

# Przegląd metod immobilizacji, waloryzacji oraz kierunków zagospodarowania popiołów

## Review of immobilization, valorization and ash management methods

Grażyna Żak, Michał Wojtasik

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Pomimo istnienia wielu nowoczesnych i niskoemisyjnych metod wytwarzania energii spalanie paliw stałych nadal stanowi istotny element w miksie energetycznym wielu krajów, w tym w Polsce. Nie przewiduje się, aby w ciągu najbliższych lat sytuacja ta uległa drastycznej zmianie, szczególnie że na znaczeniu przybiera spalanie paliw biomasowych pochodzenia rolniczego, biomasy leśnej oraz odpadów komunalnych czy osadów ściekowych. W efekcie spalania paliw stałych powstają różnego rodzaju emisje, w tym znaczny wolumen w postaci popiołów. Szczególną pozycją są popioły powstające w procesie termicznego przetwarzania odpadów komunalnych. Jest to produkt, którego zagospodarowanie cechuje się znaczną złożonością. Fakt ten wynika przede wszystkim z wysokich zawartości metali ciężkich. Z tego względu popioły te przed składowaniem są immobilizowane, czyli poddawane procesowi polegającemu na zapobieganiu uwalniania z nich szkodliwych substancji. W artykule przedstawiono przegląd literaturowy dotyczący różnych metod przetwarzania popiołów, dzięki którym możliwe jest ich dalsze składowanie lub wykorzystanie. Opisano procesy immobilizacji, czyli zabezpieczenia niebezpiecznych popiołów w celu ograniczania uwalniania z nich metali ciężkich. Dzięki tym zabiegom popioły ze spalania odpadów komunalnych nie stanowią tak dużego zagrożenia jak popioły nieprzetworzone. Przedstawiono również przegląd metod waloryzacji popiołów, czyli ich utylizacji poprzez uzyskanie na ich bazie innych materiałów gotowych do wykorzystania w różnych obszarach gospodarki. Jak się okazuje, popioły ze spalania odpadów komunalnych mogą być składnikami geopolimerów oraz zeolitów – nowoczesnych materiałów o wielkim potencjale wykorzystania, np. w budownictwie. Podejście takie, czyli przetworzenie odpadów w kierunku pełnowartościowych materiałów, jest zgodne z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Słowa kluczowe: popioły, witrafikacja, immobilizacja, geopolimery, zeolity.

**ABSTRACT:** Despite the existence of numerous modern and low-emission energy generation methods, solid fuel combustion remains a significant component of many countries' energy mixes, including Poland. This trend is expected to continue in the coming years, particularly with the increasing importance of energy recovery from agricultural biomass, forest biomass, municipal waste, and sewage sludge. Solid fuel combustion generates various emissions, notably ash in significant quantities. A special category is the ash generated in the thermal processing of municipal waste. This product is characterized by considerable complexity primarily due to high heavy metal content. Therefore, these ashes undergo immobilization before storage, a process aimed at preventing the release of harmful substances from them. The article provides a literature review of various methods of ash processing, enabling their further storage or utilization. It describes immobilization processes aimed at securing hazardous ashes in order to limit the release of heavy metals from them, thereby reducing the environmental impact compared to untreated ash. The review also presents methods for ash valorization, i.e. their reuse to obtain other materials ready for use in various sectors of the economy. It turns out that ashes from municipal waste incineration can be components of geopolymers and zeolites – modern materials with great potential for use, e.g. in construction. Such an approach, transforming waste into raw materials, aligns with the principles of a circular economy.

Key words: ashes, vitrification, immobilization, geopolymers, zeolites.

### Wstęp

Procesy immobilizacji i waloryzacji (przekształcenie odpadu w sprzedawalny materiał) pyłów kotłowych, popiołów lotnych oraz stałych pozostałości z oczyszczania spalin

prowadzone są zazwyczaj w celu uzyskania wewnętrznej i/lub zewnętrznej bariery, mających zapobiec wypłukiwaniu rozpuszczalnych związków tzw. metali ciężkich (przyjęta definicja obejmuje toksyczne pierwiastki – metale i półmetale o liczbie atomowej powyżej 20 oraz selen) z wykorzystaniem

Autor do korespondencji: M. Wojtasik, e-mail: [michal.wojtasik@inig.pl](mailto:michal.wojtasik@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 22.02.2024 r. Zatwierdzono do druku: 07.06.2024 r.

różnych mechanizmów wiązania chemicznego i fizycznego. Metale, szczególnie metale ciężkie ze względu na specjację w produktach spalania (występowanie w różnych formach chemicznych), można podzielić na trzy grupy (Wielgosiński i Wasiak, 2015):

- pierwiastki łatwo ulegające odparowaniu w strefie spalania i emitowane głównie w emisji do powietrza (m.in. rtęć (Hg), kadm (Cd), selen (Se));
- pierwiastki o wysokich temperaturach topnienia i wrzenia kumulujące się w stałych produktach spalania (żużło i popiele paleniskowym) (m.in. żelazo (Fe), magnez (Mg), kobalt (Co), chrom (Cr), miedź (Cu), mangan (Mn), molibden (Mo) oraz nikiel (Ni), glin (Al), tytan (Ti));
- pierwiastki o właściwościach pośrednich, w przypadku których występuje podział pomiędzy gazy spalinowe oraz stałe produkty spalania (m.in. arsen (As), ołów (Pb), cyna (Sn) i cynk (Zn), antymon (Sb)).

Specjacja, szczególnie w przypadku niklu (Ni), talu (Tl) oraz ołowiu (Pb), ulega znaczącej zmianie, jeżeli w strefie spalania

obecne są halogenki (chlor, brom). W efekcie zwiększa się udział tych pierwiastków w gazach odlotowych, w popiołach lotnych oraz w pyłe oddzielnym w urządzeniach filtracyjnych.

Wtórne odpady (popioły i pyły) pochodzące z typowego procesu termicznego przekształcania odpadów były przedmiotem licznych badań. Wyniki badań zawartości niektórych pierwiastków oraz niektórych związków organicznych w odprowadzanych żużlach i popiołach paleniskowych, popiołach lotnych, pyłe z urządzeń odpylających oraz w produktach oczyszczania spalin zamieszczono w tabelach 1 i 2.

Ze względu na zagrożenia środowiskowe ilość metali ciężkich we wtórnych odpadach z procesu spalania odpadów ma mniejsze znaczenie, istotna jest natomiast forma, w jakiej metale te występują. W przypadku gazów odlotowych, popiołów lotnych i pyłów metale ciężkie występują przede wszystkim w postaci soli – chlorków, bromków i fluorków. Wyjątkiem jest rtęć, kadm, tal i arsen, których znaczna część występuje w postaci par. W żużlach i popiołach paleniskowych dominują metale ciężkie w postaci tlenków lub w postaci metalicznej,

**Tabela 1.** Średnie, typowe zawartości niektórych pierwiastków w odpadach komunalnych, żużlach, popiołach, popiołach lotnych, pyłe z urządzeń odpylających oraz w gazach odlotowych pochodzących ze spalania odpadów komunalnych (Wielgosiński i Wasiak, 2015)

**Table 1.** Average typical contents of some elements in municipal waste, slag, ash, fly ash, dust from dust removal devices, and waste gases from municipal waste incineration (Wielgosiński and Wasiak, 2015)

Pierwiastek	Odpady	Popiół	Popiół lotny	Pył z urządzeń odpylających	Emisja do powietrza
	[mg/g]	[µg/g]	[µg/g]	[µg/g]	[µg/m <sup>3</sup> ]
Sb	10–60	10–80	20–60	40–120	<5
As	3–9	1–80	20–60	40–120	<50
Cd	5–15	0,5–10	50–150	50–1000	<10
Pb	400–1000	350–5000	2000–8000	2500–12 000	<50
Hg	0,5–5	<1	<5	1–30	<50
Se	0,8	0,4–1	4	10–20	<2
Sn	120	250	500	1700	–
Tl	0,2	<0,5	<0,5	<0,5	<1
Zn	600–2000	800–6000	5000–10 000	5000–80 000	<5
Ti	1300	3500–8000	6500	7000–9000	4000
Cr	40–400	100–1200	200–800	100–1000	200–800
Mn	200–500	400–1000	700–1200	800–1500	900
Fe	2,5–5,0	5–15	3,0–5,0	3,0–6,0	4,0
Ni	20–130	50–800	100–300	100–300	100–200
Cu	200–1000	250–4500	300–1500	50–5000	300–3000
Na	3–15	8–40	8–40	10–40	20–50
K	5	2–15	15–40	4–40	100
Rb	0,04	0,125	0,10	0,16	0,45
Mg	–	5–20	–	10–40	–
Ca	10–35	50–100	100	50–100	50
Sr	0,12	0,20–1,0	0,50	0,65	0,45
Ba	0,73	0,50–2,5	2,5	2,5–3,5	1,30

**Tabela 2.** Średnie, typowe zawartości niektórych związków organicznych w odpadach, żużlach i popiołach, popiołach lotnych, pyłe z urządzeń odpylających oraz w produktach oczyszczania spalin pochodzących ze spalania odpadów komunalnych (Wielgosiński i Wasiak, 2015)

**Table 2.** Average typical contents of some organic compounds in waste, slag and ash, fly ash, dust from dedusting devices and in exhaust gas treatment products from municipal waste incineration (Wielgosiński and Wasiak, 2015)

Grupa zanieczyszczeń	Popiół i żużel	Popiół lotny	Pył z urządzeń odpylających	Produkty oczyszczania spalin
	[g/kg]			
Dibenzoparadioksyny (PCDDs)	0,001–0,05	0,1–200	100–1000	0,7–30
Polichlorowane dibenzofurany (PCDFs)	0,05–0,5	0,03–120	40–200	1,4–70
Chlorobenzeny	2–160	200–1600	100–4000	0,03–0,4
Chlorofenole	6–40	20–500	50–10000	50–200
Polichlorowane bifenylo (PCBs)	2–50	0,1–50	10–250	20
Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA)	5–19 000	10–300	50–2000	30

obserwowane jest również występowanie metali w formie soli – chlorków, siarczanów. Skutkiem obecności metali w postaci soli, tlenków jest ich zwiększona rozpuszczalność w wodzie (w stosunku do metali w stanie wolnym), co skutkuje ich podwyższoną wymywalnością do środowiska.

### Witryfikacja popiołów

Obecnie jedną z najczęściej wybieranych metod immobilizacji (zatrzymania procesu wymywania substancji ekotoksycznych) ubocznych produktów spalania odpadów komunalnych jest proces witryfikacji, czyli przekształcanie popiołu w szkło lub substancje szklstopodobne (Haugsten i Gustavson, 2000; Zhang et al., 2016; Fan C. et al., 2021; Huang et al., 2022; Lin et al., 2022; Singh et al., 2022; Sirico et al., 2022). W literaturze niejednokrotnie wykazano, że metoda ta pozwala na uzyskanie bardzo dobrych wyników związania pierwiastków, głównie metali (Aloisi et al., 2006; Cheng et al., 2013; Cubas et al., 2015), usuwania lotnych i półlotnych związków organicznych oraz stabilizacji niebezpiecznych substancji (Dellisanti et al., 2007; 2009; Shu et al., 2020). Otrzymany materiał szklisty może być bezpośrednio składowany na składowiskach odpadów (Iwaszko et al., 2021) lub wykorzystany w przemyśle budowlanym (Aloisi et al., 2006; Dellisanti et al., 2007). Metoda witryfikacji pomimo wielu zalet nie jest jednak techniką pozbawioną wad. Największą z nich jest wysoki koszt energetyczny oraz surowcowy ze względu na konieczność stosowania drogich topników (Joseph et al., 2018). Aktualnie główne kierunki rozwoju tej technologii skupiają się na obniżeniu temperatury witryfikacji lub zwiększeniu wydajności ogrzewania oraz na opracowaniu tanich topników.

Jednym z kluczowych aspektów ekonomicznych technologii witryfikacji popiołów jest sposób dostarczenia ciepła procesowego. W literaturze rozważanych jest kilka różnych metod:

za pomocą ogrzewania Joule’a (ogrzewania elektrycznego oporowego) (Dellisanti et al., 2007, 2009), promieniowania mikrofalowego (Wang et al., 2012), elektrycznego (Kavouras et al., 2003; Bingham et al., 2005; Kuo et al., 2006; Silva i Mello-Castanho, 2007; Stabile et al., 2019) lub z zastosowaniem palników plazmowych (Pan et al., 2013; Zhang et al., 2016; Du et al., 2018). Zdecydowanie najmniej wydajną metodą dostarczania ciepła do procesu witryfikacji jest ogrzewanie elektryczne, jednak ze względu na niskie koszty inwestycyjne oraz łatwą dostępność tej technologii cieszy się ona dużą popularnością.

Ogrzewanie Joule’a można opisać jako technikę witryfikacji *in situ* (Dellisanti et al., 2009). Największą wadą tego rozwiązania jest wymagane dostarczenie dużej ilości prądu do stopienia materiałów i szybkiego schłodzenia po zabiegu, natomiast największa zaleta to wyjątkowa zdolność do jednoczesnego przetwarzania zanieczyszczeń – rozkładu szkodliwych węglowodorów na prostsze mniej szkodliwe związki (Dellisanti et al., 2007).

Głównymi zaletami technologii plazmowej jest bardzo szybkie i dość łatwe uzyskanie wysokich temperatur – nawet do 10000 K (Heberlein i Murphy, 2008; Messerle et al., 2018). Podobne zalety niesie ze sobą ogrzewanie mikrofalowe: szybkie nagrzewanie, możliwość uzyskania wysokiej temperatury i dużą oszczędność energii (Schulz et al., 2011a, 2011b). Obie metody wymagają jednak bardzo drogiej i unikatowej instalacji, co znacznie podnosi koszty inwestycyjne i czyni te technologie metodami drugiego wyboru. Dodatkowo metody plazmowe charakteryzują się wysoką emisją hałasu.

Jak wspomniano, drugim istotnym problemem związanym z technologią witryfikacji jest wysoki koszt topników. Kim et al. (2021) opisali możliwość zeszklenia popiołu lotnego pochodzącego ze spalarni odpadów komunalnych z użyciem jako topników dwóch rodzajów wyselekcjonowanego szkła odpadowego (szkło odpadowe z wyświetlaczy ciekłokrystalicznych

oraz odpad ze szkła krzemianu sodowo-wapniowego). Popiół poddawano procesowi zeszklenia przez stopienie go w temperaturze 1300°C z zastosowaniem co najmniej 30% wag. szkła odpadowego. Testy wymywania z zeszkłonego materiału przeprowadzono przy użyciu procedury TCLP (ang. *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) w celu określenia stężeń pięciu szkodliwych pierwiastków (Pb, Ba, As, Cd, Cr). Wyniki potwierdziły dobre efekty immobilizacji metali ciężkich, a materiał nadawał się do składowania. Podobne wykorzystanie odpadowego szkła jako topnika zaprezentowali Sharifikolouei et al. (2021). Autorzy porównali dwa różne źródła krzemionki, tj. piasek kwarcowy i stłuczkę szklaną, które zastosowano do wityfikacji popiołu lotnego pochodzącego ze spalania odpadów. Produkty poddano standardowemu testowi wymywania zgodnie z normą EN 12457-2. Stwierdzono brak wymywania metali ciężkich, co pozwoliło na sklasyfikowanie odpadów wtórnych w obu przypadkach jako materiałów obojętnych.

Gao et al. (2020) zastosowali B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (standardowy topnik do produkcji szkła) jako topnik w celu obniżenia temperatury topnienia popiołu lotnego ze spalania odpadów komunalnych i wspomagania tworzenia fazy szklistej. Przeprowadzono testy temperatury topnienia popiołu, atomowej spektroskopii absorpcyjnej, dyfrakcji rentgenowskiej, skaningowego mikroskopu elektronowego oraz obliczeń termodynamicznych. Dzięki zastosowaniu standardowego topnika (zawartość 15% mas.) temperatura procesu obniżyła się z 1211°C do 986°C, a otrzymany materiał szklisty nie wykazał uwalniania metali ciężkich.

### Wytwarzanie geopolimerów

Inną uznaną techniką stabilizacji (przeprowadzenia w formie o znikomej wytrzymałości substancji ekotoksycznych) popiołów pochodzących z odpadów komunalnych jest wykorzystanie ich do wytwarzania geopolimerów (Lancellotti et al., 2010; Zheng et al., 2010; Galiano et al., 2011; Wongsat et al., 2017; Biswal et al., 2020; Fan Y. et al., 2021; Bai et al., 2022; Tan et al., 2022). Geopolimery są to materiały będące nieorganicznymi, amorficznymi syntetycznymi polimerami glikokrzemianów stanowiącymi substytuty cementu. Empiryczny wzór liniowej cząsteczki (pojedynczego łańcucha) geopolimeru jest następujący:



gdzie:

$M$  – to metal lub kilka metali,

$z, k$  – indeksy stechiometryczne.

Uważa się, że otrzymywanie geopolimerów pochłania 2,5 razy mniej energii niż wytwarzanie cementu oraz powoduje wydzielenie 6 razy mniejszej ilości dwutlenku węgla (Fan Y.

et al., 2021). Biorąc pod uwagę fakt, że przemysł cementowy odpowiedzialny jest obecnie za około 10% antropogenicznej emisji CO<sub>2</sub>, zwolennicy zastosowania cementów geopolimerowych widzą w nich sposób na istotne zmniejszenie obciążenia środowiska.

Badania nad geopolimerami prowadzone są od lat 50. ubiegłego wieku, ale wysokie koszty niektórych składników hamują ich komercjalizację, więc zastosowanie tanich popiołów pochodzących ze spalania odpadów komunalnych może przyczynić się do dalszego rozwoju technologii geopolimerów. Dodatkowo popioły z odpadów komunalnych są bogate w metale, które są konieczne do otrzymania geopolimerów, co czyni je idealnym surowcem do wykorzystania w tym materiale. Jak wskazano w wielu publikacjach naukowych, geopolimery są materiałami stabilnymi, z których nie obserwuje się emisji (wymywania) niebezpiecznych substancji.

Kan et al. (2020) opisali szczegółowo wyniki wymywania metali z geopolimeru otrzymanego z popiołów pochodzących ze spalania odpadów komunalnych. Wykazali, że pH odcieku wahało się od 11,5 do 12,7 i było wyższe dla próbek otrzymywanych w temperaturze pokojowej niż dla próbek otrzymywanych w 60°C. Najniższe wymywanie zaobserwowali dla Zn, Co, Ni, Cu i Sn. Geopolimery unieruchomiły Ba i Pb lepiej niż cement portlandzki, który z kolei skuteczniej zatrzymał wymywanie Sb, Mo, V i Cr. W kilku próbkach badacze ci uzyskali przekroczenie dopuszczalnego stężenia Sb w odcieku. Wysoką efektywność immobilizacji metali ciężkich wykazał również Jin (Jin et al., 2016). Zbadał on wymywalność z geopolimeru otrzymanego z popiołu pochodzącego ze spalania odpadów komunalnych za pomocą syntetycznego kwaśnego deszczu o pH 3. Oznaczone wartości wymywalności Cr, Zn, Cu, Pb, Hg i Cd wynosiły znacznie poniżej dopuszczalnych wartości granicznych określonych w odpowiednich normach.

Wielu autorów (Chen et al., 2017; Zhou et al., 2020) wykazało skuteczność metod chemiczno-mechanicznych w stabilizowaniu metali ciężkich w geopolimerach. Metody te polegają na indukowaniu oddziaływań między substancjami stałymi za pomocą energii mechanicznej o dużej intensywności (siła tarcia, ścinanie). Wykazano, że ten rodzaj obróbki geopolimerów sprzyja krzepnięciu metali ciężkich w geopolimerze i znacznie zmniejsza ilości wymywanych pierwiastków.

W jednym z artykułów (Wei et al., 2022) stwierdzono, że największymi wyzwaniem w produkcji geopolimerów jest zmniejszenie dawki kosztownego aktywatora alkalicznego i poprawa wytrzymałości na ściskanie otrzymanych materiałów. W celu sprostania tym wyzwaniom zastosowano metakaolin w ilości od 0% do 20% wag., aby zbadać jego wpływ na wytrzymałość na ściskanie i skuteczność immobilizacji metali ciężkich. Dodatkowo dla zbadania możliwości zmniejszenia zużycia aktywatora wykorzystano metodę prasowania w formie.



Wyniki wykazały, że w przypadku próbek zawierających 20% mas. metakaolinu wytrzymałość geopolimerów na ściskanie wzrosła do 30,31 MPa, a poziom wymywanych metali ciężkich był poniżej limitu ustalonego przez normę (GB 16889-2008).

Innymi powszechnie stosowanymi aktywatorami alkalicznymi są NaOH, KOH, krzemian sodu i krzemian potasu (Phair et al., 2000). Badania wykazały, że aktywatory alkaliczne zawierające sód powodują lepszą rozpuszczalność Si i Al, natomiast związki potasu dają wyższą wytrzymałość na ściskanie geopolimerów. Zawartość krzemianu potasu w zaprawie geopolimerowej ma natomiast pozytywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie i urabialność, co jest cechą pożądaną tych materiałów.

W jednej z publikacji (Yang et al., 2022) opisano, że w celu poprawy skuteczności degradacji trwałych zanieczyszczeń organicznych w popiele lotnym ze spalania odpadów komunalnych, a także przezwyciężenia trudności związanych z późniejszą hydrotermalną obróbką cieczy i żuźla, zaproponowano dwuetapową strategię oczyszczania w postaci mikrofalowej hydrotermalnej degradacji z immobilizacją. Wyniki wykazały, że optymalnymi parametrami procesu mikrofalowego były temperatura 220°C, czas 1 h oraz dodatek NaOH (10% wag.) jako aktywatora. Mikrofałe przyspieszały reakcje hydrolizy za pośrednictwem OH<sup>-</sup> i sprzyjały rozrywaniu wiązań. Uzyskano geopolimer o wysokiej wytrzymałości i bardzo dobrym stopniu immobilizacji metali ciężkich.

### Wytwarzanie zeolitów

Popioły lotne zwykle zawierają znaczne ilości Si i Al (Long et al., 2020). Ze względu na obecność w ich składzie pierwiastków, które są również głównymi składnikami materiałów zeolitycznych, popiół lotny jest wykorzystywany jako surowiec w syntezie zeolitów. Najistotniejszą metodą pozyskania zeolitów jest metoda hydrotermalna. Wyróżnia się trzy rodzaje syntezy zeolitów: klasyczną hydrotermalną, wspomaganą stopionymi alkaliamentami oraz termiczną dwuetapową.

Praca dotycząca alkalicznego oczyszczania popiołów ze spalania węgla została opublikowana przez Mondragona et al. (1990), którzy określili kluczowe parametry w syntezie zeolitów, takie jak temperatura (90–100°C), stężenie NaOH (2–13 mol/dm<sup>3</sup>) i czas procesu (8–48 h). Otrzymane w takich warunkach wyniki pokazały, że amorficzna część popiołu ze spalania węgla uległa przede wszystkim przemianom w fazy krystaliczne, uzyskując w ten sposób kształt zeolitu X i P oraz hydroksysodalitu. W celu wytworzenia pożądanego typu zeolitów stosunek Si/Al można skutecznie regulować przez dodanie związków krzemianowych lub glinianowych.

Flores et al. (2021) przeprowadzili syntezę zeolitu typu P z popiołu poprzez obróbkę hydrotermalną. Utwardzanie

hydrotermalne przeprowadzono w temperaturach w zakresie od 125°C do 175°C, stosując różne czasy obróbki (8–24 h). Po syntezie powstały różne fazy zeolitu, takie jak analcym, merlinoit i chabazyt-k. Ponadto wykazali oni również, że wyższa temperatura lub przedłużony czas trwania syntezy skutkowało zmniejszeniem powierzchni właściwej.

Chen et al. (2023) opisali sposób otrzymania zeolitów syntetyzowanych z popiołu lotnego za pomocą zmodyfikowanej metody hydrotermalnej wspomaganą mikrofalami. Parametry metody hydrotermalnej, w tym temperatura, czas trwania, ilość surowców i objętość wody, zostały we wskazanej pracy zoptymalizowane. Wykazano szczególne znaczenie temperatury procesu, która sprzyja powstawaniu materiałów zeolitycznych. Wykazano również korzystny wpływ dodatku Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, który powoduje zwiększenie wydajności powstawania zeolitów. Ostatecznie ustalone przez autorów warunki hydrotermalne to temperatura 180°C, czas 1 h oraz dodatek 0,5% mas. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Otrzymany produkt wykazał właściwości fotokatalityczne, potwierdzone standardowym testem rozkładu błękitu metylenowego wobec światła.

Qiu et al. (2018) zsyntetyzowali materiały zeolityczne z popiołu lotnego pochodzącego ze spalania odpadów komunalnych i zastosowali je do adsorpcji jonów metali ciężkich. Bardziej złożone badania prowadzili Ren et al. (2021). Badali oni wpływ pyłu krzemionkowego i charakteru krzemianu sodu na właściwości mechaniczne i hydratacyjne popiołu lotnego aktywowanego alkaliamentami. Natomiast Guo et al. (2019) wytworzyli produkt zawierający syntetyczny tobermoryt – czyli formę krzemianu wapnia o wyjątkowo korzystnych właściwościach wytrzymałościowych. Efekt ten osiągnęli przez zmieszanie popiołu lotnego pochodzącego ze spalania odpadów komunalnych i popiołu lotnego pochodzącego ze spalania węgla.

Włączenie etapu spiekania przed głównym procesem hydrotermalnym badali Volli i Purkait (2015). Opisali oni syntezę zeolitów, w której NaOH poddano stopieniu z materiałem wyjściowym w wysokich temperaturach. Powstały spiek zmieszano następnie z roztworem alkalicznym i pozostawiono do starzenia. Po zakończeniu zarówno fazy stapiania, jak i starzenia zawartość minerałów takich jak kwarc i mulit uległa zmniejszeniu w wyniku zniszczenia ich struktur przestrzennych, natomiast szybkość konwersji wzrosła dość znacznie, ponieważ duża ilość Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> została wprowadzona do roztworu poprzez rozpuszczone fazy mineralne. Kryształy zeolitu utworzone w etapie stapiania miały dziesięciokrotnie większą powierzchnię i większą krystaliczność w porównaniu z produktem krystalizowanym bez stapiania (Purnomo et al., 2012). Otrzymywanie zeolitu typu A lub X było w dużej mierze faworyzowane przez proces stapiania w porównaniu z etapem bez stapiania, w którym otrzymano mieszaninę hydroksysodalitu, zeolitu X i zeolitu P1.

Inną metodą otrzymywania zeolitów z udziałem popiołów opisywaną w literaturze jest synteza wspomagana promieniowaniem mikrofalowym. Jak wykazali Li i Yang (2008), najkorzystniejsza robocza częstotliwość promieniowania w syntezie zeolitów wynosi od 915 ( $\pm 15$ ) MHz do 2450 ( $\pm 15$ ) MHz. Proces przenoszenia energii mikrofalowej (z ang. *microwave*, MW) różni się od typowego ogrzewania, co zapewnia wyraźną przewagę nad konwencjonalnymi metodami syntezy. Oddziaływanie cząsteczek dielektryka z MW odpowiada za transmisję energii. Kiedy dipole cząsteczek polarnych podążają za odwróceniem zmiennego pola elektrycznego, następuje nagrzewanie dielektryczne. Pole magnetyczne ma tendencję do orientowania cząsteczek dipolowych w polu napromieniania, a cząsteczki podążają za oscylacjami pola magnetycznego. Oddziaływania międzycząsteczkowe i opór elektryczny uniemożliwiają ich ruch. W rezultacie wytworzona energia rozprasza się w postaci ciepła, co skutkuje jednorodnym rozproszeniem ciepła w porównaniu z konwencjonalnym ogrzewaniem. Wykazano, że zastosowanie mikrofal w syntezie zeolitów może zmniejszyć opóźnienie ich zarodkowania (Perreux i Loupy, 2001). W celu efektywnego napromieniania MW w przypadku związków niepolarnych można również zastosować dodatek susceptorów – materiałów skutecznie pochłaniających MW, a następnie przekazujących pochłoniętą energię jako energię ciepłą do pobliskich cząsteczek, które nie absorbują MW na wystarczającym poziomie (Leadbeater i Torenus, 2002).

Otrzymane zeolity można wykorzystać na wiele sposobów, między innymi jako substancje do oczyszczania gazów spalinowych ze związków siarki (Liu i Zhang, 2011), usuwania CO<sub>2</sub> (Liu et al., 2011; Sarmah et al., 2013; Wang et al., 2020), eliminacji związków azotu (López-Salinas et al., 1997; Izquierdo et al., 2016), zanieczyszczeń organicznych (Zhang et al., 2012; Prajapati et al., 2016) lub rtęci (Wdowin et al., 2014; Wang et al., 2015; Rungnim et al., 2016), głównie w sektorze energetycznym.

### Podsumowanie

Co roku w polskich elektrowniach i elektrociepłowniach powstaje około 4 mln ton popiołów. Biorąc pod uwagę, że te uboczne produkty spalania zawierają wiele niebezpiecznych substancji, takich jak pierwiastki ekotoksyczne (metale ciężkie) i zanieczyszczenia węglowodorowe, są one dużym wyzwaniem dla polskiej gospodarki. Obecnie najczęściej stosowaną metodą ich utylizacji jest stabilizacja wraz z późniejszym ich składowaniem lub przekazaniem do przemysłu cementowego. Nie jest to rozwiązanie idealne ani pod kątem ekologicznym (składowanie), ani ekonomicznym (darmowe przekazanie popiołów jako odpadów). Dlatego trwają prace nad

nowymi metodami ich utylizacji. W artykule opisano wybrane metody, takie jak wityfikacja, tworzenie geopolimerów oraz zeolitów. Pierwsza z metod jest bardzo skuteczną techniką pozwalającą na ograniczenie do minimum wymywania substancji ekotoksycznych, jednak powstający materiał szklisty ma dość wąskie zastosowanie, a wysokie koszty operacyjne, związane z przetworzeniem popiołów w wysokiej temperaturze, powodują, że ta technika spośród opisanych jest najmniej konkurencyjna. Pozostałe dwie metody (tworzenie geopolimerów i zeolitów) to metody, w których popioły oprócz ich immobilizacji są przetwarzane w kierunku wysokomarżowych produktów. Geopolimery wydają się idealnym substytutem cementu. Zeolity natomiast, dzięki swojej rozwiniętej powierzchni właściwej, mają zastosowanie jako sorbenty czy katalizatory. Głównymi przeszkodami rozwoju opisanych metod u producentów popiołów jest konieczność poniesienia istotnych kosztów inwestycyjnych, jednak biorąc pod uwagę zmieniające się założenia funkcjonowania nowoczesnych, proekologicznych gospodarek, obieg zamknięty w obszarze przetwarzania popiołów jest nieunikniony.

Artykuł powstał na podstawie pracy własnej pt. *Weryfikacja możliwości zagospodarowania popiołów ze spalania odpadów komunalnych* – praca INIG – PIB; nr zlecenia: 1879/TC/2022, nr archiwalny: DK-4100-0139/2022.

### Literatura

- Aloisi M., Karamanov A., Taglieri G., Ferrante F., Pelino M., 2006. Sintered glass ceramic composites from vitrified municipal solid waste bottom ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1): 138–143. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.056.
- Bai Y., Guo W., Wang J., Xu Z., Wang S., Zhao Q., Zhou J., 2022. Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere*, 307: 135987. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135987.
- Bingham P.A., Hand R.J., Forder S.D., Lavaysierre A., 2005. Vitrified metal finishing wastes: II. Thermal and structural characterisation. *Journal of Hazardous Materials*, 122(1–2): 129–138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.03.031.
- Biswal B.K., Zhu W., Yang E.H., 2020. Investigation on Pseudomonas aeruginosa PAO1-driven bioleaching behavior of heavy metals in a novel geopolymer synthesized from municipal solid waste incineration bottom ash. *Construction and Building Materials*, 241: 118005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118005.
- Chen Q., Zhao Y., Qiu Q., Long L., Liu X., Lin S., Jiang X., 2023. Zeolite NaP1 synthesized from municipal solid waste incineration fly ash for photocatalytic degradation of methylene blue. *Environmental Research*, 218: 114873. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114873.
- Chen Z., Mao Q., Lu S., Buekens A., Xu S., Wang X., Yan J., 2017. Dioxins degradation and reformation during mechanochemical treatment. *Chemosphere*, 180: 130–140. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.04.004.
- Cheng L.-C., Wu S.-H., Huang K.-L., Lin C., Wang C.-T., Wang J.-W., Kuo Y.-M., 2013. Evaluation of effect of reducing additives

- during vitrification via simulation and experiment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(10): 1182–1189. DOI: 10.1080/10962247.2013.809389.
- Cubas A.L.V., de Medeiros Machado M., de Medeiros Machado M., de Aguiar Dutra A.R., Moecke E.H.S., Fiedler H.D., Bueno P., 2015. Final treatment of spent batteries by thermal plasma. *Journal of Environmental Management*, 159: 202–208. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.05.004.
- Dellisanti F., Rossi P.L., Valdrè G., 2007. Mineralogical and chemical characterization of Joule heated soil contaminated by ceramics industry sludge with high Pb contents. *International Journal of Mineral Processing*, 83(3–4): 89–98. DOI: 10.1016/j.minpro.2007.05.008.
- Dellisanti F., Rossi P.L., Valdrè G., 2009. Remediation of asbestos containing materials by Joule heating vitrification performed in a pre-pilot apparatus. *International Journal of Mineral Processing*, 91(3–4): 61–67. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.12.001.
- Du C., Huang Y., Gong X., Wei X., 2018. Plasma Purification of Halogen Volatile Organic Compounds. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46(4): 838–858. DOI: 10.1109/TPS.2018.2808243.
- Fan C., Wang B., Ai H., Qi Y., Liu Z., 2021. A comparative study on solidification/stabilization characteristics of coal fly ash-based geopolymer and Portland cement on heavy metals in MSWI fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 319: 128790. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128790.
- Fan Y., Li S., Li Y., Liang H., Tang M., Huang K., Zhu L., 2021. Recycling of municipal solid waste incineration fly ash in foam ceramic materials for exterior building walls. *Journal of Building Engineering*, 44: 103427. DOI: 10.1016/j.job.2021.103427.
- Flores C.G., Schneider H., Dornelles J.S., Gomes L.B., Marcilio N.R., Melo P.J., 2021. Synthesis of potassium zeolite from rice husk ash as a silicon source. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100201. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100201.
- Galiano Y.L., Pereira C.F., Vale J., 2011. Stabilization/solidification of a municipal solid waste incineration residue using fly ash-based geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1): 373–381. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.127.
- Gao J., Dong C., Zhao Y., Hu X., Qin W., Wang X., Zhang J., Xue J., Zhang X., 2020. Vitrification of municipal solid waste incineration fly ash with B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a fluxing agent. *Waste Management*, 102: 932–938. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.012.
- Guo X., Zhang T., Song M., 2019. Hydrothermal synthesized and nano-modified wall materials from solid wastes. *Construction and Building Materials*, 217: 242–250. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.069.
- Haugsten K.E., Gustavson B., 2000. Environmental properties of vitrified fly ash from hazardous and municipal waste incineration. *Waste Management*, 20(2–3): 167–176. DOI: 10.1016/s0956-053X(99)00325-6.
- Heberlein J., Murphy A.B., 2008. Thermal plasma waste treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(5): 053001. DOI: 10.1088/0022-3727/41/5/053001.
- Huang B., Gan M., Ji Z., Fan X., Zhang D., Chen X., Sun Z., Huang X., Fan Y., 2022. Recent progress on the thermal treatment and resource utilization technologies of municipal waste incineration fly ash: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 159: 547–565. DOI: 10.1016/j.psep.2022.01.018.
- Iwaszko J., Lubas M., Sitarz M., Zajemska M., Nowak A., 2021. Production of vitrified material from hazardous asbestos-cement waste and CRT glass cullet. *Journal of Cleaner Production*, 317, 128345. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128345.
- Izquierdo M.T., Juan R., Rubio B., Gómez-Giménez C., 2016. No removal in the selective catalytic reduction process over Cu and Fe exchanged type Y zeolites synthesized from coal fly ash. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 38(9): 1183–1188. DOI: 10.1080/15567036.2014.881932.
- Jin M., Zheng Z., Sun Y., Chen L., Jin Z., 2016. Resistance of metakaolin-MSWI fly ash based geopolymer to acid and alkaline environments. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 450: 116–122. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.07.036.
- Joseph A.M., Snellings R., Van Den Heede P., Matthys S., De Belie N., 2018. The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View. *Materials*, 11(1): 141. DOI: 10.3390/ma11010141.
- Kan L., Shi R., Zhao Y., Duan X., Wu M., 2020. Feasibility study on using incineration fly ash from municipal solid waste to develop high ductile alkali-activated composites. *Journal of Cleaner Production*, 254: 120168. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120168.
- Kavouras P., Kaimakamis G., Ioannidis T.A., Kehagias T., Komninou P., Kokkou S., Pavlidou E., Antonopoulos I., Sofoniou M., Zouboulis A., Hadjiantoniou C.P., Nouet G., Prakouras A., Karakostas T., 2003. Vitrification of lead-rich solid ashes from incineration of hazardous industrial wastes. *Waste Management*, 23(4): 361–371. DOI: 10.1016/s0956-053X(02)00153-8.
- Kim K., Kim K., Kim M., 2021. Characterization of municipal solid-waste incinerator fly ash, vitrified using only end-waste glass. *Journal of Cleaner Production*, 318: 128557. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128557.
- Kuo Y.M., Lin T.C., Tsai P.J., 2006. Immobilization and encapsulation during vitrification of incineration ashes in a coke bed furnace. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1–3): 75–78. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.09.055.
- Lancellotti I., Kamseu E., Michelazzi M., Barbieri L., Corradi A., Leonelli C., 2010. Chemical stability of geopolymers containing municipal solid waste incinerator fly ash. *Waste Management*, 30(4): 673–679. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.032.
- Leadbeater N.E., Torenus H.M., 2002. A study of the ionic liquid mediated microwave heating of organic solvents. *Journal of Organic Chemistry*, 67(9): 3145–3148. DOI: 10.1021/jo016297g.
- Li Y., Yang W., 2008. Microwave synthesis of zeolite membranes: A review. *Journal of Membrane Science*, 316(1–2): 3–17. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.08.054.
- Lin S., Jiang X., Zhao Y., Yan J., 2022. Disposal technology and new progress for dioxins and heavy metals in fly ash from municipal solid waste incineration: A critical review. *Environmental Pollution*, 311: 119878. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119878.
- Liu L., Singh R., Xiao P., Webley P.A., Zhai Y., 2011. Zeolite synthesis from waste fly ash and its application in CO<sub>2</sub> capture from flue gas streams. *Adsorption*, 17(5): 795–800. DOI: 10.1007/s10450-011-9332-8.
- Liu Y.X., Zhang J., 2011. Photochemical oxidation removal of NO and SO<sub>2</sub> from simulated flue gas of coal-fired power plants by wet scrubbing using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(7): 3836–3841. DOI: 10.1021/ie1020377.
- Long L., Jiang X., Lv G., Chen Q., Liu X., Chi Y., Yan J., Zhao X., Kong L., 2020. Characteristics of fly ash from waste-to-energy plants adopting grate-type or circulating fluidized bed incinerators: a comparative study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. DOI: 10.1080/15567036.2020.1796851.
- López-Salinas E., Salas P., Schifter I., Morán M., Castillo S., Mogica E., 1997. Reduction of NO by CO using a zeolite catalyst



- obtained from fly ash. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 105 B: 1565–1570. DOI: 10.1016/s0167-2991(97)80800-2.
- Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B., 2018. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste Management*, 79: 791–799. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.048.
- Mondragon F., Rincon F., Sierra L., Escobar J., Ramirez J., Fernandez J., 1990. New perspectives for coal ash utilization: synthesis of zeolitic materials. *Fuel*, 69(2): 263–266. DOI: 10.1016/0016-2361(90)90187-U.
- Pan X., Yan J., Xie Z., 2013. Detoxifying PCDD/Fs and heavy metals in fly ash from medical waste incinerators with a DC double arc plasma torch. *Journal of Environmental Sciences*, 25(7): 1362–1367. DOI: 10.1016/s1001-0742(12)60196-X.
- Perreux L., Loupy A., 2001. A tentative rationalization of microwave effects in organic synthesis according to the reaction medium, and mechanistic considerations. *Tetrahedron*, 57(45): 9199–9223. DOI: 10.1016/s0040-4020(01)00905-X.
- Phair J.W., Van Deventer J.S.J., Smith J., 2000. Mechanism of polysialation in the incorporation of Zirconia into Fly Ash-Based Geopolymers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39(8), 2925–2934. DOI: 10.1021/ie990929w.
- Prajapati Y.N., Bhaduri B., Joshi H.C., Srivastava A., Verma N., 2016. Aqueous phase adsorption of different sized molecules on activated carbon fibers: Effect of textural properties. *Chemosphere*, 155: 62–69. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.040.
- Purnomo C.W., Salim C., Hinode H., 2012. Synthesis of pure Na-X and Na-A zeolite from bagasse fly ash. *Microporous and Mesoporous Materials*, 162: 6–13. DOI: 10.1016/j.micromeso.2012.06.007.
- Qiu Q., Jiang X., Lv G., Chen Z., Lu S., Ni M., Yan J., Deng X., 2018. Adsorption of heavy metal ions using zeolite materials of municipal solid waste incineration fly ash modified by microwave-assisted hydrothermal treatment. *Powder Technology*, 335: 156–163. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.003.
- Ren J., Hu L., Dong Z., Tang L., Xing F., Liu J., 2021. Effect of silica fume on the mechanical property and hydration characteristic of alkali-activated municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 295. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126317.
- Rungnim C., Promarak V., Hannongbua S., Kungwan N., Namuangruk S., 2016. Complete reaction mechanisms of mercury oxidation on halogenated activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 310: 253–260. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.02.033.
- Sarmah M., Baruah B.P., Khare P., 2013. A comparison between CO<sub>2</sub> capturing capacities of fly ash based composites of MEA/DMA and DEA/DMA. *Fuel Processing Technology*, 106: 490–497. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.09.017.
- Schulz R.L., Wicks G.G., Folz D.C., Clark D., 2011a. Microwave Remediation of Electronic Circuitry Waste and the Resulting Gaseous Emissions. *Praca doktorska. University of Florida*.
- Schulz R.L., Wicks G.G., Folz D.C., Clark D., 2011b. Overview of hybrid microwave technology. *Journal of South Carolina Academy of Science*, 9(1): 25–29.
- Sharifikolouei E., Baino F., Salvo M., Tommasi T., Pirone R., Fino D., Ferraris M., 2021. Vitrification of municipal solid waste incineration fly ash: An approach to find the successful batch compositions. *Ceramics International*, 47(6): 7738–7744. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.11.118.
- Shu X., Li Y., Huang W., Chen S., Xu C., Zhang S., Li B., Wang X., Qing Q., Lu X., 2020. Rapid vitrification of uranium-contaminated soil: Effect and mechanism. *Environmental Pollution*, 263: 114539. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114539.
- Silva A.C., Mello-Castanho S.R.H., 2007. Vitrified galvanic waste chemical stability. *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2–3): 565–570. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.110.
- Singh A., Zhou Y., Gupta V., Sharma R., 2022. Sustainable use of different size fractions of municipal solid waste incinerator bottom ash and recycled fine aggregates in cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 17: e01434. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.E01434.
- Sirico A., Bernardi P., Sciancalepore C., Milanese D., Ferraris M., Belletti B., 2022. Fracture behavior of concrete containing MSWI vitrified bottom ash. *Procedia Structural Integrity*, 39(C): 494–502. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.122.
- Stabile P., Bello M., Petrelli M., Paris E., Carroll M.R., 2019. Vitrification treatment of municipal solid waste bottom ash. *Waste Management*, 95: 250–258. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.021.
- Tan J., De Vlioger J., Desomer P., Cai J., Li J., 2022. Co-disposal of construction and demolition waste (CDW) and municipal solid waste incineration fly ash (MSWI FA) through geopolymer technology. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132502. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132502.
- Volli V., Purkait M.K., 2015. Selective preparation of zeolite X and A from flyash and its use as catalyst for biodiesel production. *Journal of Hazardous Materials*, 297: 101–111. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.04.066.
- Wang J., Li D., Ju F., Han L., Chang L., Bao W., 2015. Supercritical hydrothermal synthesis of zeolites from coal fly ash for mercury removal from coal derived gas. *Fuel Processing Technology*, 136: 96–105. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.10.020.
- Wang Y.F., Wang L.C., Hsieh L.Te, Li H.W., Jiang H.C., Lin Y.S., Tsai C.H., 2012. Effect of temperature and CaO addition on the removal of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in fly ash from a medical waste incinerator. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(2): 191–199. DOI: 10.4209/aaqr.2011.06.0079.
- Wang Y., Jia H., Chen P., Fang X., Du T., 2020. Synthesis of La and Ce modified X zeolite from rice husk ash for carbon dioxide capture. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3): 4368–4378. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.02.061.
- Wdowin M., Wiatros-Motyka M.M., Panek R., Stevens L.A., Franus W., Snape C.E., 2014. Experimental study of mercury removal from exhaust gases. *Fuel*, 128: 451–457. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.03.041.
- Wei X., Shao N., Yan F., Wang P., Xie F., Zhang Z., 2022. Safe disposal and recyclability of MSWI fly ash via mold-pressing and alkali-activation technology: Promotion of metakaolin and mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2): 107166. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107166.
- Wielgosiński G., Wasiak D., 2015. Wtórne odpady z procesu termicznego przekształcania odpadów. *Nowa Energia*, 1(43): 42–52.
- Wongsa A., Boonserm K., Waisurasingha C., Sata V., Chindaprasirt P., 2017. Use of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in high calcium fly ash geopolymer matrix. *Journal of Cleaner Production*, 148: 49–59. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.147.
- Yang W., Cao X., Zhang Q., Ma R., Fang L., Liu S., 2022. Coupled microwave hydrothermal dechlorination and geopolymer preparation for the solidification/stabilization of heavy metals and chlorine in municipal solid waste incineration fly ash. *Science of The Total Environment*, 853, 158563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158563.
- Zhang B., Chen Y., Wei L., Zu Z., 2012. Preparation of molecular sieve X from coal fly ash for the adsorption of volatile organic compounds. *Microporous and Mesoporous Materials*, 156: 36–39. DOI: 10.1016/j.micromeso.2012.02.016.



Zhang Z., Li A., Wang X., Zhang L., 2016. Stabilization/solidification of municipal solid waste incineration fly ash via co-sintering with waste-derived vitrified amorphous slag. *Waste Management*, 56: 238–245. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.07.002.

Zheng L., Wang W., Shi Y., 2010. The effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolymer.

*Chemosphere*, 79(6): 665–671. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.02.018.

Zhou X., Zhang T., Wan S., Hu B., Tong J., Sun H., Chen Y., Zhang J., Hou H., 2020. Immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash with red mud-coal gangue. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(6): 1953–1964. DOI: 10.1007/s10163-020-01082-7.



Dr Michał WOJTASIK  
Adiunkt w Zakładzie Zrównoważonych Technologii Chemicznych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [michal.wojtasik@inig.pl](mailto:michal.wojtasik@inig.pl)



Dr hab. Grażyna ŻAK, prof. INiG – PIB  
Kierownik Zakładu Zrównoważonych Technologii Chemicznych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [grazyna.zak@inig.pl](mailto:grazyna.zak@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU ZRÓWNOWAŻONYCH TECHNOLOGII CHEMICZNYCH

- Opracowywanie, doskonalanie i wdrażanie innowacyjnych technologii:
  - wytwarzania benzyn silnikowych, paliw lotniczych, olejów napędowych i opałowych, biopaliw klasycznych i zaawansowanych, paliw syntetycznych, paliw stałych (odpadowych, RDF, biomasowych itp.) i gazowych oraz komponentów paliw;
  - otrzymywania wodoru z surowców kopalnych, odnawialnych i odpadowych;
  - wytwarzania materiałów (katalizatory, sorbenty, modyfikatory) dedykowanych dla zrównoważonych procesów i technologii;
  - zagospodarowania produktów ubocznych/pozostałościowych powstających w procesach wytwarzania paliw ciekłych, stałych i gazowych.
- Obszar naszego działania obejmuje również:
  - ocenę technologii pod kątem spełnienia kryteriów zrównoważonego rozwoju w oparciu o analizę cyklu życia produktów (LCA);
  - opracowywanie wodorowych procesów katalitycznych, ocenę testową i procesową katalizatorów stosowanych w procesach hydrokonwersji;
  - nadzór technologiczny nad opracowanymi i/lub wdrożonymi technologiami;
  - badania skażenia mikrobiologicznego paliw w systemie produkcji oraz dystrybucji paliw i biopaliw ciekłych.



Kierownik: dr hab. Grażyna Żak, prof. INiG – PIB      Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków  
Telefon: 12 617 75 90      Faks: 12 617 75 22      E-mail: [grazyna.zak@inig.pl](mailto:grazyna.zak@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy