

Geopolimery: nadchodząca rewolucja czy ślepy zaułek?

Streszczenie

Niniejsze opracowanie analizuje potencjał spoiw geopolimerowych jako alternatywy dla tradycyjnych cementów. Poprzez przegląd historii, właściwości i możliwości zastosowania geopolimerów, autor przedstawia ocenę zasadności ich produkcji w kontekście współczesnych wyzwań klimatycznych i technologicznych. Pomimo pewnych korzyści, jakie niosą za sobą geopolimery, istnieją poważne obawy dotyczące ich skuteczności i trwałości w porównaniu z konwencjonalnymi cementami, a przede wszystkim informacje dotyczące śladu węglowego, co często nieprawdźiwie deklarowane jest jako ich główna zaleta.

Słowa kluczowe:

geopolimery, ślad węglowy, żużel wielkopiecowy, popiół lotny

Abstract

This study examines the potential of geopolymer binders as an alternative to traditional cements. By reviewing the history, properties and possible applications of geopolymers, the author presents an assessment of the viability of their production in the context of contemporary climatic and technological challenges. Despite some benefits that geopolymers bring, there are serious concerns about their effectiveness and durability compared to conventional cements, and above all, information about their carbon footprint, which is often falsely declared as their main advantage.

Keywords:

geopolymers, carbon footprint, Blast furnace slag, fly ash

Wprowadzenie

W dzisiejszym świecie, gdzie zmiany klimatyczne stają się coraz bardziej widoczne, a także wydają się nieuniknione, zarówno ze względu na działalność człowieka, a także z powodu życia planety i jej naturalnych przemian. Istnieje jednak pilna potrzeba znalezienia zrównoważonych alternatyw dla tradycyjnych materiałów budowlanych i wiążących, gdyż wygląda na to, że obecne zmiany klimatyczne, z czegośkolwiek wynikają, postępują szybciej niż ludzkość potrafi się uporać z ich skutkami. Jednym ze sposobów przeciwdziałania niekorzystnym zmianom klimatycznym jest ograniczenie emisji CO₂, które wprowadzane lokalnie nie tylko nie przynosi efektów, ale przede wszystkim szkodzi gospodarce Unii Europejskiej ze względu na tzw. carbon leakage, czyli zjawisko polegające na przenoszeniu emisji z jednego kraju do drugiego. Efektem limitów emisji CO₂ jest pojawienie się

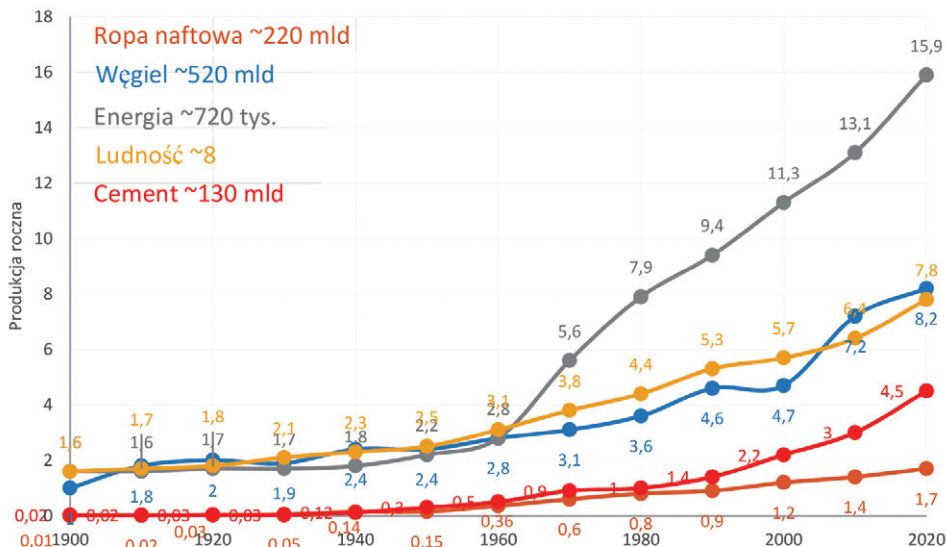
spoiw geopolimerowych, których zwolennicy obiecują zmniejszenie emisji dwutlenku węgla związanej z ich produkcją. W niniejszym artykule te spoiwa zostaną przeanalizowane pod kątem ich niejednoznacznej i kontrowersyjnej definicji, ich potencjalnej przydatności oraz tego, czy geopolimery produkowane przez przemysł są faktycznie geopolimerami wiernymi definicji ich twórcy (Davidovitsa).

Przeszłość: rewolucja przemysłowa a emisja CO₂

Od czasu rewolucji przemysłowej światowa produkcja cementu wzrosła wykładniczo, a przemysł cementowy stał się jednym z głównych źródeł emisji dwutlenku węgla na świecie. Do roku 1850 energia była wytwarzana głównie z biomasy, a obieg węgla w przyrodzie był w zasadzie nienaruszony. Wraz z rewolucją przemysłową energia zaczęła być wytwarzana głównie z paliw kopalnych, co przyczyniło się do gwałtownego wzrostu emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Uogólniając, ludzkość do ok. roku 1850 pozyskiwała energię głównie z drewna, konsumowała zasoby naturalnie, nie stosowała środków transportu generujących szkodliwe substancje ani emisję gazów cieplarnianych. Potem nastąpiła gwałtowna rewolucja przemysłowa, a świat uległ zmianie. Od tego czasu minęło 170 lat, a my, jako ludzkość, wydobyliśmy około 220 mld ton ropy naftowej i około 520 mld ton węgla, a gazy i pyły powstające w trakcie spalania przedostawały się do atmosfery. Ludzkość wtedy skupiona była na rozwoju przemysłowym, gospodarczym i urbanizacji, nie zastanawiając się nad niekorzystnym wpływem na naszą planetę. W ciągu tych 170 lat wyprodukowano również ponad 720 tys. TWh energii, a rozwój medycyny spowodował, że przybyło nas o blisko 7 mld. Wyprodukowaliśmy w tym czasie także około 130 mld ton cementu (rys. 1).

Rys. 1. Przyrost ludności, wydobywania i produkcji energii w latach 1900-2020

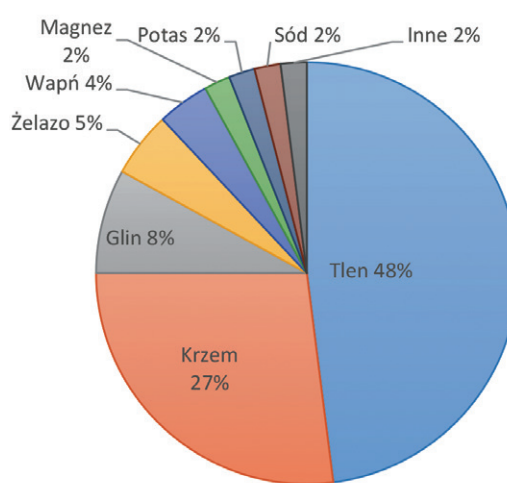


Obecna roczna produkcja cementu (około 4,5 miliarda ton) skutkuje uwalnianiem do atmosfery około 3 miliardów ton CO₂, co stanowi około 7% globalnej emisji CO₂. Dążenie do ograniczenia emisji CO₂ stało się głównym celem Unii Europejskiej, co znalazło odzwierciedlenie w różnych porozumieniach, które ewoluowały, aż w końcu dotarliśmy do pakietu klimatycznego i porozumienia „Fit for 55”. W związku z rygorystycznymi obostrzeniami producenci cementu odpowiedzieli produkcją cementów niskoemisyjnych, zawierających głównie aktywne dodatki mineralne.

Skupiając się na poszukiwaniu alternatywnych dodatków mineralnych, zaczęto analizować przydatność wszelkich odpadów przemysłowych, które potencjalnie sprawdzą się jako dodatek aktywny pucolano-wo lub hydraulicznie. Obecnie badania skupiają się na wykorzystaniu naturalnych glin aktywowanych w procesach wysokotemperaturowych, co miało swoje odzwierciedlenie w wystąpieniach i publikacjach na ostatnim kongresie chemii cementu w Bangkoku. Projekt cementów LC3 zawierających prażone gliny, kamień wapienny, gips oraz niewielki (w porównaniu do cementów portlandzkich wieloskładnikowych) udział klinkieru wydaje się być obiecującą alternatywą dla wysokoklinkierowych cementów.

Innymi badanymi materiałami są surowce zawierające fazę szklistą. Materiałem, któremu należy poświęcić więcej uwagi, jest np. stłuczka szklana, ze względu na jej działanie i wpływ na hydratację składników spoiw. Charakterystyczne dla powolnego procesu rozpuszczania tego materiału jest ciągłe i długotrwałe uwalnianie alkaliów do hydratyzującego układu, co diametralnie zmienia jego zachowanie się w czasie i właściwości stwardniałego produktu. Analizując aktualnie prowadzone badania w obszarze chemii cementu, możemy z łatwością dostrzec dwa główne trendy. Pierwszy to badania nad cementami o obniżonej zawartości klinkieru, gdzie badacze skupiają się ogólnie na poszukiwaniu dodatków mineralnych, które najtańszym możliwym kosztem będzie można przekształcić w aktywne dodatki hydrauliczne. Znacząco przyspieszyło to również prace nad nowelizacją normy 197-1, dzięki której będzie można wytwarzać cementy wieloskładnikowe C-M i CEM VI (obecnie PN-EN 197-5). Natomiast drugi widoczny trend to są geopolimery. Ale czy na pewno? Czy może raczej spoiwa aktywowane alkalicznie?

Zostawmy na moment kwestię spoiw bezklinkierowych, bo w przypadku produkcji cementów, które ewidentnie są produktem masowym, nie chodzi już tylko o zmiany klimatyczne. Jak już wspomniano, na świecie produkuje się w ostatnich latach od 4 do 4,5 miliarda ton cementu rocznie. To są kolosalne ilości, a dla porównania inne surowce, które ludzkość wykorzystuje globalnie, to na przykład cukier, którego produkuje się około 170 milionów ton, lub pszenica, której produkcja wynosi niecałe 800 milionów ton rocznie. Do wytworzenia cementu trzeba dostarczyć dodatki mineralne, a dzisiaj dodatki mineralne, których zasoby również się kończą, wymagają także energochłonnej logistyki i transportu. Chociaż trudno jest sobie wyobrazić sytuację, w której ktoś wozi piasek z jednego końca świata na drugi, zwłaszcza przy dzisiejszych cenach paliw, to taki proceder już dzisiaj jest na



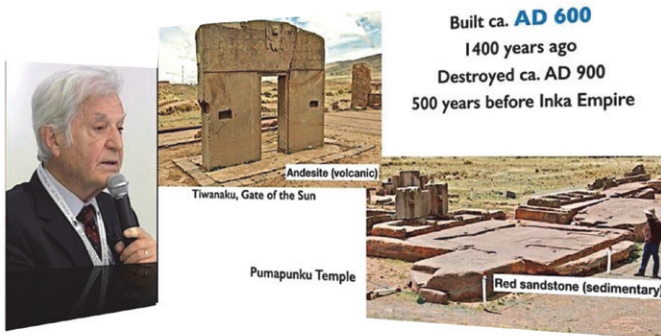
Rys. 2. Udział głównych pierwiastków w skorupie ziemskiej

porządku dziennym. Dzisiaj piasek jest uznawany za surowiec nieodnawialny, podobnie jak minerały ilaste i wapienie. W związku z nadmierną eksploatacją naszej planety, zaczęliśmy poszukiwać alternatywnych sposobów wytwarzania spoiw. Rozkwit takich badań to już lata 50. ubiegłego wieku.

Patrząc na skład skorupy ziemskiej, do dyspozycji mamy w zasadzie 8 pierwiastków, z czego tylko jeden tak naprawdę nadaje się do tworzenia bardziej złożonych przestrzennych struktur krystalicznych – chodzi oczywiście o krzem. Z kolei w związku z tym, że sensowne rozpuszczanie się krzemionki zachodzi dopiero powyżej pH 11,9, więc oczywiste jest, że badacze skupili się na spoiwach opartych na najpowszechniejszym pierwiastku alkalicznym na planecie, czyli na sodzie. I tak powstały bezklinkierowe spoiwa aktywowane alkalicznie.

Rozwój spoiw bezklinkierowych zaczął się od spoiw aktywowanych alkaliami, ale stosunkowo szybko pojawił się drugi, można by powiedzieć konkurencyjny trend, który trwa do dzisiaj, którym są geopolimery. I tutaj zaczynają się kontrowersje, bo czym właściwie są geopolimery? Chociaż geopolimery są obecnie popularnym tematem badawczym w laboratoriach setek naukowców na całym świecie i badane są mniej więcej od lat 60. ubiegłego wieku, to istnieją niejasności wokół ich definicji i składu, o czym m.in. pisała pani prof. Grzeszczyk w swoim artykule [1]. Analizując literaturę światową i krajową, można podsumować, że spoiwo składające się z popiołu aktywowanego alkaliami to geopolimery, natomiast żużel aktywowany alkaliami to spoiwa aktywowane alkalicznie. Ale można znaleźć setki artykułów opisujących geopolimery wykonane z innych materiałów niż popioły, aktywowane różnego rodzaju substancjami bogatymi w alkalia i wykazującymi różne właściwości. Jednocześnie setki artykułów naukowych opisują właściwości spoiw aktywowanych alkalicznie wykonanych z tych samych surowców, co zwane przez innych autorów geopolimery. Te same surowce, te same aktywatory i podobne właściwości. Gdzie więc jest różnica? Żeby odpowiedzieć na to pytanie, trzeba przypomnieć, skąd wywodzą się geopolimery.

Zdecydowana większość kojarzy geopolimery z prof. Davidovitem i nic dziwnego, bo to on spopularyzował to określenie na świecie. Sam Davitovits postuluje, że tego typu materiały były znane już w starożytności i to właśnie z nich wybudowano piramidy (rys. 3). Przeprowadzono nawet próbę



Rys. 3. Wykład Davidovitsa na temat możliwości wytwarzania geopolimerów w starożytności [2]

odtworzenia procesu budowy takiej minipiramidy. Nie można jednak mówić o wielkim sukcesie tego przedsięwzięcia.

W 1940 roku, na małej wysepce Elefantyna w Egipcie znaleziono tzw. Stelę Głodu. Transkrypcja tekstu steli głosi, że podczas rządów faraona Dżesera przez 7 lat z rządu przestał wylewać Nil, a Egipt nawiedziła klęska głodu. Faraon poprosił więc swojego wezyra Imhotepa o pomoc. Ten udał się do biblioteki, przestudiował święte zwoje i ustalił, że trzeba pojechać na Elefantynę, do świątyni boga Khnuma, pana wylewów Nilu, i złożyć mu solidną ofiarę. Tak też uczynił, a pomysł okazał się skuteczny.

„Jego świątynia jest otwarta w kierunku południowo-wschodnim, a Re wschodzi codziennie naprzeciw niego. Na południu jest woda szeroka i mur strzeżony dzień i noc, który oddziela świątynię od Nubijczyków. Na wschodnim obszarze Elefantyny znajduje się masyw górski zawierający rudy, kamienie szlachetne i wszystkie surowce potrzebne do budowy świątyni bogów Północy i Południa, domów dla świątyni zwierząt, piramid dla króla i wszystkich posągów stojących w świątyniach.”

Tyle z mineralogii można przeczytać na Steli Głodu, i na podstawie tego krótkiego tłumaczenia wyciągnięto wnioski, że już starożytni znali recepturę

geopolimerów i to właśnie z nich wybudowano piramidy (rys. 4).

Przyglądając się bliżej jednak geopolimerom, okazuje się, że możemy znaleźć przynajmniej 5 różnych definicji, w zależności od tego, kto tę definicję napisał [5]. Wskazuje to na fakt, że nie ma konsensusu wśród samych badaczy co do tego, czym geopolimery właściwie są. Przeglądając setki publikacji, autor dochodzi do wniosku, że określenie „geopolimery” nie odnosi się do jakiejś wyjątkowej specjalnej grupy tworzyw o konkretnym składzie, jak to się próbuje przedstawiać. Są to po prostu spoiwa aktywowane alkaliem, wytwarza się je z tych samych surowców i wykazują takie same właściwości. Można więc stwierdzić, że termin „geopolimer” jest raczej zabiegiem marketingowym i z całą pewnością brzmi zdecydowanie lepiej niż „bezklinkierowe spoiwa aktywowane alkaliem”, a samo pojęcie wprowadza namiastkę „advanced science” w badania i w technologie.

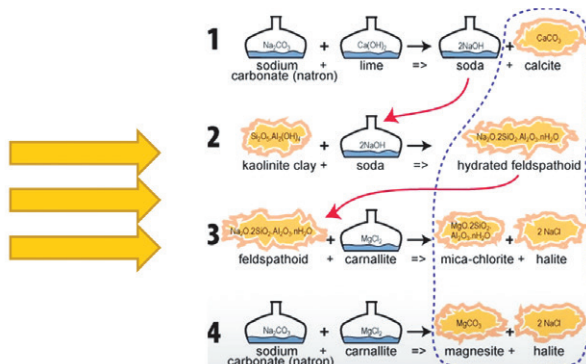
Jako zalety takich spoiw przytaczane są:

- duża odporność korozyjna,
- szybkie narastanie wytrzymałości,
- szczelność,
- przyczepność,
- dostępność surowców.

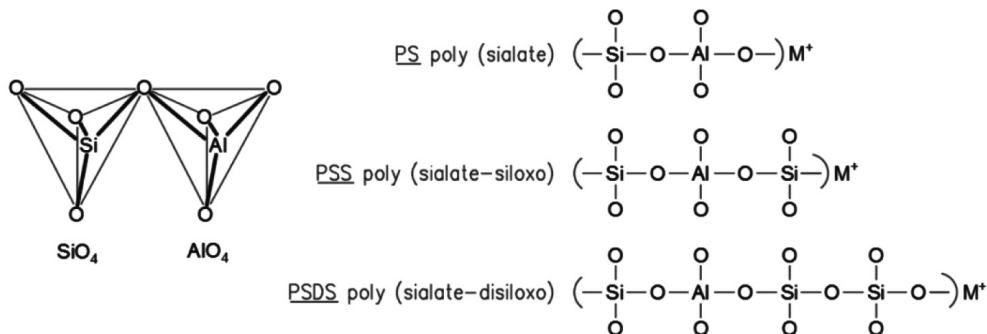
Jednak w większości publikacji pomijana jest jedna dosyć istotna kwestia – czy te spoiwa na pewno są hydrauliczne i czy są trwałe?

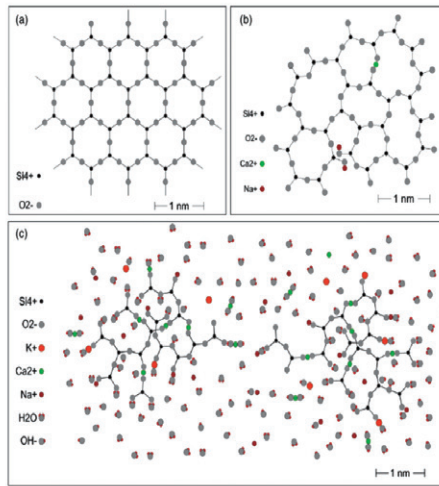
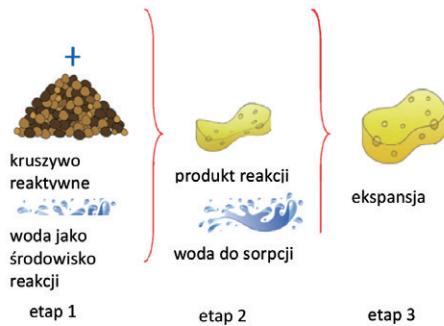
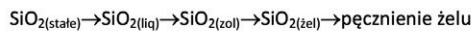
Budowa geopolimerów, jaką popularyzuje prof. Davidovits, zasługuje na szczególną uwagę. Proponowane przez niego struktury przestrzenne nie zawierają wody (rys. 5). Istnieje, co prawda, sposób syntezy krzemionki w warunkach hydrotermalnych. Jednak wedle wiedzy autora wielce kłopotliwym jest wskazanie procesu, który zachodzi w temperaturze otoczenia i nie trwa setek tysięcy lat, gdzie w środowisku wodnym powstaje krzemian albo glinokrzemian, który jest polimerem i który jednocześnie w swojej strukturze nie zawiera wody... W której sam powsta-

Rys. 4. Transkrypcja tekstu ze „Steli głodu” wg. J. Davidovitsa [3, 4]



Rys. 5. Budowa geopolimerów wg. teorii Davidovitsa [6]





Rys. 6. Schemat pochtania wody i pęcznienia żeli ASR [7]

je. Takie krzemiany z powrotem syntezuje się w warunkach hydrotermalnych, w podwyższonym ciśnieniu i temperaturze, aby cały proces przyspieszyć. Żartobliwie, zakładając normalne tempo procesu, z jakim może zachodzić geopolimeryzacja, to jeśli ktoś rzeczywiście rozpoczął prace budowlane w starożytnej Mezopotamii, to w dzisiejszych czasach można by powoli obserwować początek czasu wiązania. Technologia poszła do przodu od tamtych czasów, ale również dzisiaj wielce kłopotliwym wydaje się umieszczenie całego placu budowy w autoklawie, żeby ten proces przyspieszyć.

I chociaż obecnie w publikacjach panuje pogląd, że w procesie geopolimeryzacji powstają tzw. prekursorzy zeolitów, to zdaniem autora są to po prostu zeolity, tyle tylko że nie mają szans wykrystalizować w tak niskiej temperaturze w tak krótkim czasie w duże kryształy dające się identyfikować rentgenograficznie. Dlatego analiza rentgenowska nie wykazuje obecności faz krystalicznych, gdyż kryształy są zbyt małe do wykrycia analizą XRD, natomiast w badaniu NMR obserwujemy struktury Q3 i Q4, czyli te, które są charakterystyczne dla zeolitów. Jednocześnie, fazą nadającą wytrzymałość jest po prostu C-S-H i C-A-S-H, co potwierdzają chociażby badania DTA-TG. Stąd wniosek, że powstawanie geopolimerów w procesie hydratacji, w formie jaką postuluje Davidovits, jest niemożliwe, jeśli nie mamy na myśli długości epok geologicznych. Spoiwa nazywane geopolimerami są po prostu bezklinkierowymi spoiwami aktywowanymi alkalicznie, a za ich właściwości mechaniczne odpowiadają uwodnione krzemiany i glinokrzemiany wapnia, podobnie jak w spoiwach zawierających cement.

Ale nawet jeśli powstawałyby w trakcie geopolimeryzacji wykształcone przestrzenne kryształy zeolitów, to nie mogłyby stanowić fazy wypełniającej, na której opierałyby się właściwości mechaniczne takich spoiw. Zeolity tworzą formy kubiczne, które są albo słabo albo wcale niezwiązane ze sobą. To trochę tak, jakby dosypać do betonu ziaren z azotku baru, diamentów albo innych supertwardych tworzyw – niby z osobna twarde, ale jako całość nie są związane ze sobą i wytrzymałości nie podwyższą, tylko raczej ją obniżą.

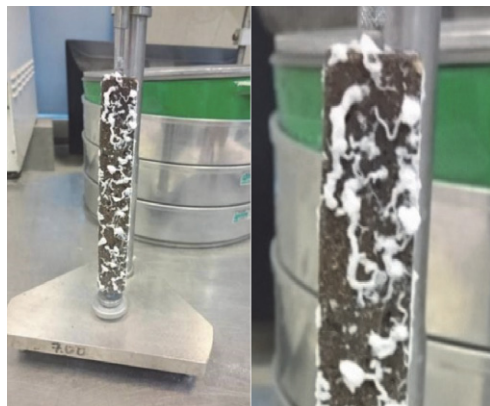
Kolejnym czynnikiem, który stawia hydrauliczność takich spoiw pod znakiem zapytania, to sam chemizm takich układów. Do powstawania geopolimerów konieczna jest obecność jonu alkalicznego,

głównie sodu lub potasu. Ale sód, jako pierwiastek pierwszej grupy układu okresowego, ma jeden elektron na powłoce walencyjnej, który zawsze oddaje i nie tworzy wiązań kowalencyjnych. Można więc ułożyć prosty łańcuszek rozumowania: z faktu, że sód nie tworzy wiązań kowalencyjnych oraz z tego, że jest jednowartościowy, wynika, że nie może być atomem centralnym przestrzennych komórek elementarnych. A z tego z kolei wynika, że sód nie może być podstawą do budowy tetra- czy oktaedrow. Z tego znów wynika, że nie można sodem zastąpić wapnia w fazie C-S-H. Musiałby być to pierwiastek podobny do wapnia, taki jak np. magnez lub stront, ale ich rozpowszechnienie w przyrodzie jest znacznie mniejsze niż wapnia. A skoro nie można sodem zastąpić wapnia, to nie może powstać trwała struktura przestrzenna typu C-S-H i C-A-S-H. W takich układach, gdzie występuje krzem i sód, produktem jest krzemian sodu N-S-H, z którym ewentualnie będzie współistniała faza glinianowa A-S-H lub A-H, jeśli jest dostępny glin. Z kolei krzemian sodu jest rozpuszczalny w wodzie i ze względu na swoje właściwości powoduje ASR, czyli reakcję krzemionki z alkalicznymi z wytworzeniem pęczniącego żelu (rys. 6).

Tutaj od razu małe sprostowanie, bo chociaż w literaturze inne określenie niż ASR w zasadzie nie występuje, to w rzeczywistości ta reakcja zachodzi pomiędzy jonami hydroksylowymi a krzemionką, a nie pomiędzy alkalicznymi a krzemionką, więc powszechnie używana nazwa wprowadza w błąd.

Dlaczego ta reakcja jest niebezpieczna? Otóż dlatego, że powstający w niej żel krzemionkowy nie ma konkretnej struktury i może chłonać wodę w zasadzie bez ograniczeń. Ciśnienie ekspansji, różnie można spotkać w publikacjach, ale podawany w literaturze zakres to do ok. 300 MPa [8, 9]. Stwardniały beton pęka już przy ułamku takich naprężeń rozciągających. Skutkiem ASR jest oczywiście rozszczelnienie, gwałtowna utrata wytrzymałości, a w efekcie przyspieszona korozja betonów. Określenie „żel” może się kojarzyć z czymś w rodzaju galaretki owocowej, a w pewnych specyficznych przypadkach rzeczywiście może się tak zdarzyć, co widać na zdjęciu (rys. 7). Natomiast żele ASR to generalnie faza stała, ale wykazująca różną granicę płynięcia w zależności od zawartości wapnia, co czyni żel ASR również uwodnionym krzemianem lub glinokrzemianem wapnia, ale z bardzo niewielkim udziałem Ca w strukturze.

Rys. 7. Wykwity z żelu ASR (Ł. Kotwica, praca własna)



Podobnie jak w przypadku szeregu roztworów stałych, gdzie na przeciwnych końcach są minerały różniące się podstawieniami, tak w przypadku żelu ASR na jednym końcu mamy uwodniony krzemian sodu – po prostu szkło wodne z mniejszą lub większą zawartością wody, a na drugim fazę C-S-H (rys. 8). W zależności od ilości wapnia zmieniają się właściwości reologiczne powstającego hydratu, a konkretnie granica płynięcia. Jeżeli więc w trakcie hydratacji powstanie żel bez wapnia albo bardzo niskowapniowy, czyli o bardzo niskiej granicy płynięcia, to problem pęcznienia nie jest aż tak niebezpieczny, bo pomimo dużej ekspansji jego granica płynięcia jest na tyle mała, że może być „przepychany” przez pory i nie zniszczy stwardniałej matrycy. Problem zaczyna się, kiedy zaczyna rosnąć udział wapnia w powstającym żelu. Wtedy rośnie jego sztywność, czyli granica płynięcia i wtedy rośnie ciśnienie ekspansji. A wiadomo, czym objawia się wewnętrzna ekspansja w betonach. Z kolei, kiedy wapnia jest dużo, to powstaje po prostu faza C-S-H, która nie jest ekspansyjna, więc hydrat przestaje być niebezpieczny. Pomimo takich właściwości geopolimerów, jak odporność korozyjna, wytrzymałość i inne, to te spoiwa mają jedną bardzo poważną wadę wynikającą z obecności omawianej fazy żelowej, szczególnie przy ograniczonej dostępności wapnia. Po prostu nie są hydrauliczne. Dodatkowo, nie mają odporności na cykle namaczanie – wysychanie, podobnie jak beton nie ma odporności na zamrażanie – rozmrażanie.

Cykle namaczanie – wysychanie powodują bardzo duże skurcze, a potem ekspansję, a w efekcie niszczenie stwardniałych matryc. W związku z tym, na dzień dzisiejszy, konstrukcje, w których można by próbować stosować takie spoiwa lub betony, to miejsca, które na pewno nigdy nie wyschną, tak żeby nie były narażone na cykle namaczanie – wysychanie, jak falochrony, filary mostów, uszczelnienia kopalń czy ciągi kanalizacyjne.

Na koniec pozostaje jeszcze jedna rzecz, o której trzeba wspomnieć. Z punktu widzenia już nie właściwości omawianych spoiw czy hydratów, ale samej emisji CO₂, to wytwarzanie geopolimerów

bez cementu jest po prostu marnotrawstwem. Dlaczego? Otóż z jednej strony mamy sytuację, w której produkujemy klinkier, bo musimy – po prostu potrzebujemy cementów. I emitujemy przy tym CO₂. Produkujemy również popioły i żużle, bo też musimy – potrzebujemy przecież energii i stali. I też emitujemy przy tym CO₂. Potem natomiast rozcieńczając klinkier dodatkami popiołów i żużli redukujemy ślad węglowy otrzymanego cementu, powiększając jego objętość i tak już wytworzonymi produktami ubocznymi.

Natomiast... produkując geopolimery, ciągle produkujemy popioły i żużle i emitujemy przy tym CO₂, bo ciągle potrzebujemy elektryczności i stali, a do tego jeszcze potrzebujemy alkaliów, którymi trzeba aktywować popioły i żużle, więc produkujemy alkalia, przy których również emitujemy CO₂. Z tego wniosek, geopolimery wcale nie zmniejszają śladu węglowego spoiw. Dodatkowo jeszcze – sumując wszystkie uboczne produkty energetyczne i hutnicze wytwarzane na świecie, pokrylibyśmy zaledwie ~75% obecnego zapotrzebowania na cement (przy założeniu, że wszystkie odpady się do tego nadają, a tak nie jest). Czyli ciągle produkujemy klinkier, bo musimy, i produkujemy przy tym CO₂, a w efekcie uzyskujemy produkt do bardzo wąskiego zastosowania, z ryzykiem wynikającym z obecności dużej ilości alkaliów i bardzo uciążliwy do stosowania na placu budowy również ze względu na alkalia.

Podsumowanie

Zmierzając więc już do końca, pozostaje pytanie, czy geopolimery to ślepy zaułek? Przede wszystkim trzeba zaznaczyć, że geopolimery, w ujęciu chemicznym – jako osobna faza nadająca wytrzymałość materiałom wiążącym w procesie hydratacji, najwyczejniej nie istnieją. Są to po prostu znane od dawna spoiwa aktywowane alkalicznie i tak należy je postrzegać, a fazą nadającą wytrzymałość w takich spoiwach jest C-S-H lub C-A-S-H albo obie naraz. Jednocześnie nie ma żadnego powodu, aby nie korzystać z pozytywnego marketingu nazwy „geopolimery” dotyczącego spoiw aktywowanych alkalicznie.

dr hab. inż. Łukasz Gofek

Literatura

1. S. Grzeszczyk, *Prawda o geopolimerach*, „Cement, Wapno, Beton”, 26(2) 101-108 (2021)
2. <http://www.davidovits.info/english/> (24.04.2024)
3. <https://www.geopolymer.org/archaeology/pyramids/pyramids-3-the-formula-the-invention-of-stone/> (24.04.2024)
4. https://pl.wikipedia.org/wiki/Stela_G%C5%82odu_z_Sehel (24.04.2024)
5. <https://en.wikipedia.org/wiki/Geopolymer> (24.04.2024)
6. J. Davidovits, 'Geopolymers: Inorganic polymeric new materials', *Journal of Thermal Analysis*, vol. 37, pp. 1633-1656, 1991.
7. F. Rajabipour i in., *Cem. Concr. Res.* 76 (2015) 130-146 / Goddard i in., 2013
8. P. Morenon, S. Multon, A. Sellier, E. Grimal, F. Hamon, E. Bourdarot, *Impact of stresses and restraints on ASR expansion*, *Constr. Build. Mater.*, 58-74, 140 (2017).
9. Hiroyuki Kagimoto, Yukihiro Yasuda, Mitsunori Kawamura, "ASR expansion, expansive pressure and cracking in concrete prisms under various degrees of restraint", *Cement and Concrete Research*, 1-15, 59 (2014).

Rys. 8. Poglądowe przedstawienie zmiany granicy płynięcia w układzie, gdzie produktem hydratacji jest żel krzemionkowy, w zależności od udziału wapnia

