

mgr inż. Łukasz Anaszewicz^{1*)}
 prof. dr hab. inż. Adam Stolarski¹⁾

Podstawowe badania wytrzymałościowe zaprawy geopolimerowej

The basic strength tests of geopolymer mortar

DOI: dx.doi.org/10.15199/33.2014.12.02

Streszczenie. W artykule omówiono badania nad materiałami geopolimerowymi w budownictwie. Przedstawiono również wyniki badań zaprawy geopolimerowej na bazie popiołu lotnego aktywowanego mieszaniną wodnego roztworu wodorotlenku sodu i krzemianu sodu. Do badań przygotowano dwie serie próbek, które różniły się stężeniem NaOH_{sol} . Próbki zaprawy poddano badaniom wytrzymałości na zginanie oraz ściskanie (zgodnie z normą PN-EN 196-1 2006) po 7 i 28 dniach. Otrzymane wyniki posłużą jako podstawa do dalszych badań nad zastosowaniem geopolimerów w budownictwie.

Słowa kluczowe: budownictwo, materiały budowlane, zaprawa geopolimerowa, popiół lotny.

Abstract. The article discusses research on geopolymer materials using in civil engineering. It also shows the results of research on mortar geopolymers based on fly ash activated with a mixture of aqueous solution of sodium hydroxide and sodium silicate. There were tested two sets of samples which differed in concentration of NaOH_{sol} . The samples of mortar were tested on flexural strength and compressive strength (according to PN-EN 196-1 2006) after 7 and 28 days. The results serve as a basis for further research on the use of geopolymers in construction.

Keywords: civil engineering, building materials, geopolymer mortar, fly ash.

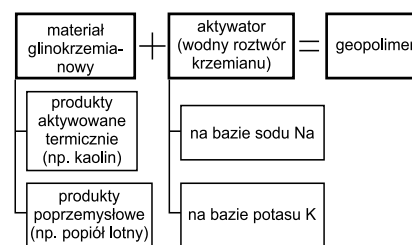
Współcześnie beton jest najpopularniejszym konstrukcyjnym materiałem budowlanym. Najczęściej stosowany i najlepiej zbadany jest beton cementowy (ang. – *ordinary portland cement* – OPC), ale ze względu na coraz większe wymagania budownictwa (większa wytrzymałość, większa odporność na korozję, wysoką temperaturę itd.) dużym zainteresowaniem cieszą się nowe rodzaje betonu. Wiele z nich poznajemy dzięki intensywnemu rozwojowi wiedzy i badań na temat kompozytów i materiałów polimerowych [1].

Jednym z problemów związanych ze stosowaniem betonu cementowego jest wzrost zanieczyszczenia atmosfery, do którego przyczynia się m.in. proces produkcji cementu portlandzkiego. Szacunkowo przy produkcji 1 tony cementu do atmosfery jest uwalniana 1 tona CO_2 , co odpowiada 2,6 mld ton dwutlenku węgla rocznie. Prawie 7% światowej emisji dwutlenku węgla przypada na produkcję cementu [2, 3]. Niektóre nowe technologie betonów umożliwiają przynajmniej częściowe uniknięcie tego problemu, a nawet utylizację

odpadów przemysłowych, np. przez wykorzystanie odpadowych popiołów ze spalania węgla w elektrociepłowniach. Jedną z możliwości jest wykorzystanie popiołów do produkcji betonów jako dodatków [1, 4]. Większe możliwości daje jednak zastosowanie popiołów jako spoiw w tzw. betonach geopolimerowych [5].

Zaprawa geopolimerowa jest spoiwem aktywowanym alkali-ami (alkali-activated). Jak opisują autorzy pracy [6], pierwszą istotną pracą w tej dziedzinie były badania Purdona prowadzone w latach czterdziestych XX w. Autor posłużył się żużłem wielkopieczowym aktywowanym wodorotlenkiem sodu. Następne były prace Gluhovsky'ego nad materiałem nazwanym przez niego „soil-cement”. Był to grunt stabilizowany alkalicznymi odpadami przemysłowymi z dodatkiem cementu. Przełom w badaniach nastąpił po opatentowaniu przez Davidovitsa w 1978 r. zaprawy z metakaolinu aktywowanego alkali-ami i wprowadzeniu pojęcia geopolimeru [6]. Odnosi się ono do klasy syntetycznych polimerów – glinokrzemianów o potencjalnym zastosowaniu jako zamiennika cementu portlandzkiego w betonie.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat powstawania geopolimeru jako zamiennika cementu w betonie. Podsta-



Rys. 1. Schemat powstawania materiału geopolimerowego

wową metodą jego uzyskania jest połączenie materiału glinokrzemianowego z wodnym roztworem krzemianu (głównie stosuje się krzemiany sodu i potasu).

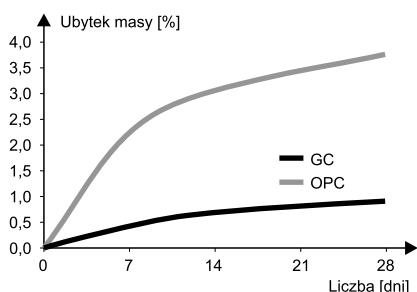
Dotychczasowe badania zaczynają geopolimerowego na bazie popiołu lotnego udowodniły zwiększoną odporność materiału na chlorki i siarczany, większą odporność ogniową oraz o 50% mniejsze pęcznienie w porównaniu z betonem cementowym [7]. Lepsze parametry spoiwa geopolimerowego wynikają ze struktury matrycy cementowej, która w tym wypadku jest bardziej jednolita i regularna niż w przypadku cementu portlandzkiego. Nie bez znaczenia jest również regularny, sferyczny kształt ziaren popiołu lotnego [8].

Na rysunku 2 przedstawiono zachowanie betonu geopolimerowego (ang. – *geopolymer concrete* – GC) oraz OPC

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

^{*)} Autor do korespondencji:

e-mail: lanaszewicz@wat.edu.pl



Rys. 2. Procentowy ubytek masy betonów GC i OPC poddanych działaniu kwasu solnego [9]

wystawionych na działanie kwasu solnego. Widoczna jest znaczna różnica w ubytku masy obu rodzajów betonu. W przypadku betonu cementowego ubytek wynosi ok. 4% i jest o ok. 3% większy niż GC [9]. Główną przyczyną lepszych właściwości GC jest bardziej jednolita struktura polimeru i mniej rys wywołanych skurczem materiału w czasie dojrzewania betonu [10].

Celem artykułu jest zaprezentowanie wyników badań wytrzymałościowych na zginanie i ściskanie zaprawy, będącej podstawowym składnikiem betonu geopolimerowego, prowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej.

Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest **zaprawa geopolimerowa** na bazie popiołu lotnego aktywowanego roztworami sodu. Najnowsze badania przedstawione w [5] pokazują różnorodność materiałów pochodzenia naturalnego i przemysłowego (np. kaolinit, metakaolinit, popiół lotny, kerogen), z których można wykonać geopolimer.

Po analizie literatury do badań wybrano popiół lotny, ponieważ jest łatwo dostępny i można go stosować bez dodatkowej obróbki cieplnej. Zastosowano **popiół lotny niskowapienny** z Elektrociepłowni Żerań w Warszawie. W tabeli 1 przedstawiono oznaczenie procentowej zawartości tlenków oraz strat prażenia LOI (ang. – *loss of ignition*).

Analiza została przeprowadzona metodą XRF w Centralnym Laboratorium Chemicznym Państwowego Instytutu Geologicznego. Sumaryczna zawartość tlenków krzemu, aluminium i żelaza powyżej 70% oraz wapna po-

niżej 20% klasyfikuje ten popiół do klasy F według ASTM C618 [15].

Do zaprawy użyto **piasku normowego** o uziarnieniu zgodnym z normą PN-EN 196-1 [16], wg tabeli 2, a jako **aktywatora** mieszaniny roztworu wodorotlenku sodu (NaOH_{sol}) oraz roztworu krzemianu sodu w postaci szkła

Tabela 2. Rozkład wielkości ziarna piasku wzorcowego [16]

Wymiar boku oczka kwadratowego [mm]	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Łączna pozostłość na sicie [%]	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

wodnego (SS_{sol}) dostępnego w sprzedaży detalicznej.

Roztwór wodny wodorotlenku sodu ma właściwości żrące, co jest największą jego wadą na etapie wykonania mieszanki. Natomiast szkło wodne jest materiałem powszechnie stosowanym w budownictwie, o właściwościach drażniących.

Na podstawie analizy dostępnych źródeł [11, 12, 13] zastosowano dwa warianty aktywatora NaOH o stężeniu 14M oraz 10M. Masa NaOH na kilogram roztworu 14M wyniosła 404 g, natomiast w przypadku roztworu 10M – 314 g. Jako SS_{sol} użyte zostało szkło wodne sodowe o stężeniu 40%. Stosunek $\text{SS}_{\text{sol}}/\text{NaOH}_{\text{sol}} = 2,5$ dobrano na podstawie [2]. Aktywator przygotowywany był nie wcześniej niż 24 h przed zastosowaniem.

Próbki do badań przygotowano zgodnie z normą PN-EN 196-1 [16]. Do popiołu lotnego dodawano aktywator (wraz z plastyfikatorem), a następnie piasek normowy. Stosunek aktywatora do popiołu został dobrany doświadczalnie na poziomie $a/p = 0,5$. Czas końcowego mieszania wydłużono do 3 min, ponieważ na podstawie badań [11] stwierdzono, że im dłuższy czas mieszania, tym większa wytrzymałość końcowa. Zaprawa układana była w formach 40 x 40 x 160 mm. Rozformowanie nastąpiło po dwóch dniach od czasu formowania. Próbki przechowywano w warunkach pokojowych.

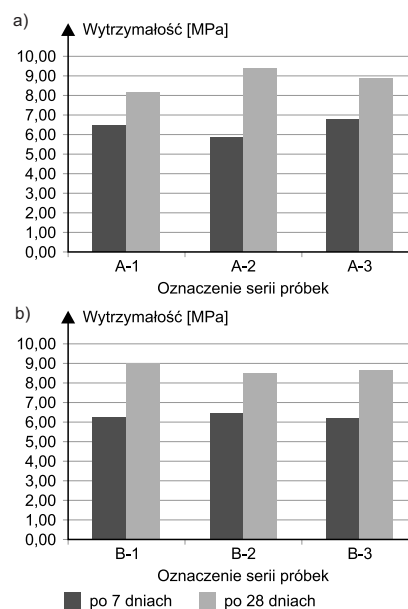
Tabela 1. Wyniki analizy XRF popiołu lotnego

Oznaczenie tlenku	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅ (SO ₃)	(Cl)	(F)	LOI	
Zawartość [%]	51,60	1,178	26,37	5,35	0,055	2,01	3,55	0,96	2,31	0,729	0,31	0,016	< 0,01	5,12

Wyniki

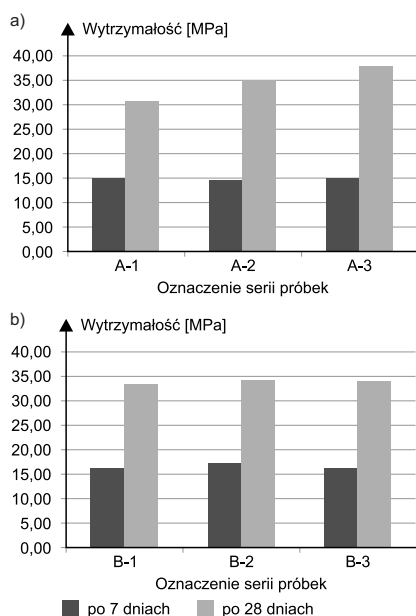
Próbki badano po 7 oraz 28 dniach dojrzewania. Przeprowadzono badanie średniej wytrzymałości na zginanie i ściskanie wg PN-EN 196-1. Badaniu na zginanie poddano 27 próbek, a na ściskanie – 54 próbki.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań na zginanie próbek: serii A, w których zastosowano aktywator 14M (rysunek 3a) oraz serii B z aktywatorem 10M (rysunek 3b). Średnia wytrzymałość na zginanie obu serii próbek kształtuje się na niemal identycznym poziomie i wynosi średnio po 7 dniach 6,37 MPa (seria A) i 6,33 MPa (seria B), a po 28 dniach 8,83 MPa (seria A) i 8,75 MPa (seria B). W obu przypadkach identyczny jest też wzrost średniej wytrzymałości po 28 dniach względem wytrzymałości 7-dniowej o blisko 38%.



Rys. 3. Wyniki średniej wytrzymałości na zginanie próbek: a) serii A; b) serii B

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek serii A i B. Stwierdzono, że po 7 dniach nieznacznie większą wytrzymałość osiągnęły próbki serii B – średnio 16,6 MPa, niż próbki serii A – średnio 14,9 MPa. Po 28 dniach nastąpił znaczny przyrost wytrzymałości – w przypadku serii A na poziomie ok. 130%, a próbek serii B o ok. 100%. Tym samym wyrównały się początkowe różnice i średnia wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w przypadku obu serii próbek wyniosła 34 MPa.



Rys. 4. Wyniki średniej wytrzymałości na ściskanie próbek: a) serii A; b) serii B

Podsumowanie

W dotychczasowych badaniach otrzymano porównywalne wyniki wytrzymałości zaprawy, w której aktywatorem był roztwór NaOH o stężeniu 10M i 14M, dlatego też w dalszych badaniach nad betonem geopolimerowym zastosowane zostaną oba rodzaje aktywatora. Możliwość użycia aktywatora o niższym stężeniu NaOH, ze względu na żrące właściwości roztworu wodorotlenku sodu, będzie rozwiązaniem bezpieczniejszym. Informacje

literaturowe wskazują jednak, że w masie betonu geopolimerowego nie obserwuje się zwiększonej korozyjności stali w porównaniu z betonem cementowym [14].

Na podstawie badań stwierdzono, że otrzymana zaprawa geopolimerowa, pod względem klasy wytrzymałości, odpowiada zaprawie na bazie cementu portlandzkiego. Wynik ten potwierdza realne szanse na uzyskanie i wykorzystanie nowego rodzaju betonu, w którym cement portlandzki zostanie całkowicie zastąpiony przez popiół lotny oraz aktywator. Wskazuje to na możliwość wykorzystania w budownictwie materiałów będących odpadami przemysłowymi pozyskiwanymi z lokalnych elektrociepłowni.

Literatura

- [1] Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T., Betony ultrawysokowartościowe, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008.
- [2] Hardjito D., Wallah S.E., Dody M. J. Sumajouw, Rangan B. V., On the development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, ACI Material Journal/November-December 2004.
- [3] Zongjin Li, Advanced concrete technology, WILEY 2011.
- [4] Brandt A. M., Zastosowanie popiołów lotnych z kotłów fluidalnych w betonach konstrukcyjnych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2011.
- [5] Davidovits J., Geopolymer Chemistry & Applications, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, 2011.
- [6] Pacheco Torgal F., Castro Gomes J. P., Said Jalali, Some considerations about the

durability of historic mortars, Historical mortars conference, 1, Lisboa, Portugal, 2008.

[7] Wallah S. E., Rangan B. V., Low – calcium fly ash – based geopolymer concrete: long – term properties, Research Report GC2 Faculty of Engineering Curtin Univ. of Tech., Perth, Australia 2006.

[8] Król M., Błaszczczyński T. Z., Ekobetony geopolimerowe, Materiały Budowlane 11, 2013.

[9] Madhan Gopal K., Naga Kiran B., Investigation on behavior of fly ash based concrete in acid environment, International Journal of Modern Engineering Research V. 3, I. 1, 2013.

[10] Chao Li, Henghu Sun, Longru Li, A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, Cement and concrete research 40 (2010) str. 1341 – 1349.

[11] Hardjito D., Rangan B. V., Development and properties of Low – Calcium Fly Ash – based Geopolymer Concrete, Research Report GC1, Curtin University of Technology, Perth. 2005.

[12] Gum Sung Ryu, Young Bok Lee, Kyung Taek Koh, Young Soo Chung, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, Construction and Building Materials 47, 2013.

[13] Palomo A., Grutzeck M. W., Blanco M. T., Alkali-activated fly ashes. A cement for the future, Cement and Concrete Research 29, 1999.

[14] Gourley T., Johnson G. B., Developments in geopolymer precast concrete, Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions, Institut Geopolymere, Saint-Quentin, 2005.

[15] ASTM C618-12a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[16] PN-EN 196-1:2006, Metody badania cementu, PKN, 2006.

Otrzymano 06.11.2014 r.

PROMOCJA dla PRENUMERATORÓW

Wszyscy, którzy jak najszybciej zaprenumerują miesięcznik „Materiały Budowlane” na 2015 r. w wersji papierowej, będą mogli przez dwa miesiące **BEZPŁATNIE** korzystać z internetowego archiwum naszego czasopisma. Promocja obowiązywać będzie w styczniu i lutym 2015 r. Druk prenumeraty na stronie www.materiałybudowlane.info.pl/prenumerata oraz dołączony do tego wydania czasopisma.

ZAMÓW PRENUMERATĘ miesięcznika „Materiały Budowlane” i SKORZYSTAJ Z PROMOCJI!

Baza artykułów z lat 2004 – 2014 dostępna jest na portalu informacji technicznej www.sigma-not.pl. Korzystanie z portalu wymaga zarejestrowania się i zalogowania.