

Wpływ wskaźnika spoiwowego na wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego

A study on the effect of Binder Index on compressive strength of geopolymer concrete

1. Wprowadzenie

Niekorzystna ocena wpływu przemysłu cementowego na środowisko spowodowała rozwój badań nad alternatywnymi materiałami, które mogłyby stanowić spoiwa do produkcji betonu. W tym kontekście, beton geopolimerowy [GPC] jest postrzegany jako nowy rodzaj materiału budowlanego, który może stanowić nowy rodzaj betonu stosowany w rozwiązaniach infrastrukturalnych. Beton geopolimerowy jest materiałem przyjaznym dla środowiska bowiem do jego produkcji wykorzystuje się przemysłowe produkty uboczne, przede wszystkim granulowany żużel wielkopiecowy i popiół lotny, po ich aktywacji roztworami alkalicznymi. Powszechnie stosowanym aktywatorem alkalicznym jest roztwór mieszaniny NaOH z Na_2SiO_3 . Wymienione przemysłowe produkty uboczne są bogate w krzemionkę i tworzą po aktywacji roztworem alkalicznym matrycę spoiwową, która po związaniu spaja kruszywo tworząc stwardniały beton.

Kühl (4) w 1907 opisał możliwość wytwarzania spoiwa hydraulicznego ze zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego aktywowanego dodatkiem NaOH, które w skali przemysłowej produkowano w byłym ZSRR od roku 1965, w wyniku prac Głuchowskiego (5,6). Głuchowski nazwał to spoiwo „geopolimerem”, co wywołało głośne dyskusje wśród rosyjskich naukowców, związanych z chemią materiałów budowlanych (7). Natomiast Davidowicz (8) opatentował w roku 1970 stosowanie do produkcji GPC granulowanego żużla wielkopiecowego i jako aktywatora roztwór alkaliczny.

Warunki dojrzewania, zwłaszcza temperatura, mają duży wpływ na proces twardnienia GPC. Hardjito i in. (2) oraz Wang (10) stwierdzili z kolei, że mieszanina roztworów wodorotlenku sodu i krzemianu sodu może stanowić dobry aktywator, a większe stężenie wodorotlenku sodu, a także wyższa temperatura dojrzewania, zapewniają lepszą wytrzymałość betonu. Różni autorzy badali znaczenie stosunku molowego $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ i przyjmowali wartość 2,5 jako zapewniającą uzyskanie maksymalnej wytrzymałości na ściskanie, przy stałej zawartości spoiwa. Anuradha (1) i Rangan

1. Introduction

The increased awareness of environmental concerns of cement industry has given a scope for development of alternate concrete materials. In this context the development of geopolymer concrete (GPC) is being viewed as an emerging class of concrete material and could be the next generation concrete for applications in civil engineering infrastructure. The geopolymer concrete is an environmental friendly material in the sense that it uses the industrial byproducts such as ground granulated blast furnace slag (GGBS) and fly ash (FA), along with alkaline activated solutions. The commonly used combination of alkaline activator solution is NaOH and Na_2SiO_3 . These rich in silica byproducts form with alkaline solution a binder matrix to bound aggregate in the mixture and to produce the hardened concrete.

Kühl (4) in 1907 has establish the possibility to produce the hydraulic binder from ground granulated blast furnace slag activated with NaOH addition and industrial production was developed in former Soviet Union in the year 1965, as a result of Gluckovsky (5) works (6). Gluckovsky was the first which used the name of this binder “geopolymers” which caused the critical discussions among Russian scientists working in cement chemistry (7). Davidovits, (1970) (8) had patented the use of waste material like fly ash and ground granulated blast furnace slag along with high alkaline solution as activators in development of GPC. The curing conditions especially, temperature significantly impacts the hardening process of GPC. Hardjito et al. (2) and Wang (10) concluded that a combination of sodium hydroxide and sodium silicate solutions can be a good application for activators and higher concentration of sodium hydroxide solution and curing temperature enable the concrete compressive strength to be higher. Various authors studied the importance of molar ratio of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ and suggested as 2.5 for maximum compressive strength at constant binder content. Anuradha (1) and Rangan (5) carried out research

* Corresponding author email: ramadr@gmail.com

(5) przeprowadzili badania betonu geopolimerowego z popiołem lotnym, uwzględniając różne proporcje mieszanek i zmieniając przy projektowaniu mieszanki betonowej stosunek woda/geopolimer oraz stosując dwa stężenia NaOH, a mianowicie 8 moli/L i 12 moli/L.

Biorąc pod uwagę ostatnie prace związane z GPC, niniejsze doświadczenia mają na celu zbadanie jednoczesnego wpływu zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego, popiołu lotnego i stężenia molowego aktywatora alkalicznego na wytrzymałość na ścislenie GPC. W celu określenia łącznego wpływu stosunku zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego oraz stężenia molowego aktywatora alkalicznego na wytrzymałość na ścislenie GPC, wprowadzono ujednoczony parametr zwany „wskaźnikiem spoiwowym” [Ws]. Beton geopolimerowy ze zmielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym i popiołem lotnym można natomiast nazwać „dwuskładnikowym mieszanym GPC”.

2. Program badań

2.1. Materiały

Popiół lotny i granulowany żużel wielkopieczowy zastosowano jako spoiwo. Granulowany żużel wielkopieczowy pochodził z Toshali Cements Pvt Ltd, Bayyavaram w Indiach, a popiół lotny z państwowej elektrowni w Ramagundam w Indiach. Ciężar właściwy żużla i popiołu lotnego wynosiły odpowiednio 2,90 i 2,17. Ich skład chemiczny podano w tabelicy 1.

Zamiast zwykłego piasku rzeczny, jako kruszywo drobne zastosowano piasek Robo, nazywany także fabrycznym piaskiem produkowanym przez mechaniczne kruszenie skał. Piasek ten należy do kategorii 2 zgodnie z normą indyjską IS: 383, a jego ciężar właściwy i gęstość nasypowa wynosiły odpowiednio 2,65 g/cm³ i 1,45 g/cm³.

Granit łamany o średnicy ziarna mniejszej od 20 mm, uzyskany od lokalnego przedsiębiorstwa zajmującego się kruszeniem surowców, zastosowany jako kruszywo grube jest zgodny z normą indyjską IS: 383 (3). Jego ciężar właściwy i gęstość nasypowa wynosiły odpowiednio 2,80 g/cm³ i 1,5 g/cm³.

Do przygotowania roztworu alkalicznego użyto wody pitnej.

Zastosowane stężenia molowe roztworu wodorotlenku sodu wynosiły od 6 moli/L do 12 moli/L. W tabelicy 2 podano masę granulowanego wodorotlenku sodu użytego do przygotowania roztworów NaOH. Stosunek molowy roztworu krzemianu sodu do wodorotlenku sodu wynosił 2,5; przed użyciem, zmieszany roztwór przechowywano przez 24 godziny w normalnej temperaturze [25±2°C] i wilgotności względnej 65%.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO I ŻUŻLA WIELKOPIECOWEGO, % MASOWE

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH AND GGBS, % BY MASS

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	LOI
Popiół lotny / Fly ash	60.12	26.63	4.22	0.32	4.10	1.21	0.20	0.85
Żużel wielkopieczowy / GGBS	34.16	20.10	0.81	0.88	32.8	7.69	nd	--

nd – nie oznaczano / non determined

on fly ash based geopolymer concrete considering different mix proportions and developed a mix design process by varying the water to geopolymer solids ratio with two different molarities of NaOH i.e. 8M and 12M.

Keeping in view of the past work done on GPC, the present investigation is aimed at studying the combined effect of GGBS, FA and molarity of alkaline activator on the compressive strength of GPC. A unified parameter called ‘**Binder Index (Bi)**’ is introduced to quantify the effects GGBS to FA ratio and molarity of alkaline activator on the compressive strength of GPC. With the use of GGBS and Fly ash the geopolymer concrete that is produced can be called as ‘Binary blended GPC’.

2. Experimental program

The experimental program consisted of finding the compressive strength of GGBS and FA based geopolymer concrete by casting and testing of cubes of size of 150 mm³.

2.1. Materials

Fly ash and GGBS are used as binders in this research work. GGBS is obtained from Toshali Cements Pvt Ltd, Bayyavaram, India and fly ash from National thermal power plant, Ramagundam, India. Specific gravity of GGBS and fly ash are 2.90 and 2.17 respectively. Chemical composition details are shown in Table 1.

As fine aggregate the Robo sand (RS) also called as manufactured sand produced by stone crushing was used, instead of normal river sand. The RS used conforming to Zone-2 according to IS: 383 and has specific gravity and bulk density of 2.65 g/cm³ and 1.45 g/cm³ respectively.

Crushed granite of 20 mm nominal size obtained from a local crushing unit is used as coarse aggregate and is well graded aggregate according to IS:383 (3). The specific gravity and bulk density are 2.80 g/cm³ and 1.5 g/cm³ respectively.

Potable water was used in the experimental work for preparation of alkaline solution.

The molarity of sodium hydroxide solution used varies from 6 M to 12 M. The sodium hydroxide pellets used for preparation of NaOH solution is given in Table.2. The ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide solution was 2.5; the mixed solution was stored for 24 hours at room temperature (25±2°C) and relative humidity of 65%, before it was used for casting.

Tablica 2 / Table 2

MATERIAŁY WYKORZYSTANE DO PRZYGOTOWANIA ROZTWORU NAOH
 MATERIALS USED FOR NAOH SOLUTION PREPARATION

	6 moli/L 6 moles/L	8 moli/L 8 moles/L	10 moli/L 10 moles/L	12 moli/L 12 moles/L
Granulki wodorotlenku sodu Sodium hydroxide pellets, g	200	255	306	354
Woda / Water, g	800	745	694	646

2.2. Skład mieszanki

Po przygotowaniu i zbadaniu różnych mieszanek, przyjęto ostateczne ich składy, podane w tablicy 3, z których przygotowywano próbki betonowe i określono ich właściwości.

2.3. Formowanie próbek GPC

Suche składniki betonu zmieszano używając do tego celu obrotowego bębna o pojemności miski mieszarki 100 kg, po czym dodano odpowiednie ilości roztworu alkalicznego oraz superplastyfikatora. Jednorodność mieszanki uzyskano po ciągłym mieszaniu przez około 5 minut. Przygotowane mieszanki miały dobrą konsystencję i były odporne na segregację. Natychmiast po zakończeniu mieszania, mieszanką wypełniano formy sześciennie i próbki zagęszczano na stole wibracyjnym. Po zagęszczeniu górną powierzchnię próbek wyrównywano za pomocą kielni.

Po 24 godzinach dojrzewania w powietrzu w temperaturze 20±2°C i 90% WW, próbki rozformowano i przechowywano w warunkach połowych przez okres 28 dni. Temperatura powietrza i wilgotność względna w tych warunkach wynosiły odpowiednio 35±2°C i 75%.

3. Wytrzymałość na ściskanie

Kostki sześciennie badano w maszynie wytrzymałościowej o obciążeniu do 2000 kN. Obciążenie zwiększano w sposób ciągły ze stałą szybkością, aż do momentu zniszczenia próbki. Maksymalne obciążenia poszczególnych próbek rejestrowano. Pomiar przeprowadzono zgodnie z IS 516 (3). Badania próbek wykonywano

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY GPC

COMPOSITION OF GPC

Nr No	Popiół lotny: żużel wielkopiecowy FA:GGBS	Stosunek Ratio GGBS/FA	Materiały / Materials, kg					
			Kruszywo grube Coarse agg.	Piasek Sand Robo	Popiół lotny Fly ash	Żużel wielkopiecowy GGBS	Roztwór Solution NaOH	Krzemian sodu Sodium silicate
1	80 : 20	0.25	18.00	13.20	7.85	2.00	1.80	4.50
2	70 : 30	0.43	18.00	13.20	6.90	2.95	1.80	4.50
3	60 : 40	0.67	18.00	13.20	5.91	3.94	1.80	4.50
4	50 : 50	1.00	18.00	13.20	4.93	4.92	1.80	4.50
5	40 : 60	1.50	18.00	13.20	3.94	5.91	1.80	4.50
6	30 : 70	2.30	18.00	13.20	2.95	6.90	1.80	4.50

2.2. Mix proportions

After preparation of different mixes and testing the cast specimens, a final mix proportion shown in Table 3 was adopted to carry out concrete preparation and its properties examination.

2.3. Casting of GPC specimens

The dry materials were weighed and mixed using a rotating drum type 100 kg capacity pan mixer and the alkaline liquid and superplasticizer of optimum dosage were added. Proper homogenous mixing was obtained by continuous mixing for about 5 minutes. The fresh mixes prepared were cohesive and segregation resistant. Immediately after mixing, the fresh GPC was casted in cube moulds followed by compacting on jolting table. After compaction the top surface was levelled with a trowel.

The specimens were demoulded after 24 hours of casting and during this period the hydrated in the air at 20±2°C, 90% RH, and cured outdoor. For outdoor curing, specimens were left out air dried for a period of 28 days at temperature of 20±2°C and 90% RH. The outdoor curing was at air temperature of 35±2°C and relative humidity of 75%.

3. Compressive strength

The cube specimens are tested on compression testing machine of capacity 2000 kN. The load applied was increased continuously at a constant rate until the resistance of the specimen to the increasing load breaks down and no longer can be sustained. The maximum load applied on the specimen is recorded. The testing was done as per IS 516 [3]. The testing of specimens was carried out at the end of 7 days (7D) and 28 days (28D) of outdoor curing. A total of 144 cubes representing 6 different GGBS/FA ratios (0.25, 0.43, 0.67, 1.0, 1.5 and 2.3), 4 different molarities (6, 8, 10 & 12) of alkaline solution, 2 different curing periods (7 and 28 days) 3 identical specimens for each variation, were cast and tested. The compression strength of GPC for different GGBS to fly ash ratio and for different molarity of alkaline activator is given in Table 4.

po 7 dniach [7D] i 28 dniach [28D] przechowywania w warunkach polowych. Przygotowano łącznie 144 kostki, w których zastosowano 6 różnych stosunków żużla wielkopieczowego/popiołu lotny [0,25, 0,43, 0,67, 1,0, 1,5 i 2,3], 4 różne stężenia molowe roztworu alkalicznego [6, 8, 10 i 12] oraz dwa różne czasy dojrzewania [7 i 28 dni], po czym badano po trzy próbki z każdego zestawu. W tabelicy 4 podano wytrzymałość na ściskanie GPC o różnym stosunku żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego i zmiennym stężeniu molowym aktywatora alkalicznego.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wpływ stosunku żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego na wytrzymałość GPC

Wpływ stosunku żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego na wytrzymałość GPC dla poszczególnych stosunków molowych aktywatora alkalicznego pokazano na rysunkach 1-4. Wyniki te wykazują, że wytrzymałość na ściskanie GPC wzrasta wraz ze wzrostem stosunku żużel/popioł. Jednakże, szybkość wzrostu wytrzymałości na ściskanie jest większa w przypadku stosunków żużel/popioł mniejszych od 1,0, co pokazano w Tabelicy 4 jako procentowy wzrost wytrzymałości ze zmieniającym się stosunkiem molowym roztworu aktywatora.

4.2. Wpływ stężenia molowego aktywatora alkalicznego na wytrzymałość na ściskanie GPC

Na rysunku 5 pokazano wpływ stężenia molowego aktywatora alkalicznego dla różnych stosunków żużel/popioł, na wytrzymałość na ściskanie GPC po 28 dniach. Wraz ze wzrostem stężenia roztworu alkalicznego, wytrzymałość na ściskanie GPC po 28 dniach również ulega zwiększeniu. Jednakże, wzrost wytrzymałości nie zachodzi proporcjonalnie ze zwiększaniem stężenia roztworu aktywatora. Wraz ze wzrostem stosunku żużel/popioł od 0,25 do 2,3, wytrzymałość na ściskanie GPC po 28 dniach ulega zwiększeniu w zależności od stężenia aktywatora alkalicznego, wzrastającego kolejno: 6 moli/L, 8 moli/L, 10 moli/L i 12 moli/L odpowiednio o 175%, 156%, 139% i 107%.

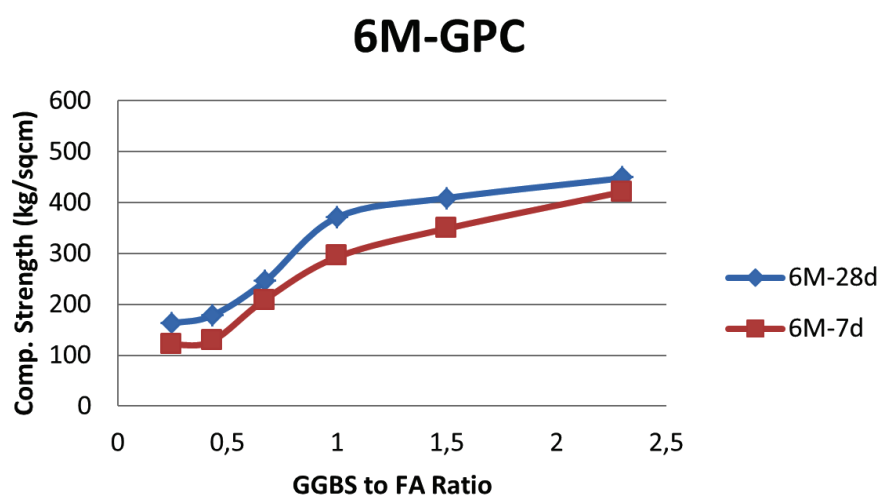
4.3. Wpływ wskaźnika spoiwowego na wytrzymałość na ściskanie GPC

W celu zbadania jednoczesnego wpływu stosunku żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego oraz stężenia aktywatora alkalicznego, zastosowano pojęcie „wskaźnika spoiwowego”

4. Results and discussions

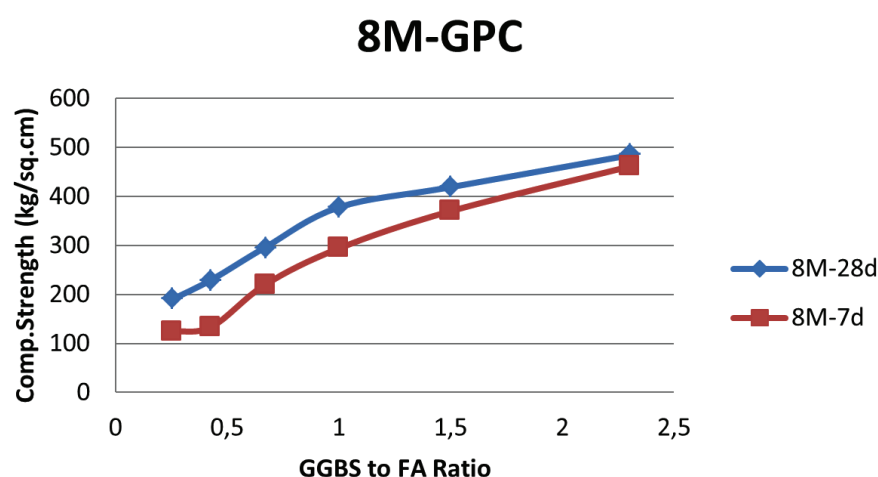
4.1. Effect of GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC

The effect of GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC for a particular molarity of alkaline activator is shown in Figs.1 -4. From these figures it can be observed that the compressive strength of GPC has increased with increase in GGBS to FA ratio. However the rate of increase of compressive strength is higher for GGBS to FA ratios lower than 1.0 as it is shown by the per cent increase of strength values with change in molarity presented in Table.4.



Rys. 1. Wpływ stosunku żużel/popioł na wytrzymałość na ściskanie GPC, 6 moli/L

Fig. 1. GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC, 6 moles/L



Rys. 2. Wpływ stosunku żużel/popioł na wytrzymałość na ściskanie GPC, 8 moli/L

Fig. 2. GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC, 8 moles/L

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE GPC, MPa

THE COMPRESSION STRENGTH OF GPC, MPa

Nr No	GGBS/FA	6 moli/L 6 moles/L			8 moli/L 8 moles/L			10 moli/L 10 moles/L			12 moli/L 12 moles/L			% wzrostu wytrzymałości ze wzrostem stężenia molowego od 6 do 12 moli/L % increase in strength as molarity changes from 6 to 12 moles/L	
		7D	28D	7D/28D	7D	28D	7D/28D	7D	28D	7D/28D	7D	28D	7D/28D	7D	28D
1.	0.25	12.0	16.3	0.736	12.4	18.9	0.656	13.8	22.1	0.624	19.1	27.4	0.697	59	68
2.	0.43	12.8	17.8	0.719	13.4	23.0	0.583	14.8	25.5	0.58	22.3	29.5	0.756	74	66
3.	0.67	20.9	24.5	0.853	22.0	29.6	0.743	23.7	36.7	0.646	26.5	38.9	0.681	27	59
4.	1.00	29.3	37.1	0.79	29.4	37.8	0.778	29.7	38.8	0.765	30.2	40.3	0.749	3.1	8.6
5.	1.50	34.9	40.9	0.853	37.0	41.9	0.883	39.6	43.0	0.921	40.2	43.9	0.916	15	7.3
6.	2.30	42.1	44.8	0.94	46.1	48.4	0.952	48.8	52.9	0.922	50.5	56.9	0.888	20	27
% wzrostu wytrzymałości ze wzrostem stosunku żużel/popioł od 0,25 do 2,3 % increase in strength as GGBS/FA increases from 0.25 to 2.3		25.1	17.5	--	27.2	15.6	--	25.3	13.9	--	16.4	10.7	--		

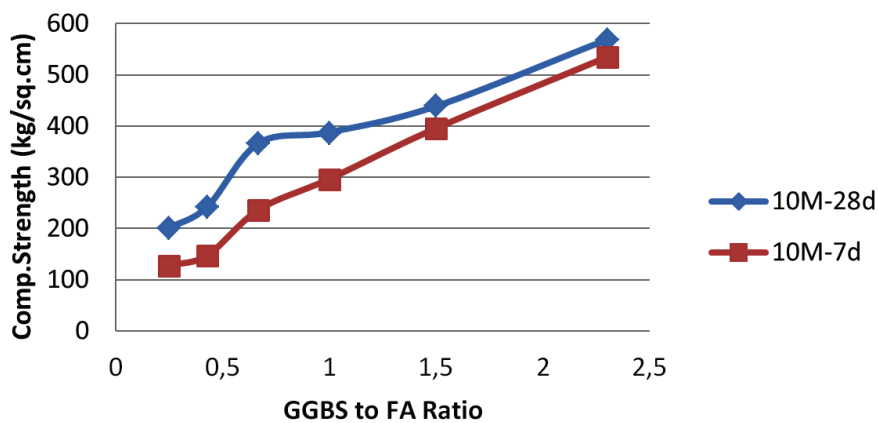
Tablica 5 / Table 5

WPŁYW WSKAŹNIKA SPOIOWEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE GPC

BINDER INDEX VS COMPRESSIVE STRENGTH OF GPC

Wskaźnik spoiwowy, Ws Binder index, Bi	Wytrzymałość na ściskanie, MPa Compressive strength of GPC, MPa		Stosunek 7-dniowej do 28-dniowej wytrzymałości GPC Ratio of 7 day strength to 28 day strength of GPC
	7 dni / 7 days 7D	28 dni / 28 days 28D	7D/28D
1.5	12.0	16.3	0.736
2	12.4	18.9	0.656
2.5	13.8	22.1	0.624
2.58	12.8	17.8	0.719
3	19.1	27.4	0.697
3.44	13.4	23.0	0.583
4.02	20.9	24.5	0.853
4.3	14.8	25.5	0.580
5.16	22.3	29.5	0.756
5.36	22.0	29.6	0.743
6	29.3	37.1	0.790
6.7	23.7	36.7	0.646
8	29.4	37.8	0.778
8.04	26.5	38.9	0.681
9	34.9	40.9	0.853
10	29.7	38.8	0.765
12	37.0	41.9	0.883
12	30.2	40.3	0.749
13.8	42.1	44.8	0.940
15	39.6	43.0	0.921
18	40.2	43.9	0.916
18.4	46.1	48.4	0.952
23	48.8	52.9	0.922
27.6	50.5	56.9	0.888

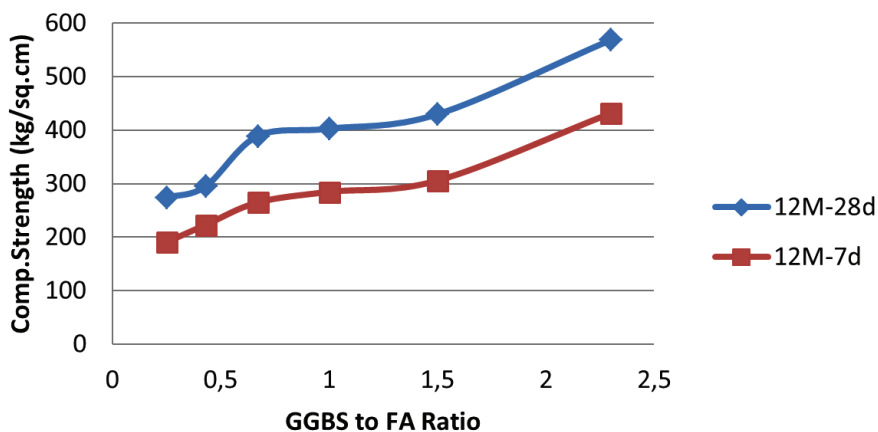
10M-GPC



Rys. 3. Wpływ stosunku żużel/popioł na wytrzymałość na ściskanie GPC, 10 moli/L

Fig. 3. GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC, 10 moles/L

12M-GPC



Rys. 4. Wpływ stosunku żużel/popioł na wytrzymałość na ściskanie GPC, 12 moli/L

Fig. 4. GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC, 12 moles/L

[Ws]. Wskaźnik ten określony jest jako iloczyn stosunku żużla wielkopieczowego do popiołu lotnego i stężenia molowego roztworu alkalicznego [M].

$$Ws = (\text{żużel/popioł}) \times M$$

W tablicy 5 oraz na rysunku 7 podano wyniki wytrzymałości na ściskanie GPC po 7 dniach [f7] i 28 dniach [f28] próbek dojrzewających w powietrzu w warunkach polowych wraz z wartościami wskaźnika spoiwowego [Ws]. Uzyskane wyniki wykazały, że zarówno po 7 dniach jak i po 28 dniach wytrzymałość na ściskanie GPC zwiększa się wraz ze wzrostem wskaźnika spoiwowego. Jednakże, wytrzymałość nie rośnie proporcjonalnie do wzrostu wskaźnika spoiwowego i jest to zależność nieliniowa. Najlepszą korelację wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach i 28 dniach dojrzewania w warunkach polowych ze wskaźnikiem spoiwowym [Ws] znaleziono stosując wyrażenia podane poniżej. Zależności

4.2. Effect of molarity of alkaline activator on compressive strength of GPC

The effect of molarity of alkaline activator for different GGBS to FA ratios, on 28 day compressive strength of GPC is shown in Fig.5. In general as the molarity is increasing the 28 day compressive strength of GPC also has increased. However, the increase of strength is not in proportion to the increase in molarity. As the GGBS to FA ratio increased from 0.25 to 2.3 the 28 dayS compressive strength of GPC has increased by 175%, 156%, 139% and 107% for molarity of alkaline activator of 6M, 8M, 10M and 12M respectively.

4.3. Effect of Binder Index on the Compressive strength of GPC

To study the combined effect of GGBS to fly ash ratio and the molarity of alkaline activator, the 'Binder Index (Bi)' has been used. The Binder Index is taken as the product of GGBS to fly ash ratio (GGBS/FA) and molar concentration (M) of activator solution.

$$Bi = (GGBS/FA) \times M$$

The values of compressive strength of GPC at 7 days (f7) and 28 days (f28) of air curing (outdoor curing) with the level of Binder Index (Bi) are given in Table 5 and the variation of the same is shown in Fig. 7. This variation indicates that both 7 days and 28 days compressive strength of GPC has increased with increase in Binder Index. However, the strength increase is not in proportion to the increase of binder index. There is a non-linear variation between Binder index and compressive strength of GPC. The

following best fit equations give the relation between compressive strength of GPC at 7 days and 28 days of air curing with Binder index (Bi) along with correlation coefficient (R²). These relations holds good for Bi greater than 1.0

$$f7 = 85.82 (Bi)^{0.56}$$

$$R^2 = 0.929$$

$$f28 = 145.7 (Bi)^{0.422}$$

$$R^2 = 0.936$$

4.4. Comparison of 7-days strength to 28-days strength ratio of GPC

The variation of the ratio of 7–days (7D) strength to 28–days (28D) strength of GPC for different Binder Index values is shown in Fig.6. A non-linear variation has been observed between the 7D to 28D

te są korzystne w przypadku Ws większego od 1,0.

$$f_7 = 85,82 (Bi)^{0,56}$$

$$R^2 = 0,929$$

$$f_{28} = 145,7 (Bi)^{0,422}$$

$$R^2 = 0,936$$

4.4. Porównanie stosunku wytrzymałości GPC po 7 dniach do wytrzymałości po 28 dniach

Na rysunku 6 podano zależność stosunku wytrzymałości po 7 dniach do wytrzymałości po 28 dniach twardnienia GPC dla różnych wartości wskaźnika spoiwowego. Podane poniżej równanie pozwala na określenie tej zależności w funkcji wskaźnika spoiwowego [Ws]. Współczynnik korelacji ma bardzo małą wartość wynoszącą 0,53.

$$\text{Stosunek wytrzymałości GPC} = 0.588 (Ws)^{0.137}$$

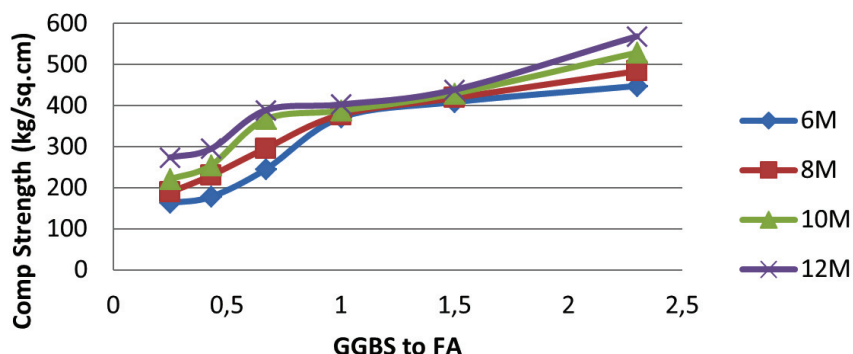
Z pokazanych zależności wynika, że żużel wielkopiecowy można stosować jako składnik częściowo zastępujący popiół lotny. Żużel wielkopiecowy, który zwykle zawiera znaczną ilość wapnia w porównaniu do popiołu lotnego, zapewnia twardnienie takiego spoiwa. Zatem, beton geopolimerowy ze spoiwem stanowiącym mieszaninę popiołu lotnego i żużla wielkopiecowego wykazuje korzystne właściwości bez konieczności stosowania podwyższonych temperatur w trakcie dojrzewania.

5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski.

1. Wytrzymałość na ściskanie GPC ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem stosunku żużel/popiół, dla stałego stężenia roztworu aktywatora.
2. Szybkość wzrostu wytrzymałości na ściskanie jest większa dla stosunku żużel/popiół mniejszego od 1,0.
3. Wraz ze wzrostem stężenia roztworu aktywatora, wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach ulega także zwiększeniu. Jednakże, wzrost ten nie jest wprost proporcjonalny do zwiększania stężenia roztworu aktywatora.
4. Do określenia wytrzymałości na ściskanie betonu geopolimerowego można zastosować „wskaźnik spoiwowy”, ujmujący jednocześnie wpływ stosunku żużel/popiół i stężenia roztworu alkalicznego.

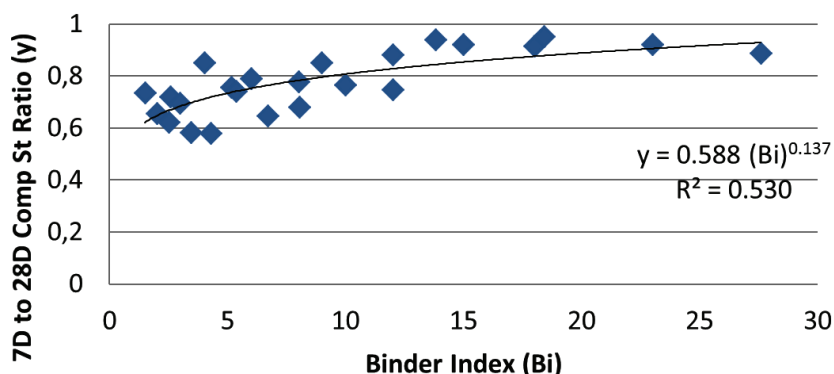
Comp.Strength vs GGBS to FA Ratio



Rys. 5. Wpływ stosunku żużel/popiół na wytrzymałość na ściskanie GPC

Fig. 5. GGBS to fly ash ratio on compressive strength of GPC

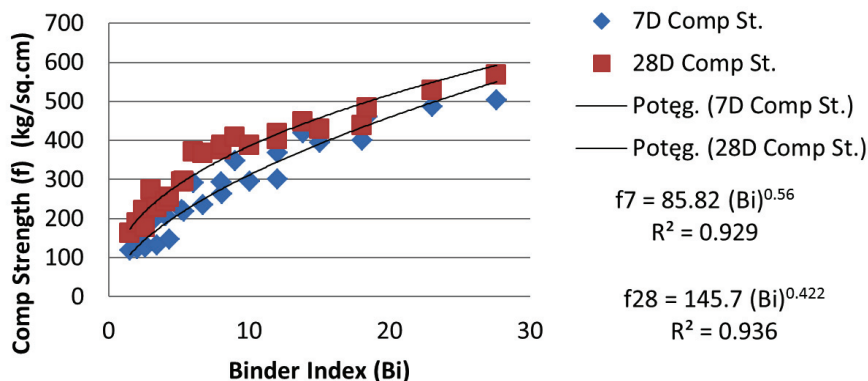
Ratio of 7D to 28D Strength to Binder Index



Rys. 6. Zależność stosunku 7-dniowej do 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie GPC i wskaźnika spoiwowego

Fig. 6. 7D to 28D compressive strength ratio of GPC vs binder index

Binder Index vs Comp St. of GPC



Rys. 7. Zależność wytrzymałości na ściskanie GPC i wskaźnika spoiwowego

Fig. 7. Compressive strength of GPC vs binder index

5. Wraz ze wzrostem „wskaźnika spoiwowego” ulega zwiększeniu wytrzymałość na ściskanie GPC zarówno po 7 dniach jak i po 28 dniach.
6. Zależność wytrzymałości na ściskanie GPC od „wskaźnika spoiwowego” jest nieliniowa.
7. Stosunek wytrzymałości betonu geopolimerowego po 7 dniach do wytrzymałości po 28 dniach ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem „wskaźnika spoiwowego” przy czym jest to zależność nieliniowa.
8. Mieszanka popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego może być stosowana do produkcji GPC bez konieczności zwiększania temperatury w trakcie dojrzewania.

Literatura / References

1. R. Anuradha, V. Sreevidya, R. Venkatasubramani, B. V. Rangan, Modified guidelines for geopolymer concrete mix design using Indian standard, *Asian J. Civil. Eng., Build. Hous.*, **13** 3, 353 (2012).
2. D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Mater. J.*, **101**, 6, 467 (2004).
3. IS: 516–1956 (Reaffirmed 1999), Indian Standard Methods of Tests for Strength of Concrete.
4. H. Kühn, *Zement Chemie*, Verlag Technik, Berlin 1952.
5. http://www.uni-weimar.de/Bauing/fib/forschung/eng-fo_shz.thm
6. V. D. Gluckovsky, G. S. Rostoykaya, G. V. Rumyna, 7th ICCO Paris, vol. III, p. V–164. Paris 1980.
7. V. D. Gluckovsky, W. Zajtsev, W. Pachomov, *Silicates Ind.*, **48**, 197 (1983).
8. J. Davidovits, Synthetic mineral polymer compound of the silico aluminate family and preparation process, US patent 4472199, 1978.
9. B. V. Rangan, Mix design and production of fly ash based geopolymer concrete, *Indian Concrete J.*, **82**, 7 (2008).
10. S. D. Wang, X. C. Pu, K. L. Scrivener, P. L. Pratt, Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems, *Adv. Cem. Res.*, 93 (1995).

strength ratio and Binder Index. The following non-linear equation can be used to relate 7D to 28D strength ratio with that of Binder Index (Bi) of GPC. The correlation coefficient of the equation is 0.53.

$$7D \text{ to } 28D \text{ compressive strength ratio of GPC} = 0.588 (\text{Bi})^{0.137}$$

From the above observations it can be concluded that the GGBS can be used for the partial replacement of FA. The GGBS, which normally contains a substantial amount of calcium compared to that of fly ash, imparts heat of hydration required for the polymerization process. Thus geopolymer concrete with fly ash and GGBS combination reveal encouraging results without the need of heat curing.

5. Conclusions

The following conclusions can be made from the experimental investigation presented.

1. The compressive strength of GPC has increased with increase of GGBS to FA ratio for a particular molarity of activator used.
2. The rate of increase of compressive strength is higher for GGBS to FA ratios less than 1.0
3. As the molarity of activator was increasing the 28–days compressive strength of GPC also has increased. However, the increase of strength is not in proportion to the increase in activator solution molarity.
4. A new parameter called 'Binder Index' which combines the effects of both GGBS to FA ratio and molar concentration of activator solution can be used to control the compressive strength of geopolymer concrete.
5. Both 7–days and 28–days compressive strength of GPC has increased with increase in Binder Index.
6. There is a non-linear variation between Binder index and compressive strength of GPC.
7. The 7D to 28D compressive strength ratio of GPC has increased with the increase of binder index and this increase can be approximated by a non-linear relation.
8. Fly ash and GGBS combination can be used for the production of GPC without the need of heat curing.