

Zdzisław BIELECKI¹, Sylwia WŁODARCZAK², Marek OCHOWIAK²,
Andżelika KRUPIŃSKA², Magdalena MATUSZAK²

¹ Kmb Catalyst Sp. z o.o., Wiry.

² Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska.

MODYFIKATORY I KATALIZATORY POPRAWIAJĄCE SPALANIE PYŁU WĘGLOWEGO

Słowa kluczowe: modyfikator, katalizator, pył węglowy, spalanie

1. WPROWADZENIE

Spalanie pyłu węglowego jest jednym z kluczowych procesów wykorzystywanych w energetyce, jednak ze względu na niską reaktywność drobnych cząstek węgla oraz trudności w zapewnieniu pełnego utlenienia, proces ten cechuje się często niską efektywnością oraz wysoką emisją szkodliwych zanieczyszczeń [1]. W celu poprawy parametrów spalania oraz zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko, jednym z rozwiązań jest stosowanie różnego rodzaju modyfikatorów i katalizatorów.

Spalanie pyłu węglowego wymaga odpowiedniej aktywności katalitycznej, aby zapewnić szybkie utlenianie sadzy i składników lotnych. Węgiel w formie pyłu charakteryzuje się niską aktywnością powierzchniową, co powoduje konieczność podnoszenia temperatury zapłonu i utrzymywania wysokiej temperatury procesu. Dodatkowo obecność związków siarki, metali ciężkich oraz innych zanieczyszczeń powoduje zatrucie katalizatorów i obniżenie efektywności spalania. Stąd też poszukiwania nowych materiałów katalitycznych koncentrują się na zwiększeniu aktywności, stabilności termicznej i odporności na zatrucie.

W niniejszej pracy dokonano krótkiego przeglądu najważniejszych grup materiałów katalitycznych, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów wieloskładnikowych, które dzięki efektom synergii wykazują znacznie wyższą efektywność. Szczególną uwagę poświęcono strukturze i właściwościom perowskitów, roli związków ceru oraz znaczeniu nanoskalowych nośników katalitycznych. Wskazano także niekonwencjonalne rozwiązania pozwalające na zagospodarowanie materiałów odpadowych jako katalizatorów lub materiałów, które nie wykazują negatywnego oddziaływania na środowisko. Ostatnim etapem było przedstawienie procedury projektowania modyfikatorów procesu spalania.

2. PEROWSKITY JAKO NOWOCZESNE MATERIAŁY KATALITYCZNE

Perowskity to grupa złożonych tlenków o strukturze ABO_3 , gdzie A i B to różne kationy metali [2]. Ich unikalna struktura krystaliczna pozwala na szerokie modyfikacje składu chemicznego poprzez częściową substytucję jonów A lub B, co umożliwia dostosowanie właściwości katalitycznych, termicznych oraz transportu elektronów i jonów tlenu.

W kontekście katalizy spalania pyłu węglowego perowskity wyróżniają się zdolnością do szybkiego transportu tlenu wewnątrz struktury oraz aktywacją cząsteczek tlenu w warunkach wysokiej temperatury (800-1100°C). W badaniach [3] wykazano, że perowskity domieszkowane kobaltem ($LaCoO_3$), manganem ($LaMnO_3$) oraz miedzią ($LaCuO_3$) istotnie poprawiają efektywność spalania pyłu węglowego poprzez zwiększenie szybkości utleniania sadzy i gazów pośrednich (CO , H_2) [4].

Mechanizm działania perowskitów opiera się na cyklu redoks jonów metali w pozycji B, które ulegają łatwej zmianie stopnia utlenienia, wspierając proces przeniesienia tlenu z fazy gazowej do paliwa stałego. Dodatkowo, defekty tlenowe powstałe w strukturze perowskitów ułatwiają migrację jonów tlenu, co przekłada się na wysoką aktywność katalityczną nawet przy obniżonych temperaturach pracy.

Kolejnym ważnym aspektem jest stabilność termiczna tych materiałów, które wykazują odporność na sinteryzację i zatrucie powierzchni przez związki siarki lub chloru obecne w węglu. Dzięki temu perowskity mogą pracować długo bez utraty właściwości katalitycznych, co jest kluczowe z punktu widzenia zastosowań przemysłowych.

Zastosowanie perowskitów jako modyfikatorów pyłu węglowego jest wciąż intensywnie badane, także pod kątem optymalizacji składu, metod syntezy (np. sol-żel, ko-precypitacja) oraz sposobów aplikacji (mieszanie z paliwem, powłoki na cząstkach pyłu). Efekty synergiczne uzyskuje się często łącząc perowskity z innymi tlenkami, np. CeO_2 , co zwiększa całkowitą aktywność katalityczną układu [4].

3. WPŁYW ZWIĄZKÓW CERU I SYNERGII Z INNYMI METALAMI

Tlenek ceru (CeO_2) jest powszechnie uznawany za jeden z najskuteczniejszych katalizatorów wspomagających spalanie paliw stałych, w tym pyłu węglowego. Główną zaletą CeO_2 jest jego zdolność do szybkiej wymiany elektronów dzięki przejściu między stanami Ce^{3+} i Ce^{4+} (właściwości redoks) oraz do magazynowania i uwalniania tlenu (właściwość ta jest określana jako efekt buforowania tlenu). Dodatkowym atutem jest jego zdolność do modyfikacji zarówno powierzchniowej, jak i w masie materiału [5-7].

Badania Shan i współpracowników [8] wskazują, że tlenek ceru umożliwia utrzymanie wysokiej aktywności utleniania sadzy przez stabilizację powierzchni katalitycznej i zapobieganie aglomeracji cząstek. CeO_2 sam w sobie wykazuje wysoką zdolność do aktywacji tlenu molekularnego i formowania reaktywnych form tlenu, które są kluczowe dla skutecznego dopalania cząstek węgla.

Synergiczne efekty pojawiają się, gdy CeO_2 jest łączony z innymi tlenkami metali, takimi jak Fe_2O_3 , CuO czy MnO_2 . Na przykład Pham i współpracownicy [8] pokazali, że mieszanina CeO_2 z Fe_2O_3 obniża temperaturę zapłonu pyłu węglowego nawet o $70\text{--}100^\circ\text{C}$, co jest istotne dla redukcji emisji szkodliwych gazów oraz poprawy wydajności energetycznej procesu. Dodatek miedzi i manganu wzmacnia ten efekt przez zwiększenie liczby miejsc aktywnych i przyspieszenie cyklu redoks.

Związki ceru pełnią także rolę stabilizatora tlenków metali, zapobiegając ich sinteryzacji i deaktywacji. Co więcej, nanometryczne cząstki CeO_2 wykazują lepsze właściwości katalityczne niż ich makroskopowe odpowiedniki ze względu na wyższą powierzchnię właściwą i większą koncentrację defektów tlenowych [8].

Salinas i współpracownicy [10] zaprezentowali zaprojektowane, złożone katalizatory w postaci ciał stałych otrzymanych metodą sol-żel. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie produktów o znacznym rozwinięciu powierzchni katalitycznej. Jednym z obiecujących, opracowanych rozwiązań był układ K-CeO_2 .

Ze względu na powyższe właściwości, CeO_2 i jego układy wieloskładnikowe są obecnie intensywnie wdrażane w przemyśle energetycznym jako modyfikatory poprawiające spalanie pyłu węglowego, zwłaszcza w krajach, gdzie węgiel jest głównym źródłem energii.

4. ZNACZENIE STRUKTURY NOŚNIKA KATALITYCZNEGO I NANOSKALOWYCH UKŁADÓW

Efektywność katalitycznego spalania pyłu węglowego nie zależy wyłącznie od składu chemicznego katalizatora, ale w dużej mierze od jego struktury fizycznej oraz postaci nośnika. Nośniki katalityczne pełnią kilka kluczowych funkcji: zwiększają powierzchnię kontaktu między katalizatorem a reagentami, stabilizują cząstki aktywne, zapobiegają ich aglomeracji oraz poprawiają rozkład temperatury w palenisku.

Typowe nośniki to tlenki metali, takie jak Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 oraz TiO_2 . Wybór nośnika determinuje właściwości mechaniczne, termiczne oraz chemiczną stabilność układu katalitycznego. Nanoskalowe nośniki wyróżniają się znaczną powierzchnią właściwą (nawet powyżej $200\text{ m}^2/\text{g}$), co umożliwia bardzo równomierne rozproszenie cząstek aktywnych.

Nanostrukturyzacja katalizatorów przekłada się na zwiększenie liczby aktywnych miejsc powierzchniowych oraz lepszą dystrybucję ciepła i masy podczas spalania, co skutkuje szybszym i bardziej pełnym utlenianiem pyłu. Larsson i współ-

pracownicy [11] w swoich badaniach wykazali, że nanokompozyty tlenków metali osadzone na nośnikach aluminiowych i tytanowych wykazują wyższą stabilność katalityczną oraz zwiększoną aktywność w spalaniu węgla w porównaniu do tradycyjnych, makroskopowych katalizatorów.

Ponadto nanoskalowe układy umożliwiają projektowanie katalizatorów wielofunkcyjnych, gdzie różne składniki mogą działać w sposób komplementarny: np. jeden komponent aktywuje tlen, drugi usprawnia rozpad węglowodorów, a trzeci stabilizuje powierzchnię. To właśnie dzięki takim synergicznym właściwościom dwu- i wieloskładnikowych katalizatorów można osiągnąć znacznie lepsze efekty niż w przypadku katalizatorów jednoskładnikowych.

Pan i inni [12] wykazali, że wybór nośnika istotnie wpływa na aktywność, selektywność i stabilność katalizatora. Interakcje między nośnikiem a żelazem modyfikują strukturę powierzchni i właściwości redoks katalizatora. Analizowanymi nośnikami były związki takie jak SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 . Najbardziej obiecującym rozwiązaniem jest układ: $\text{FeNa}/\text{Al}_2\text{O}_3$, natomiast najmniejszą aktywność i selektywność, głównie ze względu na niewystarczające właściwości redoks i powierzchniowe, zaobserwowano dla układów FeNa/SiO_2 .

5. NOWATORSKIE ROZWIĄZANIA

W obliczu rosnących wymagań środowiskowych oraz potrzeby poprawy efektywności energetycznej, coraz większą uwagę przykładą się do innowacyjnych metod spalania węgla. Tradycyjne technologie ulegają modyfikacjom, a do paliwa bazowego wprowadza się różnorodne dodatki, katalizatory oraz komponenty pochodzenia organicznego i odpadowego. Celem tych działań jest nie tylko zwiększenie wydajności spalania, ale również ograniczenie emisji szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO) czy dwutlenek siarki (SO_2), oraz lepsze wykorzystanie dostępnych surowców wtórnych.

Wang i współpracownicy [13] przedstawili w jaki sposób dodatek pyłu hutniczego oraz osadów olejowych wpływa na właściwości spalania węgla. Wykazano, że zastosowanie tych materiałów jako dodatków do węgla w technologii PCI może poprawić efektywność spalania i jednocześnie umożliwić zagospodarowanie odpadów przemysłowych. Jest to krok w kierunku bardziej zrównoważonego i ekologicznego podejścia w przemyśle hutniczym. Warto nadmienić, że skład chemiczny rozpatrywanych dodatków jest bardzo rozbudowany. Zawierają one m.in. różnorodne tlenki metali, takie jak Fe_2O_3 , CaO , MgO , czy ZnO . Tlenki żelaza (Fe_2O_3) i wapnia (CaO) są szczególnie efektywne w obniżaniu temperatury zapłonu i przyspieszaniu procesu spalania.

Di i współpracownicy [14] prowadzili badania dotyczące wpływu katalizatora, będącego produktem prażenia sydereytu, na charakterystyki spalania węgla kamiennego i antracytu. Celem pracy było zbadanie, w jaki sposób dodatek katalizatora wpływa na właściwości spalania węgla kamiennego i antracytu, w tym na tempera-

turę zapłonu, wskaźniki spalania, stopień wypalenia oraz ilość wydzielanego ciepła. Wykazano, że dla węgla kamiennego optymalne stężenie katalizatora wynosiło 1,5%, a dla antracytu 0,5%. Zastosowanie takiej dawki pozwalało na wzrost szybkości spalania węgla kamiennego o 42,5%, a antracytu o 9,13%. Ponadto katalizator wpływał na obniżenie temperatury zapłonu (antracyt – 3°C, węgiel kamienny 7°C) oraz zwiększenie wydzielanego ciepła (do 4,7 kJ/mg dla węgla kamiennego i 4,66 kJ/mg dla antracytu).

Tultabajew i współpracownicy [15] przedstawili innowacyjne podejście do poprawy efektywności i ekologiczności procesów w przemyśle węglowym poprzez użycie emulsji olejowo-wodnych na bazie oleju z krokosza (saflora). Wykazano, że zaproponowane rozwiązanie to ekologiczna i efektywna technologia, która pozwala ograniczyć negatywny wpływ przemysłu na środowisko oraz poprawia jakość i bezpieczeństwo produkcji węgla. Umożliwia także znaczącą redukcję emisję emitowanych pyłów, jak i poprawia sam proces spalania.

Ciekawym wątkiem także w kontekście katalitycznym jest współspalanie paliwa węglowego z biomasą. Przyczynia się to do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego oraz wspiera postęp technologiczny w sektorze energetyki. Istotną zaletą stosowania biomasy jest zerowy bilans emisji dwutlenku węgla, ponieważ ilość dwutlenku węgla uwalniana w procesie spalania jest równoważna ilości pochłoniętej przez rośliny w trakcie fotosyntezy. Biomasa wyróżnia się na tle innych źródeł energii odnawialnej m.in. możliwością zagospodarowania odpadów rolniczych (redukcja emisji metanu i pyłów), stabilnością dostaw (w przeciwieństwie do energii wiatrowej i słonecznej), niższymi kosztami i większą dostępnością niż wódór oraz brakiem zagrożeń radiologicznych typowych dla energetyki jądrowej. Współspalanie paliw stałych i biomasy jest procesem technologicznym, w którym węgiel spalany jest jednocześnie z odpowiednio dobranymi stałymi biopaliwami lub produktami ich przetworzenia. Metoda ta integruje wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych z tradycyjnym spalaniem paliw kopalnych i pozwala na zmniejszenie temperatury spalania, co wpływa na zmniejszenie emisji tlenków azotu. Współspalanie biomasy z węglem stanowi efektywną metodę ograniczenia zużycia paliw kopalnych [16-18].

Celem pracy [19] było badanie wpływu różnych proporcji biomasy w mieszance paliwowej na charakterystyki spalania oraz emisję zanieczyszczeń. Badano mieszanki zawierające 0%, 25%, 50%, 75% i 100% biomasy. Zwiększenie udziału biomasy w mieszance paliwowej wpływało na zmianę temperatury spalania, emisję zanieczyszczeń i efektywność spalania.

Kazagic i współpracownicy [20] przeprowadzili badania eksperymentalne nad współspalaniem niskokalorycznego węgla brunatnego z biomasą drzewną (trociny) oraz miskantem, mające na celu ocenę emisji zanieczyszczeń i problemów popiołowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistej pracy kotłów pyłowych. Przetestowano 12 mieszanek paliwowych w temperaturach 1250°C i 1450°C, analizując m.in. emisje NO_x, SO₂, CO. Stwierdzono, że współspalanie węgla z biomasą

w wysokim udziale (do 30%) nie powoduje istotnych problemów technologicznych, a przy odpowiednich warunkach pozwala ograniczyć emisje NO_x i częściowo SO₂ – szczególnie przy użyciu miskań, który wpływał korzystniej niż trociny. Efektywność spalania utrzymano na akceptowalnym poziomie do 15% udziału biomasy, powyżej którego wzrastała zawartość niedopalonego węgla w żużlu.

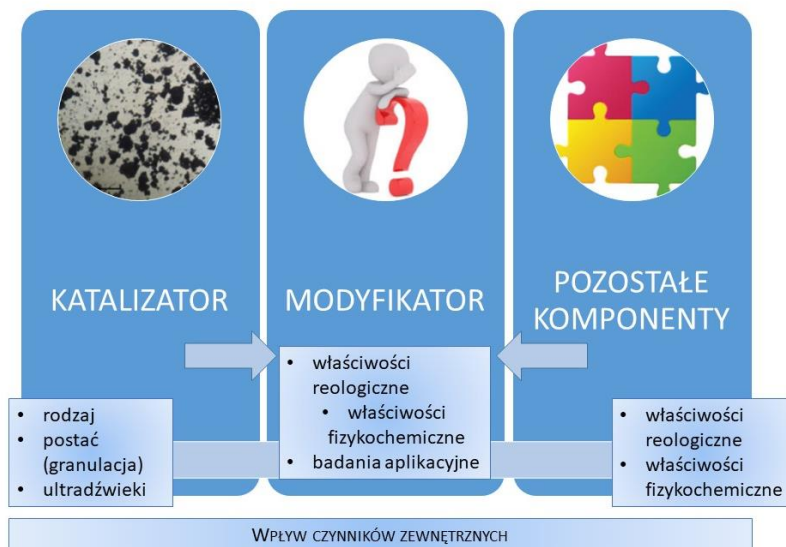
Chae i współpracownicy [21] przeprowadzili badania eksperymentalne w skali pilotażowej nad porównaniem dwóch technologii ograniczania emisji NO_x przy współspalaniu biomasy z węglem: reburningu (dopalonego spalania) i cofiringu (klasycznego współspalania). Testowano trzy rodzaje biomasy (pelety drzewne, biomasę torrefikowaną i pusty owocnik palmy olejowej) o czterech udziałach energetycznych (5–20%). Analizowano efektywność redukcji NO_x, konwersję węgla oraz wpływ właściwości paliwa. Wyniki wykazały, że reburning jest znacznie skuteczniejszy niż cofiring, osiągając nawet 4,9-krotnie większą efektywność redukcji NO_x w przeliczeniu na jednostkę energii. Największą efektywność uzyskiwano przy najniższych udziałach biomasy, a efektywność malała wykładniczo wraz ze wzrostem udziału. Ponadto, skuteczność reburningu była znacznie mniej zależna od właściwości biomasy, takich jak zawartość lotnych składników czy azotu, niż cofiring. Z kolei cofiring prowadził do lepszej konwersji węgla (czyli efektywności spalania) niż reburning, zwłaszcza w przypadku biomasy o wysokiej zawartości lotnych związków.

Wang i współpracownicy [22] analizowali proces współspalania biomasy, którą stanowiła słoma i drewno, z węglem w piecu z opadającą rurą. Monitorowano emisję tlenków azotu i tlenku węgla wzdłuż wysokości pieca, a także określano zawartość niedopalonego węgla w popiele lotnym. Uwzględniono wpływ rodzaju paliwa, temperatury, udziału biomasy we współspalaniu oraz współczynnika podziału powietrza. Wyniki wykazały, że wzdłuż wysokości pieca stężenie NO początkowo wzrastało, a następnie powoli malało dla wszystkich paliw, przy czym emisja NO ze spalania słomy lub drewna stanowiła odpowiednio około 1/3 i 1/2 emisji z samego węgla. W badanym zakresie temperatur (900–1100°C) wzrost temperatury powodował zwiększenie emisji NO, lecz jednocześnie w pewnym stopniu zmniejszał zawartość niedopalonego węgla, natomiast wpływ na emisję CO był niewielki. W warunkach współspalania biomasy emisja NO, emisja CO oraz zawartość niedopalonego węgla wyraźnie malały wraz ze wzrostem udziału biomasy w mieszance paliwowej. Ponadto, wyniki spalania z podziałem powietrza pokazały, że w przypadku spalania węgla podział powietrza znacząco redukował emisję NO, ale jednocześnie zwiększał emisję CO oraz zawartość niedopalonego węgla. W przypadku biomasy efekt ten był mniej wyraźny.

6. PERSPEKTYWY DZIAŁAŃ W ZAKRESIE PROJEKTOWANIA MODYFIKATORA

Projektowanie modyfikatora do procesu spalania pyłu węglowego to złożone i skomplikowane zadanie, które wymaga nie tylko dogłębnej wiedzy z zakresu chemii i inżynierii procesowej, ale również precyzyjnego podejścia etapowego. Każdy krok – od analizy właściwości pyłu, przez dobór odpowiednich reagentów, aż po optymalizację warunków spalania – musi być starannie zaplanowany i przetestowany. Proces ten wiąże się z licznymi wyzwaniami technologicznymi i środowiskowymi, co czyni go jednym z bardziej skomplikowanych obszarów badań nad poprawą efektywności i czystości spalania paliw stałych. Szczególnym wyzwaniem okazuje się przejście od skali laboratoryjnej, gdzie warunki można ściśle kontrolować, do skali przemysłowej, w której pojawia się szereg nowych zmiennych i ograniczeń technologicznych. Skalowanie procesu wymaga nie tylko dostosowania parametrów technicznych, ale także uwzględnienia ekonomiki i niezawodności działania w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, co czyni ten etap jednym z najbardziej krytycznych w całym cyklu projektowym.

Na rysunku 1 przedstawiono graficznie sposób projektowania przykładowego modyfikatora w postaci zawiesiny (cząstki ciała stałego – katalizatora, transportowane przez ciecz nośną).



Rys. 1. Metodologia projektowania nowatorskiego modyfikatora procesu spalania pyłu węglowego w postaci zawiesiny

Na rynku dostępne są już gotowe rozwiązania w postaci opracowanych produktów komercyjnych. Przykładami mogą być oferty firm takich jak Dugas [23], BASF [24] czy Clariant [25]. Warto jednak zaznaczyć, że są to rozwiązania wciąż niedoskonałe, wymagające dalszego rozwoju oraz doprecyzowania pod kątem specyficznych warunków aplikacyjnych. Ciekawą alternatywą jest modyfikator na bazie niklu Raneya opisany w zgłoszeniu patentowym [26].

Od skutecznego modyfikatora spalania pyłu węglowego oczekuje się przede wszystkim poprawy efektywności energetycznej procesu przy jednoczesnym ograniczeniu emisji szkodliwych substancji, takich jak tlenki azotu, siarki czy cząstki stałe. Kluczowe jest także wspomaganie stabilności płomienia, optymalizacja procesu utleniania oraz redukcja pozostałości popiołowych. Modyfikator powinien być ponadto łatwy w aplikacji, kompatybilny z istniejącą infrastrukturą oraz ekonomicznie opłacalny w warunkach przemysłowych. Idealne rozwiązanie musi łączyć skuteczność działania z bezpieczeństwem użytkowania i neutralnością środowiskową, spełniając jednocześnie rygorystyczne normy regulacyjne.

7. WNIOSKI

Spalanie pyłu węglowego, choć jest procesem powszechnie stosowanym w energetyce, nadal stawia poważne wyzwania ze względu na niską reaktywność paliwa oraz problem emisji zanieczyszczeń. Przegląd literatury pokazuje, że istotnym kierunkiem poprawy efektywności i ekologiczności tego procesu jest stosowanie modyfikatorów i katalizatorów, które dzięki efektom synergii wieloskładnikowych systemów znacznie zwiększają aktywność spalania.

Perowskity, jako materiały o unikalnej strukturze krystalicznej i wysokiej stabilności termicznej, wykazują znaczny potencjał w katalizie spalania pyłu węglowego poprzez efektywny transport i aktywację tlenu. Związki ceru i ich kompozyty z innymi tlenkami metali odgrywają rolę aktywnych centrów katalitycznych, które umożliwiają obniżenie temperatury zapłonu i zwiększenie szybkości reakcji utleniania.

Znaczenie nanoskalowych nośników katalitycznych polega na ich zdolności do zwiększania powierzchni kontaktu i stabilizowania aktywnych cząstek, co przekłada się na lepsze właściwości katalityczne całego układu. Projektowanie katalizatorów wieloskładnikowych, integrujących różne mechanizmy działania, stanowi obiecującą strategię w dalszym rozwoju technologii spalania pyłu węglowego.

Przedstawione w literaturze rozwiązania wskazują na rosnące zainteresowanie innowacyjnymi metodami poprawy efektywności i ekologiczności spalania paliw stałych. Zastosowanie odpadów przemysłowych, takich jak pył hutniczy czy osady olejowe, katalizatorów mineralnych oraz emulsji olejowo-wodnych pokazuje, że możliwe jest nie tylko zwiększenie efektywności procesu spalania, ale również ograniczenie jego negatywnego wpływu na środowisko. Szczególnie obiecujące

wydają się także strategie współspalania biomasy z węglem, które łączą aspekty energetyczne z gospodarką obiegu zamkniętego. Wszystkie te podejścia wpisują się w globalny trend poszukiwania bardziej zrównoważonych i wielofunkcyjnych technologii w sektorze energetycznym i przemysłowym.

W efekcie, zastosowanie nowoczesnych, synergicznych systemów katalitycznych może przyczynić się do poprawy efektywności energetycznej, redukcji emisji zanieczyszczeń oraz zwiększenia trwałości instalacji spalających pył węglowy, co jest szczególnie istotne w kontekście globalnych wyzwań związanych z ochroną środowiska i efektywnością energetyczną.

Zastosowanie modyfikatorów i katalizatorów o charakterze wieloskładnikowym wykazuje znaczące efekty synergii, które mogą prowadzić do znacznej poprawy efektywności spalania pyłu węglowego oraz redukcji emisji szkodliwych substancji. Jednakże, dla pełnego zrealizowania potencjału takich systemów, niezbędne są dalsze badania skupiające się na optymalizacji składu, mechanizmów działania oraz trwałości katalizatorów w rzeczywistych warunkach przemysłowych.

W świetle zaprezentowanych wyników i tendencji badawczych, szczególnie wartym kierunkiem rozwoju pozostaje poszukiwanie nowych, innowacyjnych rozwiązań, które zapewnią wymierne efekty w zakresie poprawy efektywności spalania pyłu węglowego oraz ograniczenia emisji zanieczyszczeń.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu dofinansowanego z I Priorytetu Programu Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021–2027 (FENG), na podstawie umowy o dofinansowanie nr FENG.01.01-IP.02-0976/24, pt. „Katalizatory spalania dla kotłów: pyłowych, rusztowych i fluidalnych”. Dodatkowo prace badawcze były wspierane w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (SBAD).

LITERATURA

- [1] Lorenz U., Skutki spalania węgla kamiennego dla środowiska przyrodniczego i możliwości ich ograniczania. Mat. Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Sympozja i Konferencje nr 64. Wyd. Instytut GSMiE PAN, Kraków, 97-112, 2005.
- [2] Ludwiczak M., Właściwości i aktywność modyfikowanych perowskitów tytanowych w fotokatalitycznym rozkładzie wody. Praca doktorska, Poznań 2012.
- [3] Bhalla A., Guo R., Roy R., The perovskite structure – a review of its role in ceramic science and technology, Mat. Res. Innovat., 3-26, 4, 2000.
- [4] Li Y. i inni, Perovskite-type oxides as efficient catalysts for coal combustion: A review. App. Catalysis B: Environmental, 480-495, 250, 2020.
- [5] Li, Y. i inni, Effects of CeO₂ support facets on VO_x/CeO₂ catalysts in oxidative dehydrogenation of methanol. J. Catalysis, 15-24, 315, 2014.
- [6] Campbell C.T., Peden C.H.F. Chemistry: oxygen vacancies and catalysis on ceria surfaces. Science, 713-714, 309, 2005.

- [7] Sawyer R., Nesbitt H.W. Secco R.A. High resolution X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) study of K_2O-SiO_2 glasses: evidence for three types of O and at least two types of Si. *J. Non-Crystalline Solids*, 290-302, 358, 2012.
- [8] Shan, Y. i inni, A review on application of cerium-based oxides in gaseous pollutant purification. *Sep. Pur. Tech.*, 1-18, 250, 117181. 2020.
- [9] Pham C.N. i inni, Synthesis of $CeO_2-Fe_2O_3$ mixed oxides for low-temperature carbon monoxide oxidation. *Adsorption Sci. Tech.*, 1-12, 5945169, 2022.
- [10] Salinas D. i inni, Effect of potassium on sol-gel cerium and lanthanum oxide catalysis for soot combustion. *Modern Research in Catalysis*, 68-77, 4, 3, 2015.
- [11] Larsson P.O. i inni, Supported metal oxides for catalytic combustion of CO and VOCs emissions: preparation of titania overlayers on a macroporous support, *Catalysis Today*, 137-144, 35, 1-2, 1997.
- [12] Pan X. i inni, Effects of different supports on catalytic performance of iron-based catalysts in CO_2 hydrogenation to olefins, *J. Fuel Chem Technol.*, 493-503, 53, 4, 2025.
- [13] Wang Y. i inni, Combustion characteristics of coal for pulverized coal injection (PCI) blending with steel plant flying dust and waste oil sludg. *ACS Omega*, 28548-28560, 6(43), 2021.
- [14] Di, Z. i inni, Study on the effects of catalyst on combustion characteristics of pulverized coal. *Metall. Res. Technol.*, 1-12, 114, 104, 2017.
- [15] Tultabayev M.Ch. i inni, Application of emulsions based on safflower oil in the coal industry. *Ugol' – Russian Coal J.*, 40-45, 9, 2023.
- [16] Nowak K., Współspalanie biomasy z węglem w kotłach energetycznych. *JCEEA*, 379-390, 61, 2014.
- [17] Gaze B., Redukcja ilości zanieczyszczeń pochodzących z konwersji energetycznej odpadów rolniczych. *Rozprawa doktorska*. Wrocław 2014.
- [18] Ren Q., Zhao C., Evolution of fuel-N in gas phase during biomass pyrolysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 408-418, 50, 2015.
- [19] Chaiyo R., Wongwiwat J., Sukjai Y., Numerical and experimental investigation on combustion characteristics and pollutant emissions of pulverized coal and biomass co-firing in a 500 kW burner. *Fuels*, 1-22, 6(1), 9, 2025.
- [20] Kazagic A., Hodzic N., Metovic S., Co-combustion of low-rank coal with woody biomass and miscanthus: an experimental study. *Energies*, 1-14, 601, 2018.
- [21] Chae T. i inni, Pilot-scale experimental study on impacts of biomass cofiring methods to NO_x emission from pulverized coal boilers – part 2: NO_x reduction capability through reburning versus cofiring. *Energies*, 1-12, 6552, 2021.
- [22] Wang, X. i inni, Effect of biomass/coal co-firing and air staging on NO_x emission and combustion efficiency in a drop tube furnace. *Energy Procedia*, 2331-233461, 2014.
- [23] <https://dagas.pl/aktywator-reduxco/>, dostęp 20.05.2025.
- [24] <https://www.basf.com>, dostęp 20.05.2025.
- [25] <https://www.clariant.com>, dostęp 20.05.2025.
- [26] Choiński D., Szajna E., Bielecki Z., Sposób intensyfikacji procesu spalania paliw stałych, PL416911A1, Urząd Patentowy RP, opublikowano 23.10.2017.