących objęściowy rozkład wielkości kropeł uwalnianych z dyszy atomizującej suszarki B-290 (BUCHI) przy dwóch natężeniach przepływu cieczy: 0,36 dm³/h (pompka - 20%) oraz 1,44 dm³/h (pompka - 80%) w funkcji natężenia przepływu gazu atomizującego.

Wyniki badań dotyczących procesu atomizacji wodnego roztworu maltodesktryny (20% mas.) prowadzonego z użyciem dyszy 2850 przeznaczonej do suszarki Mobile Minor (Niro/GEA) w wariantach z mieszaniem zewnętrznym oraz z mieszaniem wewnętrznym zostały przedstawione na Rys. 2 (A, B, C). Badania zostały przeprowadzone w warunkach stałego ciśnienia powietrza atomizującego równego 1 bar. W przypadku dyszy z mieszaniem zewnętrznym zapewniało to stały przepływ powietrza przez dyszę równy $36 \text{ dm}^3/\text{min}$ bez względu na natężenie przepływu cieczy. W przypadku dyszy z mieszaniem wewnętrznym przepływ gazu był uzależniony od przepływu cieczy i zmieniał się w zakresie od $20 \text{ dm}^3/\text{min}$ dla obciążenia cieczą na poziomie $1 \text{ dm}^3/\text{h}$ do $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ przy przepływie cieczy na poziomie równym $5 \text{ dm}^3/\text{h}$. W przypadku dyszy z mieszaniem zewnętrznym wzrost wielkości uwalnianych kropeł sygnalizowany wzrostem średnic odpowiadających poszczególnym percentylom rozkładu objętościowego jest w takich warunkach ściśle związany z rosnącym przepływem cieczy, podczas, gdy w przypadku dyszy z mieszaniem wewnętrznym może on wynikać również z towarzyszącemu temu obniżeniu przepływu gazu.



Rys. 2. Zestawienie parametrów charakteryzujących objętościowy rozkład wielkości kropeł uwalnianych z dysz atomizujących przeznaczonych do suszarki Mobile Minor (Niro/GEA) z mieszaniem zewnętrznym (zew) oraz wewnętrznym (wew) przy ciśnieniu gazu atomizującego 1 bar w funkcji natężenia przepływu cieczy.

Aerozol uwalniany z dyszy z mieszaniem zewnętrznym charakteryzuje się zbliżoną wartością Dv_{10} przy porównywalnych przepływach cieczy, nieznacznie niższą wartością mediany – Dv_{50} oraz znacznie niższą wartością Dv_{90} . Sprawia to, że szerokość rozkładu objętościowego opisywana parametrem SPAN jest znacznie niższa i prawie stała w szerokim zakresie przepływu cieczy w przypadku dyszy z mieszaniem zewnętrznym. Także, analiza średnicy Sautera wskazuje, że w kontekście suszenia rozpyłowego lepszą jakość aerozolu zapewnia użycie dyszy z mieszaniem zewnętrznym.

Suszenie rozpyłowe proszków wytwarzanych z roztworu wodnego maltodekstryny przeprowadzono w obydwu suszarkach w warunkach przedstawionych szczegółowo w części poświęconej metodyce, przy czym parametry atomizacji zostały dobrane w sposób zapewniający wytwarzanie aerozolu charakteryzującego się medianą rozkładu objętościowego – Dv_{50} na poziomie 20 μm . W przypadku dyszy z mieszaniem zewnętrznym wymagało to zwiększenia ciśnienia doprowadzanego powietrza do wartości około 1,7 bara. Pełna charakterystyka aerozolu uwalnianego z dysz atomizujących w procesie suszenia została przedstawiona w Tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka aerozoli uwalnianych z dysz atomizujących w procesie suszenia rozpyłowego wodnego roztworu maltodekstryny

Suszarka	$Dv_{10} \pm SD$	$Dv_{50} \pm SD$	$Dv_{90} \pm SD$	SPAN $\pm SD$	$D_{32} \pm SD$
BUCHI B-290	8.58 $\pm$ 0,21	20.54 $\pm$ 0,28	40.50 $\pm$ 0,48	1.55 $\pm$ 0,01	14.03 $\pm$ 0,37
Mobile Minor	9.44 $\pm$ 0.05	21.38 $\pm$ 0.14	42.52 $\pm$ 0,28	1.55 $\pm$ 0.01	15.33 $\pm$ 0.07

Analiza danych doświadczalnych przedstawionych w tabeli 1 wskazuje, że w obydwu suszarkach proszek był wytwarzany z aerozolu charakteryzującego się wysoce zbliżonym rozkładem objętościowym. Natomiast, analiza właściwości produktu otrzymanego w wyniku suszenia prowadzonego w obydwu suszarkach w warunkach mających zmaksymalizować produkcję wskazuje na pojawienie się różnic w jego charakterystyce po rozproszeniu w strumieniu powietrza (Tabela 2), które najprawdopodobniej wynikają z budowy obydwu urządzeń.

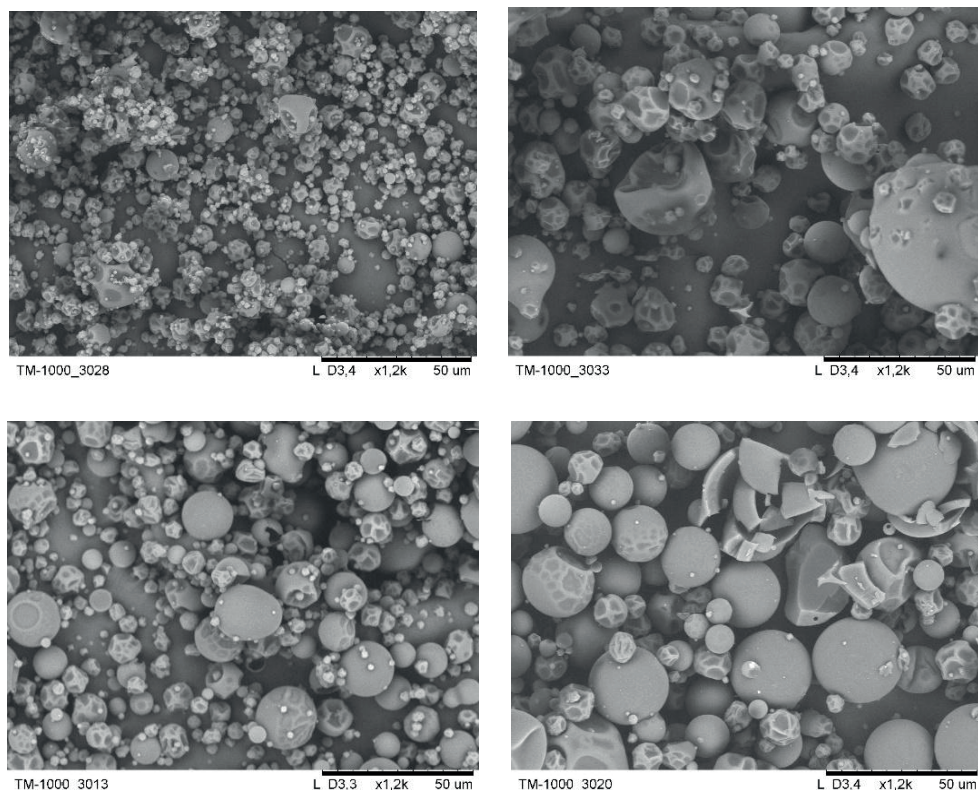
Jednocześnie, zaobserwowano, że w przypadku suszarki BUCHI B-290 z 2 kg maltodekstryny rozpuszczonej w wodzie odzyskano 1 kg w postaci produktu, oraz 0,65 kg w postaci proszku zebranego z wnętrza komory suszenia. Oznacza to 50% stopień odzysku maltodekstryny i stosunkowo duże straty materiały w komorze suszenia. Może to wskazywać na problem z całkowitym odparowaniem

rozpuszczalnika z największych kropel wynikający z krótkiego czasu przebywania kropel w komorze suszenia (1-1.5 s). Razem z cyklonem o małej średnicy (80 mm), tzn. wyższej sprawności w stosunku do cząstek małych sprawia to, że proszek odzyskany z suszarki BUCHI B-290 charakteryzuje się stosunkowo małymi cząstkami. W przypadku suszarki Mobile Minor osiągnięto odzysk produktu na poziomie ok. 68%, przy czym proszek pochodzący z komory suszenia stanowił tylko 15% masy w stosunku do maltodekstryny rozpuszczonej w atomizowanym roztworze. Jednocześnie, produkt po aerolizacji charakteryzuje się blisko dwukrotnie wyższą medianą rozkładu objętościowego niż w przypadku produktu odzyskanego z suszarki BUCHI. Może to wskazywać na bardziej skuteczne suszenie dużych kropel, a jednocześnie na utratę małych cząstek w cyklonie o większej średnicy (140 mm).

Tabela 2. Charakterystyka proszków otrzymanych w wyniku suszenia rozpyłowego

Suszarka	Miejsce zebrania	Dv10±SD	Dv50±SD	Dv90±SD	SPAN±SD	D ₃₂ ±SD
BUCHI B-290	Pojemnik. na produkt	1.93±0.05	8.60±1.20	24.28±5.37	2.60±0.54	3.54±0.27
	Komora suszenia	7.06±0.97	26.10±3.61	142.83±30.04	5.23±1.19	9.37±1.08
Mobile Minor	Pojemnik. na produkt	4.46±0.11	15.33±0.05	36.37±0.99	2.08±0.08	4.89±0.024
	Komora suszenia	7.55±0.94	22.21±0.74	49.76±2.18	1.90±0.03	7.85±0.66

Analiza zdjęć mikroskopowych SEM wykonanych przy powiększeniu x1200 (Rys. 3) wskazuje, że produkt odzyskany z obydwu suszarek rozpyłowych złożony jest z cząstek niewykazujących cech wzajemnego oddziaływania, tzn. nie są widoczne agregaty oraz aglomeraty cząstek. Może wskazywać to na wybór prawidłowych warunków suszenia, które minimalizują zawartość wody w produkcie, a co się z tym wiąże zmniejszają również ryzyko przekroczenia temperatury zeszklenia. Jednocześnie, wielkość cząstek w obserwowanym obszarze jest większa w przypadku proszku pochodzącego z suszarki Mobile Minor, co jest zgodne z wynikami badań rozpraszania proszków w strumieniu powietrza. Skupiska cząstek o cechach odpowiadających agregatom widoczne są jedynie w proszku pochodzącym z komory suszenia suszarki B-290.



Rys. 3. Zdjęcia SEM proszków uzyskanych metodą suszenia rozpyłowego przy użyciu suszarki BUCHI B-290 (A – produkt, B – proszek z komory suszenia) oraz Mobile Minor (C – produkt, D – proszek z komory suszenia) wykonane przy powiększeniu x1200.

Podsumowanie

Metoda suszenia rozpyłowego umożliwia efektywne wytwarzanie dodatków do paliw stałych z roztworów na bazie biomasy, o ściśle kontrolowanych parametrach. Wymaga to doboru odpowiedniej dyszy atomizującej oraz optymalizacji parametrów jej pracy, z uwzględnieniem m.in. charakterystyki suszarki rozpyłowej i warunków prowadzenia procesu.

Właściwości otrzymywanego produktu, w szczególności rozkład wielkości cząstek proszku, są silnie zależne nie tylko od parametrów strugi aerozolu doprowadzanej do komory suszenia, lecz także od konstrukcji samej suszarki. Dzięki dużej elastyczności procesu suszenia rozpyłowego możliwe jest precyzyjne sterowanie właściwościami wytwarzanych tą metodą dodatków do paliw stałych, wpływających na poprawę procesu spalania.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Milanesi, A., et al., *Spray drying: From a traditional technology to modern biotechnological applications*. Int. J. Pharm. X. 17 (2025).
- [2] Rianza, J., et al., *Ignition behavior of coal and biomass blends under oxy-firing conditions with steam additions*, Greenhouse Gas Sci Technol 3 (2013) 397-414.
- [3] Włodarczak, S., et al., *Perspectives on Cleaner-Pulverized Coal Combustion: The Evolving Role of Combustion Modifiers and Biomass Co-Firing*. Energies 19(3) (2026), 633.
- [4] Lu, H., et al., *Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle*. Fuel 89 (2010) 1156-1168.
- [5] Ruprecht, N.A., et al., *A new method for continuous measurement of residence time distribution in spray drying*. Drying Technol. 40(13) (2022), 2645-2654.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.10>

Perspektywy wykorzystania paliw stałych w energetyce i ciepłownictwie w świetle nadchodzących wyzwań

MAREK PRONOBIS

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Słowa kluczowe: Krajowy System Elektroenergetyczny, ciepłownictwo, paliwa stałe,

Uwagi ogólne

O ile Krajowy System Elektroenergetyczny (KSE) stanowi zintegrowany zbiór urządzeń o zapewnionej zastępowalności elementów (Jednostki Wytwórcze Centralnie Dysponowane JWCD), o tyle ciepłownictwo w Polsce to ok. 400 niezależnych systemów miejskich, których elementy - elektrociepłownie (EC) i ciepłownie (C) funkcjonują lokalnie i nie da się ich zastąpić innymi podczas np. awarii. Powoduje to odmienne wyzwania w zakresie np. dyspozycyjności.

Zasadnicze wyzwania dla KSE:

- zapewnienie ciągłej dostawy energii elektrycznej na poziomie wymaganym przez odbiorców
- zapewnienie wymaganych parametrów energii elektrycznej
- minimalizacja ceny produkowanej energii
- spełnienie wymagań ekologicznych.

Zasadnicze wyzwania dla C:

- zapewnienie ciągłej dostawy ciepła na poziomie wymaganym przez odbiorców
- zapewnienie wymaganych parametrów energii cieplnej
- minimalizacja ceny produkowanego ciepła
- spełnienie wymagań ekologicznych.

W przypadku EC wyzwania są połączeniem powyższych.

Dla zapewnienia ciągłości dostaw we wszystkich przypadkach niezwykle istotna jest dyspozycyjność zakładów wytwórczych, przy czym w skali KSE poszczególne JWCD mogą być zastępowane przez inne będące w rezerwie, co rzadko kiedy jest możliwe dla EC i C.

W obecnym czasie pojawia się jeszcze nieznanym praktycznie od lat problem fizycznego bezpieczeństwa dostaw energii w sytuacji niedającego się wykluczyć zagrożenia celowymi atakami na infrastrukturę energetyczną. Szczególnie wrażliwe są tu dostawy gazu ziemnego (GZ), ponieważ atak na terminal gazowy w Świnoujściu wyłączyłby natychmiast 1/3 GZ spalanego w Polsce.

Kwestia zapewnienia wymaganych parametrów energii elektrycznej w KSE nabrała ogromnej wagi, kiedy w systemie pojawiły się duże udziały OZE w formie instalacji fotowoltaicznych (PV) i farm wiatrowych (FW - morskie lub lądowe). W polskich warunkach, przy braku elektrowni jądrowych, utrzymanie właściwych parametrów wytwarzanego prądu i szybkie zastępowanie ubytków mocy spowodowanych niekontrolowaną zmiennością wytwarzania PV i FW mogą jedynie zapewnić klasyczne elektrownie pracujące w układzie Clausiusa-Rankine'a i układy parowo-gazowe (PG) oraz elektrownie wodne szczytowo-pompowe [1, 2]. Jednak maksymalna energia zmagazynowana w elektrowniach szczytowo-pompowych, to tylko 1,2% całej produkowanej energii elektrycznej [3].

Jeżeli udział OZE (niesynchronicznych) przekracza 70-75% chwilowej generacji, inercja systemu spada do poziomu krytycznego. Przy zbyt niskiej inercji, nagłe odłączenie jednego dużego źródła powoduje tak szybki spadek częstotliwości, że systemy zabezpieczające nie nadążają z reakcją i następuje blackout. Dlatego KSE musi posiadać odpowiednią sterowaną rezerwę [4] w jednostkach synchronicznych. W tej sytuacji niemożliwe jest wyeliminowanie z systemu bloków na paliwa kopalne dla zmniejszenia śladu węglowego (carbon footprint CFP) a jedyną częściową alternatywą jest przejście kotłów węglowych na spalanie biomasy. Ograniczenie dla takich modernizacji stanowi obecnie brak właściwej polityki w zakresie wspierania biomasy Agro dla energetyki.

Należy nadmienić, że zastępowanie węgla przez GZ jest jedynie alternatywą pozorną, ponieważ CFP może w tym przypadku być większy niż dla węgla [5]. Pokazują to poniższe przykłady.

Dyskutowanym problemem jest przyjęcie tzw. horyzontu czasowego (time horizon TH) analizy wpływu metanu na środowisko. Chodzi o właściwe określenie równoważnika emisji CH_4 i CO_2 . Szerszą analizę tego problemu podano w [6]. W [7] za [8] przyjęto dwie wartości względnego Global Warming Potential (GWP) liczonego jako $\text{GWP}_{\text{CH}_4}/\text{GWP}_{\text{CO}_2}$: 29,8 $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{kg}_{\text{CH}_4}$, co odpowiada TH = 100 lat i 82,5 dla TH = 20 lat.

Jako wskaźnik ekologiczności paliw odniesiono do siebie e_{CFP} [$\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_e$] dla GZ oraz paliw stałych uwzględniając ulot CH_4 związany z pozyskaniem GZ, dla danego horyzontu czasowego. Otrzymany bezwymiarowy wskaźnik e_{CFPR} jest zdefiniowany jako

$$e_{CFPR} = e_{CFP\text{ NG}} / e_{CFP\text{ OF}} \quad (1)$$

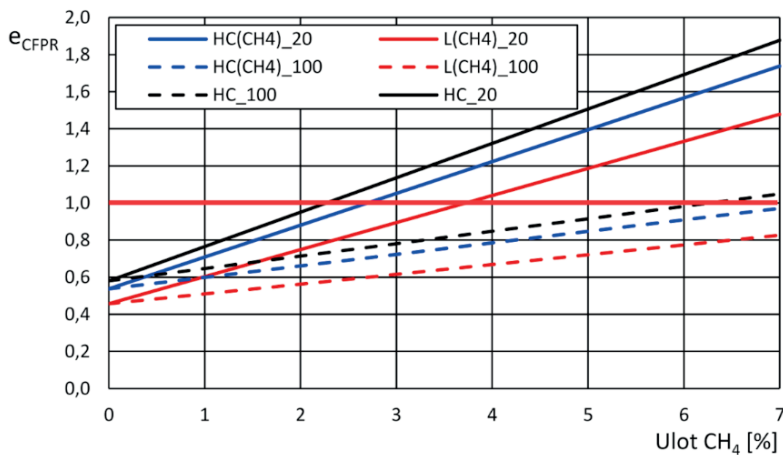
gdzie:

e_{CFP} – względny CFP dla wytwarzania energii

$e_{CFP\text{ NG}}$ – CFP dla wytwarzania energii z gazu ziemnego, $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{e/\text{th}}$

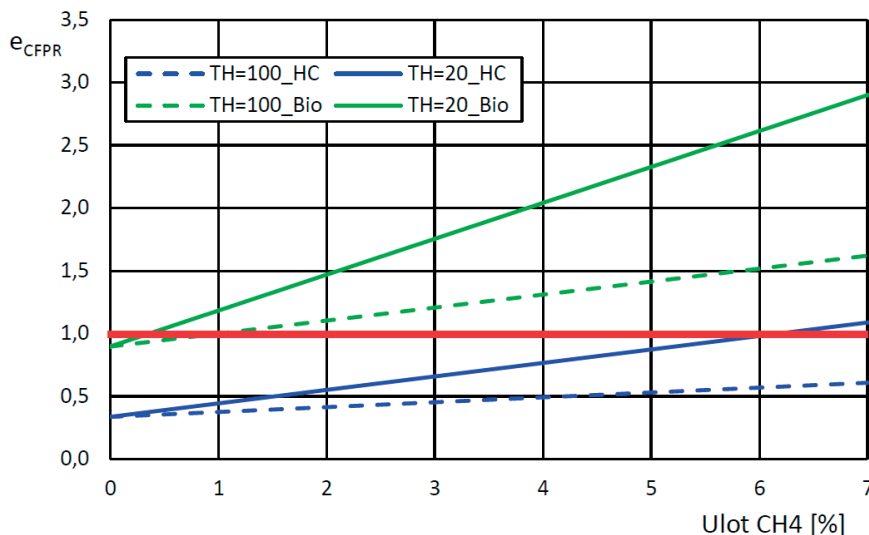
$e_{CFP\text{ OF}}$ – CFP dla wytwarzania energii z innego porównywanego paliwa (węgiel kamienny WK, brunatny WB, biomasa) $\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{e/\text{th}}$.

Z wykresu Rys. 1 widać, że przy zerowym ulocie metanu jego ślad węglowy wynikający z CO_2 powstałego po spaleniu jest rzędu 45% tego dla WB i 60% tego dla WK. W miarę wzrostu U_{CH_4} skumulowany ślad węglowy rośnie i podwaja się ($e_{CFPR} \approx 0,9 - 1,2$) dla TH = 20 przy $U_{\text{CH}_4} \approx 5$ dla WB i $U_{\text{CH}_4} \approx 3,3$ dla WK. Jest oczywiste, że ten wpływ będzie mniejszy dla TH = 100.



Rys. 1. Względny ślad węglowy e_{CFPR} dla zastępowania gazem węgla kamiennego i brunatnego przy tej samej sprawności h_{net} bloków energetycznych dla TH=20 i 100 lat [5] WK = Hard Coal, HC - bezmetanowy, HC(CH4) - z ulotem metanu WB = Lignite, L(CH4) - z ulotem metanu

Zastąpienie bloków węglowych blokami parowo-gazowymi (PG) o wysokiej sprawności zmienia ten obraz - Rys. 2. Wyniki pokazują, że zastępowanie starych bloków węglowych nowoczesnymi układami PG jest efektywnym sposobem zmniejszenia śladu węglowego produkowanej energii elektrycznej.



Rys. 2. Względny ślad węglowy e_{CFPR} dla zastępowania blokiem PG istniejących jednostek węglowych lub biomasowych (brykiety drzewne) przy różnej sprawności bloków energetycznych ($h_{net} = 35\%$ dla WK i Bio oraz 60% dla GZ)

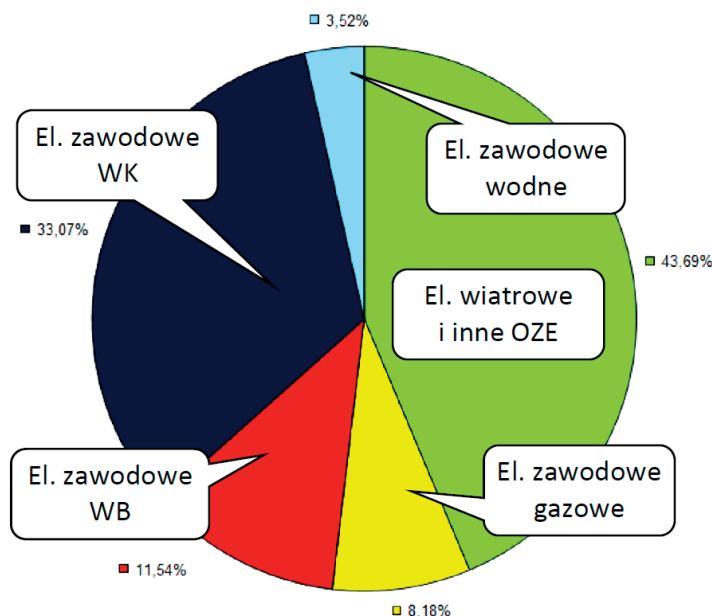
Rys. 2 pokazuje natomiast, że jeżeli istniejący blok z kotłem PC lub CFB spala biomasę, to zastąpienie go przez układ PG traci sens ekologiczny. Wówczas nawet dla $TH = 100$ już od $U_{CH_4} = 1\%$ (co jest praktycznie nie do uniknięcia) bardziej ekologiczny od wysokosprawnego bloku PG okazuje się relatywnie niskosprawny blok biomasowy.

Ponadto koszt GZ, wskutek realizacji po roku 2027 Rozporządzenia [7] dotyczącego spalania GZ w energetyce i związanych z tym emisji CH_4 powstałych podczas wydobycia i transportu tego paliwa, znacznie wzrośnie.

Trzeba się też zastanowić, jaki stopień zmniejszenia śladu węglowego usprawiedliwia duże koszty paliwa oraz modernizacji urządzeń i instalacji związanych ze przejściem na GZ. Dlatego linia 1,0 na Fig.1 i Fig.2 ma tylko znaczenie formalne. Ale już przyjmując, że obniżenie e_{CFPR} powinno wynosić co najmniej 20%, do poziomu 0,8, to widać, że dopuszczalny ulot CH_4 jest od tego formalnego wyraźnie niższy. Przy podwyższonym U_{CH_4} nawet wprowadzenie bloku PG przestaje mieć sens.

Struktura paliwowa energetyki

Strukturę polskiej energetyki w 2024 r. pokazano na Rys. 3 [9]. W przypadku KSE widoczny jest praktycznie taki sam udział OZE (wliczając wodne) jak paliw kopalnych włączając GZ.



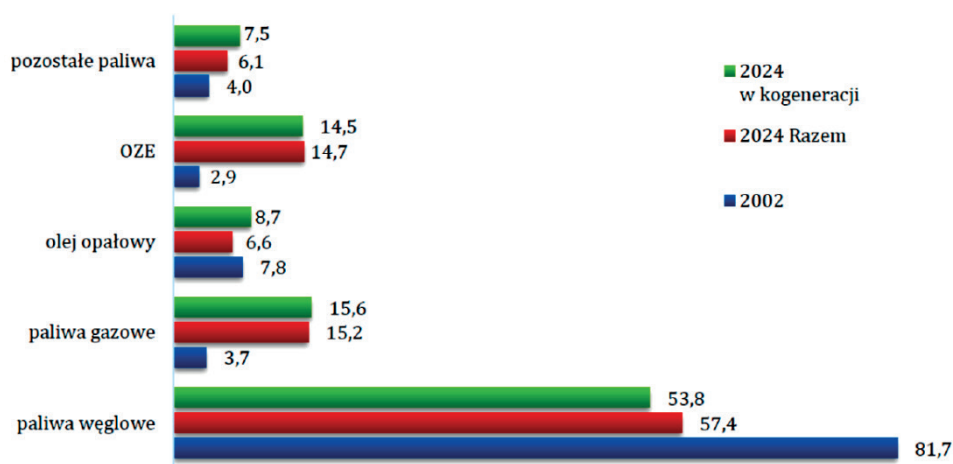
Rys. 3. Struktura procentowa mocy osiągalnej w KSE stan na 31.12.2024 r. [9]

Jednak tylko elektrownie wodne i biomasowe mają turbiny o odpowiednio dużej inercji mechanicznej, podczas gdy FW i PV takiej właściwości nie mają. Biorąc pod uwagę wspomniane zagrożenia dla energetyki gazowej, utrzymywanie w systemie JWCD na paliwa stałe jest niezbędne dla bezpieczeństwa KSE. Inne sposoby utrzymania napięcia i częstotliwości, jak inercja wirtualna przy dysponowaniu magazynami energii, czy kompensatory synchroniczne, mają wady zarówno techniczne jak i ekonomiczne, których nie mają klasyczne bloki synchroniczne z turbinami i generatorami o dużej masie wirującej.

W okresie przed wprowadzeniem elektrowni jądrowych nie ma więc realnej możliwości odejścia od istniejących bloków węglowych, a jedyną alternatywą są modernizacje związane z przejściem na spalanie lub współspalanie biomasy. Z wielu względów opisanych w [5] i [10] preferowana musi tu być biomasa Agro. Wymaga to jednak wsparcia i gwarancji ze strony państwa na wszystkich etapach jej produkcji.

W ciepłownictwie – Rys. 4 [11], nadal przewaga paliw kopalnych była ogromna, przy czym pod nazwą OZE kryje się biomasa wraz z niewielkim udziałem biogazu.

Domknięcie cyklu produkcyjnego w postaci utylizacji popiołu lotnego i żużla stwarza przestrzeń dla wprowadzania rozmaitych dodatków do spalania, ułatwiających spełnienie specyficznych wymagań dla takich Ubocznych Produktów Spalania (UPS).



Rys. 4. Struktura paliw wg energii chemicznej w nich zawartej zużywanych do produkcji ciepła w 2002 r. i w 2024 r. oraz do produkcji ciepła w kogeneracji w 2024 r. [%] [11]

Wnioski

- Dalszy rozwój KSE, w sytuacji braku energetyki jądrowej, musi uwzględniać klasyczne elektrownie jako niezbędny składnik chroniący parametry elektryczne systemu i zabezpieczający przed blackoutem w sytuacji dużego udziału niesterowalnych odnawialnych źródeł energii OZE (farmy wiatrowe FW i fotowoltaika PV).
- Przy zastępowaniu węgla gazem ziemnym bez istotnego podwyższenia sprawności wytwarzania h_{net} , należałoby spalać jedynie GZ z potwierdzonym niskim ulotem U_{CH_4} , bo inaczej sens takiej modernizacji jest wątpliwy.
- Zauważalne podwyższenie śladu węglowego WK powoduje metan towarzyszący wydobywaniu. Dlatego zalecane jest spalanie w elektrowniach węgla z kopalń bezmetanowych. W kopalniach metanowych CH_4 powinien być odzyskiwany i wykorzystywany, dla zmniejszenia jego GWP do poziomu odpowiadającego CO_2 .
- Szczegółowej analizy wymaga ekologiczność pozyskiwania GZ z dużych odległości w połączeniu ze skraplaniem i ponownym odparowaniem gazu.
- Alternatywą dla GZ jest przejście starego bloku z kotłem PC lub CFB na biomasę. Wówczas nawet dla $TH = 100$ już od $U_{CH_4} = 1\%$ bardziej ekologiczny od wysokosprawnego bloku PG okazuje się relatywnie niskosprawnym blokiem biomasowym.
- W okresie przed wprowadzeniem elektrowni jądrowych nie ma realnej możliwości odejścia od istniejących bloków węglowych, a jedyną alternatywą są modernizacje związane z przejściem na spalanie lub współspalanie biomasy, najlepiej Agro.

- Spełnienie wymagań ekologicznych energetyki w zakresie emisji gazów cieplarnianych wymaga szczegółowej analizy na każdym etapie wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, aby uniknąć działań pozornych (greenwashing). Nadmierne uzależnienie KSE i ciepłownictwa od gazu ziemnego może być dla krajowej gospodarki bardzo szkodliwe, jednocześnie zwiększając w niektórych przypadkach ślad węglowy w porównaniu ze spalaniem węgla.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Machowski J, Lubośny Z, *Stabilność Systemu Elektroenergetycznego*. WNT- Warszawa 2018.
- [2] Majcher J, Strategia rozwoju kraju w „Polskiej polityce energetycznej do 2040 r.” - o czym decydenci winni pamiętać. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2021 - zeszyt 6.
- [3] Sawicki J, Analiza technicznych możliwości budowy elektrowni szczytowo-pompowej w odkrywkach KWB „Bełchatów”. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej* Nr 128, *Studia i Materiały* Nr 36 2009.
- [4] Stanowisko Prezydium KPE PAN w sprawie zapewnienia sterowalnej rezerwy mocy w KSE przy rosnącym wytwarzaniu z energii elektrycznej z pogodozależnych źródeł odnawialnych. Warszawa 2024.
- [5] Pronobis M, Rzeczywisty ślad węglowy przechodzenia z węgla na inne paliwa w elektroenergetyce i ciepłownictwie. *Energetyka* - w druku.
- [6] Pronobis M, Kierunki modernizacji kotłów pyłowych w krajowym systemie energetycznym. *Energetyka* 3/2024, 93-101, ISSN 0013-7294.
- [7] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1787 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie redukcji emisji metanu w sektorze energetycznym oraz zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/942.
- [8] IPCC 6th Assessment Report (AR6) <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- [9] PSE, Raport 2024 KSE, Zestawienie danych ilościowych dotyczących funkcjonowania KSE w 2024 roku.

- [10] Kalisz S, Pronobis M, Sołtys J, Propozycja suplementacji KSE wykorzystaniem energii z biomasy Agro. *Energetyka* 4/2025, 93-100, ISSN 0013-7294.
- [11] Urząd Regulacji Energetyki: Energetyka ciepła w liczbach – 2024. Warszawa 2025.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.11>

Technologia wytwarzania kwalifikowanego paliwa kompozytowego bazującego na węglu kamiennym oraz biomasie

JAROSŁAW SMYŁA^{1*}, MARIA WOJTAS²

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Sztucznej Inteligencji i Cyberbezpieczeństwa

² Centrum Naukowo-Przemysłowe EMAG

jaroslaw.smyla@ai.lukasiewicz.gov.pl

Słowa kluczowe: paliwa kompozytowe, biomasa, aglomeracja ciśnieniowa

Wprowadzenie

Artykuł przedstawia wyniki laboratoryjnych badań spalania mikrobryketu otrzymanego z odpadowej frakcji węgla kamiennego (ziarno < 5 mm). Brykiet o objętości 1,5 i 2,5 cm³ wytworzono w prasie walcowej z rozdrobnionego do granulacji 2 mm węgla, zmieszanego ze spoiwem oraz/lub dodatkami katalitycznymi i sorbentami, a następnie poddanego procesowi suszenia do wilgotności końcowej około 7%. Badania porównawcze wykonano względem paliwa z kopalni „ZG Sobieski”. Wyniki wskazują, że paliwa kompozytowe w postaci mikrobryketu zapalają się szybciej, spalają się w wyższej temperaturze i pozostawiają mniej popiołu niż węgiel kawałkowy. Większa reaktywność bryketu względem węgla kawałkowego pozwala zmniejszyć strumień powietrza o około 10%, co jednocześnie redukuje objętość spalin i straty kominowe. Ogranicza także prędkość unoszenia pyłu, co prowadzi do zmniejszenia emisji.

Przyczyny opracowania paliwa kwalifikowanego

W zurbanizowanych obszarach Polski podstawowymi źródłami emisji zanieczyszczeń do atmosfery są indywidualne urządzenia grzewcze zasilane paliwami stałymi [1,2]. Wprowadzają one do powietrza szkodliwe pyły, zwłaszcza na niewielkich wysokościach nad gruntem [3,4]. W Polsce ciągle funkcjonuje około 5 mln domowych palenisk na paliwa stałe. Około 3 mln stanowią kotły z dolnym spalaniem, które wymagają usunięcia lub zastąpienia innymi źródłami energii [5]. Węgle spalane w gospodarstwach domowych charakteryzują się zazwyczaj wartością opałową 23-27 MJ/kg, zawartością popiołu do 12% oraz zawartością lotnych związków organicznych (LZO) dochodzącą do 36% [6]. W kotłach starszej generacji lotne związki organiczne nie ulegają całkowitemu spalaniu i są emitowane do atmosfery. Dodatkowo niecałkowite spalanie istotnie zwiększa emisję toksycznego tlenku węgla. Obowiązujące przepisy określają rygorystyczne limity emisji dla aktualnie sprzedawanych kotłów centralnego ogrzewania na paliwa stałe.

Paliwo kompozytowe

Oprócz wartości opałowej oraz zawartości popiołu i siarki istotne są przede wszystkim: reaktywność, kształt i rozmiar paliwa, stabilność kształtu, wytrzymałość mechaniczna oraz porowatość.

W procesie produkcji paliwa określanego obecnie jako „groszek/ groszek plus”, czyli sortymentu węgla kamiennego o wymiarach 5-25 mm, powstaje nieprzydatna frakcja ziarnowa do 5 mm. Pozostałość tę można wykorzystać do produkcji kwalifikowanego kompozytowego paliwa węglowego w postaci mikrobrykietów o masie około 1-3 g i objętości 1,0-2,5 cm³ [7]. Ich właściwości mogą umożliwić zasilanie m.in. kotłów małej i średniej mocy, zapewnić równomierne oddawanie ciepła, istotnie zmniejszyć emisję pyłu, ograniczyć rozkruszanie paliwa w urządzeniach zasilających kotły oraz zredukować emisję CO, NO_x i LZO.

Sposobem poprawy parametrów paliwa z surowej biomasy jest wytwarzanie paliwa z mieszaniny węgla i biomasy. Pozwala to zwiększyć gęstość energetyczną biomasy oraz wprowadzić dodatki, które dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym podnoszą wartość użytkową paliwa. W przypadku węgla dotyczy to zarówno węgla brunatnego i kamiennego o wysokiej wilgotności, zawartości popiołu i siarki, jak i paliw niskiej jakości oraz odpadów. Pomimo zróżnicowanego składu, technologii wytwarzania pozwala na uzyskanie paliwa stabilnego eksploatacyjnie.

Wykorzystanie różnych rodzajów biomasy, takich jak rośliny energetyczne, trociny, łuski słonecznika, słoma ryżowa, odpady bawełniane czy słoma zbóż, wynika

w dużej mierze z lokalnych możliwości produkcyjnych. W literaturze badania nad brykietowaniem paliw kompozytowych prowadzono głównie z użyciem pras stemplowych o zamkniętej komorze, które są urządzeniami energochłonnymi i mało efektywnymi przy wysokich naciskach jednostkowych [8]. Wykazano jednak, że w prasach walcowych można wytwarzać takie paliwo przy znacznie niższym jednostkowym zapotrzebowaniu na energię procesu zagęszczania [9,10]. Na podstawie parametrów wytrzymałościowych brykietów ustalono, że wilgotność mieszaniny przeznaczonej do brykietowania powinna mieścić się w zakresie 20-30% [11]. Aglomeracja ciśnieniowa prowadzona w prasach walcowych stanowi obecnie istotny proces technologiczny w energetyce i gałęziach przemysłu z nią powiązanych.

Materiały do badań

W badaniach nad produkcją paliwa kompozytowego w postaci mikrobryketu wykorzystano odsiewki węglowe (pozostałość poprodukcyjna < 5 mm) powstające przy produkcji groszku przez firmę „Tresko” w Trzebini oraz węgiel z kopalni „Sobieski” (TAURON Wydobycie S.A., Zakład Górniczy Sobieski, Jaworzno). Przed przygotowaniem mieszanin węgiel rozdrobniono do uziarnienia 2 mm. Mieszaniki brykietowe sporządzono przez połączenie węgla z wodą, 3% spoiwem organicznym oraz wybranymi katalizatorami w odpowiednich proporcjach wagowych. Mieszaniki przygotowane do brykietowania miały wilgotność $18,5 \pm 0,5\%$.

Do brykietowania zastosowano następujące mieszaniki: BTw/oC – miał węglowy „Tresko” + 3% spoiwa organicznego; BTC1 – miał węglowy „Tresko” + 3% spoiwa organicznego + katalizator I; BTC2 – miał węglowy „Tresko” + 3% spoiwa organicznego + katalizator II; BSw/oC – miał węglowy „Sobieski” + 3% spoiwa organicznego. Jako próbkę odniesienia zastosowano groszek plus z kopalni „Sobieski” o granulacji 5-25 mm, oznaczony w dalszej części jako EPS.

Mieszaniki dokładnie uśredniono, a następnie zagęszczono w prasie walcowej przy prędkości obwodowej 0,4 m/s i szczelinie między walcami wynoszącej 1 mm. Mieszaniki aglomerowano do brykietów siodłowych o objętości $2,5 \text{ cm}^3$ i wymiarach $20 \times 20 \times 10 \text{ mm}$.

Stanowisko badawcze

Stanowisko składa się z tygla Elstein Round Tunnel Heaters RTR (Elstein-Werk M. Steinmetz GmbH & Co. KG, Northeim, Niemcy) o mocy 500 W, zasilanego napięciem 230 V i wyposażonego w zintegrowaną termoparę typu K (NiCr-Ni). Tygiel

umieszczono na wadze analitycznej WPT 3C (Radwag, Radom), a termoparę podłączono do multimetru HIT 29S (Gossen Metrawatt). Integralną częścią stanowiska jest ruchoma rura kominowa o średnicy 60 mm i długości 1000 mm, która w określonych warunkach pogodowych wytwarza ciąg powietrza wynikający z różnicy ciśnień 8 Pa. Podczas badań rura pozostawała w położeniu podniesionym do chwili zapłonu próbki. Test reaktywności polegał na odważeniu $24,5 \pm 0,2$ g brykietów lub węgla i umieszczeniu ich w tyglu.

Zawartość popiołu określano jako stosunek masy pozostałości po spaleniu do początkowej masy próbki. Niedopał wyznaczano natomiast jako różnicę masy pomiędzy popiołem oznaczonym na stanowisku a popiołem uzyskanym w badaniach DTA na aparacie TGA-701. Obserwacje mikroskopowe mikrostruktury prowadzono z wykorzystaniem cyfrowego mikroskopu Levenhuk DTX 500 LCD.

Wygląd pozostałości po spaleniu poszczególnych, przygotowanych do badań paliw pokazano na Rys. 1. Brykiet zbudowany jest z miazgu węglowego, którego porowatość wynosi 21-25%. W odróżnieniu od węgla kamiennego cechuje go rozbudowany układ kanalików i duża liczba większych porów, co ułatwia wydzielanie związków lotnych w niższej temperaturze. Struktura i porowatość paliwa istotnie wpływają na temperaturę rozpoczęcia wydzielania związków lotnych oraz tempo tego procesu. W Tabeli 1 przedstawiono wybrane parametry przygotowanych próbek paliwa.



Rys.1. Widok popiołów po spaleniu brykietu i węgla kawałkowego (od góry: brykiet z katalizatorem; brykiet z sorbentem; węgiel kawałkowy – materiał własny).

Tabela 1. Wybrane parametry próbek uzyskane podczas badań

Parametr	BTw/oC	BTC1	BTC2	BSw/oC	EPS
Wilgotność brykietu po sezonowaniu, %	6.7	6.6	5.8	--	10.2
Popiół, %	6.75	6.32	5.02	6.35	7.76
Niedopał, %	1.75	1.32	0.02	0.46	1.87
Pojawienie się dymu, min	3.5	3.5	3.5	3.5	5.0
Barwa dymu	czarna	czarna	biała	--	szara
Zapłon, min	6.0	6.5	6.0	6.0	6.5
Temperatura zapłonu, °C	602	650	613	643	650
Maks. temperatura spalania, °C	698	765	767	730	650

Tabela przedstawia wybrane parametry uzyskane na zaprojektowanym stanowisku badawczym, służącym do wyznaczania krzywej różniczkowej ubytku masy próbki paliwa podczas ogrzewania, zapłonu i spalania.

Badania wykazały, że wilgotność węgla kawałkowego jest o około 35% wyższa niż wilgotność brykietów w stanie powietrzno-suchym. Ma to decydujący wpływ na ilość energii uzyskanej w procesie spalania. Z węgla kawałkowego odparowuje o około 3,5% więcej wody niż z brykietów, co prowadzi do niepotrzebnych strat energii. Największą zawartość popiołu i niedopału stwierdzono również w przypadku węgla kawałkowego, co obniża jego przydatność. Dla próbki z katalizatorem 2 (BTC2) niedopał był bardzo niski i wyniósł 0,02%.

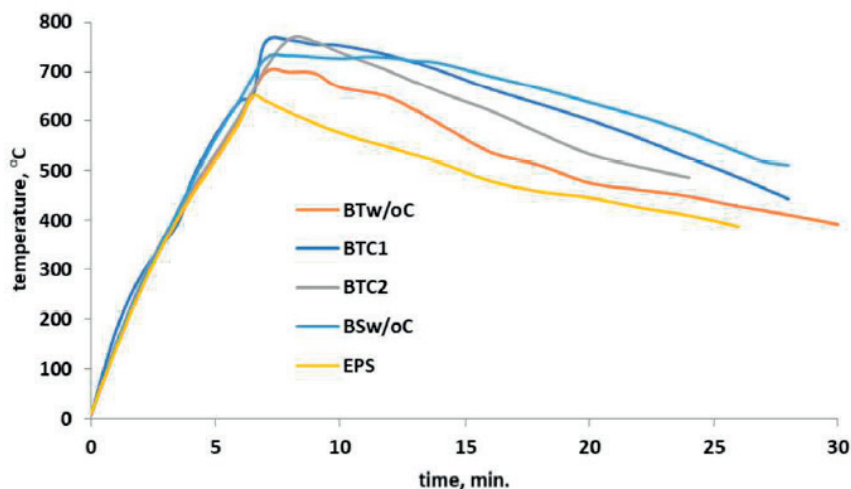
Czas zapłonu był porównywalny dla wszystkich próbek. Należy jednak zaznaczyć, że moment rozpoczęcia wydzielania części lotnych w przypadku węgla kawałkowego występował wyraźnie później, co najprawdopodobniej wynika z braku porowatości jego mikrostruktury.

Rysunki 2 i 3 pokazują zmianę temperatury próbek podczas ogrzewania i spalania oraz procentowy ubytek masy próbek w czasie tych procesów. Analiza przebiegu uzyskanych krzywych ubytku masy wykazała, że brykiety charakteryzują się dużą dynamiką wydzielania części lotnych. Wynika to z rozwiniętej powierzchni właściwej brykietu oraz jego porowatości sięgającej około 25%. Uwalnianie składników lotnych z węgla kawałkowego jest trudniejsze i trwa dłużej.

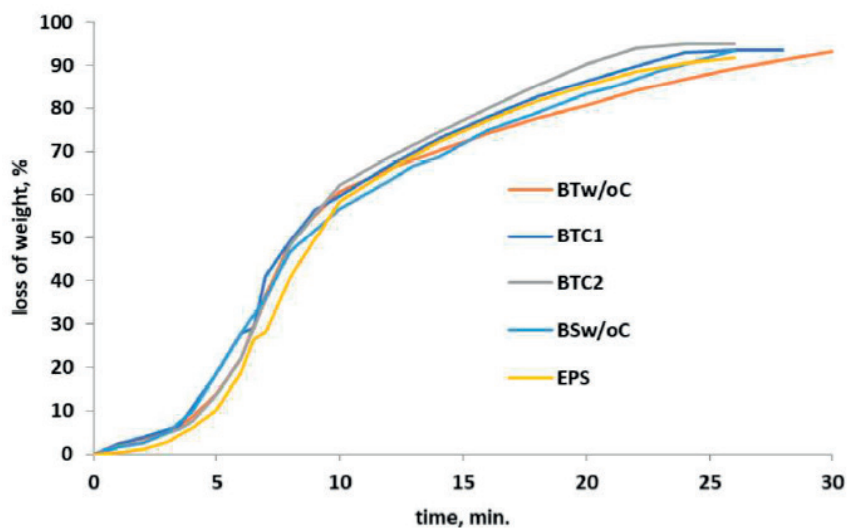
Ponadto brykiety zachowują integralność podczas spalania części lotnych i samego paliwa, ponieważ ich porowatość umożliwia swobodny przepływ gazowych produktów odgazowania. Węgiel kawałkowy podczas spalania rozpada się na mniejsze części wskutek ciśnienia wewnętrznego powodowanego przez powstające gazy. Rysunek 4 przedstawia zmianę procentowego ubytku masy próbek w funkcji temperatury podczas ogrzewania i spalania. Z wykresu wynika, że zmiana struk-

tury wpływa na reaktywność paliwa, ponieważ ułatwia wydzielanie części lotnych. W przypadku brykietów szybszy ubytek masy rozpoczyna się już przy 50°C. Przy 500°C procentowy ubytek masy jest o około 5% większy na korzyść brykietów.

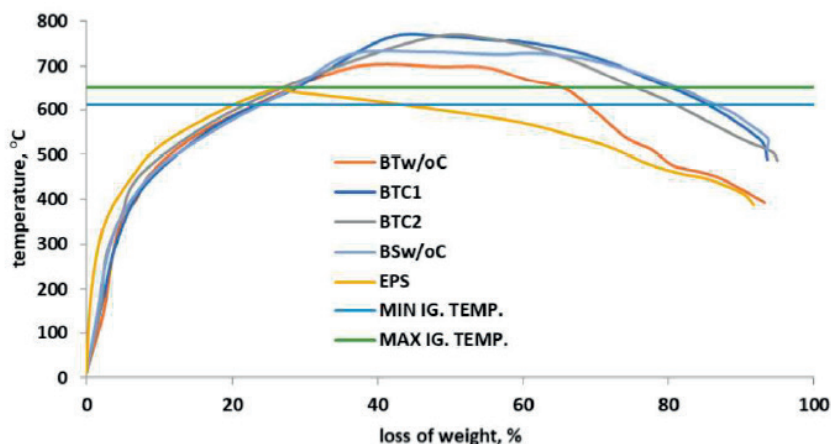
Wykres pokazuje również, że najwyższa osiągnięta temperatura dla węgla kawałkowego odpowiada temperaturze zapłonu. Po osiągnięciu punktu zapłonu temperatura procesu spalania spada. Dla wszystkich wytworzonych brykietów maksymalna temperatura spalania była osiągnięta po procesie zapłonu i była wyższa o 87-154°C.



Rys. 2. Zmiana temperatury próbki w czasie podczas ogrzewania i procesu spalania.



Rys. 3. Zmiana procentowego ubytku masy próbek w czasie podczas ich ogrzewania i spalania.



Rys. 4. Zmiana procentowego ubytku masy próbek w funkcji temperatury podczas ogrzewania i spalania.

Wnioski

Przedstawiona technologia pozwala przede wszystkim zagospodarować nieprzydatną frakcję drobną do 5 mm. Ta rozdrobniona pozostałość, z dodatkiem katalizatorów i/lub sorbentów oraz lepiszcza, może zostać wykorzystana do produkcji certyfikowanego kompozytowego paliwa węglowego w postaci mikrobrykietów. Technologia umożliwia także łączenie ze sobą surowców o różnych właściwościach (wykorzystać surowce o niższych parametrach) celem uzyskania paliwa o kwalifikowalnych parametrach.

Przeprowadzone badania spalania wykazały, że paliwo w postaci brykietów spala się znacznie lepiej niż węgiel kawałkowy. Wynika to głównie z porowatości brykietów wynoszącej 21-25%. W przeciwieństwie do węgla kamiennego brykiety mają rozgałęziony system kanałów oraz dużą liczbę większych porów, co ułatwia wydzielanie związków lotnych w niższej temperaturze. Zmiana struktury powoduje więc zmianę reaktywności paliwa, ponieważ sprzyja uwalnianiu części lotnych.

Większa reaktywność brykiety względem węgla kawałkowego pozwala ograniczyć strumień powietrza o około 10%, co zmniejsza objętość spalin i straty kominowe. Ograniczenie prędkości unoszenia pyłu prowadzi natomiast do obniżenia emisji. Otrzymane paliwo kompozytowe może zatem wykazywać lepsze właściwości eksploatacyjne niż produkt podstawowy.

Badania przedstawione w artykule zostały zrealizowane w ramach projektu UDA-RPSL.01.02.00-24-0B0F/20-00.

Bibliografia

- [1] Łowicki D., *Landscape pattern as an indicator of urban air pollution of particulate matter in Poland*, Ecol. Indic. 97 (2019) 17-24.
- [2] Stala-Szlugaj K., *Spalanie węgla kamiennego w sektorze komunalno-bytowym – wpływ na wielkość niskiej emisji*, Rocz. Ochr. Środ. 13 (2011) 1877-1889.
- [3] Wielgościński G., Czerwińska J., *Smog episodes in Poland*, Atmosphere 11 (2020) 277.
- [4] Rogula-Kozłowska W. i in., *A study on the seasonal mass closure of ambient fine and coarse dusts in Zabrze, Poland*, Bull. Environ. Contam. Toxicol. 88 (2012) 722-729.
- [5] Dane statystyczne GUS dotyczące zużycia energii w gospodarstwach domowych, dostęp: 30 kwietnia 2022.
- [6] Kerimray A. i in., *Coal use for residential heating: patterns, health implications and lessons learned*, Energy Sustain. Dev. 40 (2017) 19-30.
- [7] Bembenek M. i in., *Research on the possibility of producing an environmentally friendly qualified composite fuel for the transitional period in the household and communal sector in Poland*, Przem. Chem. 101 (2022) 191-196.
- [8] Drzymała Z., *Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods*, Elsevier Science Publishers, 1993.
- [9] Hryniewicz M. i in., *Agglomeration of fine-grained materials in roll presses with asymmetrical compaction unit*, Przem. Chem. 94 (2015) 2223-2226.
- [10] Baiul K. i in., *Optimization of wastes compaction parameters in case of gradual wear of the briquetting press rolls*, Struct. Integr. (2022) 293-302.
- [11] Janewicz A., Kosturkiewicz B., *Otrzymywanie brykietów paliwa kompozytowego z węgla brunatnego i biomasy*, Przem. Chem. 94 (2015) 1521-1523.

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.12>

Optymalizacja procesu spalania i waloryzacja ubocznych produktów spalania dla wypełnienia założeń gospodarki o obiegu zamkniętym

JAKUB SOBIERAJ¹, TOMASZ MACIEJEWSKI¹, WOJCIECH KURPAS¹

¹ KMB Catalyst, Sp z o.o.

Słowa kluczowe: UPS, uboczne produkty spalania, GOZ, paliwa stałe, biomasa, węgiel kamienny

Spalanie paliw stałych pozostaje istotnym elementem polskiego systemu elektroenergetycznego, głównie ze względu na przewidywalność pracy jednostek wytwórczych, a także ich zdolności regulacyjne i stabilizacyjne. Jednocześnie należy podkreślić, że otoczenie gospodarcze, krajowe i europejskie uwarunkowania regulacyjne oraz tempo transformacji sektora energii zmieniają się na tyle dynamicznie, iż jednoznaczne określenie długoterminowego kierunku rozwoju polskiej energetyki jest utrudnione. W tych warunkach nadal zasadne pozostaje analizowanie roli paliw stałych, procesu spalania oraz możliwości zagospodarowania ubocznych produktów spalania, które powstają obok energii elektrycznej i ciepła. W 2023 r. ponad 60% końcowego zużycia energii w gospodarstwach domowych w przeliczeniu na jednego mieszkańca nadal wiązało się ze spalaniem paliw stałych [1].

Równocześnie sektor wydobywczy w Polsce doświadcza istotnych trudności ekonomicznych i organizacyjnych, co w dłuższej perspektywie może prowadzić do dalszego ograniczania krajowej podaży węgla kamiennego i brunatnego. Oznacza to sytuację, w której spadek popytu na paliwa stałe może być wolniejszy niż tempo zmniejszania się podaży krajowej. W rezultacie rola importu węgla może w kolejnych latach wzrosnąć. Dostępne analizy wskazują, że przy określonych scenariuszach rozwoju systemu energetycznego bilans paliwowy może okazać się nie-

wystarczający, co dodatkowo zwiększa znaczenie bezpieczeństwa dostaw paliw do sektora energetycznego [2,3].

Alternatywę częściowo stanowi biomasa, której wykorzystanie również napotyka szereg ograniczeń. W odróżnieniu od węgla biomasa nie tworzy jednolitego rynku towarowego i charakteryzuje się znaczną niejednorodnością właściwości fizycznych i chemicznych. W ujęciu energetycznym można ją zdefiniować jako stały materiał organiczny pochodzenia biologicznego, możliwy do wykorzystania jako nośnik energii. Istotne ograniczenia dotyczą jednak dostępności surowca, miejsca jego pochodzenia, sezonowości podaży oraz relatywnie niskiej gęstości energetycznej, która wpływa na ekonomikę transportu i magazynowania. Z dostępnych danych wynika, że krajowy potencjał podaży biomasy może być niewystarczający względem deklarowanego lub prognozowanego zapotrzebowania, co ogranicza zarówno bieżącą eksploatację, jak i decyzje inwestycyjne.

Powyższe uwarunkowania wskazują, że paliwa stałe, mimo iż nie stanowią obecnie dominującego kierunku nowych inwestycji, nadal pełnią ważną funkcję w krajowym systemie elektroenergetycznym. W perspektywie krótko- i średnioterminowej całkowite odejście od ich spalania wydaje się mało prawdopodobne.

Niezależnie od rodzaju paliwa, proces spalania prowadzi do powstawania frakcji mineralnych określanych zbiorczo jako uboczne produkty spalania (UPS). Należą do nich m.in. popioły lotne, popioły denne oraz żużle. W zależności od właściwości materiałowych, sposobu zagospodarowania oraz uwarunkowań prawnych UPS mogą być traktowane jako odpady lub jako surowce wtórne możliwe do ponownego wykorzystania. Z tego względu wpisują się one w model gospodarki o obiegu zamkniętym, w którym mogą częściowo zastępować kruszywa naturalne oraz dodatki mineralne. Ich wykorzystanie może przyczyniać się do ograniczenia zużycia surowców pierwotnych, redukcji ilości odpadów przemysłowych oraz obniżenia śladu środowiskowego wybranych procesów przemysłowych [4,5].

Efektywne wykorzystanie UPS w modelu GOZ wymaga jednak często przeprowadzenia waloryzacji, rozumianej jako zespół działań prowadzących do poprawy właściwości użytkowych materiału. Waloryzacja może być realizowana na trzech etapach: przed procesem spalania, w jego trakcie oraz po jego zakończeniu [6]. Do metod stosowanych przed spalaniem należą m.in. suszenie, peletowanie lub brykietowanie, rozdrabnianie, toryfikacja, piroliza, odsiewanie, usuwanie części niepalnych oraz addytywowanie.

Drugim obszarem jest waloryzacja prowadzona w trakcie spalania. Proces spalania paliw stałych ma charakter złożonego zjawiska fizykochemicznego, którego przebieg zależy od parametrów pracy instalacji, właściwości paliwa oraz zastoso-

wanej technologii. Tożsama ilość paliwa może, w zależności od warunków procesu, generować różny uzysk energii, odmienny skład gazów odlotowych oraz zróżnicowane właściwości UPS. Z tego względu technologia spalania oraz sposób prowadzenia procesu determinują zarówno ilość, jak i jakość ubocznych produktów spalania, a tym samym ich potencjał do dalszego zagospodarowania.

Trzecim wariantem jest waloryzacja po procesie spalania, która obejmuje zarówno świeże UPS, jak i materiały zdeponowane historycznie na składowiskach. W tym kontekście stosuje się również pojęcia urban mining oraz ash harvesting, odnoszące się do odzysku surowców z wcześniej odrzuconych lub zdeponowanych strumieni materiałowych. Do podstawowych metod waloryzacji po procesie spalania należą mielenie, przesiewanie, stabilizacja chemiczna, dopalanie oraz wymywanie. Zasadność zastosowania poszczególnych metod zależy od docelowego kierunku wykorzystania materiału oraz od relacji pomiędzy efektem technologicznym, kosztem ekonomicznym i bilansem środowiskowym procesu.

Uboczne produkty spalania znajdują obecnie zastosowanie przede wszystkim w budownictwie, inżynierii lądowej oraz wybranych obszarach przemysłu materiałowego. Do najważniejszych kierunków wykorzystania UPS należą: produkcja cementu i betonu, drogownictwo i budownictwo ziemne, rolnictwo, geopolimery, materiały kompozytowe i wypełniacze, odzysk wybranych pierwiastków, górnictwo, a także sorbenty i materiały filtracyjne. Ze względu na dynamiczny rozwój badań niewykluczone jest dalsze poszerzanie tych zastosowań [7].

Ocena przydatności UPS powinna mieć charakter wielokryterialny i obejmować co najmniej cztery grupy czynników: fizykochemiczne, środowiskowe, ekonomiczne oraz prawne. Do parametrów fizykochemicznych należą m.in. skład chemiczny, zawartość części palnych, reaktywność, zawartość CaO i SO₃, odczyn pH oraz uziarnienie. Aspekt środowiskowy obejmuje m.in. wymywalność składników potencjalnie niebezpiecznych, emisje wtórne oraz stabilność objętościową. Kryteria ekonomiczne odnoszą się do kosztów transportu, przetwarzania i magazynowania oraz do porównania opłacalności odzysku i składowania. Aspekt prawny dotyczy spełnienia wymagań normatywnych, klasyfikacji materiału oraz zgodności z procedurą utraty statusu odpadu (end-of-waste). Dopiero łączne spełnienie wymagań w tych obszarach umożliwia bezpieczne i zgodne z prawem zawrócenie materiału do gospodarki [8].

Rynek UPS można analizować jako wielopoziomowy łańcuch wartości obejmujący: poziom wytwarzania UPS, poziom obrotu i przetwarzania, poziom zagospodarowania końcowego oraz otoczenie instytucjonalne i naukowe. Do pierwszej grupy należą podmioty energetyczne wytwarzające UPS w ramach działalności podstawowo-

wej. Drugi poziom obejmuje podmioty zajmujące się handlem, logistyką i waloryzacją materiału. Trzeci tworzą odbiorcy końcowi, tacy jak cementownie, producenci betonu i przedsiębiorstwa budowlane. Czwarty poziom stanowią jednostki naukowe, organizacje branżowe oraz instytucje otoczenia regulacyjnego i eksperckiego.

Dostępność publicznych danych dotyczących rzeczywistego zagospodarowania UPS pozostaje ograniczona. Utrudnia to jednoznaczne określenie skali problemów występujących po stronie wytwórców oraz identyfikację czynników decydujących o braku możliwości ponownego wykorzystania określonych strumieni materiałowych. Dodatkowym utrudnieniem jest rozproszenie źródeł powstawania odpadów, zmienność jakości UPS oraz ograniczona dostępność spójnych danych dotyczących strumieni kierowanych do składowania. Wg autorów [9] odzysk popiołów z węgla kamiennego (kod odpadu 10 01 02) znajduje się na wysokim poziomie i kształtuje się następująco (dane do obu wykresów pochodzą z GUS, m.in. z raportu [10]). Ci sami autorzy pokazują dane dotyczące popiołów biomasowych, które są zatrważające i pokazują w zasadzie brak zagospodarowania popiołów powstałych z paliwa biomasowego. Wg raportu [11] w roku 2023 w polskiej energetyce wytworzonych zostało prawie 10 mln ton odpadów, z czego odzyskowi poddano niewiele ponad 4.2 mln ton, co stanowi ok. 45,3% całości. Współczynnik ten pokazuje, że pomimo dużego udziału recyklingu w przypadku popiołów lotnych z węgla kamiennego, pozostałe UPS produkowane przy udziale innych paliw nie znajdują swojego ponownego zastosowania w gospodarce.

W ramach projektu badawczego "Combustion catalysts for pulverized, grate, and fluidized bed boilers," analizowana jest możliwość opracowania modyfikatora procesu spalania, którego zastosowanie mogłoby jednocześnie poprawiać parametry eksploatacyjne kotła oraz korzystnie wpływać na właściwości powstających UPS. Do potencjalnych korzyści należą: zwiększenie elastyczności pracy kotła i obniżenie minimum technicznego, zmniejszenie zawartości niedopału w popiele, zwiększenie gęstości nasypowej popiołu, ograniczenie emisji NO_x, redukcja podatności na żużlowanie komory paleniskowej, a także poprawa diagnostyki procesu dzięki szerszemu wykorzystaniu danych eksploatacyjnych i analizie wieloparametrowej.

Podsumowując, paliwa stałe w dalszym ciągu odgrywają istotną rolę w funkcjonowaniu krajowego systemu elektroenergetycznego, a ich znaczenie w perspektywie krótkoterminowej pozostaje wysokie. Równocześnie UPS stanowią ważny strumień materiałowy, którego właściwe zagospodarowanie może ograniczać zużycie surowców pierwotnych i wspierać rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym. Warunkiem zwiększenia skali ich wykorzystania jest jednak dalszy rozwój badań, dostosowanie ram prawnych, poprawa jakości materiału oraz efektywna współpraca pomiędzy

wszystkimi uczestnikami rynku. Szczęólnego znaczenia nabiera przy tym rozwój technologii waloryzacji UPS pochodzących ze spalania biomasy, które obecnie charakteryzują się relatywnie niższym poziomem zagospodarowania.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Eurostat, *Energia 2025 – dane statystyczne raport*, 2025.
- [2] Jonek-Kowalska I., Grebski W., *Comparative Analysis of Domestic Production and Import of Hard Coal in Poland: Conclusions for Energy Policy and Competitiveness*, *Energies* 17 (2024) 5157.
- [3] Roszkowski M., *Analiza scenariuszowa bilansu podaży-popytu węgla kamiennego w Polsce do 2040 roku*.
- [4] Huang T.-Y., Chiueh P.-T., Lo S.-L., *Life-cycle environmental and cost impacts of reusing fly ash*, *Resour. Conserv. Recycl.* 123 (2016).
- [5] Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., *Recovered Fly Ashes as an Anthropogenic Raw Material*, *Minerals* 13 (2023) 623.
- [6] Sobieraj J., *Waloryzacja popiołów w celu ich dalszego wykorzystania w materiałach antropogenicznych*, rozprawa doktorska.
- [7] CEMBUREAU – European Cement Association, *Use of secondary raw materials in the EU cement industry*, 2023, <https://cembureau.eu/media/kj3no0w3/230123-cembureau-qa-secondary-materials.pdf>
- [8] Sobieraj J., Gądek W., Wnorowska J. i in., *Poprawa własności ubocznych produktów spalania z kotłów rusztowych*, *Instal*, 2020, nr 1, s. 15-21.
- [9] Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., *Recovered Fly Ashes as an Anthropogenic Raw Material*, *Minerals* 13 (2023) 623. <https://doi.org/10.3390/min13050623>
- [10] Komisja Europejska, *Environment 2022*, 2022.
- [11] Główny Urząd Statystyczny, *Ochrona Środowiska 2024*, 2024, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2024,1,25.html>

<https://doi.org/10.21008/b.978-83-7775-901-1.13>

Charakterystyka spalania pyłu węglowego z dodatkiem biomasy otrzymanej metodą suszenia rozpyłowego

**SYLWIA WŁODARCZAK^{1*}, MAREK OCHOWIAK¹,
ANDŻELIKA KRUPIŃSKA¹, DARIUSZ CHOIŃSKI², ZDZISŁAW BIELECKI³**

¹ Politechnika Poznańska, Wydział *Technologii Chemicznej*

² Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki.

³ KMB Catalyst Sp. z o.o.

* sylwia.wlodarczak@put.poznan.pl

Słowa kluczowe: biomasa, pył węglowy, modyfikatory spalania

Współspalanie biomasy z węglem stanowi efektywną i szeroko stosowaną technologię, pozwalającą ograniczyć zużycie paliw kopalnych, zmniejszyć emisję zanieczyszczeń oraz zwiększyć udział energii odnawialnej przy niewielkich modyfikacjach istniejącej infrastruktury. Proces ten daje efekt synergiczny, poprawiając reaktywność paliwa i parametry spalania [1]. Ekologiczne, ekonomiczne i technologiczne korzyści współspalania stanowią istotny element transformacji energetycznej oraz jeden z kluczowych kierunków dekarbonizacji sektora energetycznego [2]. Głównym celem badań było sprawdzenie, czy zastosowanie maltodekstryny o kontrolowanej morfologii i rozmiarze cząstek może poprawić parametry spalania, w szczególności obniżyć temperaturę zapłonu oraz zmienić charakter przebiegu reakcji termicznych.

Biomasa, ze względu na swoją włóknistą strukturę, jest trudna do efektywnego rozdrobnienia, co prowadzi do powstawania cząstek o nieregularnych kształtach i szerokim rozkładzie wielkości oraz zmiennej zawartości wilgoci. W celu przezwyciężenia tych ograniczeń zastosowano metodę suszenia rozpyłowego do wytwarza-

nia biomasy w postaci mikrokapsulek o kontrolowanych właściwościach fizycznych. Do przygotowania materiału użyto roztwór maltodekstryny, który poddano procesowi mikrokapsułkowania w suszarce rozpyłowej Büchi Mini Dryer B-290, prowadząc proces w trzech temperaturach wlotowych: 120°C, 100°C i 80°C.

Otrzymane materiały scharakteryzowano metodą analizy rozkładu wielkości kropeł i cząstek z użyciem analizatora Malvern Spraytec. Następnie wykonano badania procesów pirolizy mieszanin pyłu węglowego i biomasy z użyciem pirolizatora wraz z chromatografem z detektorem MS. Analizowano próbki czystego węgla oraz mieszaniny węgla z dodatkiem biomasy o stosunku masowym 32:1. Wszystkie próbki zostały przygotowane na bazie pyłu węgla kamiennego z KWK Janina. Węgiel został zmielony i przesiany, aby utrzymać stałą granulację o średniej średnicy cząstek 70 µm i zapewnić powtarzalność pomiarów nawet dla prób o małej masie. W badaniach z użyciem pirolizatora wykorzystano dwie próbki. Próbka P1 zawierała wyłącznie sam pył węgla kamiennego o rozmiarze ziarna 70-90 µm. W próbce P2 biomasa stanowi 1: 32 masy węgla.

Pomiary prowadzone były z wykorzystaniem urządzenia firmy **Shimadzu: EGA/PY-3030D**, jest to wielofunkcyjny pirolizer wraz z chromatografem z detektorem MS. Pirolizer jest programowany temperaturowo, posiada możliwość pracy w trybie termodesorpcji oraz pirolizy, analizy EGA (Evolved Gas Analysis) analiza wydzielanych gazów. Urządzenie posiada kwadropolowy detektor mas MS, zakres skanowania wynosi co najmniej od 1,5 do 1090 m/z. Czułość spektrometru mas w jonizacji elektronowej (EI): tryb SCAN wynosi: $S/N \geq 500$ (dla 1 pg/ul OFN i helu jako gazu nośnego), minimalny poziom detekcji (IDL) liczony dla 100 fg/ul OFN m/z 272 (n=8) to $IDL \leq 5$ fg. Masa próbek była w granicach 10 ± 1 mg. Probki w pirolizerze były umieszczone na wełnie mineralnej.

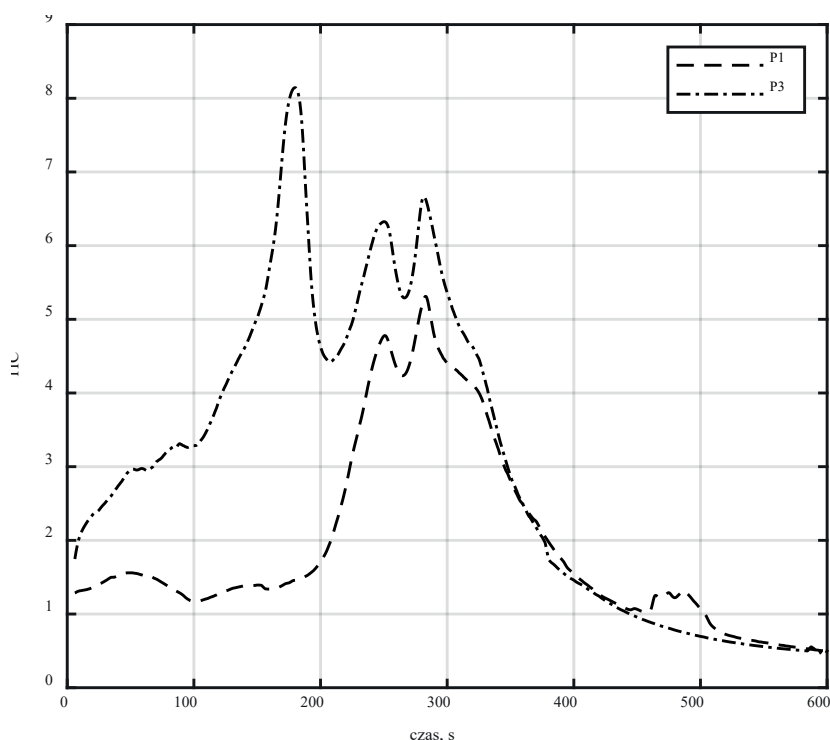
Przeprowadzana była analiza typu **EGA** (Evolved Gas Analysis), wykonana była bez kolumny chromatograficznej, zamiast niej była kapilara 2.5m x 0.15mm. Pomiar były prowadzone z programowaną temperaturą od 80°C do 600°C w ciągu jednej minuty. Analizy były prowadzone w atmosferze helu.

Kapilara łącząca dozownik z MS miała 2.5m, prędkość gazu nośnego 138cm/s, zatem opóźnienie wnoszone przez kapilarę wynosiło 1.81s.

Na rysunku 1 został przedstawiony całkowity prąd jonowy dla obydwu próbek. Można zauważyć, że dla próbki P2 z biomasą, choć jej zawartość wynosiła tylko 1:32 masy próbki, emisja gazów pirolitycznych w całym badaniu była większa.

Kolejnym etapem były badania temperatury zapłonu oraz przebiegu spalania w komorze spalania, obejmujące zarówno pomiary temperatury zapłonu, jak i analizę wizualną procesu.

Analiza rozkładu wielkości kropeł i cząstek wykazała istotny wpływ parametrów procesu suszenia takich, jak przepływ gazu atomizującego i lepkość roztworu, na wielkość uzyskiwanych cząstek. Zaobserwowano również, że obniżenie temperatury suszenia prowadzi do wzrostu rozmiaru cząstek proszku, co wiązano z większą zawartością wilgoci oraz tendencją do aglomeracji.



Rys.1. Całkowity prąd jonowy detektora MS dla próbek P1 i P2

Wyniki badań pirolizy wykazały, że obecność biomasy wpływa na przebieg rozkładu termicznego paliwa. Zaobserwowano zwiększone wydzielanie tlenku węgla (CO), co wskazuje na intensyfikację reakcji związanych z rozkładem grup tlenowych obecnych w strukturze węgla. Dodatkowy tlen wprowadzony wraz z biomasą sprzyja tworzeniu reaktywnych form tlenu, przyspieszających degradację złożonych struktur węglowych. Jednocześnie stwierdzono zwiększony udział związków alifatycznych w produktach pirolizy próbek zawierających biomasę. Zjawisko to jest korzystne, ponieważ związki alifatyczne spalają się łatwiej i bardziej całkowicie niż związki aromatyczne, które sprzyjają powstawaniu sadzy i produktów niecałkowitego spalania.

Badania temperatury zapłonu wykazały wyraźną poprawę właściwości zapłonowych mieszanin zawierających biomasę. Czysty węgiel zapalał się w temperaturze około 570°C, natomiast mieszanina z dodatkiem biomasy ulegała zapłonowi już w około 520°C. Dodatkowo odnotowano wzrost zawartości części lotnych o około 9%, co sprzyja łatwiejszemu inicjowaniu spalania.

Badania przeprowadzone w komorze spalania potwierdziły, że mieszaniny węgla i biomasy zapalały się w niższych temperaturach, a proces spalania przebiegał szybciej i w bardziej ograniczonej objętości. Analiza wizualna umożliwiła precyzyjne określenie momentu zapłonu oraz charakterystyki płomienia.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że zastosowanie biomasy przygotowanej metodą suszenia rozpyłowego może istotnie poprawić parametry spalania pyłu węgla. Nawet niewielki dodatek biomasy prowadzi do obniżenia temperatury zapłonu oraz poprawy kinetyki procesów termicznych. Wyniki te wskazują na potencjał zastosowania tej technologii w praktyce przemysłowej, szczególnie w kontekście poprawy efektywności i ekologiczności spalania paliw stałych.

Podziękowania

Badania realizowane były w ramach projektu „Katalizatory spalania dla kotłów pyłowych, rusztowych i fluidalnych”, finansowanego w ramach Priorytetu I Funduszy Europejskich dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), umowa o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24.

Bibliografia

- [1] Yi, B., et al., *Investigation on the co-combustion characteristics of multiple biomass and coal under O₂/CO₂ condition and the interaction between different biomass*, Journal of Environmental Management 322 (2022) 115812.
- [2] Włodarczak, S., et al., *Perspectives on cleaner-pulverized coal combustion: the evolving role of combustion modifiers and biomass co-firing*, Energies 19 (2026) 633.

ISBN 978-83-7775-900-4

