

Od odpadu do wychwytu CO₂ – ISSA w zaprawach budowlanych

From waste to CO₂ capture – ISSA in cement mortars



dr hab. Monika Kasina, prof. UJ

Instytut Nauk Geologicznych
Uniwersytet Jagielloński
monika.kasina@uj.edu.pl
ORCID: 0000-0002-7117-3721



mgr Adam Wierzbicki

Instytut Nauk Geologicznych
Uniwersytet Jagielloński
adam.wierzbicki@uj.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8912-738X

Streszczenie

Produkcja cementu odpowiada za ok. 5–8% globalnej emisji CO₂. Skala tego oddziaływania wymusza nie tylko redukcję udziału klinkieru portlandzkiego w materiałach budowlanych, lecz także poszukiwanie rozwiązań, które umożliwią wtórną reabsorpcję CO₂ podczas eksploatacji kompozytów cementowych. Jednym z potencjalnych dodatków mineralnych są popioły ze spalania osadów ściekowych (ISSA), powstające w procesie monospalania w temperaturze 850–900°C. Materiał ten charakteryzuje się stabilnym składem chemicznym, drobnym uziarnieniem oraz obecnością słabo rozpuszczalnych faz wapniowo-żelazowo-magnezowych.

Celem pracy było określenie potencjału ISSA jako dodatku do zapraw budowlanych w kontekście procesu pasywnej sekwestracji CO₂ oraz stabilizacji metali ciężkich w matrycy cementowej. Badania obejmowały analizę składu chemicznego

oraz mineralogicznego (ICP-OES, ICP-MS, XRD i SEM-EDS), ocenę uziarnienia, testy wymywalności (zgodnie z normą PN-EN 12457-2), a także ocenę stopnia zaawansowania procesu mineralnej karbonatyzacji w warunkach naturalnej ekspozycji. Wykazano, że ISSA zawiera średnio 7–8% fosforu, który występuje głównie w postaci whitlockitu, co ogranicza jego biodostępność i zmniejsza ekonomiczną zasadność odzysku. Jednocześnie zaprawy z dodatkiem popiołów ze spalania osadów ściekowych wykazują wysoką retencję metali ciężkich oraz stabilność środowiskową. W elementach niezbrojonych karbonatyzacja nie stanowi zagrożenia konstrukcyjnego i może prowadzić do częściowego uszczelnienia mikrostruktury poprzez precypitację CaCO₃, wspierając wtórną absorpcję CO₂. Uzyskane wyniki wskazują, że materiałowe wykorzystanie ISSA stanowi obecnie bardziej racjonalny kierunek zagospodarowania niż odzysk fosforu.

Słowa kluczowe karbonatyzacja zapraw, popiół z osadów ściekowych (ISSA), redukcja emisji CO₂, stabilizacja metali

Abstract

Cement production accounts for approximately 5–8% of global CO₂ emissions. The scale of this impact necessitates not only reducing the Portland clinker content in construction materials, but also identifying solutions that enable secondary CO₂ uptake during the service life of cement-based composites. Incinerated sewage sludge ash (ISSA), generated during mono-incineration at 850–900°C, is a potential mineral additive. This material is characterized by a stable chemical composition, fine particle size distribution, and the presence of poorly soluble Ca–Fe–Mg phases. The aim of this study was to evaluate the potential of ISSA as an additive in cement mortars with respect to passive CO₂ sequestration and heavy metal stabilization. The research included chemical and mineralogical characterization (ICP-OES, ICP-MS, XRD and SEM-EDS),

particle size analysis, leaching tests in accordance with PN-EN 12457-2, and assessment of the advancement of mineral carbonation under natural exposure conditions. The results show that ISSA contains 7–8 % of phosphorus, which occurs predominantly as whitlockite, which limits its bioavailability and reduces the economic feasibility of phosphorus recovery. At the same time, mortars incorporating ISSA exhibit high retention of heavy metals and environmental stability. In non-reinforced elements, carbonation does not pose a structural risk and may contribute to partial pore refinement through CaCO₃ precipitation, supporting secondary CO₂ uptake. Overall, the findings indicate that material use of ISSA is currently a more rational management pathway than phosphorus recovery.

Keywords mortar carbonation, incinerated sewage sludge ash (ISSA), CO₂ mitigation, heavy metal stabilization



WPROWADZENIE

Produkcja cementu jest jednym z głównych źródeł emisji CO₂ związanych z budownictwem. W ujęciu globalnym materiał ten odpowiada za kilka procent emisji CO₂ (w literaturze wskazuje się na 5–8% w zależności od metodyki bilansowania) [1]. Jednak w obrębie samych sektorów przemysłowych udział ten jest znacznie wyższy i w odniesieniu do emisji bezpośrednich bywa raportowany na poziomie ok. 27% [2]. Różnica wynika z odmiennego mianownika: pierwsza wartość odnosi się do wszystkich globalnych emisji, natomiast druga tylko do tych spowodowanych przez przemysł. W konsekwencji nawet umiarkowany wzrost produkcji cementu może nieproporcjonalnie silnie wpływać na bilans emisji w sektorze przemysłowym, zwłaszcza w krajach rozwijających się. **Ślad węglowy kompozytów cementowych można ograniczyć m.in. poprzez redukcję udziału klinkieru oraz wykorzystanie dodatków mineralnych, w tym odpadowych.**

Prognozy wskazują na dalszy wzrost zapotrzebowania na cement. Do 2050 r. szacowany jest on na ok. 12–23% wobec 2005 r., przy czym znaczna część tego przyrostu ma dotyczyć krajów spoza OECD.

W przypadku braku skutecznych działań dekarbonizacyjnych taki trend może przełożyć się na zauważalny wzrost globalnych emisji CO₂ (rzędu kilku procent) w skali analizowanego okresu [3]. Równocześnie beton i zaprawy cementowe wykazują zdolność wtórnej akumulacji CO₂ w procesie karbonatyzacji, która stanowi swoiste „odwrócenie” części emisji procesowych związanych z kalcynacją.

Co istotne, wytyczne Międzypaństwowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC) dla krajowych inwentaryzacji gazów cieplarnianych opisują metody szacowania emisji dwutlenku węgla z produkcji cementu. W praktyce jednak nie uwzględniają wprost wtórnej absorpcji CO₂ przez materiały cementowe w wyniku karbonatyzacji, co może prowadzić do niedoszacowania bilansu węgla w tym sektorze [5].

Przedmiotem badań były zaprawy cementowe modyfikowane rosnącym dodatkiem popiołów ze spalania osadów ściekowych (ISSA).

Zjawisko to zostało ilościowo opisane w pracach bilansujących pochłanianie CO₂ przez istniejące zasoby materiałów cementowych w skali globalnej. Wskazano, że w fazie użytkowania produktów cementowych może dochodzić do wtórnej reabsorpcji rzędu ok. 20% emitowanego CO₂ [1, 4]. Karbonatyzacja jest procesem silnie zależnym od warunków środowiskowych (wilgotności, temperatury, dostępności CO₂) oraz składu i mikrostruktury materiału, w tym porowatości i dostępności faz wapniowych (CaO/Ca(OH)₂).

W obliczu transformacji klimatycznej sektora budowlanego kluczowe staje się ograniczenie udziału klinkieru portlandzkiego w kompozytach cementowych oraz zwiększenie efektywności wykorzystania materiałów wtórnych. Równoległe wzrasta ilość popiołów ze spalania osadów ściekowych (ISSA), powstających w procesach monospalania (w temperaturach 850–900°C) i stanowiących stabilne źródło materiału mineralnego o potencjale zagospodarowania [6]. ISSA zawiera znaczące ilości Si, Fe, Ca i P, a jednocześnie może być wzbogacony w pierwiastki potencjalnie

toksyczne, co zawęża zakres jego bezpiecznych zastosowań [6–9]. Dotychczas wiele prac dotyczyło odzysku fosforu z ISSA, jednak forma jego występowania często cechuje się niską rozpuszczalnością. Ogranicza to biodostępność i zwiększa koszty technologiczne odzysku bez dodatkowego przetwarzania [10, 11]. W tym kontekście racjonalną alternatywą staje się zastosowanie materiałowe ISSA w spoiwach, w których wysoka stabilność mineralna może być atutem (bezpieczeństwo środowiskowe, immobilizacja metali), natomiast drobne uziarnienie – oddziaływać na przebieg karbonatyzacji [12].

Celem pracy było określenie wpływu dodatku ISSA na przebieg karbonatyzacji zapraw cementowych, ich stabilność środowiskową (w tym zdolność wychwytywania oraz immobilizacji pierwiastków potencjalnie toksycznych) i na parametry wytrzymałościowe. Założono, że zastosowanie ISSA nie pogorszy właściwości mechanicznych ani bezpieczeństwa środo-

wiskowego kompozytów, a w przypadku elementów niezbrojonych proces karbonatyzacji może mieć charakter neutralny lub potencjalnie korzystny z punktu widzenia mikrostruktury i oddziaływania środowiskowego. Przedmiotem badań były zaprawy cementowe modyfikowane rosnącym dodatkiem ISSA.

Metodyka obejmowała:

- analizę mineralogiczną ISSA (XRD, SEM-EDS) oraz chemiczną (ICP-OES i ICP-MS) zarówno próbek ISSA, jak i rozтворów poekstrakcyjnych;
- analizę rozkładu wielkości ziaren metodą dyfrakcji laserowej (ISO 13320);
- testy wymywalności zgodne z normą PN-EN 12457-2 [13];
- ocenę zmian pH i stabilności metali.

Serię kompozytów cementowych przygotowano przy rosnącym dodatku ISSA. Dla czytelności w niniejszym artykule wyniki omawiano w podziale na warianty o niskim, umiarkowanym i podwyższonym dodatku.

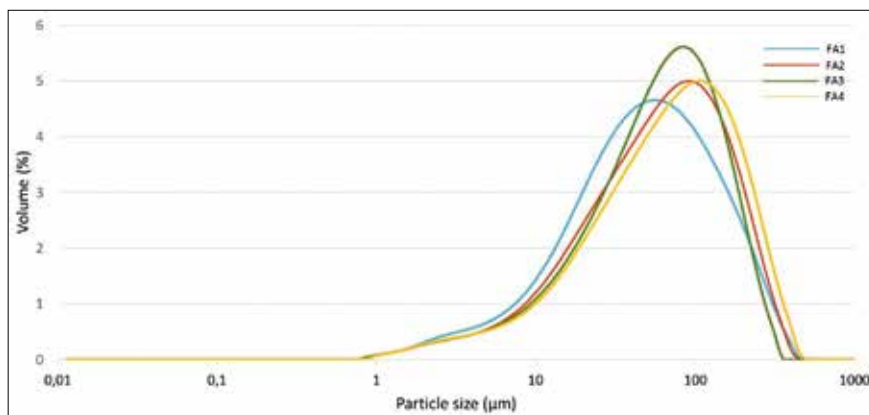
Tak dobrane metody pozwoliły kompleksowo ocenić właściwości materiałowe i środowiskowe kompozytów.

CHARAKTERYSTYKA CHEMICZNA I MINERALOGICZNA ISSA

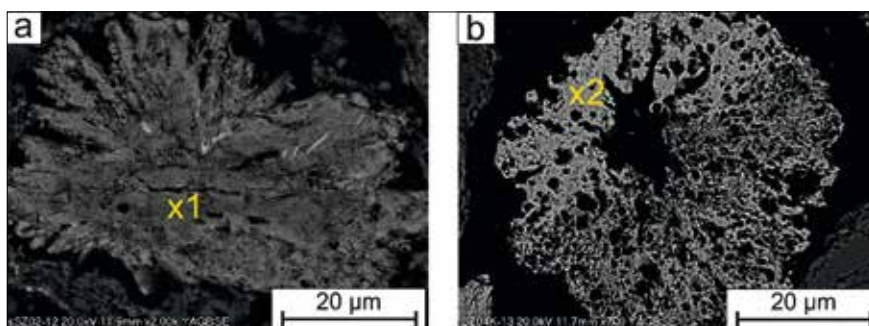
Próbki ISSA były pobierane kwartalnie od 2015 do 2023 r. Analiza uziarnienia ISSA wykazała unimodalny rozkład wielkości cząstek z dominującym maksimum w zakresie ok. 10–130 μm (rys. 1). Taki profil wskazuje na przewagę frakcji drobnej, a tym samym podwyższoną powierzchnię aktywną materiału. W kontekście zastosowań w spoiwach cementowych większy udział cząstek drobnych może sprzyjać intensywniejszym procesom powierzchniowym, w tym reaktywności w środowisku alkalicznym oraz interakcji z produktami hydratacji (np. na granicy faz i w strefie przejściowej). Z perspektywy środowiskowej drobniejsze frakcje mogą w większym stopniu determinować kinetykę rozpuszczania/ługowania, a więc potencjalną mobilność wybranych składników w kontakcie z wodą (np. podczas przepłykiwania deszczówką). W efekcie uziarnienie ISSA to istotny parametr zarówno przy ocenie potencjału materiałowego, jak i w interpretacji wyników dotyczących wymywania oraz ewentualnych procesów odzysku fosforu.

Zestawienie składu chemicznego ISSA wskazuje na dominację krzemionki (Si ~17–18%) przy istotnych udziałach Fe (~10%), Ca (~8–9%) i P (średnio 7–8%), a także umiarkowanej stracie prażenia (LOI ~3–4%). Taki profil potwierdza mineralny charakter materiału i jednocześnie sugeruje potencjał oddziaływania na hydratację i karbonatyzację w układach cementowych (udział Si i Ca). Obecność fosforu może wpływać też na kinetykę wiązania, a wysokie stężenia metali (Zn ~3976 mg/kg, Cr ~711 mg/kg, Cu ~633 mg/kg, Pb ~139 mg/kg, Cd ~6 mg/kg) [8] uzasadniają konieczność oceny środowiskowej i monitorowania mechanizmów ich immobilizacji w matrycy cementowej.

Analiza dyfrakcyjna XRD z dopasowaniem metodą Rietvelda wykazała, że ISSA



Rys. 1. Rozkład wielkości ziaren w ISSA dla próbek pobieranych kwartalnie na przełomie 2015 i 2016 r. [8]



Rys. 2. Przykładowa fotografia whitlockitu w popiele ISSA. Obrazy SEM-BSE: a) whitlockit o morfologii radialnej, b) agregat radialny częściowo spieczony z przerostami Fe. Oznaczenia x1 i x2 wskazują punkty pomiarowe analizy EDS [14]

jest materiałem w przeważającej mierze krystalicznym, a udział fazy amorficznej jest umiarkowany i wynosi $19,9 \pm 2,4\%$ mas. W składzie mineralnym dominują:

- kwarc ($30,0 \pm 0,6\%$ mas.),
- whitlockit ($22,0 \pm 0,8\%$ mas.),
- skalenie ($18,9 \pm 1,0\%$ mas.) oraz
- hematyt ($7,8 \pm 0,4\%$ mas.) [14].

Dodatkowo zidentyfikowano fazę Fe-PO_4 w ilości $1,5 \pm 0,3\%$ mas. Wyniki wskazują, że fosfor jest związany przede wszystkim w stabilnych fazach krystalicznych, z przeważającym udziałem whitlockitu (rys. 2 a, b) o składzie zbliżonym do $\text{Ca}_9(\text{Mg,Fe})(\text{PO}_4)_6(\text{PO}_3\text{OH})$ [14].

Zidentyfikowanie whitlockitu jako dominującej fazy nośnej fosforu w ISSA wskazuje, że jest on w dużym stopniu związany w strukturach krystalicznych o niskiej rozpuszczalności. W konsekwencji bezpośrednie wykorzystanie ISSA jako źródła P (np. w zastosowaniach rolniczych) jest ograniczone, a efektywny odzysk tego pierwiastka wymaga dodatkowych, kosztownych etapów przetwarzania. Jednocześnie ta sama stabilność mineralogiczna sprzyja zastosowaniom materiałowym: ograniczona rozpuszczalność faz fosforanowych i krzemianowych przekłada się na niższą mobilność składników w kontakcie z wodą.

IMMOBILIZACJA METALI POTENCJALNIE TOKSYCZNYCH

Wraz ze wzrostem udziału ISSA w kompozytach cementowych obserwowano spadek stężeń Ca w wodach przesiąkowych (deszczówce) po przepłukiwaniu bloków w warunkach naturalnych. Trend ten jest zgodny z bardziej efektywnym wiązaniem wapnia w produktach hydratacji oraz w fazach węglanowych powstających podczas karbonatyzacji (m.in. CaCO_3), co ogranicza jego mobilność. Równolegle zmniejszały się stężenia Si w wodach przesiąkowych. Można to wiązać z niską rozpuszczalnością faz krzemianowych oraz retencją krzemu w uwodnionej matrycy (np. w żelu C-S-H). Interpretację należy rozpatrywać w odniesieniu do składu chemicz-



nego i pH deszczówki, które determinują rozpuszczalność faz cementowych.

W warunkach naturalnej ekspozycji i przepłukiwania próbek deszczówką kompozyty cementowe zawierające ISSA cechowała wysoka skuteczność immobilizacji metali. W wariantach o podwyższonym dodatku ISSA Cd był niewykrywalny w wodach przesiąkowych, a stężenia Zn obniżono o ok. 90–93% (z 288 do $19\text{--}33 \mu\text{g/L}$). Stężenia Pb były pomijalne ($<0,07 \mu\text{g/L}$) [12]. Jednocześnie Cu i Ni wykazywały nieznacznie podwyższone wartości w porównaniu z pozostałymi metalami. Trend ten jest zgodny z interpretacją, że ich źródłem może

metali (np. wodorotlenków i/lub węglanów) oraz

- sorpcji/inkorporacji jonów na produktach hydratacji cementu, w szczególności na fazach typu C-S-H oraz ettringicie.

W konsekwencji kompozyty cementowe z dodatkiem ISSA działają jak bariera sorpcyjna [12]. Deszczówka transportująca śladowe ilości metali wnika w porowatą strukturę materiału, a następnie metale są wychwytywane w strefie alkalicznej poprzez procesy precypitacji i sorpcji [12]. Taki mechanizm ogranicza uwalnianie metali i sprzyja długoterminowej stabilności środowiskowej

W badaniach własnych kompozyty z dodatkiem ISSA utrzymywały wysoką wytrzymałość na ściskanie po ekspozycji naturalnej,

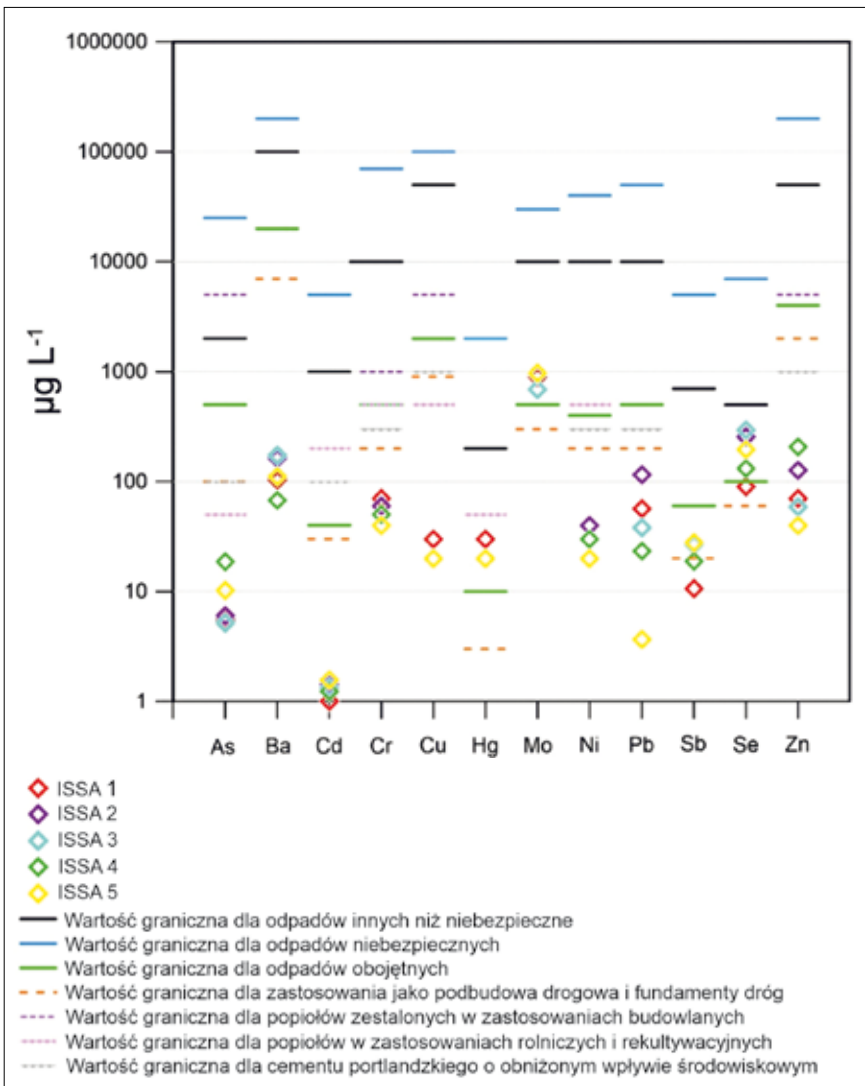
być przede wszystkim matryca cementowa, a nie dodatek ISSA. Wartości pH w wodach przesiąkowych pozostawały stabilne (ok. 8–9) dla wszystkich kompozytów zawierających ISSA, podczas gdy wariant referencyjny (zaprawa normowa) bez dodatku ISSA charakteryzował się nieco niższym i bardziej zmiennym pH [12]. Utrzymanie alkalicznego odczynu wskazuje na zachowanie zdolności buforowania układu, co jest kluczowe dla ograniczania mobilności metali w warunkach kontaktu z wodą opadową. Mechanizm immobilizacji można przypisać działaniu:

- alkalicznego środowiska sprzyjającego wytrącaniu trudno rozpuszczalnych form

kompozytu, przy jednoczesnym zachowaniu stężeń metali w wodach przesiąkowych poniżej wartości odniesienia dla wód środowiskowych [15]. Skuteczność bariery wydaje się być jednak uwarunkowana utrzymaniem odczynu zasadowego. Potencjalny spadek pH w długim czasie może zwiększyć mobilność wybranych metali potencjalnie toksycznych [12].

WYMYWALNOŚĆ ISSA JAKO PRZESŁANKA BEZPIECZNEGO ZASTOSOWANIA W MATERIAŁACH CEMENTOWYCH

Wyniki testów wymywalności przeprowadzonych zgodnie z normą PN-EN 12457-2 [13] wskazują, że ISSA cechuje korzystny



Rys. 3. Ocena wymywalności ISSA w odniesieniu do progów środowiskowych według norm PN-EN. Stężenia pierwiastków w roztworze po teście wymywalności (µg/L; skala logarytmiczna) dla próbek ISSA zestawiono z wartościami granicznymi dla klasyfikacji odpadów (obojętne/inne niż niebezpieczne/niebezpieczne) oraz wybranymi limitami dla scenariuszy zagospodarowania (m.in. podbudowy drogowe, popioły zastalane w budownictwie, zastosowania rolnicze/rekultywacja) (zmodyfikowane oprac. na podstawie [6])

profil środowiskowy [6]. Stężenia badanych pierwiastków w roztworach po wymywalności pozostają poniżej progów odnoszonych do klasyfikacji jako odpad niebezpieczny, a materiał spełnia kryteria dla odpadu innego niż niebezpieczny (rys. 3). Jednocześnie należy zauważyć, że wykres zestawia wyniki wymywalności ISSA z dwoma typami progów: po pierwsze – klasyfikacji odpadu (obojętny; inny niż niebezpieczny; niebezpieczny), po drugie – dla konkretnych scenariuszy zagospodarowania, które bywają istotnie bardziej restrykcyjne. W takich scenariuszach ocena środowiskowa jest często „sterowana” przez pierwiastki o re-

latywnie najwyższej wymywalności, czyli takie, które najłatwiej przechodzą do roztworu i jako pierwsze zbliżają się do wartości granicznych. W przypadku ISSA dotyczy to najczęściej Mo oraz Zn, a lokalnie również Cu i Ni. Oznacza to, że nawet jeśli większość pierwiastków ma bardzo niską wymywalność, to o spełnieniu kryterium może decydować jeden pierwiastek krytyczny.

Z punktu widzenia zastosowań praktycznych może to prowadzić do dwóch wniosków. Po pierwsze, należy uwzględnić zmienność między partiami materiału i systematycznie kontrolować jakość

(np. wykonując okresowe testy wymywalności). Po drugie, najbardziej korzystne są ścieżki zagospodarowania, w których ISSA jest trwale związana w spoiwie (np. w kompozytach cementowych). Matryca cementowa działa bowiem jak bariera ograniczająca transport wody w porach i sprzyja immobilizacji składników, zmniejszając ich mobilność w warunkach eksploatacyjnych.

MINERALNA KARBONATYZACJA KOMPOZYTÓW CEMENTOWYCH

W celu oceny zdolności cementowych kompozytów z dodatkiem ISSA do pasywnego wiązania CO₂ przeprowadzono badania karbonatyzacji w warunkach kontrolowanych (laboratoryjnych) oraz naturalnych (terenowych) [16]. Efektywność karbonatyzacji określono na podstawie zmian zawartości CaCO₃ oznaczanej objętościową metodą Scheiblera (zgodnie z ISO 10693).

Wyniki ilościowe wskazują, że warunki ekspozycji istotnie determinują przyrost CaCO₃, a więc rzeczywistą efektywność wiązania CO₂. Największe przyrosty CaCO₃ zaobserwowano w kompozytach z umiarkowanym udziałem ISSA. Przy wyższych dodatkach (powyżej 30%) przyrost był niewielki, a lokalnie stwierdzono nawet spadek wartości CaCO₃ względem zaprawy normowej. Zjawisko to można tłumaczyć różnicami w dostępności faz wapniowych, zmiennością wilgotności oraz kinetyką reakcji w warunkach naturalnych [16].

W praktyce oznacza to, że ISSA może wspierać proces karbonatyzacji, a w konsekwencji wtórną akumulację CO₂. Efekt ten ma jednak charakter nieliniowy i silnie zależny od mikrostruktury oraz dostępności jonów Ca w układzie.

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE

Z punktu widzenia zastosowań inżynierskich istotne jest, że w badaniach własnych kompozyty z dodatkiem ISSA utrzymywały wysoką wytrzymałość na ściskanie po ekspozycji naturalnej, osiągając po pół roku wartość rzędu ok. 70 MPa.

Dodatkowo po symulowanym długo-okresowym starzeniu, odpowiadającym ok. 50 latom w przeliczeniu na ekwiwalent czasu eksploatacji, wytrzymałość pozostawała na poziomie ok. 50 MPa, podczas gdy próbki zapraw normowych wykazywały spadek do ok. 30 MPa.

Wartości te są istotne w kontekście klasyfikacji cementów według EN 197-1, gdzie klasa 42,5 odnosi się do wytrzymałości normowej cementu oznaczanej na zaprawach normowych i obejmuje zakres ok. 42,5–62,5 MPa (dla wieku 28 dni, zależnie od podklasy N/R). W praktyce używane poziomy wytrzymałości po ekspozycji, ponad 70 MPa po 6 miesiącach oraz ponad 50 MPa po przyspieszonych testach starzeniowych, wskazują, że materiał zachowuje właściwości odpowiadające wysokim klasom wytrzymałościowym. Ponadto ubytek masy całkowitej po 50 latach w przeliczeniu na ekwiwalent czasu eksploatacji wynosił ok. 1,8–2,0%. Jest to szczególnie istotne dla elementów małej infrastruktury niezbrojonej, gdzie karbonatyzacja nie inicjuje ryzyka depastywacji stali, a decydujące znaczenie mają parametry takie jak stabilność mikrostruktury, odporność na oddziaływanie wód opadowych oraz zmiany temperatur.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone analizy potwierdzają, że ISSA jest materiałem mineralnym o stabilnym składzie. Skład fazowy wskazuje na dominację faz krzemianowych oraz fosforanowych, przy czym fosfor jest związany głównie w formach o niskiej rozpuszczalności (whitlockit). Ogranicza to jego biodostępność i czyni odzysk fosforu bez dodatkowego przetwarzania technologicznie oraz ekonomicznie mniej opłacalnym. Jednocześnie wyniki badań środowiskowych wskazują na korzystny profil wymywalności ISSA oraz wysoką stabilność w systemach cementowych. W warunkach naturalnej ekspozycji i kontaktu z wodą opadową kompozyty cementowe zawierające ISSA wykazały stabilny, zasadowy odczyn, a także wysoką skuteczność immobilizacji metali, szczególnie Zn i Cd.

Obserwacje te są zgodne z mechanizmami retencji w matrycy cementowej, obejmującymi precypitację trudno rozpuszczalnych form metali oraz sorpcję na produktach hydratacji (m.in. C–S–H i ettringicie). Z punktu widzenia użytkowego istotne jest, że **w wariantach o niskim poziomie modyfikacji ISSA utrzymano znacznie wyższą wytrzymałość na ściskanie po ekspozycji naturalnej oraz po długookresowym starzeniu niż w próbkach zaprawy normowej, co potwierdza przydatność materiału do zastosowań budowlanych.** W elementach niezbrojonych karbonatyzacja nie stanowi zagrożenia korozyjnego i może sprzyjać korzystnym zmianom mikrostruktury poprzez intensywniejsze wytrącanie CaCO₃, wspierając wtórną akumulację CO₂. W efekcie materiałowe wykorzystanie ISSA jako dodatku do zapraw cementowych stanowi obecnie racjonalny kierunek zagospodarowania tego odpadu, łączący aspekt środowiskowy z wymaganiami użytkowymi.

WERYFIKACJA HIPOTEZY

Postawiona hipoteza, że stabilność mineralogiczna ISSA sprzyja bezpiecznemu zastosowaniu materiałowemu w zaprawach cementowych oraz ogranicza mobilność składników w kontakcie z wodą, została potwierdzona. Wyniki wymywalności, stabilne pH w warunkach naturalnych, skuteczna immobilizacja metali oraz utrzymanie wysokiej wytrzymałości po ekspozycji wskazują, że ISSA może pełnić funkcję dodatku funkcjonalnego w kompozytach cementowych, szczególnie w zastosowaniach niezbrojonych. ■

Literatura

- [1] Steiner S. i in., „Effect of relative humidity on the carbonation rate of portlandite, calcium silicate hydrates and ettringite” w: *Cement and Concrete Research*, t. 135, 2020, art. 106116.
- [2] Zhaurova M., Soukka R., Hotttanainen M., „Multi-criteria evaluation of CO₂ utilization options for cement plants using the example of Finland” w: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, t. 112, 2021, art. 103481.
- [3] International Energy Agency (IEA), „Cement technology roadmap: carbon emissions reductions up to 2050” [dostęp: 15.02.2026]

w: IEA, <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap-carbon-emissions-reductions-up-to-2050>.

- [4] Strippl H. i in., *CO₂ Uptake in Cement Containing Products: Background and Calculation Models for IPCC Implementation*, raport nr B 2309. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2018 [dostęp: 15.02.2026], w: DiVA, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24723.12328.2018>.
- [5] Xi F. i in., „Substantial global carbon uptake by cement carbonation” w: *Nature Geoscience*, t. 9, nr 12, 2016, s. 880–883, <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>.
- [6] Kasina M., Kajdas B., Michalik M., „The leaching potential of sewage sludge and municipal waste incineration ashes in terms of landfill safety and potential reuse” w: *Science of the Total Environment*, t. 791, nr 2, 2021, art. 148313.
- [7] Eriksson E. i in., „Potential priority pollutants in sewage sludge” w: *Desalination*, t. 226, 2007, s. 371–388.
- [8] Kasina M. i in., „Characterization of incineration residues from wastewater treatment plant in Polish city: a future waste-based source of valuable elements?” w: *Journal of Material Cycles and Waste Management*, t. 21, nr 4, 2019, s. 885–896.
- [9] Kasina M. i in., „Assessment of valuable and critical elements recovery potential in ashes from processes of solid municipal waste and sewage sludge thermal treatment” w: *Resources*, t. 9, nr 11, 2020, art. 131, <https://doi.org/10.3390/res.1106131>.
- [10] Kasina M., Jarosz K., „Chemical and microbiological techniques for recovery and/or removal of elements from incinerated sewage sludge ash – a review of basic methods” w: *Energies*, t. 16, nr 6, 2023, art. 2840.
- [11] Kasina M., „The assessment of phosphorus recovery potential in sewage sludge incineration ashes – a case study” w: *Environmental Science and Pollution Research*, t. 30, 2023, s. 13067–13078.
- [12] Kasina M. i in., „Environmental safety of incinerated sewage sludge ash reuse in cement-based composites under natural exposure”, artykuł zgłoszony do publikacji, 2026 [nieopublikowany].
- [13] PN-EN 12457-2:2006 Charakteryzowanie odpadów – Wymywanie – Badanie zgodności w odniesieniu do wymywania ziarnistych materiałów odpadowych i osadów – Część 2: Jednostopniowe badanie porcjowe przy stosunku cieczy do fazy stałej 10 l/kg w przypadku materiałów o wielkości cząstek poniżej 4 mm (bez redukcji lub z redukcją wielkości).
- [14] Kasina M. i in., „Characteristic of phosphorus rich compounds in the incinerated sewage sludge ashes: a case for sustainable waste management” w: *Scientific Reports*, t. 13, 2023, art. 9137.
- [15] European Parliament and Council, Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy w: *Official Journal of the European Union*, L226, 2013, s. 1–17 [dostęp: 15.02.2026] w: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013L0039>.
- [16] Kasina M. i in., *Influence of exposure conditions on the carbonation and durability of ISSA-modified cementitious materials* (submitted 2026).