

**Nikolina Poranek,**

Katedra Technologii i Urzędzeń Zagospodarowania Odpadów, Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli, Politechnika Śląska

**Beata Łażniewska-Piekarczyk,**

Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli, Politechnika Śląska

**Krzysztof Pikoń,**

Katedra Technologii i Urzędzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śląska

**Adrian Czajkowski,**

Katedra Maszyn i Urzędzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

## Ocena możliwości zagospodarowania odpadów wtórnych z ITPOK

Instalacje Termicznego Przekształcania Odpadów Komunalnych (ITPOK) unieszkodliwiają odpady i odzyskują z nich energię. Wyzwanie stanowi zagospodarowanie odpadów wtórnych z ITPOK, które stanowią ponad 30% wsadu. W największej ilości powstaje żużli ok. 30%, natomiast popioły lotne są odpadami niebezpiecznymi i to one stanowią największe wyzwanie w zawróceniu ich do obiegu. Żużle poddaje się procesowi waloryzacji i znajdują one zastosowanie w przemyśle, natomiast popioły lotne została się, stabilizuje i składowuje.

Alternatywą dla składowania odpadów wtórnych jest wytworzenie produktu budowlanego, np. betonu lub geopolimeru, gdzie ten drugi jest stanowczo bardziej przyjazny środowisku ze względu na brak użycia lub wykorzystanie małej ilości wysokoemisyjnego cementu. W celach przygotowawczych odpadów wtórnych do użycia ich w produkcie końcowym można wykonać obróbkę wstępną, która ma na celu poprawię właściwości fizyko-chemicznych, bądź/i zmniejszenie wymywalności związków, tj. meta-

le ciężkie. Wśród innych metod i przygotowań odpadu wyróżnić można m. in. ceramizację, keramizację, wityfikację, chemiczną aktywację (NaOH, CaOH<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + NaOH, NH<sub>4</sub>OH), obróbkę kwaśną rozcieńczonymi roztworami (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), stabilizację chemiczną (FeSO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), chelatację oraz inne technologie dedykowane w zależności od potrzeb, które warunkuje np. skład fizyko-chemiczny i przeznaczenie produktu końcowego. Zagospodarowanie odpadów

wtórnych z ITPOK wpisuje się w Gospodarkę o Obiegu Zamkniętym i Zrównoważony Rozwój oraz wydłuża cykl życia produktu, zmniejsza emisję gazów cieplarnianych oraz ślad węglowy.

Odpady resztkowe, odpady nie nadające się do recyklingu, zanieczyszczone, bądź odpady palne są zagospodarowane w ITPOK, gdzie odzyskuje się z nich energię. Energia, zarówno elektryczna, jak i cieplna może być wykorzystana na potrzeby własne instalacji, bądź miasta i okolic. Sam proces termicznego

przekształcania odpadów nie jest stonkowanym obciążeniem środowiskowym ze względu na wykorzystywanie BAT (ang. *Best Available Technology / Techniques*), BEP (ang. *Best Environmental Practice*) oraz wprowadzeniem rygorystycznych regulacji prawnych m. in. Rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie wymagań dotyczących prowadzenia procesu termicznego przekształcania odpadów oraz obowiązujących we wszystkich krajach Unii Europejskiej dyrektywy w sprawie emisji przemysłowych (2010/75/UE) [1], [2].

Pomimo korzystania z najnowszych technologii w ITPOK powstają również odpady wtórne, tzw. Uboczne Produkty Spalania (UPS) oraz emisja. Problem emisji zanieczyszczeń został praktycznie rozwiązany. Systemy dopalania i oczyszczania spalin i gazów odlotowych ograniczyły emisję niebezpiecznych polichlorowanych dibenzo-p-dioksyn, polichlorowanych dibenzofuranów, pyłów, lotnych związków organicznych oraz innych toksycznych związków i substancji [3], [4].

Obecnie największym problemem oraz argumentem, który stosują środowiska będące przeciwko budowie ITPOK jest fakt powstania UPS w ilości ponad 30%. Rodzaj, skład fizyko-chemiczny oraz ilość powstających odpadów wtór-

nych z konkretnej instalacji może być uzależniony od sezonu, regulacji prawnych oraz regulacji dotyczących zbierania odpadów z danego obszaru, procesu spalania, technologii procesu, technologii oczyszczania spalin, rodzaju zabudowy, a nawet pogody [4].

Odpadem, którego powstaje najwięcej po procesie termicznej obróbki jest żużel. Ilość żużla zależy głównie od morfologii przetwarzanych odpadów, np. zawartości popiołu paleniskowego, substancji nieorganicznych, szkła, porcelany, czy metali. Im większy udział związków niepalnych, tym większa ilość żużla, która na ogół waha się w okolicach 30%. Żużel jest jednak odpadem innym niż niebezpieczne, dlatego jego wykorzystanie w przemyśle i zawrócenie do obiegu w idei Gospodarki o Obiegu Zamkniętym jest obecnie wykonalne. Żużel, aby mógł być wykorzystany, musi zostać poddany obróbce, czyli waloryzacji, dzięki czemu zostanie oczyszczony oraz ustabilizowany.

Waloryzację można podzielić na 2 etapy. W pierwszym etapie, jak przedstawia rysunek 1 - żużel jest schładzany i transportowany na zadaszony, utwardzony i uszczelniony plac. Tam żużel jest stabilizowany.

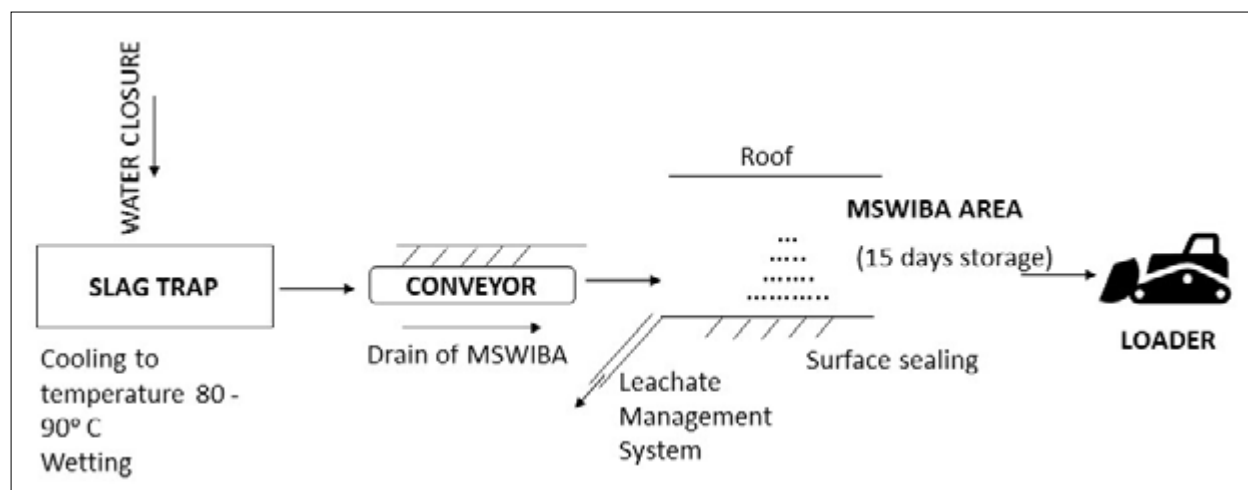
Kolejnym etapem waloryzacji jest rozdrabnianie i przesiewanie żużla, w ce-

lu rozdzielenia go na frakcje. Na tym poziomie następuje również wydzielenie metali żelaznych oraz nieżelaznych, które można poddać procesom recyklingu. Ustabilizowana, konkretna frakcja jest przekazywana do odbiorcy końcowego.

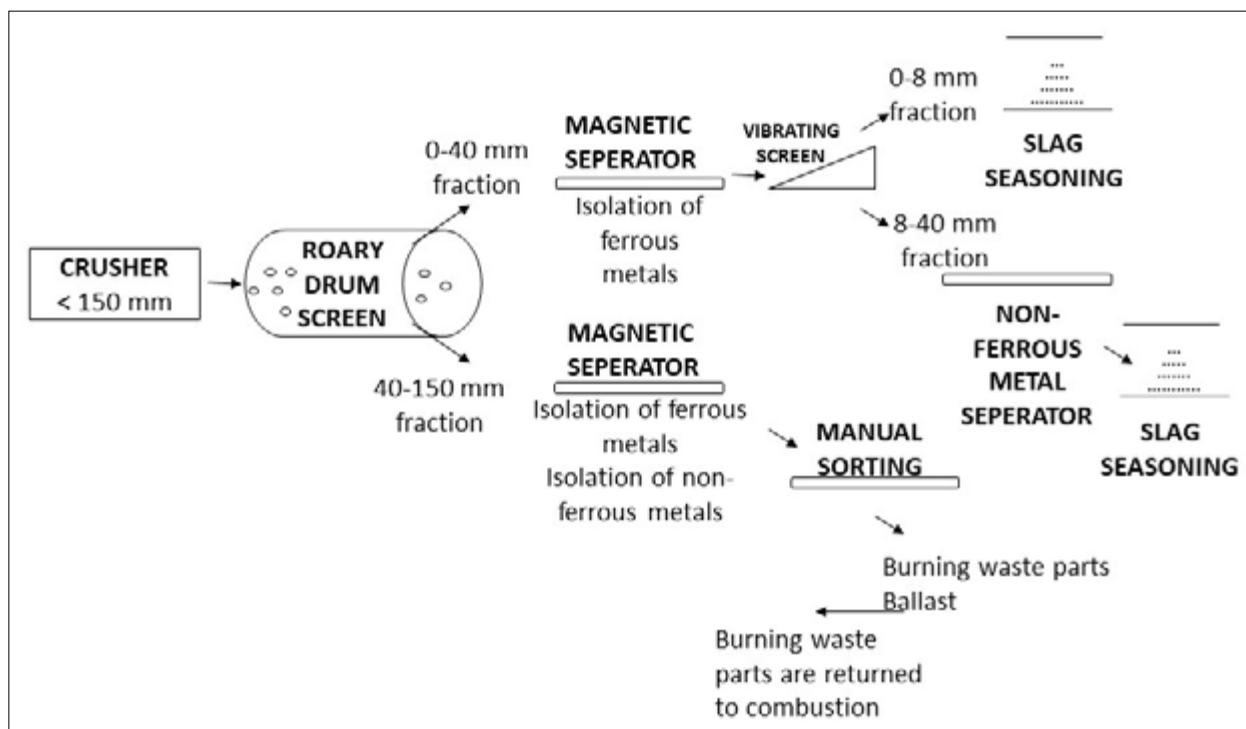
Rysunki przedstawiają przykładową instalację do waloryzacji żużla. Podstawową różnicę może stanowić frakcja końcowa, która jest przyjmowana przez odbiorcę końcowego. Żużel obecnie jest wykorzystywany w budownictwie jako domieszka do kruszyw, które mogą stanowić podbudowę dróg.

Obecnie trwają badania nad zagospodarowaniem żużla jako zamiennika kruszywa, bądź cementu w mieszance budowlanej. W tym celu można zastosować alkaliczną aktywację różnymi roztworami chemicznymi (np. NaOH, CaOH<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + NaOH) [5].

W celu przeprowadzenia chemicznej aktywacji i doboru odpowiedniego stężenia, temperatury oraz czasu procesu należy poznać skład fizyko-chemiczny żużla, który jest niejednorodny. Następnie określić przeznaczenie obrabianego materiału. Jeżeli żużel miałby stanowić zamiennik cementu, należy go zmielić do odpowiedniej frakcji. Pomimo tego, że proces mielenia jest energochłonny, wypada



Rys. 1. Przykładowy pierwszy etap waloryzacji żużla [5]  
\*MSWIBA (ang. *Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash* - żużel)



Rys. 2. Przykładowy drugi etap waloryzacji żużła [5]

	As	Ba	Cr	Cu	Pb	Ni	Se	Zn
2 weeks NaOH treatment	60,00%	92,23%	>99%	96,85%	> 99%	70,98%	70,00%	98,52%
3 weeks NaOH treatment	50,00%	85,92%	> 99%	94,49%	> 99%	45,08%	72,50%	94,39%

Tab. 1. Zmniejszenie wymywalności metali ciężkich z żużła po chemicznej aktywacji

mieć na uwadze, że do wytworzenia 1 Mg cementu zużywa się ok. 1 Mg minerałów surowcowych oraz wytwarza około 807 kg (0,5 - 1 Mg w zależności od procesu) CO<sub>2</sub>. Jeżeli żużel miałby stanowić zamiennik kruszywa drobnego, piasku, również można poddać go procesowi mielenia, bądź przesiewu.

Tabela 1 przedstawia zmniejszenie wymywalności w środowisku wodnym wybranych metali ciężkich po aktywacji alkalicznej.

Zastosowanie chemicznej aktywacji ograniczyło wymywanie się niektórych metali ciężkich nawet ponad 90% [5].

Uciążliwym odpadem do zagospodarowania jest popiół lotny, który jest odpadem niebezpiecznym. Ilość oraz jakość popiołu lotnego uzależniona jest

od procesu spalania oraz stosowanego systemu oczyszczania gazów odlotowych. Popiołu lotnego powstaje około 3,6-4,2%. Charakteryzuje go wysoka zawartość metali ciężkich, chloru oraz siarki. Obecnie jest on stabilizowany i zestalany w monolit w pustkach wydobywczych starych kopalni, np. soli. Proces ten ma na celu uzupełnienie wyrobisk, jednak nadal są to składowiska podziemne, których kubatura jest ograniczona. Sam proces składowania jest najniżej w hierarchii postępowania z odpadami i nie wpisuje się w GOZ oraz zrównoważony rozwój. Ponadto, w przypadku Polski, odpady często są wywożone poza granice kraju, ponieważ w Polsce nie ma odpowiednich miejsc do składowania popiołów lotnych z ITPOK,

co przekłada się na emisję CO<sub>2</sub> i zużycie energii związanej z transportem [6], [7].

Proces stabilizacji i zestalania należy do najpopularniejszych metod unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych mineralnych. Polega on na immobilizacji zanieczyszczeń poprzez stworzenie trwałej mieszanki z wykorzystaniem spoiwa hydraulicznego (np. cement portlandzki, wapno) lub innego materiału o właściwościach pucolanowych, chemicznych dodatków powodujących przekształcenie związków rozpuszczalnych w nierozpuszczalne oraz dodaniu wypełniaczy poprawiających strukturę mieszanki oraz jej trwałość i wytrzymałość. Przekształcenie w formy nierozpuszczalne polega na np. stąceniu soli lub tlenków metali toksycznych do trudno rozpuszczalnych wodorotlenków, siarczków, czy fosforanów.

W celu zmniejszenia wymywalności i mobilności metali ciężkich w mieszance optymalizuje się pH w granicach 8-10. Często wykorzystywany uwodniony cement portlandzki charakteryzuje się pH

ok. 11,5-13, przez co metale ciężkie są mobilne. Wynika to z bazy cementu portlandzkiego, którą tworzą klinkier portlandzki z niewielkim dodatkiem gipsu. Natomiast krzemiany di- i triwapniowe (alit i belit) stanowią 74% masy klinkieru portlandzkiego. W wyniku reakcji z wodą powstaje faza żelowa C-S-H oraz krystaliczny wodorotlenek wapnia. Zagęszczenie matrycy betonu również wpływa na immobilizację i zamknięcie w strukturze betonu metali ciężkich. Zazwyczaj faza żelowa C-S-H stanowi 50-60% zaczynu cementu, 20-25% to wodorotlenek wapnia, a 15-20% to etryngit (czy Aft) i AFm. W związku z migracją wody przez barierę mineralną wiązanie cementu jest procesem długotrwałym, który w normalnych warunkach trwa 28 dni, gdzie przereagowuje 75% cementu. W przypadku dodania odpadów do mieszanki, czas migracji, a w związku z tym wiązania może ulec wydłużeniu, przez co obserwuje się wzrost wytrzymałości mieszanek betonowanych z dodatkiem odpadów wraz ze wzrostem czasu.

Parametrem bezpośrednio decydującym o właściwościach mieszanki jest wskaźnik w/c. Im niższy tym produkt wykazuje lepsze właściwości. Nie można jednak

obniżać zawartości wody poniżej pewnej granicy ze względu na jej udział w procesie hydratacji cementu oraz urabialności mieszanki. W przypadku stosowania odpadów w mieszance należy wziąć pod uwagę uwodnienie przetwarzanych materiałów, aby uzyskane monolity nie charakteryzowały się wysoką porowatością. Wysoka porowatość przekłada się na wymywalność metali oraz niską odporność na działanie mrozu. W konsekwencji zaobserwuje się niszczenie monolitu.

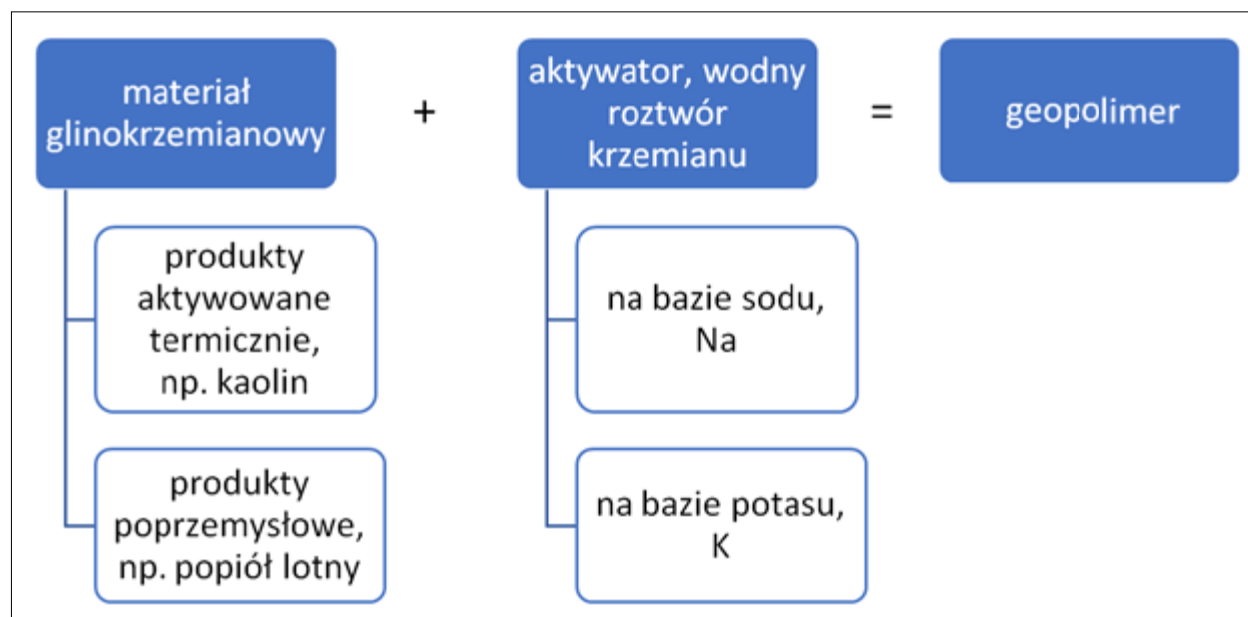
Proces zestalania i stabilizacji jest powszechnie stosowany. Istnieją również opatentowane technologie dedykowane, tj. Geodur lub Synrock. Technologia Geodur została już zastosowana na terenie Polski w Warszawie [8].

Istotnym czynnikiem środowiskowym, który negatywnie wpływa na wykorzystywanie procesu zestalania i stabilizacji odpadów jest dodatek emisyjnego cementu. Zamiennikiem dla mieszanki betonowej może być mieszanka geopolimerowa, która charakteryzuje się brakiem cementu lub jego niewielką ilością. Geopolimer jest to nieorganiczny, amorficzny, syntetyczny polimer - glinokrzemian. Geopolimery są stosunkowo nowymi badanymi materiałami na rynku, przez co nie do końca po-

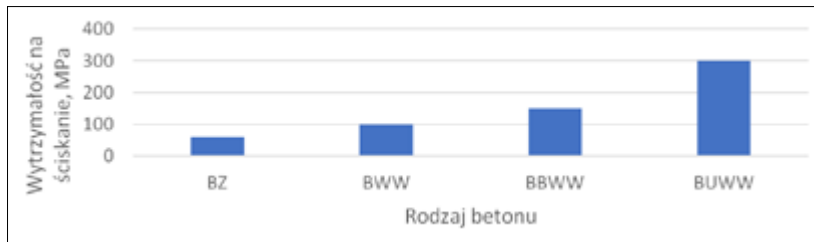
znanymi i jak na razie droższymi. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt o wprowadzanych opłatach za emisję CO<sub>2</sub>, przez co koszt jednostkowy wytworzenia cementu prawdopodobnie będzie miał tendencję wzrostową. Pomimo modernizacji cementowni, wytwarzanie dużych ilości CO<sub>2</sub> jest nieuniknione ze względów procesowych.

Wytworzenie geopolimeru jest mniej energochłonne oraz mniej emisyjne, przez co zmniejsza się obciążenie środowiska naturalnego. Ponadto do jego wytworzenia wykorzystuje się popioły lotne. W związku z tym, że geopolimery są mało poznanymi materiałami, w pierwszej fazie badań bezpieczniej jest poznać ich właściwości i parametry na podstawie wykorzystania popiołu lotnego ze spalania węgla, w związku z jego jednorodnością. Proces powstania geopolimeru przedstawia rysunek 3.

Obecne spoiwa cementowe pozwalają na osiągnięcie dużych wytrzymałości na ściskanie i dzielą się na: beton zwykły (BZ), beton wysokowartościowy (BWW), beton bardzo wysokowartościowy (BBWW) oraz beton ultrawysokowartościowy (BUWW). Rysunek 4 przedstawia podział betonów ze względu na ściskanie i ich wartości.



Rys. 3. Przykładowy proces powstania materiału geopolimerowego



Rys. 4. Podział betonów ze względu na wytrzymałość na ściskanie

Należy zwrócić uwagę, że stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie jest w miarę stały i wynosi od 10:1-10:1,5 niezależnie od rodzaju betonu. Ewenementem mieszanki budowlanej ze spoiwem geopolimerowym jest między innymi ten stosunek, który wynosi około 10:5,5. Ponadto odnotowuje się brak skurczu podczas dojrzewania i wysychania, czyli brak zmiany objętości świeżej mieszanki w stosunku do dojrzałej.

Wyzwaniem może okazać się sam parametr wytrzymałości na ściskanie, który dochodzi do 50 MPa. Jednak rozwiązaniem jest domieszka innego odpadu, np. żużla wielkopieczowego lub metakaolinu, czyli wypalanej glinki. Połączenie tych składników umożliwia wzrost wytrzymałości na ściskanie do ponad 125 MPa po 28 dniach oraz do 150 MPa po 210 dniach i ponad 150 MPa po 360 dniach. W tym wypadku jest możliwość osiągnięcia parametrów dla BUWW. Dodatkowo dodatek żużla czy metakaolinu umożliwia wykonanie mieszanki geopolimerowej bez procesu wygrzewania, czego wymaga mieszanka z użyciem jedynie popiołu lotnego. Zauważono zależność parametru wytrzymałości na ściskanie od stopnia rozdrobnienia spoiwa, gdzie jej szybki przyrost (60-80%) w pierwszych dwóch dniach (wzg. 28 dni) porównuje się z betonami na bazie spoiwa cementowego szybkowiązającego typu R.

W przypadku tradycyjnych betonów zachodzi konflikt pomiędzy minimalizacją porowatości oraz odporności na czynniki chemiczne, a uzyskaniem względnie dużej porowatości zapewnia-

jącej odpowiednią mrozoodporność, co rodzi problem w przypadku wyboru betonu klasy minimum VHPC (Very High-Performance Concrete, czyli BBWW), a brakiem możliwości wykorzystania go w klasie ekspozycji XF (warunki związane z agresją mrozową). Takiego dylematu nie ma w przypadku geopolimeru ze względu na inny charakter wiązania, co sprawia, że mieszanki geopolimerowe mają 6-krotnie większą wytrzymałość na rozciąganie. Różnią się również wymiarami porów, które są znacznie mniejsze i równomiernie rozłożone. Właśnie dzięki temu struktura jest bardziej odporna i charakteryzuje się większą wytrzymałością na naprężenia wewnętrzne, które mogą być spowodowane przemarzeniem i zmianą objętości. Jest to również związane z odpornością na działanie środowisk chemicznych, np. chlorków i siarczków. Ma to związek z budową spoiwa, gdzie cement portlandzki charakteryzuje się nieregularnymi cząstkami, natomiast cząstki popiołu lotnego są sferyczne. Koreluje to z końcową matrycą po hydratacji i polimeryzacji. Również w przypadku przeprowadzonych badań na działanie środowisk alkalicznych oraz wysokiej temperatury (w stymulowanych warunkach zbliżonych do pożaru) betony geopolimerowe wypadają lepiej. Wytrzymałość wiązań polimerowych jest wykorzystywana w powłokach ochronnych w silnikach odrzutowych, co jest dobrym potwierdzeniem słusznego kierunku badań.

Popiół lotny z ITPOK charakteryzuje się zmiennością w składzie, a ponadto jest zakwalifikowany jako odpad niebezpieczny, dlatego również cięższy w pro-

wadzeniu badań i tworzeniu mieszanek. Ponadto priorytetowym wyzwaniem będzie immobilizacja zanieczyszczeń, a dopiero w kolejnej fazie badań skupienie się na jakości powstałego materiału. Już wiadomo, że mieszanki geopolimerowe to materiały z potencjałem, dzięki którym zagospodarowanie odpadów wtórnych z ITPOK nie będzie tak szkodliwe dla środowiska, jak w przypadku tworzenia betonów cementowych. Ponadto, dzięki usystematyzowanej strukturze będzie łatwiej o brak wymywalności zanieczyszczeń, a równocześnie o dobre właściwości budowlane, ponieważ nie potrzeba kompromisu pomiędzy klasą batonu, a np. ekspozycją XF. Co istotne, istnieje możliwość połączenia ustabilizowanego żużla wraz z popiołem lotnym, co może rokować dobrym kierunkiem nad wytrzymałością betonu geopolimerowego oraz jego prostotę wytwarzania z powodu braku potrzeby wygrzewania mieszanki [9].

Oprócz waloryzacji, tworzenie mieszanek betonowych i geopolimerowych - istnieją również inne technologie i sposoby obróbki, które immobilizują zanieczyszczenia. Często jednak istnieją inne powody, dla których nie są wykorzystywane, np. energochłonność, a co za tym idzie - kosztowność procesu. W obróbce i zagospodarowaniu różnych odpadów wtórnych można wyróżnić np. ceramizację, keramizację, wityfikację, chemiczną aktywację ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaOH}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  +  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  +  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ), obróbkę kwaśną rozcieńczonymi roztworami ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), stabilizację chemiczną ( $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ), chelatyzację oraz inne technologie dedykowane.

Ceramizacja jest procesem uznanym za jeden z najskuteczniejszych sposobów immobilizacji uciążliwych odpadów. Z tego względu może być wykorzystana nawet do zagospodarowania odpadów radioaktywnych, np. z energetyki jądrowej. Odpady niepalne, tj. popiół, efektywnie można dodać w skład łatwo topiącego się szkła borokrzemianowego. Pyły i popioły można zagospodarować w kompozytach z matrycą szklistą,

odporną chemicznie oraz czynnikiem spajającym.

Keramizacja jest procesem częściowego zeszklenia, który można zastosować w przypadku żużli i polega na rozdrobnieniu odpadu oraz wytworzeniu jednorodnej mieszaniny z surowcem krzemionkowym i alkalicznym. W procesie keramizacji również ważna jest informacja mówiąca o składzie chemicznym żużla, ponieważ na tej podstawie dobierane są pozostałe składniki. Uzyskany granulata może być wykorzystywany w budownictwie jako materiał izolacyjny lub w wyrobie np. cegieł jako materiał szamotowy [10], [11].

Witryfikacja, innymi słowy zeszklenie polega na przemianie kinetycznej ze stanu ciekłego lub plastycznego w szklisty. Witryfikację można również stosować w remediacji gleb. Witryfikacja jest procesem energochłonnym.

Istnieje wiele metod zagospodarowania odpadów wtórnych z ITPOK, które różnią się skutecznością. Istotnym jednak jest wybranie procesu jak najmniej obciążającego środowisko oraz korzystnego ekonomicznie. Procesy wysokotemperaturowe są drogie oraz zużywają dużo energii, procesy chemiczne powodują powstanie innych odpadów, np. ciekłych, na które również trzeba opracować sposób zagospodarowania.

Wytwarzanie produktów z odpadów wtórnych z ITPOK powoduje wydłuże-

nie ich życia, co uwzględnia się w analizie cyklu życia LCA (ang. *Life Cycle Assessment*). Ślad węglowy jest wówczas mniejszy, co przekłada się na mniejszą uciążliwość dla środowiska.

Bardzo dobrym kierunkiem do zagospodarowania odpadów wtórnych z ITPOK jest przemysł budowlany. Beton jest dobrym środowiskiem do immobilizacji zanieczyszczeń, jednak nie idealnym. Wykorzystanie popiołu lotnego w betonie jako produktu jest możliwe, jednak obecnie w małych ilościach. Powodem oprócz wymywania się metali ciężkich i problemu spełnienia norm środowiskowych jest wysoki poziom chloru i siarki powodujący korozyjność zbrojenia oraz betonu. Rozwiązaniem może być uszczelnienie mieszanki, zmiana pH, zastosowanie plastyfikatora lub superplastyfikatora i napowietrzacza oraz zrezygnowanie ze zbrojenia. Innym problemem będzie uzyskanie odpowiednich decyzji na przekazywanie i zagospodarowanie odpadu niebezpiecznego. Kolejnym wyzwaniem jest negatywne nastawienie społeczeństwa do stosowania odpadu niebezpiecznego jakim jest popiół lotny w betonie. Znacznie lepszym, jednak obecnie mniej poznanym rozwiązaniem jest wytworzenie geopolimeru, który jest bardziej przyjazny środowiskowo [12].

Reasumując, budownictwo jest dobrym kierunkiem do zagospodaro-

wania UPS z ITPOK. Mieszanki budowlane dobrze immobilizują zanieczyszczenia, a UPS charakteryzują się właściwościami konstrukcyjnymi. Jest to rozwiązanie zgodne z ideą GOZ oraz Zrównoważonym Rozwojem. Proces produkcji cementu jest uciążliwością dla środowiska ze względu na wydobycie surowców naturalnych, energochłonność oraz emisję gazów cieplarnianych. Przemysł cementowy jest odpowiedzialny za około 5% całkowitej emisji CO<sub>2</sub>, 63% emisji CO<sub>2</sub> z cementowni to emisja procesowa, której nie da się wyeliminować z procesu w związku z rozkładem węgla na tlenek wapnia i ditlenek węgla. Polska jest jednym z głównych producentów cementu w Europie, z ilością 14 cementowni o łącznej zdolności produkcyjnej 24 mln Mg/r. Należy wziąć pod uwagę, że Unia Europejska dąży do ograniczeń emisji dwutlenku węgla, gdzie celem jest redukcja o co najmniej 40% do 2030 r., dlatego poszukuje się i rozwija rozwiązania mniej obciążające środowisko, które promują innowacyjne metody syntez materiałów i substytuty komercyjnego cementu. Ponadto w produkcji betonu zużywa się ogromne ilości piasku i kruszyw naturalnych. Alternatywą jest korzystanie z odpadów, np. UPS z ITPOK i zwracanie ich do obiegu. □

#### Literatura

1. Poranek Nikolina and Łaźniewska-Piekarczyk Beata, "Konieczność budowy instalacji końcowych oraz zagospodarowanie odpadów w nich powstających ze szczególnym uwzględnieniem ITPOK." Praca zbiorowa pod redakcją Krzysztofa Pikoń i Magdaleny Bogackiej. Collective work edited Krzysztof Pikoń and Magdalena Bogacka., pp. 206-2012.
2. "Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=celex%3A32010L0075> (accessed Aug. 09, 2021).
3. "Global Compact Network Poland. Przeciwdziałanie Szarej Strefie w Polsce 2018/19. Raport".
4. K. Pikoń, N. Poranek, A. Czajkowski, and B. Łaźniewska-Piekarczyk, "Poland's proposal for a safe solution of waste treatment during the covid-19 pandemic and circular economy connection," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/app11093939.
5. Bogacka Magdalena, Poranek Nikolina, Łaźniewska-Piekarczyk Beata, and Pikoń Krzysztof, "Removal of Pollutants from Secondary Waste from an Incineration Plant: The Review of Methods," *Energies*, vol. 13, no. 23, Nov. 2020.
6. "Circular economy action plan." [https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en) (accessed Jun. 14, 2021).
7. S. Çetin, C. de Wolf, and N. Bocken, "Circular Digital Built Environment: An Emerging Framework," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 6348, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13116348.
8. M. Fengler, "Stabilizacja i zeszklenie (mobilizacja) odpadów niebezpiecznych ze spalarni odpadów komunalnych w technologii „Geodur”,” *Piece Przemysłowe & Kotły*, vol. 11–12, 2012, Accessed: Aug. 09, 2021. [Online]. Available: [www.pplik.pl](http://www.pplik.pl)
9. I. Hager, M. Sitarz, and K. Mróz, "Fly-ash based geopolimer mortar for high-temperature application-Effect of slag addition," *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, p. 128168, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128168.
10. "Opis patentowy. Numer zgłoszenia: 304384." <http://docplayer.pl/4419795-12-opis-patentowy-19-pl-11-175155-13-b1.html> (accessed Aug. 09, 2021).
11. H. Pieczarowski, "Utylizacja żużli i popiołów ze spalania odpadów komunalnych," *Przegląd geologiczny*, vol. 44, no. 7, 1996.
12. C. Marieta, A. Guerrero, and I. Leon, "Municipal solid waste incineration fly ash to produce eco-friendly binders for sustainable building construction," *Waste Management*, vol. 120, pp. 114–124, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.WASMAN.2020.11.034.