

G. Hathi Ram¹, Prof. B. Sesha Sreenivas², Prof. D. Rama Seshu³

¹Kakaktiya Univ., Warangal, India

²University College of Engg., Kothagudem, Kakaktiya Univ., India

³National Institute of Technology, Warangal, India

Wytrzymałość betonu geopolimerowego opartego na żużlu i popiole lotnym

Strength characteristics of geopolymer concrete using GGBFS and fly ash as source materials

Słowa kluczowe: beton geopolimerowy, popioły lotne, granulowany żużel wielkopieczowy, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie, Wskaźnik Spoiwowy, temperatura otoczenia

Key words: Geopolymer Concrete, Fly Ash, Ground Granulated Blast Furnace Slag, Compressive Strength, Split Tensile Strength and Flexural Strength, Binder Index, Ambient temperature.

1. Wstęp

Produkcja cementu portlandzkiego jest związana z dużym zużyciem energii, a jednocześnie przyczynia się do znacznej emisji CO₂ do atmosfery. Zmiana klimatu spowodowana globalnym ociepleniem stała się palącym problemem. Globalne ocieplenie spowodowane jest emisją gazów cieplarnianych do atmosfery, do których zalicza się dwutlenek węgla¹. Przemysł cementowy ma znaczny udział w emisji CO₂, ponieważ produkcja jednej tony cementu portlandzkiego powoduje emisję około 0,8 tony CO₂ do atmosfery (1). Jednak cement portlandzki jest głównym spoiwem w przemyśle betonowym, co skłania do poszukiwania materiałów bardziej przyjaznych dla środowiska. Trwają prace nad alternatywą dla cementu portlandzkiego w betonie, głównie ze względów

1. Introduction

The production of Portland cement consumes considerable amount of energy and at the same time is associated with high emission of CO₂ to the atmosphere. The climate change due to global warming has become a major concern. The global warming is caused by the emission of greenhouse gases, such as carbon dioxide¹, to the atmosphere by human activities. The cement industry is held responsible for some of the CO₂ emissions, because the production of one ton of Portland cement emits approximately 0,8 ton of CO₂ into the atmosphere (1). However, Portland cement is still the main binder in concrete construction prompting a search for more environment friendly materials. Several efforts are in progress to supplement the use of Portland cement in concrete in order to address the global warming issues. These include the utilization of supplementary cementing materials such as fly ash, silica fume,

¹ Komentarz Redakcji: Znaczenie emisji dwutlenku węgla dla ocieplenia klimatu jest przez niektórych poddawane w wątpliwość [patrz: C. Allègre, D. de Montvalon, L'imposture climatique (pol. Oszustwo klimatyczne), wyd. Plon 2010]

¹ Editorial comment: The significance of CO₂ emission is not commonly accepted [see C. Allègre, D. de Montvalon, L'imposture climatique (eng. Climatic cheat), Plon 2010]

związanych z globalnym ociepleniem. Obejmują one prace nad spoiwami zawierającymi dodatki mineralne, a przede wszystkim popiół lotny, pył krzemionkowy, mielony granulowany żużel wielkopiecowy, popiół z łusek ryżowych lub metakaolin. Jedną z możliwych alternatyw jest zastosowanie spoiw aktywowanych alkaliami, wykorzystując krzemianowe uboczne produkty przemysłowe. W 1978 Davidovits zaproponował wytwarzanie spoiw z minerałów pochodzenia geologicznego zawierających krzem i glin lub z produktów ubocznych takich jak popiół lotny lub granulowany żużel wielkopiecowy [GŻW], wykorzystując proces polimeryzacji, który zachodzi w środowisku zasadowym (3-4)². Dostępnych jest wiele publikacji opisujących zaczyny oraz betony geopolimerowe. Mając na uwadze dotychczasowe prace badawcze, prezentowane badania miały na celu zbadanie wpływu aktywowanego wodorotlenkiem i krzemianem sodu popiołu lotnego i granulowanego żużla wielkopiecowego [GŻW] na właściwości mechaniczne betonu geopolimerowego. Aby określić wpływ dodatków mineralnych na wytrzymałość betonu geopolimerowego, dojrzewającego w temperaturze otoczenia, zaproponowano parametr o nazwie „Wskaźnik Spoiwowy” [WS].

2. Badania

Plan badań polegał na pomiarach wytrzymałości betonu geopolimerowego, przy czym próbki miały następujące wymiary: kostki sześciennie o boku 100 mm, walce o wymiarach $r = 100 \text{ mm} \times h = 200 \text{ mm}$ oraz beleczki o wymiarach $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Próbki miały następujący stosunek masowy popiołu lotnego do GŻW: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 i 0:100. Stosunek aktywatora alkalicznego do popiołu lotnego wynosił 0,36, a udział drobnego kruszywa w całości kruszywa wynosił 32%. W badaniach zastosowano 8 molowy roztwór sodu. Każdy wynik jest średnią z badań trzech próbek po 7 i 28 dniach dojrzewania w warunkach otoczenia.

2.1. Materiały

Badany popiół lotny [PL] pochodził z elektrowni Kothagudem, Bhadradi Kothagudem Dist, Telangana, Indie. Dostawcą GŻW było Blueway Exports Vijayawada, Andhra Pradesh, Indie. Gęstości popiołu i żużla wynosiły odpowiednio 2,17 i 2,90. Szczegółowy skład chemiczny popiołu lotnego i żużla zamieszczono w tablicy 1. Zastosowano naturalny piasek rzeczny zgodny z normą IS 383:1970. Gęstość i wskaźnik miarkości piasku wynosiły odpowiednio 2,32 i 2,81. Kruszywo grube, o maksymalnej wielkości ziarna 12 mm, pochodziło z lokalnego źródła. Roztwór wodorotlenku sodu, o stężeniu 8 mol/dm^3 , wykonano z granulowanego NaOH i wody wodociągowej. Tak otrzymany roztwór NaOH zmieszano z roztworem Na_2SiO_3 . Stosunek roztworów krzemianu sodu do

granulowanego żużla wielkopiecowego, popiołu lotnego i metakaolinu jest w rozwoju alternatywnych spoiw do cementu portlandzkiego. Jedną z możliwych alternatyw jest użycie aktywowanego spoiwa z wykorzystaniem odpadów przemysłowych zawierających materiały krzemowe. W 1978, Davidovits zaproponował, że spoiwa mogą być produkowane przez reakcję polimerową alkalii z krzemem i glinem z materiałów geologicznych lub odpadów przemysłowych takich jak popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy [GGBFS]². Nazwał te spoiwa geopolimerami (2)³. Najbardziej rozpowszechnionymi odpadami przemysłowymi używanymi jako materiały wiążące są popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy (3-4). Wiele publikacji opisuje geopolimerowe pasty i geopolimerowe materiały. Biorąc pod uwagę dotychczasowe prace badawcze, obecne badania miały na celu zbadanie wpływu popiołu lotnego, GGBFS i roztworu wodorotlenkowego na właściwości mechaniczne geopolimerowego betonu. Proponuje się parametr nazywany „Wskaźnik Spoiwowy”, który służy do ilościowego określenia wpływu wiążących na wytrzymałość geopolimerowego betonu wytwarzanego w temperaturze otoczenia.

2. Experimental

The experimental program consisted of the geopolymer concrete strength determination by casting and testing cubes of size 100 mm, cylinders of size 100 mm x 200 mm, as well as bars of size 100 mm x 100 mm x 500 mm. Five different fly ash to GGBFS proportions [100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100] were used. 8 molar sodium hydroxide solution was used throughout the experimental investigation as an alkaline activator. Alkaline liquid activator/fly ash ratio was taken as 0.36. Fine aggregate / total aggregate ratio was taken as 32 %. Three identical specimens for each variation were cast and tested for 7 days and 28 days of ambient curing.

2.1. Materials

Fly ash was obtained from Kothagudem Thermal Power Station, Bhadradi Kothagudem Dist, Telangana, India. GGBFS was obtained from Blueway Exports supplier, from Vijayawada, Andhra Pradesh, India. Specific gravity of FA and GGBFS were 2.17 and 2.90 respectively. Chemical composition of FA and GGBFS are shown in Table 1. Natural river sand conforming to grading zone II of IS 383:1970 was used. Specific gravity and fineness modulus of sand used were 2.32 and 2.81 respectively. Coarse aggregate of maximum size 12 mm from local source was used. Sodium hydroxide activator was prepared using sodium hydroxide pellets and potable water. The NaOH solution thus prepared was mixed with Na_2SiO_3 solution. The ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide solution was fixed as 2.5 (5). The mixture was stored for 24 hours at room temperature before casting. Superplasticizer Conplast SP-430 was used to obtain the desired workability.

Komentarz Redakcji:

² Możliwość produkcji spoiwa z granulowanego żużla wielkopiecowego aktywowanego NaOH zaproponował w roku 1907 Kühl i otrzymał na to patent http://www.uni-weimar.de/Bauing/fib/forschung/eng-fo_shz.thm

Editorial comments:

² the production of binder of GGBFS activated with NaOH was found by Kühl in 1907 http://www.uni-weimar.de/Bauing/fib/forschung/eng-fo_shz.thm

³ Name “geopolimer” was introduced by Gluckovsky in his book: Activated slag binder, 1961 [in Russian].

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO I ŻUŻLA, % MASOWY

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH AND GGBFS, PERCENT BY MASS

Material/ / Surowiec	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	LOI
Fly ash	60.12	26.63	4.22	0.32	4.1	1.21	0.2	0.85
GGBFS	34.16	20.1	0.81	0.88	32.8	7.69	nd	nd

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY MIESZANEK BETONÓW GEOPOLIMEROWYCH

GEOPOLYMER CONCRETE MIX PROPORTIONS

FA:GGBFS	Molarity Stężenie, mol/dm ³	Geopolymer concrete mix proportions / Składy mieszanek betonów geopolimerowych, kg/m ³							
		Coarse aggregate Kruszywo grube	Fine aggregate Kruszywo drobne	Fly ash Popiół lotny	GGBFS	NaOH solution Roztwór NaOH	Sodium silicate Krzemian sodu	Superplasticizer (2% of the binder) Superplastyfikator (2% masy spoiwa)	Extra water (7.5% of the binder) Dodatkowa woda (7,5% masy spoiwa)
100:0	8	1100	517.45	575.2	0	59.10	148.25	11.50	43.15
75:25	8	1100	517.45	431.4	143.8	59.10	148.25	11.50	43.15
50:50	8	1100	517.45	287.6	287.6	59.10	148.25	11.50	43.15
25:75	8	1100	517.45	143.8	431.4	59.10	148.25	11.50	43.15
0:100	8	1100	517.45	0	575.2	59.10	148.25	11.50	43.15

wodorotlenku sodu ustalono na 2,5 (5). Roztwory przygotowano 24 godziny przed formowaniem i przechowywano w temperaturze otoczenia. Odpowiednią urabialność uzyskano stosując superplastyfikator Conplast SP-430.

2.2. Skład betonów

Składy mieszanek betonów geopolimerowych zamieszczono w tablicy 2.

2.3. Formowanie próbek z betonu geopolimerowego

Składniki stałe betonu geopolimerowego [BGP], czyli kruszywo i popiół lotny mieszano na sucho przez około trzy minuty. Ciekłe składniki mieszanek, czyli roztwór zasadowy, wodę i superplastyfikator, zostały wstępnie zmieszane, a następnie dodane do składników stałych i mieszanie kontynuowano przez kolejne cztery minuty. Mieszaniny miały zwykle dużą gęstość. Urabialność świeżego betonu badano metodą opadu stożka. Próbki formowano w trzech warstwach składających się z 25 porcji każda, a następnie zagęszczano na stoliku wstrząsowym przez dziesięć sekund. Próbki rozformowano po 24 godzinach i przetrzymywano w warunkach otoczenia.

Badano wytrzymałość na ściskanie, na zginanie przy rozłupywaniu i na zginanie za pomocą uniwersalnej prasy, o maksymalnym obciążeniu 1000 kN. Obciążenie zwiększano stopniowo ze stałą prędkością, aż do zniszczenia próbki. Belki zginano przy obciążeniu dwupunktowym (zginanie czteropunktowe). Wyniki rejestrowano zgodnie z normą IS 516-1956 (6). Przygotowywano po trzy próbki z każdego betonu, które badano po 7 i 28 dniach dojrzewania, w warunkach otoczenia. Łącznie 30 kostek, 30 próbek

2.2. Mix proportions

The geopolymer concrete mix proportions are shown in Table 2.

2.3. Casting of geopolymer concrete specimens

The solids constituents of the GPC, i.e. the aggregates and the fly ash were dry mixed for about three minutes. The liquid part of the mixtures, i.e. the alkaline solution, added water, and the superplasticiser, were premixed then added to the solids. The wet mixing was continued for another four minutes. The fresh geopolymer concrete was dark in colour and shiny in appearance. The mixtures were usually very cohesive. The workability of the fresh concrete was measured by means of the conventional slump test. Compaction of fresh concrete in the moulds was done by applying 25 manual strokes per layer in three equal layers, followed by compaction on a jolting table for ten seconds. The moulds were demoulded after 24 hours and kept for ambient curing.

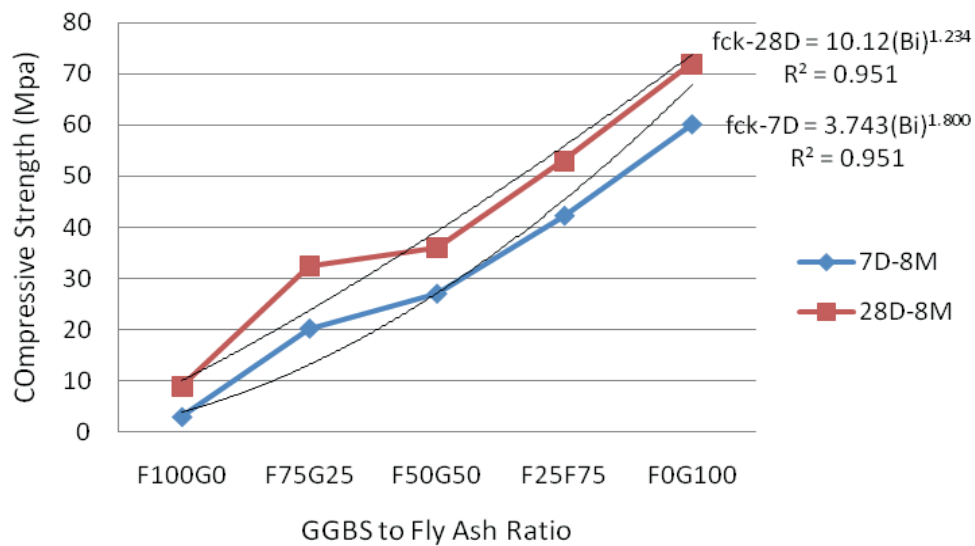
The GPC specimens for compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture were tested on universal testing machine of capacity 1000kN. The load was increased gradually at constant rate until failure. The prisms were tested under two point loading for modulus of rupture. The maximum loads applied on various specimens were recorded as per IS 516-1956 (6). Three identical specimens of a given composition were cast and tested after 7 days and 28 days of ambient curing. A total of 30 cubes, 30 cylinders and 30 prisms using different GGBFS to FA ratios and 8 molar alkaline activator were cast and tested after 7 days and 28 days of ambient curing. The test results are given in Table 3. The 'Binder Index [Bi]' has been used to study the combined effect of

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE, WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

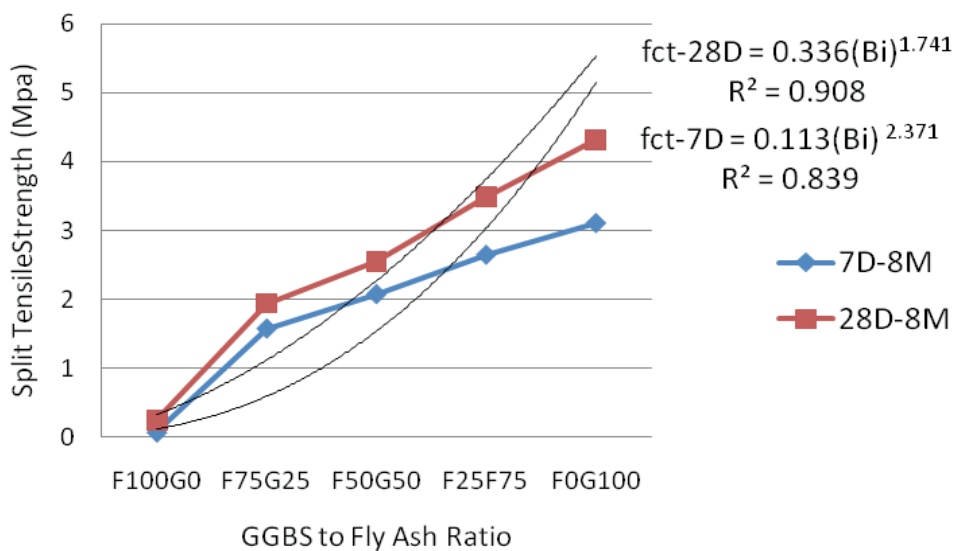
GPC COMPRESSIVE STRENGTH, SPLITTING TENSION STRENGTH AND MODULUS OF RUPTURE FOR GPC

FA: GGBFS	Binder Index [Bi] Wskaźnik spoiwowy [WS]	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, MPa			Splitting tension strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, MPa			Modulus of rupture Wytrzymałość na zginanie, MPa		
		7D	28D	7D/28D	7D	28D	7D/28D	7D	28D	7D/28D
100:0	0	2.95	8.8	0.33	0.06	0.24	0.25	0.70	0.94	0.74
75:25	2	20.2	32.4	0.62	1.57	1.94	0.80	1.60	2.25	0.71
50:50	4	27.0	36.0	0.75	2.07	2.55	0.81	3.78	4.89	0.77
25:75	6	42.2	53.0	0.79	2.64	3.49	0.75	4.50	6.2	0.72
0:100	8	60.0	72.0	0.83	3.10	4.32	0.71	5.78	7.31	0.79



Rys. 1. Wpływ stosunku żużla do popiołu lotnego na wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego

Fig. 1. Effect of GGBFS to fly ash ratio on compressive strength of GPC



Rys. 2. Wpływ stosunku żużla do popiołu lotnego na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu geopolimerowego

Fig. 2. Effect of GGBFS to fly ash ratio on splitting tension strength of GPC

cylicydrycznych i 30 belek o r33nych stosunkach 3u33la do popiołu lotnego z aktywatorem sodowym o stę33zeniu 8-moli. Wyniki badań zamieszczono w tablicy 3. Aby określić wzajemne interakcje 3u33la z popiołem przy stałym dodatku aktywatora, zastosowano czynnik nazwany „Wskaźnik Spoiwowy” [WS] (7).

$$\text{Wskaźnik Spoiwowy} = \text{Stę33zenie molowe} \times [\text{G}\ddot{Z}\text{W}/(\text{G}\ddot{Z}\text{W} + \text{PL})]$$

3. Wyniki

Zależność wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie przy rozłupywaniu i wytrzymałości na zginanie od wzajemnych proporcji 3u33la i popiołu lotnego pokazano na rysunkach 1 - 3.

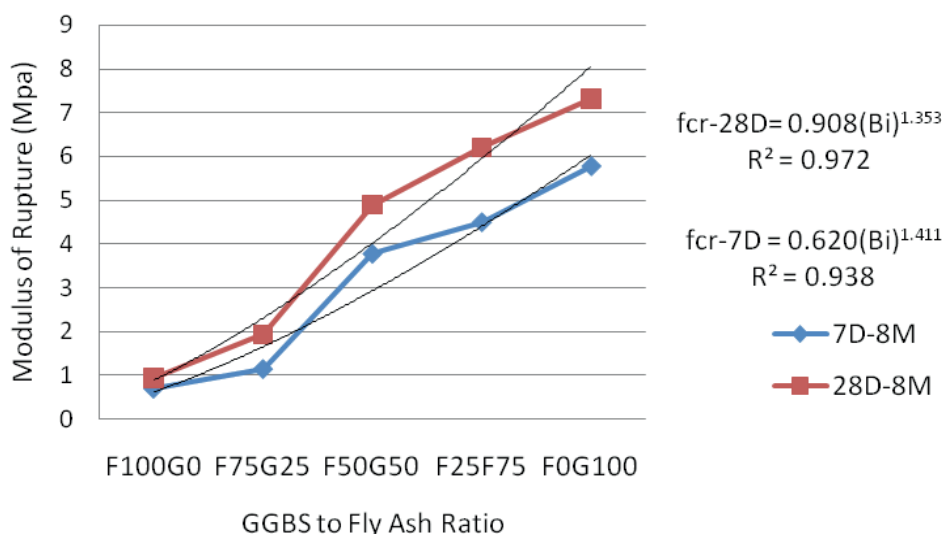
GGBFS to fly ash ratio at fixed molar concentration of activator solution (7).

$$\text{Binder Index} = \text{Molarity} \times [\text{GGBFS} / (\text{GGBFS} + \text{Fly Ash})] \quad [1]$$

3. Results

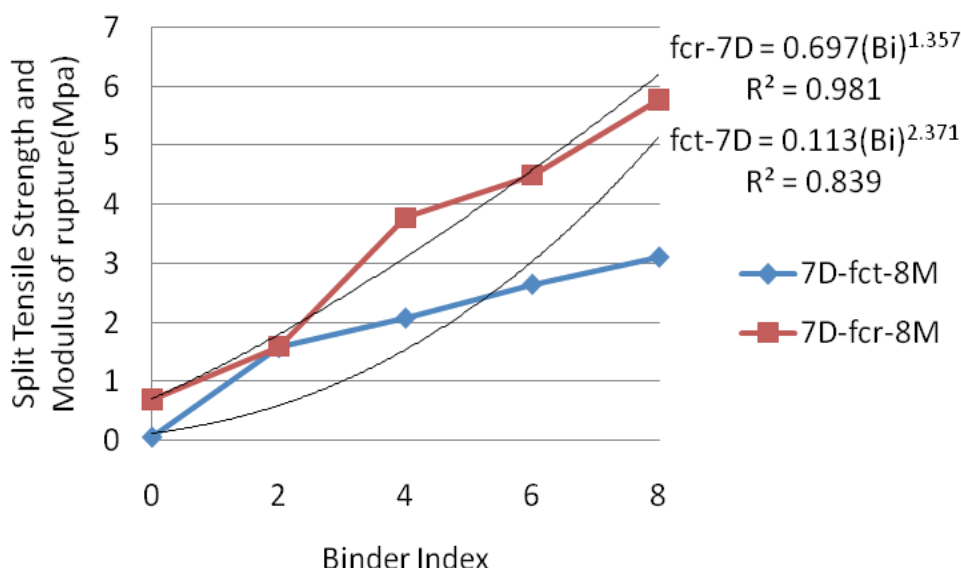
The variation of compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture with GGBFS to fly ash proportions are shown in Figs. 1 – 3.

The compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture for geopolymer concrete are increasing with increase in



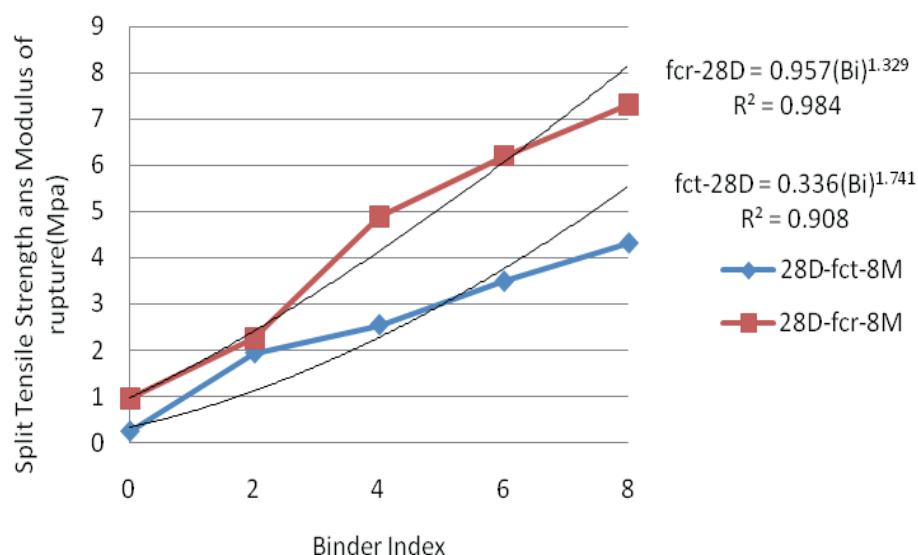
Rys. 3. Wpływ stosunku 3u33la do popiołu lotnego na wytrzymałość na zginanie betonu geopolimerowego

Fig. 3. Effect of GGBFS to fly ash ratio on modulus of rupture of GPC



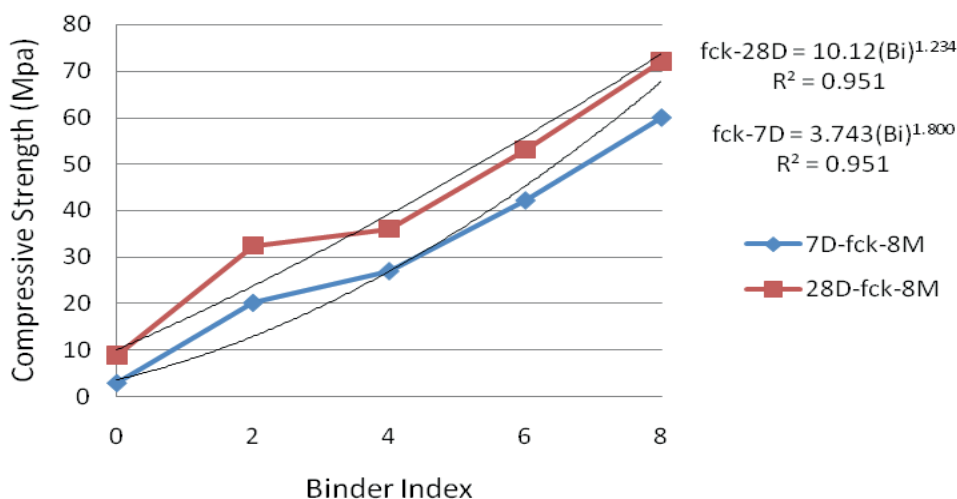
Rys. 4. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i na zginanie od Wskaźnika Spoiwowego betonu geopolimerowego po 7 dniach dojrzewania

Fig. 4. Effect of Binder Index on splitting tension strength and modulus of rupture of GPC after 7 days of curing



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i na zginanie od Wskaźnika Spoiowego betonu geopolimerowego po 28 dniach dojrzewania

Fig. 5. Effect of Binder Index on splitting tension strength and modulus of rupture of GPC after 28 days of curing



Rys. 6. Wpływ Wskaźnika Spoiowego na wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego

Fig. 6. Effect of Binder Index on compressive strength of GPC

Wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozłupywanie i wytrzymałość na zginanie betonu geopolimerowego wzrastają wraz ze wzrostem udziału żużla, a zwiększenie wytrzymałości jest większe, jeśli stosunek żużla do popiołu jest większy niż 1.

Zależność wytrzymałości na ściskanie, na zginanie przy rozłupywaniu i na zginanie od Wskaźnika Spoiowego [WS] pokazano na rysunkach 4-6.

Wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu, a także wytrzymałość na zginanie betonu geopolimerowego wzrasta wraz ze zwiększaniem Wskaźnika Spoiowego, a ten przyrost jest większy, gdy Wskaźnik Spoiowy przekracza 4.

GGBFS proportion and the increase in strength is higher beyond GGBFS to fly ash ratio 1.

The effect of binder index on splitting tension strength, modulus of rupture and compressive strength are shown in Figs. 4-6.

The compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture for geopolymer concrete are increasing with the increase of Binder Index, and this increase is higher for Binder Index ratio above 4.

4. Conclusions

Based on the experimental results of this investigation, the following conclusions are drawn:

4. Wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Wytrzymałość na ściskanie, na zginanie przy rozłupywaniu i na zginanie betonu geopolimerowego, wzrastała wraz ze wzrostem udziału żużla w mieszance.
2. Przyrost wytrzymałości na ściskanie, na zginanie przy rozłupywaniu i na zginanie betonu geopolimerowego jest bardzo szybki do 7 dni dojrzewania i następnie zmniejsza się wraz z wiekiem betonu.
3. Wytrzymałość betonu geopolimerowego zwiększa się wraz ze zwiększaniem się Wskaźnika Spoiwowego, a przyrost jest większy dla wartości wskaźnika większego niż 4.
4. Mieszanka żużla i popiołu może być wykorzystana do produkcji betonu geopolimerowego, bez potrzeby obróbki termicznej.
5. Wytrzymałość na ściskanie, na zginanie przy rozłupywaniu i na zginanie betonu geopolimerowego rośnie wraz ze wzrostem udziału żużla, a przyrost wytrzymałości jest większy, gdy stosunek żużla do popiołu lotnego przekracza 1.

1. The compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture of geopolymer concrete is increasing with the increase in GGBFS proportion in the mix.
2. The rate of gain in compressive strength, splitting tension strength and flexural strength of geopolymer concrete is very fast at 7 days curing period and the rate is decreasing with age.
3. The strength of geopolymer concrete is rising with the increase of the Binder Index value and this increase is effective above binder index value 4.
4. Fly ash and GGBFS combination can be used for the production of GPC without the need of heat curing.
5. The compressive strength, splitting tension strength and modulus of rupture for geopolymer concrete are increasing with the rise in GGBFS proportion and the increase in strength is higher beyond GGBFS to fly ash ratio 1.

Literatura / References

1. V.M. Malhotra, Making Concrete Greener with Fly ash. *Concr. Internat.* **21**, 61-66 (1999).
2. J. Davidovits, The Need to Create a New Technical Language for the Transfer of Basic Scientific Information, *Proc. Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information Symposium*, Luxembourg (1981).
3. D. Ravikumar, S. Peethamparan, N. Neithalath, Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder, *Cem. Concr. Comp.* **32**, 399-410 (2010).
4. J.E. Oh, P.J.M. Monteiro, S.S. Jun, S. Choi, S.M. Clark, The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers, *Cem. Concr. Res.* **40**, 189-196 (2010).
5. R. Anuradha, et al, Modified Guide lines for Geopolymer concrete mix design using Indian standard, *Asian J. Civil Eng.*, **13**, 353-364 (2012)
6. IS516-1956, Indian standard methods of Test for Strength of Concrete.
7. D.Rama Seshu, R.Shankaraiah, B.Sesha Srenivas, A study on the effect of Binder index on compressive strength of Geopolymer concrete, *Cement Wapno Beton* **84**, 211-215 (2017).