

Abstract

Właściwości kompozytów geopolimerowych z wykorzystaniem zmieszanego gruzu budowlanego

Wstęp.

1. Postawy teoretyczne i praktyczne kompozytów geopolimerowych.
 - 1.1. Definicja kompozytu.
 - 1.2. Definicja polimeru i geopolimeru.
 - 1.3. Własności fizyczne i chemiczne geopolimerów
 - 1.4. Rodzaje kompozytów geopolimerowych
2. Problem produkcji i zagospodarowania odpadów budowlanych w kontekście ochrony środowiska i klimatu.
3. Właściwości i zastosowanie gruzu budowlanego w budownictwie i geotechnice.
4. Kompozyty geopolimerowe w połączeniu ze zmieszonym gruzem budowlanym – właściwości.

Wstęp.

W przemyśle budowlanym, który z coraz większą uwagą jest traktowany przez gremia eksperckie jako kolejna gałąź gospodarki przyczyniająca się do nadmiernej emisji gazów cieplarnianych, trwa poszukiwanie innowacji pozwalających na uzyskanie redukcji tych emisji. Nadzieją na taką zmianę na horyzoncie są kompozyty geopolimerowe. Są to kompozyty, w których jedną z dwóch faz stanowi geopolimer. Geopolimery zaś są bardzo obiecującym materiałem budowlanym, którego popularność będzie ciągle rosła. Przede wszystkim wynika to z lepszych własności fizycznych i fizycznych, niższej emisji w trakcie ich produkcji, a także łatwości w recyklingu.

Z drugiej strony pojawia się też problem zagospodarowania różnego rodzaju odpadów budowlanych pochodzących albo z projektów budowlanych, albo rozbiórkowych. Odpady te stanowią również bardzo duże źródła budulca do ponownego wykorzystania. Już od lat trwają prace zmierzające do maksymalizacji ponownego zużycia gruzów budowlanych w różnej postaci.

Niniejsza praca zajmie się tematem geopolimerów, kompozytów geopolimerowych oraz jakie są ich własności z wykorzystaniem zmieszanego gruzu budowlanego. Celem pracy jest przedstawienie użyteczności pierwotnej i wtórnej kompozytów geopolimerowych: pierwotnej, jako materiału będącego w „pierwszym obiegu”, a potem w „drugim obiegu” z wykorzystaniem gruzu budowlanego.

Część teoretyczna dzieli się na kilka sekcji tematycznych. Na początku omówię podstawowe definicje, czyli czym jest kompozyt, polimer i geopolimer. Następnie zostaną omówione właściwości geopolimerów, które stanowią składnik jednej z faz kompozytów geopolimerowych. Następnie szczegółowo omówię właściwości, rodzaje i zastosowania kompozytów geopolimerowych. Później przedstawię pokrótce problemy dotyczące produkcji budowlanej w kontekście zagadnień środowiskowych i efektywności, gdzie kompozyty i gruz budowlany są ważnymi z punktu widzenia badań i praktyki materiałami. Następnie przedstawię co udało się osiągnąć w kwestii sprawdzania właściwości kompozytów z wykorzystaniem zmieszanego gruzu budowlanego.

1. Postawy teoretyczne i praktyczne kompozytów geopolimerowych.

1.1. Definicja kompozytu.

Istnieje wiele definicji kompozytu. Prawdopodobnie pierwsza definicja autorstwa Broutman i Knock (1975) mówi, że: kompozyt: jest materiałem wytworzonym przez człowieka, składa się z co najmniej dwóch różnych materiałów z wyraźnie zaznaczonymi granicami między nimi, składniki kompozytu tworzą go przez udział w całej objętości, posiada właściwości różne od jego składników”. Z kolei Boczkowska i in. (2005) określają kompozyt jako „materiał utworzony z co najmniej dwóch materiałów (faz) o różnych własnościach w taki sposób, że ma własności lepsze od każdego składnika osobno, a także lepsze od wynikających z prostego sumowania tych własności”.

Kompozyt składa się z osnowy i zbrojenia. Osnowa w tym przypadku jest ciągłym elementem kompozytu, w którym zostało rozmieszczone zbrojenie. Z kolei zbrojenie, inaczej nazywane wzmocnieniem albo napełniaczem, jest dodawanym materiałem, który wpływa na zmianę właściwości, stąd jego nazwa. Nie jest jednak pewne w literaturze jak należy definiować zbrojenie w różnych przypadkach (czy zbrojenie to tylko włókna, a np. składniki ziarniste to napełniacz, itd.) (Brańszczyńska-Malik i in. 2005).

1.2. Definicja polimeru i geopolimeru.

Zgodnie z definicją Proniewicz (2019) polimery „należą do związków organicznych, których cząsteczka (makrocząsteczka) jest zbudowana z wielu mniejszych, powtarzających się, uporządkowanych w sposób regularny jednostek zwanych monomerami, połączonych kowalencyjnymi wiązaniami chemicznymi, które tworzą długie łańcuchy, czasami z rozgałęzieniami lub sieciowaniem pomiędzy łańcuchami”.

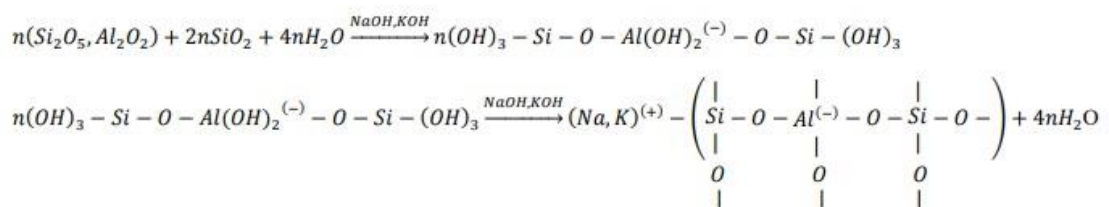
Polimery występują w naturze, jak i są dziełem człowieka. Naturalne to skrobia, celuloza, hemiceluloza, białka, polipeptydy. Człowiek z kolei wytwarza wiele polimerów, z których najbogatszą rodzinę stanowią tworzywa sztuczne potocznie nazywane plastikami. Kolejną grupą są zaś geopolimery.

Geopolimer jest rodzajem polimeru nieorganicznego o strukturze amorficznej będącego materiałem glinokrzemianowym powstającym w środowisku zasadowym w temperaturze poniżej 100°C (Mikuła, Łach 2014a). Ze względu na kluczową dla definiowania tej grupy materiałów zawartości krzemu (Si) i glinu (Al) nazywane są one także polisialanami (Mikuła 2018).

Geopolimery są wytwarzane w procesie geopolimeryzacji, który przebiega w następujących etapach (Mikuła, Łach, 2014a):

- Wykonanie roztworzenia tlenków glinokrzemianowych w roztworze wodorotlenku sodu albo wodorotlenku potasu,
- Doprowadzenie do dyfuzji rozpuszczonego glinu i krzemu z powierzchni cząstek do przestrzeni międzycząsteczkowej,
- Tworzenie się fazy żelu w wyniku polikondensacji między dodanym roztworem krzemianu oraz glinem i krzemem,
- Utwardzenie fazy żelowej.

W ostatnim etapie dochodzi do zastygnięcia masy. Na poniższym rysunku przedstawiłem równanie reakcji, która przebiega dwuetapowo:



Rysunek. Równanie reakcji geopolimeryzacji (Zhang 2015).

Na podstawie powyższej formuły można zauważyć, że pierwszymi substratami reakcji są krzemiany Si_2O_5 oraz dwutlenek aluminium Al_2O_2 , które następnie są poddawane działaniu silnych zasad, a więc wspomnianych już wodorotlenków potasu i sodu. Wówczas uzyskiwane są pierwsze produkty reakcji czyli reaktywne oligomery krzemianowe i glinowe, które następnie są poddawane kolejnej alkalizacji, wówczas

produkty reakcji to kationy sodu i potasu, polisialany oraz woda (Zhang 2015). W trakcie reakcji dochodzi do polikondensacji i jest na indukowana termicznie poprzez zwiększenie temperatury do poziomu powyżej 35°C, z kolei Mikuła (2018) wskazuje, że optymalny przedział temperatur do uzyskiwania geopolimerów to 60-80°C. Z kolei wodorotlenki odgrywają w tej reakcji rolę alkalicznych aktywatorów (Camargo i in. 2020).

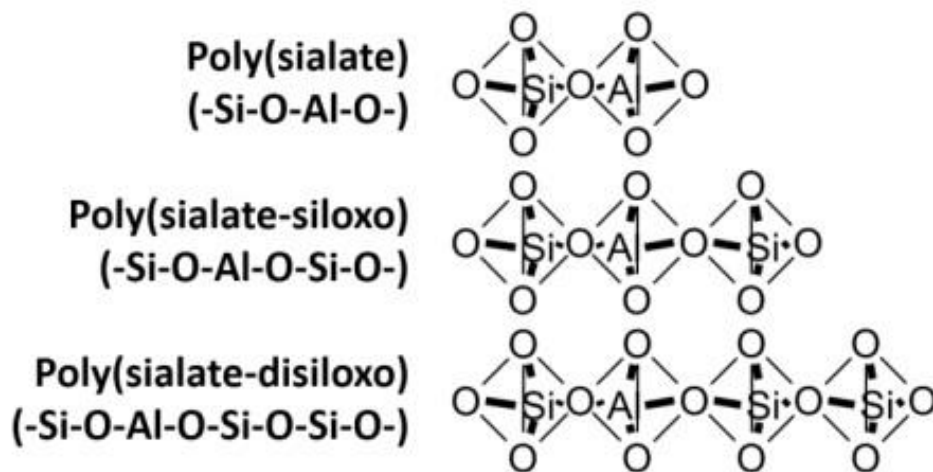
Historia geopolimerów jest bardzo długa. Należy ją zacząć od materiałów wiążących jak beton czy gips, do których dodawano różne domieszki pyłu, tufu wulkanicznego (starożytność, średniowiecze). Z kolei materiały pucolanowe, czyli domieszki w postaci krzemianów i tlenków glinu znane są od początków XX wieku. Termin „geopolimer” został użyty po raz pierwszy w 1970 roku. W latach siedemdziesiątych XX wieku trwały testy spoiw geopolimerowych, którymi obkładano płyty wiórowe. Równoległe do użycia weszły substancje alkaliczne, które służyły do aktywacji głównej substancji. W 1930 roku użyto do tego wodorotlenku sodu i potasu, którymi aktywowano żużel wielkopiecowy w celu późniejszego dodawania go do cementu. W 1940 powstało pierwsze spoiwo na bazie żużla i ługu. Później doszło do masowego użycia cementów aktywowanych alkalicznie. W 19772 roku okazało się, że płytki ceramiczne można uzyskiwać w niskich temperaturach, bez wypalania (Mikuła i Łach, 2014b).

1.3. Własności fizyczne i chemiczne geopolimerów

Zhang (2015) rozróżnia trzy podstawowe rodzaje struktur chemicznych polisialanów, do których należą:

- Polisialany „proste”,
- Polisialany z dodatkową grupą tlenku krzemu (ang. *poli(sialaite+siloxo)*),
- Polisialany z dodatkową podwójną grupą tlenku krzemu (ang. *poli(sialate+disiloxo)*).

Poniżej znajduje się rysunek przedstawiający każdy z tych rodzajów geopolimerów:



Rysunek. Trzy rodzaje polisialanów według różnic strukturalnych łańcucha polimerowego (Zhang 2015).

Geopolimerami, które są stosowane w praktyce są także występujące w przyrodzie surowce, jak również surowce odpadowe z działalności człowieka, jak kaolin, metakaolin, popioły lotne, dolomit, pyły i popioły ze spalania surowców roślinnych (popiół ze spalania oleju palimowego). Różnią się one od względem zawartości krzemianów, innych soli (fosforanów, siarczanów) i tlenków (tlenku aluminium, tlenku żelaza, tlenku tytanu, tlenku wapnia, tlenki magnezu, tlenku potasu, tlenku wapnia). (Zain et al. 2017).

Własności fizyczne (w tym mechaniczne) geopolimerów (Zhang 2015) to:

- Wysoka wytrzymałość mechaniczna,
- Wysoka wartość sił adhezyjnych, w tym adhezji geopolimeru do stali,
- Wysoka wytrzymałość powierzchni,
- Wysoka odporność na temperaturę i działanie ognia,
- Wysoka odporność na reagenty chemiczne oraz kwasy organiczne i nieorganiczne,
- Niewielka zawartość metali ciężkich podlegających wymywaniu,
- Niska porowatość, materiał zawiera tylko mikro- i nanopory.

Badania prowadzone przez Koleżyński, Król i Zychowicz (2018) doprowadziły do wniosków, że w przypadku struktur powierzchniowych geopolimerów, zależnie od proporcji Si:Al. należy oczekiwać dużych struktur uporządkowanych fragmentów, podobnych do tych, które są obserwowane w zeolitach.

1.4. Właściwości kompozytów geopolimerowych.

Kompozyty geopolimerowe zyskują na popularności w szczególności przez ostatnią dekadę. Jeszcze 13 lat temu, Wala i Rosiek (2008) pisały o dużym oporze branży budowlanej w stosowaniu kompozytów polimerowych ze względu na brak jednolitej nomenklatury dla tej klasy materiałów, brak odpowiednich wdrożeń w prawie w zakresie wymogów jakościowych i konstrukcyjnych z zastosowaniem kompozytów geopolimerowych, konserwatyzm branżowy i utrwalone błędne przekonania, że substancje alkaliczne zmniejszają mrozoodporność betonów i zapraw.

Właściwości kompozytów geopolimerowych należy podzielić na:

- Cechy ekonomiczne i środowiskowe, które zostaną scharakteryzowane w dalszej części pracy,
- Właściwości fizyczne, obejmujące właściwości mechaniczne,
- Właściwości chemiczne, w tym poziom łatwopalności (niepalności),
- Właściwości użytkowe.

Właściwości fizyczne kompozytów zależne są od rodzaju zbrojenia, który jest używany w danym produkcie:

Tab Właściwości mechaniczne kompozytów geopolimerowych w zależności od rodzaju zbrojenia – wytrzymałość na zginanie.

Rodzaj zbrojenia	Udział masowy w kompozycie (%)	Wytrzymałość na zginanie (MPa)
Szamet (ziarna 25 μ m)	50	15,33
Dolomit (ziarna 45 μ m)	20	15,92
Płytki flogopitowe (50-100 μ m)	20	11,4
Proszek granitowy (\leq 90 μ m)	55	10,3
Forsforan diwapniowy	15	10,4
Hydroksyapatyt z tanki kostnej	15	10
Pocięte włókna węglowe (100 μ m \times 7 μ m)	20	29,9
Wełna bazaltowa	10	22,2
Przędza z włókien bazaltowych	30	41
Jednokierunkowe włókna węglowe	20	269
Materiał Nextel 610	50	45,8
Materiał Nextel 720	50	46

Źródło: (Kriven, 2018).

1.5. Rodzaje kompozytów geopolimerowych

W praktyce inżynierskiej występuje bardzo wiele rodzajów kompozytów geopolimerowych. Można wyróżnić w tym przypadku podział ich według roli geopolimeru w kompozycie (geopolimer jako macierz, albo jako osnowa), dodatkowo można wyróżnić kompozyty geopolimerowe według rodzaju ich zastosowania oraz rodzaju użytych materiałów oprócz geopolimeru, jak również rodzaju zbrojenia (Ranjbar i Zhang 2015).

Zbrojenia, jakie są stosowane w kompozytach geopolimerowych można podzielić a organiczne i nieorganiczne. Z kolei zbrojenia organiczne dzielą się na pochodzenia zwierzęcego, pochodzenia roślinnego, a także substancje organiczne o pochodzeniu syntetycznym. Rodzaje kompozytów geopolimerowych różnią się własnościami

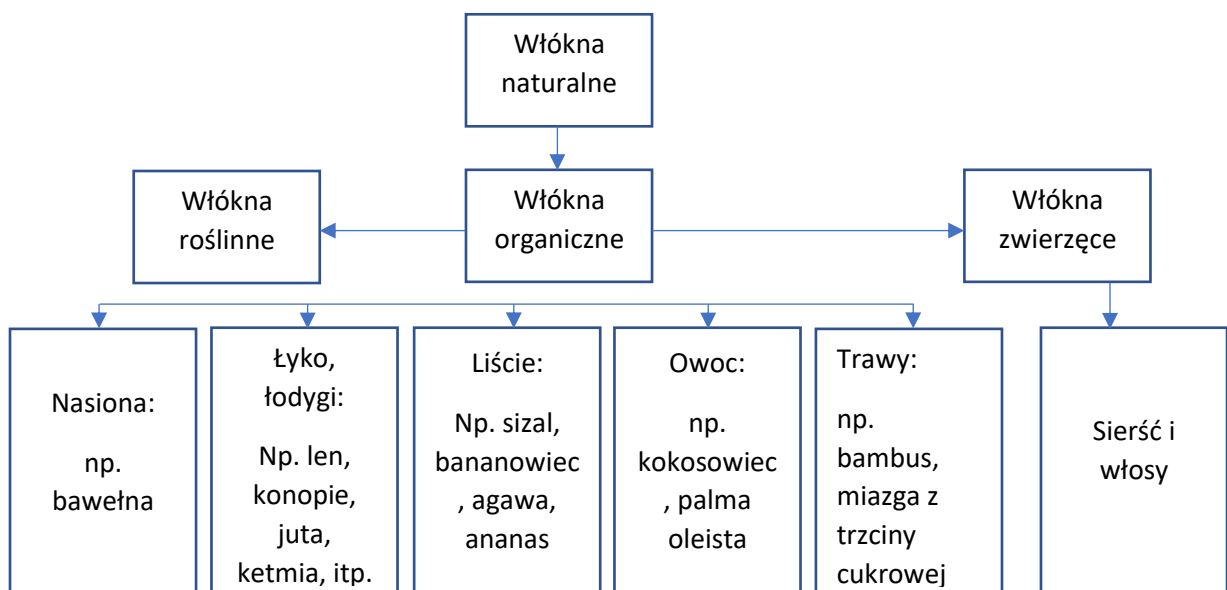
mechanicznymi (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie) co zależy od rodzaju zbrojenia, rodzaju osnowy, jak również proporcji między różnymi substancjami wchodzącymi w skład kompozytu. Abdullah i in. (2015) sprawdzali zależność między proporcjami popiołu lotnego i piasku w kompozycie a jego odpornością na ściskanie i zauważyli, że wzrost zawartości piasku zmniejszał je z 17 MPa (proporcja popiołu lotnego do piasku 1:2) do 9,2 MPa (proporcja odpowiednio 1:5).

Korniejenko (2018) przedstawia zastosowanie geopolimerów w kompozytach, jako:

- Składników zbrojenia,
- Składników osnowy.

W przypadku, gdy geopolimer jest osnową, wówczas stosowane są różne materiały mające w kompozycie odgrywać rolę zbrojenia i wówczas zbrojeniem najczęściej są włókna (włókna węglowe, włókna szklane, włókna naturalne, itp.) (Korniejenko 2018).

W wytwarzaniu ekologicznych kompozytów geopolimerowych stosowane są jako składnik różnego rodzaju włókna sztuczne oraz pochodzenia ze świata zwierząt i roślin. Pozwala to na wykorzystanie różnego rodzaju odpadów z produkcji i konsumpcji spożywczej. Camargo i in. (2020) proponują następujący podział włókien, które mogą być wykorzystywane jako wzmocnienie w kompozytach geopolimerowych.



Rysunek. Klasyfikacja włókien naturalnych do wykorzystania z kompozytów geopolimerowych - opracowanie własne na podstawie (Camargo i in. 2020).

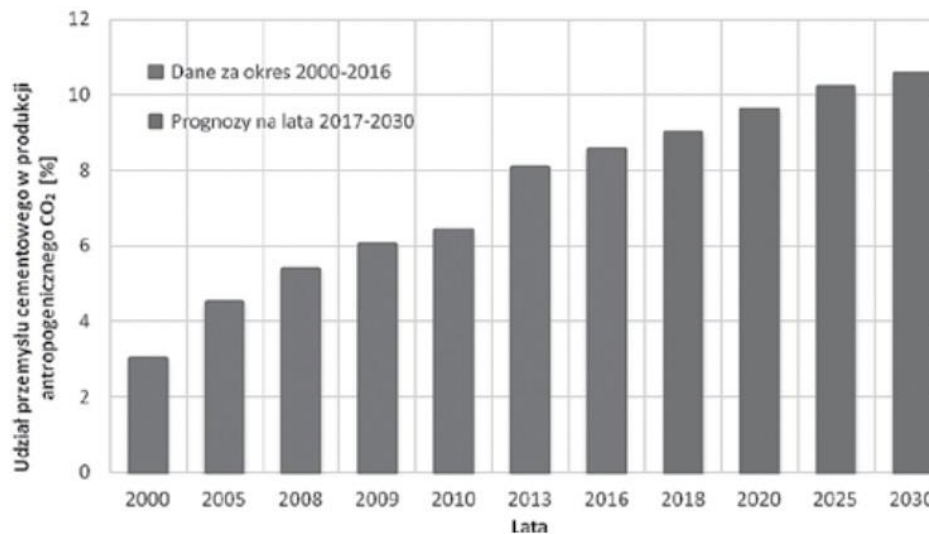
W składzie wszystkich tych naturalnych włókien znajdują się naturalne polimery: celuloza, hemicelulozy, lignina, oraz pektyny (heretopolisacharydy). Oleje, woski i lipidy obecne w tych materiałach odgrywają rolę ochronną przed wysuszeniem i atakiem ze strony drobnoustrojów (Camargo i in. 2020).

W badaniu Mikuła i Łach (2014a) przeprowadzono testy z zakresu zastosowania tzw. tufu filipowickiego (skały pozyskiwane między Karniowcami a Filipowicami i Myślachowicami), którego główny składnik stanowią sanidyn, kaolinit, biotyt, illit i kwarc, zaś uśredniona zawartość tlenków wynosi: SiO_2 – 56,04%, Al_2O_3 – 5,38%. Uzyskano też wysoką wytrzymałość mechaniczną (40-50 MPa) oraz wytrzymałość cieplną (uzyskano odczyt wytrzymałości mechanicznej w próbie przy 900°C na poziomie 66 MPa).

2. Problem produkcji i zagospodarowania odpadów budowlanych w kontekście ochrony środowiska i klimatu.

Kompozyty polimerowe mogą odegrać w przyszłości znaczną rolę ze względu na możliwość ich łatwego recyklingu oraz dużo niższej emisji dwutlenku węgla do atmosfery. To właśnie emisja tego gazu podejrzewanego o antropogeniczny wkład w ocieplanie klimatu na świecie jest dużym problemem branży cementowej. Jak wskazują dane pochodzące z branży produkcji cementu klinkierowego tylko 5% jej emisji generuje pobór prądu elektrycznego i tyle samo (5%) pochłania transport. Aż 42% pochodzi z procesu wypalania, z kolei 48% z procesu dekarbonizacji. Niższa temperatura reakcji, w której nie dochodzi w ogóle do reakcji pirolizy, a także brak dekarbonizacji (praktycznie brak udziału pierwiastku węgla i gazu CO_2 w reakcji) powodują, że geopolimery, a przez to i kompozyty geopolimerowe mogą stać się atrakcyjną alternatywą dla cementów

(Błaszczczyński i Król, 2019). Tymczasem udział przemysłu cementowego w emisji dwutlenku węgla rośnie zgodnie z poniższym wykresem:



Rysunek. Udział przemysłu cementowego w emisji CO₂ (Błaszczkowski i Król, 2019)

Według Kriven (2018) ślad węglowy po wyprodukowaniu każdej tony cementu portlandzkiego to 0,95 tony, z kolei wyprodukowaniu każdej tony przeciętnego geopolimeru to zaledwie 0,25 tony, dlatego też przestawienie światowej produkcji z cementu na geopolimery, a w tym także oparcie się o kompozyty geopolimerowe dałoby prawdopodobnie redukcję emisji CO₂ w tej gałęzi gospodarki nawet 70-90%.

W związku z tym recykling gruzu budowlanego i innych odpadów budowlanych i remontowych pozwala na znaczne oszczędności energetyczne i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych.

Dodatkowo surowce stanowiące macierz w kompozytach geopolimerowych. Zain et. al. (2017) przytoczyli dane dotyczące ekotoksyczności i okazało się, że ekwiwalenty w postaci popiołu lotnego czy metakaoliny służące do wytwarzania kompozytów geopolimerowych miały dużo niższą biobójczość, ekotoksyczność w stosunku do ludzi, życia słodkowodnego, morskiego, gleby, utleniania fotochemicznego, zakwaszania czy potencjały eutrofizacyjnego niż ekwiwalent cementu portlandzkiego.

3. Właściwości i zastosowanie gruzu budowlanego w budownictwie i geotechnice.

Gruz budowlany to różnego rodzaju gruz pochodzący z procesu konstrukcyjnego, remontowego, lub wyburzeniowego. Wyróżnia się wiele rodzajów gruzu budowlanego z których podstawowe to gruz betonowy i gruz ceglany, a także gruz z wnętrzbudynków, w którego skład wchodzi tynk, czy gładź szpachlowa, czy też np. gruz ceglany wymieszany z wapnem. Do przydatności gruzu budowlanego można zastosować kryteria oceny stosowane w klasyfikacji jakościowej „R”, zaś wskaźnikami są: uziarnienie, zawartość pyłów mineralnych, zawartość zanieczyszczeń obcych, zawartość ziaren nieforemnych, zawartość związków siarki, czy nasiąkliwość wodna. Już kilkanaście lat temu w Belgii odzyskiwano ponad 90% gruzu budowlanego, z czego trzy czwarte jest wykorzystywane do projektów niwelacji terenu, wykonywania podbudów i elewacji, zaś pozostała część jako kruszywo do betonu (Golda i Król 2006).

Istnieją różne podejścia normatywne w klasyfikacjach gruzu budowlanego, które zostało już przerobiono na kruszywo (Golda i Król 2006):

- Klasyfikacja kruszyw z recyklingu według RILEM: tutaj wyróżniamy trzy klasy: RCAC I, który pochodzi z elementów murowych, wyróżnia się najniższą minimalną gęstością w stanie suchym, ma najwyższą dopuszczalną nasiąkliwość wagową oraz zawartość materiałów obcych, RCAC II to materiał pochodzący z elementów betonowych, z kolei RCAC III stanowi mieszaninę składającą się z 80% kruszywa naturalnego oraz maksymalnie 20% kruszywa z recyklingu,
- Klasyfikacja kruszyw z recyklingu według wytycznych niemieckich: kruszywo z betonu (typ I), kruszywo z elementów budowlanych (typ II), kruszywo z elementów murowych (typ III), kruszywo mieszane (typ IV).

W poniższej tabeli przedstawione są wymagania dla kruszyw z recyklingu według RILEM:

Tabela. Klasy kruszyw z recyklingu – RILEM.

Cecha	RCAC I	RCAC II	RCAC III
Minimalna gęstość w stanie suchym (kg/dm ³)	1500	2000	2400
Maksymalna nasiąkliwość wagowa (%)	20	10	3
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <2,200 kg/dm ³ (%)	-	10	10
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <1,800 kg/dm ³ (%)	10	1	1
Maksymalna zawartość materiału o gęstości <1,000 kg/dm ³ (%)	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość materiałów obcych (%)	5	1	1
Maksymalna zawartość metali (%)	1	1	1
Maksymalna zawartości zanieczyszczeń organicznych (%)	1	0,5	0,5
Maksymalna zawartość ziaren <0,063mm (%)	3	2	2
Maksymalna zawartość ziaren <4mm (%)	5	5	5
Maksymalna zawartość siarczanów rozpuszczalnych wyrażona jako SO ₃ (%)	1	1	1

Źródło: (Golda i Król, 2006).

W przypadku kruszyw uzyskiwanych z różnego rodzaju gruzu według metodyki niemieckiej dopuszcza się różne proporcje trzech głównych składników: czyli gruzu betonowego lub kruszywa naturalnego, gruzu ceglanego, gruzu tynkowego, oraz domieszkowo: innych mineralnych składników (beton lekki, zaprawa budowlana, pumeks, beton komórkowy), asfaltu i zanieczyszczeń (szkło, ceramika, papier, gips, plastik, metal, drewno) (Mróz 2014).

4. Kompozyty geopolimerowe w połączeniu ze zmieszany gruzem budowlany – właściwości.

Możliwości połączenia kompozytów geopolimerowych z kruszywem recyklingowym przygotowanym na bazie zmieszanego gruzu budowlanego sprawdzano pod kątem przygotowania spoiw stosowanych w budownictwie. O ile kruszywo z recyklingu uzyskuje zadowalające właściwości użytkowe, to stworzenie spoiwa z zawartością kompozytów polimerowych powinno przyczynić się do poprawy właściwości mechanicznych spoiwa po zastygnięciu. Poniżej przedstawione zostały porównawczo właściwości cementu portlandzkiego z typowymi wartościami dla kompozytów polimerowych:

Tab Porównanie właściwości mechanicznych cementu portlandzkiego z kompozytami geopolimerowymi.

Właściwość	cement	Kompozyty polimerowe
Wytrzymałość na zgniatanie (MPa)	60	100-120
Wytrzymałość na zginanie (MPa)	5-6	10-15
Gęstość (g/cm ³)	2,7	1
Czas zastygania	28	1

Źródło: (Kriven, 2018).

Literatura:

Abdullah, M.M.A. Tahir M.F.A., Ibrahim, W.M.W. (2015). 'The properties and durability of fly ash-based geopolymetric masonry bricks'. W: Pacheco-Torgal, F.,

Lourenco, P. B., Chindraprasit, P. (red.). *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks Design, Properties and Durability*, Elsevier, London, s. 273-287.

Błaszczński, T. Z., Król M. R., (2019). ‘Właściwości spoiw glinokrzemianowych na bazie lotnych popiołów wapniowych’, *Przegląd Budowlany*, nr 7-8, s. 46-55.

Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., (2005). *Kompozyty*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Brańszczyńska-Malik, K. N., Pędzich, Z., Pietrzak, K., Rosłaniec Z., Sterzyński T., Szweyger, M., (2005), ‘Problemy terminologii w kompozytach i wyrobach kompozytowych’, *Kompozyty*, vol. 5, no. 1, s. 19-24.

Brautman L.J., Krock R.H., (1975). *Composite Materials*, New York: Academic Press.

Camargo, M. M., Taye, E. A., Roether, J. A., Redda, D. T., Boccaccini, A. R. (2020). ‘A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites’, *Materials*, vol. 13, no. 4603, s. 1-29, doi:10.3390/ma13204603

Golda, A., Król, A., (2006). ‘Drugie życie betonu’, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, październik-grudzień, s. 44-47.

Koleżyński, A., Król, M., Żychowicz, M. (2018), ‘The structure of geopolymers – Theoretical studies’, *Journal of Molecular Structure*, no. 1163, s. 465-471.

Kriven, W. M. (2018) *Geopolymer-Based Composites*, w: Beaumont, P.W.R. and Zweben, C.H. (red.). *Comprehensive Composite Materials II*. Oxford: Academic Press, s. 269-280.

Mikuła, J., Łach, M. (2014a). ‘Wytwarzanie i właściwości geopolimerów na bazie tufu wulkanicznego’, *Inżynieria Materiałowa*, r. 25, s. 270-276.

Mikuła, J. Łach. M. (2014b). ‘Geopolimery – nowa przyjazna środowisku alternatywa dla betonów na bazie cementu portlandzkiego. Wprowadzenie’ w: J. Mikuła, (red.). *Rozwiązania proekologiczne w produkcji – nowoczesne materiały kompozytowe przyjazne środowisku*. Kraków: Politechnika Krakowska, s. 13-32.

- Mikuła, J., (2018), Wytwarzanie i zastosowanie geopolimerów na bazie surowców odpadowych, Kraków: Politechnika Krakowska, źródło: http://odpady.nfosigw.gov.pl/gfx/ees/userfiles/files/67_forum/3.67.pdf
- Mróz, R. (2014), 'Problem(atyka) gruzu betonowego', *Budownictwo, Technologie, Architektura*, październik-grudzień, s. 64-68.
- Proniewicz, E. (2019), *Polimery*, seria: e-Podręczniki, Kraków: AGH.
- Ranjbar, N., Zhang, M. (2015). 'Fiber-reinforced geopolymer composites', *Cement and Concrete Composites*, no. 107, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103498
- Wala, D., Rosiek, G. (2008). 'Adhezja kompozytów geopolimerowych do betonu, stali i ceramiki', *Kompozyty*, vol. 8, no. 1, s. 36-40.
- Zain, H., Abdullah, M.M, Hussin, K., Ariffin, N., Bayuadoi, R. (2017). 'Review on Various Types of Geopolymer Materials with the Environmental Impact Assessment', *MATEC Web of Conferences*, vol. 97, DOI: 10.1051/mateconf/20179701021
- Zhang, M. (2015), *Geopolymer, Next Generation Sustainable Cementitious Material – Synthesis, Characterization and Modeling* (PhD dissertation). Worcester: Worcester Polytechnic University.