

Składy mieszanek z betonu geopolimerowego

Mix proportioning of geopolymer concrete

Słowa kluczowe: Beton geopolimerowy, aktywator alkaliczny, wytrzymałość na ściskanie, zewnętrzne warunki twardnienia, geopolimeryzacja, projektowanie mieszanek.

Keywords: Geopolymer Concrete, Alkaline activator, Compressive Strength, Outdoor curing, Geopolymerisation, Mix design.

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem infrastruktury oraz sprzyjającą koniunkturą w sektorze mieszkaniowym, rośnie także zapotrzebowanie na cement. W związku z wymaganiami związanymi z ochroną środowiska w przemyśle cementowym, pojawia się potrzeba korzystania z alternatywnej zrównoważonej technologii. Rozwój alkalicznie aktywowanych spoiw o ulepszonych właściwościach fizycznych i dłuższej trwałości stał się alternatywą dla zwykłego cementu portlandzkiego. Geopolimery to nowa klasa materiałów cementowych, która może być nowoczesną generacją betonu do zastosowań w infrastrukturze cywilnej. Ta innowacyjna technologia otwiera nowe możliwości dla zrównoważonego rozwoju budownictwa w nadchodzących dekadach i może być pomocna w budowaniu trwałych konstrukcji.

Materiały te mogą zastąpić klasyczne spoiwa w betonie, stanowiącego główny materiał konstrukcyjny. Podstawową zaletą cementu geopolimerowego jest zmniejszenie oddziaływania na środowisko naturalne, a więc zapewnienie zrównoważonego rozwoju, który jest definiowany jako optymalne i efektywne wykorzystanie zasobów naturalnych w celu zapewnienia przyszłym pokoleniom możliwości dalszego z nich korzystania. Zagadnienie to obejmuje mniejszą emisję dwutlenku węgla, efektywniejsze wykorzystanie zasobów mineralnych, pełniejsze wykorzystanie surowców wtórnych oraz długą trwałość wytwarzanych nowych materiałów konstrukcyjnych, związaną z ich właściwościami fizycznymi i chemicznymi.

Davidovits, (1)¹ opisał wykorzystanie przemysłowych produktów ubocznych takich jak popiół lotny i zmielony granulowany żużel wielkopiecowy jako spoiwa oraz alkalicznych roztworów jako aktywatorów. Powszechnie stosowaną kombinacją roztworu alkalicznego jest NaOH i Na₂SiO₃. Roztwór ten jest aktywatorem dla podanych wyżej materiałów odpadowych, które mogą stanowić

¹ Kühl w 1907 opisał możliwość produkcji spoiwa zawierającego granulowany żużel wielkopiecowy i NaOH

1. Introduction

With the growth in infrastructure development and boom in the housing sector, the demand for cement is bound to increase. Due to environmental demands of cement industry, there arises a strong need to make use of alternative sustainable technology. The development of alkali activated binders with superior engineering properties and longer durability has emerged as an alternative to ordinary Portland cement [OPC]. Geopolymer is an emerging class of cementitious material and could be the next generation concrete for civil infrastructure applications. This innovative technology provides a new platform for sustainable growth of our urban society in the coming decades and can help in building durable structures.

These materials can replace classic binders in concrete as a major construction material. The main benefit of geopolymer cement is reduction in environmental impacts to move towards sustainable development which is defined as the optimum usage with correct and efficient operation of basic and natural resources for providing the requirements of future generation. This includes less emission of carbon dioxide; a more efficient use of mineral and material resources; increase the use of recycled materials and issues the long-term durability by the mechanical properties of these novel materials studied.

Davidovits, (1)¹ reported the use of industrial by-products like fly ash and GGBS as binders and high alkaline solution as activators. The commonly used combination of alkaline solution is NaOH and Na₂SiO₃. This solution is an activator for aforementioned waste materials, which are binders and together with aggregates in mixture form geopolymer concrete (GPC) which has high strength, durability and low shrinkage (2). The alkaline solution activates glass components silica and alumina in siliceous fly ash to form calcium aluminosilicate hydrate and calcium silicate hydrate (C-S-H), as a reaction with calcium ions released from GGBS. The

¹ In 1907 Kühl described possibility of production of binder containing ground granulated blast furnace slag and NaOH

spoiwa i mieszane z kruszywem tworzyć beton geopolimerowy [GPC], który ma dużą wytrzymałość, dobrą trwałość oraz mały skurcz (2). Roztwór alkaliczny aktywuje krzemionkę i glin w szkłe, w krzemionkowym popiele lotnym, które w wyniku reakcji z jonami wapnia uwolnionymi z granulowanego żużla wielkopieczowego, powodują powstawanie uwodnionego krzemianu wapnia [C-S-H]. Warunki dojrzewania, a przede wszystkim temperatura, mają duży wpływ na te reakcje (3). Hardjito i in. (4) stwierdzili, że kombinacja roztworów wodorotlenku sodu i krzemianu sodu może stanowić dobry aktywator, a większe stężenie wodorotlenku sodu i wyższa temperatura dojrzewania, zapewnia dobrą 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, przy stałej zawartości spoiwa. Pinto (5) i Rangan, (6) podali metody projektowania mieszanki betonu geopolimerowego z popiołem lotnym, a Anuradha i in., (7) zaproponowali zmiany w normie indyjskiej dostosowując ją do GPC. Jarvis R. Black (8) przeprowadził badania betonu geopolimerowego z popiołem lotnym biorąc pod uwagę różne proporcje mieszanek i zmieniając przy projektowaniu mieszanki betonowej stosunek woda/geopolimer oraz stosując dwa stężenia molowe NaOH, a mianowicie 8 moli/L i 12 moli/L. Okazało się, że dużym problemem było błyskawiczne wiązanie występujące w przypadku tych mieszanek GPC (8). Celem doświadczeń Talha Junaid i in. (9), którzy badali beton geopolimerowy z popiołem lotnym krzemionkowym, stosując krzemian sodu i wodorotlenek sodu jako aktywatory alkaliczne, było określenie właściwości GPC. Czynniki wpływającymi na urabialność i wytrzymałość GPC były: stosunek woda/spoiwo, stosunek roztwór alkaliczny/popiół lotny oraz stosunek roztwór alkaliczny/woda zarobowa. Czynniki te były przydatne do określenia składu mieszanki betonowej. Subhash i in. (10) opisali wykorzystanie popiołu lotnego jako składnik spoiwa do produkcji GPC z dodatkiem alkalicznego roztworu.

W niniejszej pracy zaprojektowano kilka mieszanek dla normalnej i średniej klasy GPC, przy zmiennych zawartościach popiołu lotnego i wody, rozdrobnienia kruszywa drobnego i stosunku kruszywa drobnego do całkowitej zawartości kruszywa. Natomiast zachowano stały stosunek krzemianu sodu do wodorotlenku sodu wynoszący 1 oraz stężenie molowe wodorotlenku sodu na poziomie 3, w przypadku wszystkich mieszanek.

W odniesieniu do poprzednich prac dotyczących GPC, celem niniejszej pracy było zbadanie następujących czynników: rodzaju spoiwa, jego zawartości oraz stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo. Stosunek krzemianu sodu do wodorotlenku sodu utrzymano na poziomie 2,5, a stężenie molowe NaOH wynosiło 8 moli/L. Doświadczenia miały na celu zbadanie wpływu tych czynników na wytrzymałość i trwałość betonu geopolimerowego.

2. Znaczenie badań

Chociaż wielu naukowców prowadziło badania betonu geopolimerowego, do dzisiaj nie opracowano odpowiedniej mieszanki

curing conditions, especially temperature, have significant impact on these reactions (3). Hardjito et al. (4) stated that a combination of sodium hydroxide and sodium silicate solutions can be a good activators and higher concentration of sodium hydroxide solution and curing temperature assure the higher concrete compressive strength. Different 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. Pinto (5) and Rangan, (6) proposed a mix design methodology for geopolymer concrete with fly ash and Anuradha et al., (7) suggested modifications in Indian Standard code for suitability of GPC. Jarvis R. Black (8) carried out research on fly ash based geopolymer concrete considering different mix proportions and developed a mix design process by varying the water to geopolymer ratio with two different molarities of NaOH i.e. 8 moles/L and 12 moles/L. The conclusion of this work was that the flash set was a significant problem for GPC mixes (8). The goal of Talha Junaid et al. (9) experiments on siliceous fly ash based geopolymer concrete, by selecting the sodium silicate and sodium hydroxide as alkaline activators, was the determination of GPC properties. The parameters influencing strength and workability of GPC were: water to binder ratio, alkaline solution to fly ash ratio and alkaline solution to water ratio.

These relations were useful for determining the composition of concrete mix. Subhash et al. (10) reported the utilization of fly ash as the binder component for the preparation of GPC mix with high alkaline solution addition. A mix design procedure was proposed for normal and standard grade GPC, varying the ingredients such as quantity of fly ash and water, grading of fine aggregate, fine aggregate to total aggregate ratio, by maintaining sodium silicate to sodium hydroxide ratio as 1 and sodium hydroxide molarity as 3, for all mixes.

With respect to the previous works with GPC, the present research work goal is examination of the following parameters: type of binder, binder content, alkaline solution/binder ratio. The ratio of sodium silicate to sodium hydroxide was kept at 2.5 with molarity of NaOH as 8 moles/L and the mass ratio of SiO_2 to Na_2O of the sodium silicate solution is 2.61 ($\text{SiO}_2 = 30.0\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 11.5\%$ and water = 58.5%). The investigation aims in studying the influence of these parameters on strength and durability properties of geopolymer concrete.

2. Research significance

Though many researchers carried out works on geopolymer concrete, a proper mix design was not developed till date with both siliceous fly ash and GGBS. A proper quantification for geopolymer concrete components is necessary to design GPC for practical applications. This research presents a mix design method of geopolymer concrete. The developed method quantifies the suitable binder type, content and proportion (fly ash and GGBS), alkaline solution/binder ratio and aggregate content.

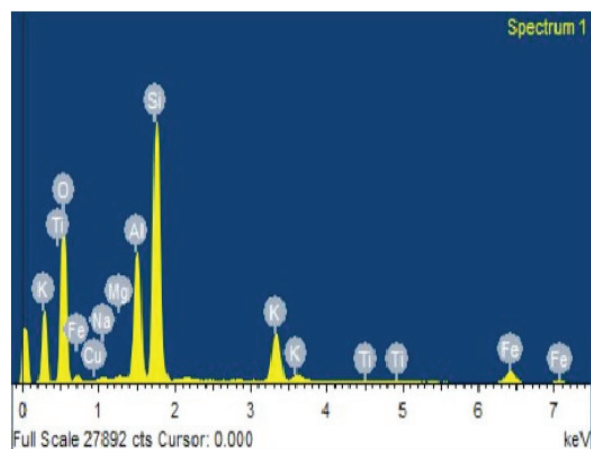
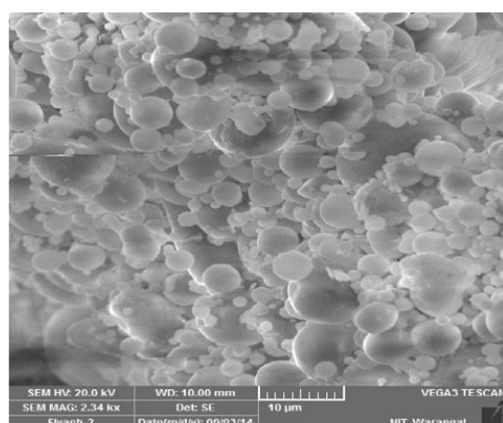
zawierającej krzemionkowy popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy. Prawidłowe określenie proporcji tych składników w betonie geopolimerowym jest konieczne do uzyskania GPC o dobrej wytrzymałości i trwałości do różnych konstrukcji budowlanych. W pracy przedstawiono metodę projektowania mieszanki z betonu geopolimerowego. Opracowana metoda określa ilościowo odpowiedni rodzaj spoiwa, jego zawartość i proporcje popiołu lotnego do granulowanego żużla wielkopiecowego, stosunek roztworu alkalicznego do spoiwa oraz zawartość kruszywa.

3. Program badań

3.1. Materiały

Zastosowano następujące materiały do badań:

Krzemionkowy popiół lotny i granulowany żużel wielkopiecowy zastosowano jako spoiwo. Granulowany żużel wielkopiecowy pochodził z GGBS 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. Skład chemiczny podano w tablicy 1. Mikrostrukturę popiołu lotnego i żużla zbadano pod elektronowym mikroskopem skaningowym. Ziarna popiołu lotnego miały kulisty kształt. Krzemionkowy popiół lotny ma dużą zawartość krzemionki



Rys. 1. Mikrostruktura i skład popiołów lotnych na podstawie analiz SEM i EDXA

Fig. 1. Microstructure and composition of fly ash on the basis of SEM and EDXA

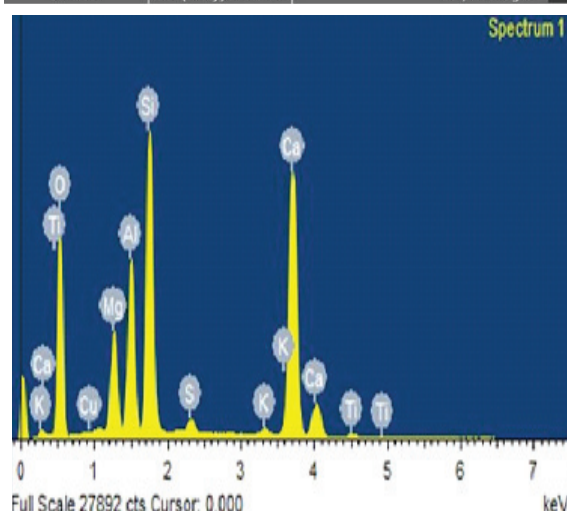
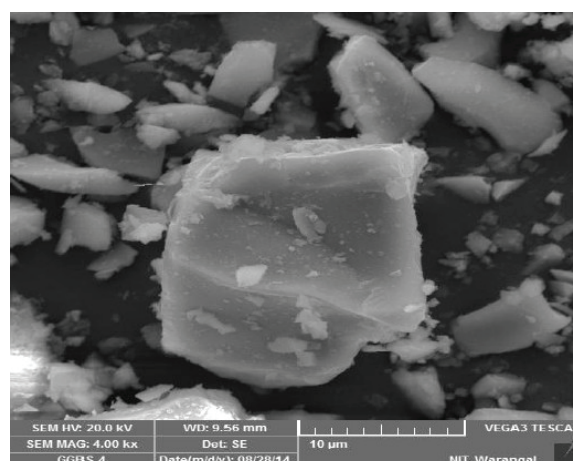
3. Experimental program

3.1. Materials

Materials used in the present investigation were the following:

Siliceous fly ash and GGBS are used as binders. GGBS is provided from Toshali Cements Pvt Ltd, Bayyavaram, India and fly ash from National thermal power plant, Ramagundam, India. The specific gravity of GGBS and fly ash are 2.90 and 2.17 respectively. Chemical composition is shown in Table 1. The microstructure of fly ash and GGBS were examined using Scanning Electron Microscope (SEM). Fly ash particles were spherical in shape. The siliceous fly ash is mainly rich in silica and alumina [Fig. 1.]. The mineralogical characterization of fly ash and GGBS sample has been carried out for the X-Ray diffraction analysis which has been shown in [Fig. 2.] The XRD pattern of GGBS shown in figure containing the 95% of glass content. With the help of the glass content in slag hydraulic activity can be known. Fly ash contains quartz and mullite and glass halo means the large content of this phase.

Fine Aggregate: The nearby river sand conforming to Zone-2 according to IS: 383 (11) is used as fine aggregate. The specific gravity and bulk density of sand are 2.65 and 1.45 g/cm³ respectively.



Rys. 2. Mikrostruktura i skład granulowanego żużla wielkopiecowego na podstawie analiz SEM i EDXA

Fig. 2. Microstructure and composition of GGBS on the basis of SEM and EDXA

i tlenku glinu [tablica 1.]. Analizy rentgenograficzne popiołu i żużla [rysunek 2.] wykazały, że zawartość szkła w żużlu powinna wynosić co najmniej 95%, natomiast popiół zawiera głównie kwarc i mullit oraz nieznaczną ilość kalcytu. Podniesienie tła wskazuje na zawartość szkła.

Jako kruszywo drobne zastosowano okoliczny piasek rzeczny należący do kategorii 2 zgodnie z normą indyjską IS: 383 [a]. Ciężar właściwy i gęstość nasypowa piasku wynosiły odpowiednio 2,65 i 1,45 g/cm³.

Granit łamany o średnicy ziarna wynoszącej 20 mm, otrzymany od lokalnego przedsiębiorstwa zajmującego się kruszeniem surowców, zastosowano jako kruszywo grube, zgodne z normą indyjską IS: 383 [a]. Jego ciężar właściwy i gęstość nasypowa wynosiły odpowiednio 2,80 i 1,5 g/cm³.

Do przygotowania roztworu alkalicznego użyto wody pitnej. Superplastyfikatorem zastosowanym w badaniach był sulfonowany kondensat naftalenowo-formaldehadowy.

3.2. Przygotowanie roztworu alkalicznego

W celu zbadania właściwości betonu geopolimerowego przygotowano roztwór NaOH o stężeniu wynoszącym 8 moli/L. Stosunek roztworu krzemianu sodu do roztworu wodorotlenku sodu był stały i wynosił 2,5, a przygotowany roztwór przechowywano przez 24 godziny w temperaturze pokojowej [25±2°C] przed jego użyciem, ponieważ rozpuszczenie NaOH w wodzie jest reakcją egzotermiczną a wydzielanie ciepła może wpłynąć na zachowanie się betonu.

3.3. Proporcje mieszanki

Metodę projektowania zwykłego betonu przystosowano do betonu geopolimerowego, tak więc projekty mieszanki dostępne w literaturze zastosowano jako wytyczne, a nowe mieszanki zaprojektowano z uwzględnieniem norm indyjskich, podobnie jak dla zwykłego betonu. W większości badań wykonanych do dzisiaj, w procesie dojrzewania wykorzystano aktywację cieplną. W trakcie niniejszych badań, zastosowano dojrzewanie na dworze [35°C] aby stwierdzić czy możliwe jest uzyskanie odpowiednich właściwości mechanicznych betonu geopolimerowego w takich warunkach. Przechowywanie na dworze jest konieczne do stworzenia warunków analogicznych do formowania „in situ”. Kilka doświadczeń przeprowadzono uwzględniając podstawowe kryterium do opracowania składu betonu, którą była średnia wytrzymałość na ściskanie wynosząca około 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa i 50 MPa po 28 dniach przechowywania próbek na dworze oraz przy mniejszym stężeniu alkalicznego roztworu.

3.4. Przygotowanie próbek

Suche składniki betonu mieszano w odpowiednich proporcjach 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 5 do 7 minut, po czym wykonano badania w celu zapewnienia odpowiedniej urabialności

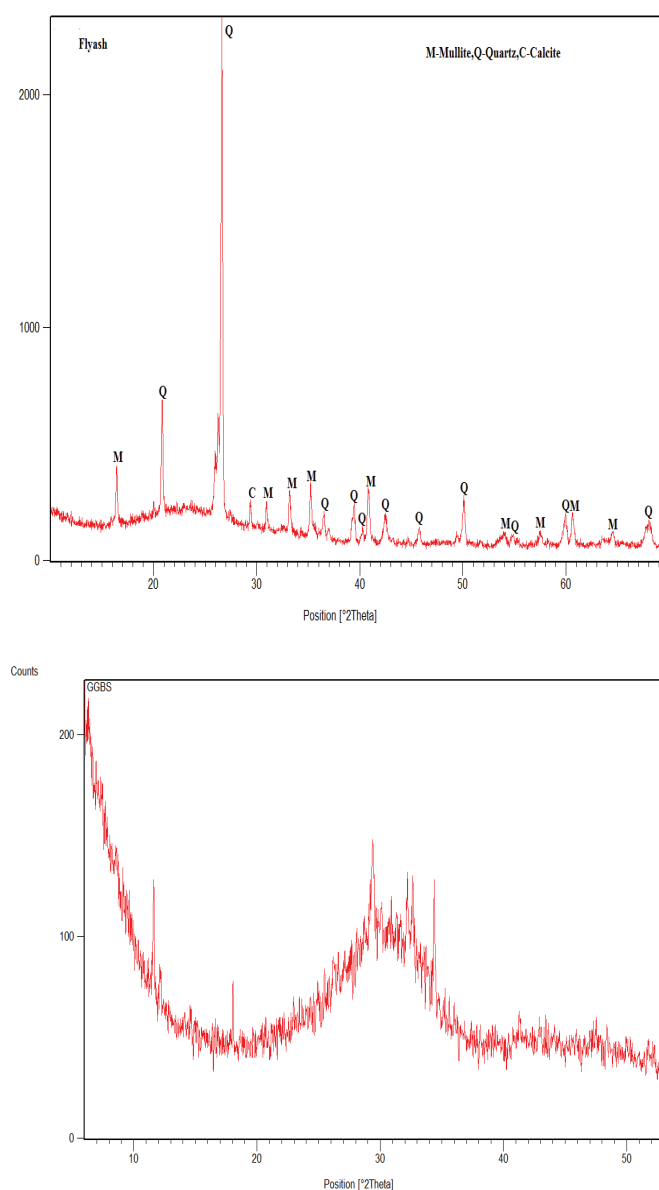
Tabela 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU LOTNEGO I ŻUŻLA [% MASOWE]

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH AND GGBS [% BY MASS]

Składnik Constituent	Popiół lotny Fly ash	Żużel wielkopiecowy GGBS
SiO ₂	60.11	34.06
Al ₂ O ₃	26.53	20
Fe ₂ O ₃	4.25	0.8
SO ₃	0.35	0.9
CaO	4.00	32.6
MgO	1.25	7.89
Na ₂ O	0.22	nd*
Straty prażenia / LOI	0.88	nd*

*nd – nie określone / non determined



Rys. 3. Dyfraktogramy popiołu lotnego (u góry) i żużla wielkopiecowego (na dole)

Fig. 3. XRD pattern of fly ash (upper) and GGBS (bottom)

mieszanki betonowej. Czas mieszania oraz formowanie próbek były takie same dla wszystkich mieszanek, przy czym utrzymywano stałą konsystencję mieszanek betonowych. Natychmiast po zakończeniu mieszania, świeży beton zaformowano, po czym formy wibrowano na stole wibracyjnym przez 45 sekund. Po 24 godzinach próbki rozformowano i przechowywano na zewnątrz przez odpowiedni czas dojrzewania.

3.5. Dojrzewanie betonu geopolimerowego

Sposób dojrzewania betonu geopolimerowego zależy od składu spoiwa zastosowanego w mieszance. Dojrzewanie w podwyższonej temperaturze jest zazwyczaj konieczne w przypadku gdy spoiwo stanowi jedynie popiół lotny krzemionkowy, co oznacza spoiwo o małej zawartości wapnia. Większość mieszanek w tych badaniach zawiera w swojej matrycy żużel i z tego powodu dojrzewanie na zewnątrz jest wystarczające. Czas wiązania betonu geopolimerowego zależy od wielu czynników takich jak skład roztworu alkalicznego oraz stosunku roztworu alkalicznego do zawartości masowej spoiwa [popiół lotny i żużel]. W trakcie przechowywania na zewnątrz, próbki pozostawiono na świeżym powietrzu w temperaturze $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej 75% aż do określonego czasu przeznaczonego na badanie. Nie kontrolowano temperatury i wilgotności.

4. Metody badań

Do badania wytrzymałości na ściskanie przygotowano normowe kostki sześciennie o wymiarach $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, które badano pod naciskiem 3000 kN w maszynie wytrzymałościowej przy normowej szybkości nacisku zgodnej z IS 516 [b]. Wartości wytrzymałości uzyskane po 7 i 28 dniach są średnią z pomiarów trzech kostek sześciennych ściskanych danego dnia.

W niniejszej pracy zbadano wpływ zawartości żużla w spoiwie na wytrzymałość na ściskanie betonu polimerowego, z różnym stosunkiem roztworu alkalicznego do spoiwa. Wytrzymałość na ściskanie kostek zbadano po 28 dniach.

5. Projektowanie składu betonu

5.1. Dane wymagane przy projektowaniu mieszanki

1. Wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego (f_{ck})
2. Należy znaleźć odpowiedni stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo dla wymaganej wytrzymałości docelowej
3. Stosunek kruszywo/spoiwo dla wymaganego F_t [dla wybranego stosunku popiół lotny/żużel]
4. Zawartość spoiwa dla wymaganej docelowej wytrzymałości [dla wybranego stosunku popiół lotny/żużel]
5. Skład roztworu alkalicznego i stosunek roztworu alkalicznego do spoiwa

Coarse Aggregate: Crushed granite of 20 mm nominal size, obtained from a local crushing unit, is used as coarse aggregate which is well graded according to IS: 383 (11). The specific gravity and bulk density are 2.80 and 1.5 g/cm^3 .

Water: Potable water was used in the experiments for preparation of alkaline solution.

Super Plasticizer: Superplasticizer used was sulphonated naphthalene formaldehyde.

3.2. Preparation of Alkaline Solution

For examination of the properties of geopolymer concrete, solution having concentration of NaOH equal 8 moles/L was used. The ratio of sodium silicate solution to sodium hydroxide solution was constant, equal 2.5 and the mixed solution was stored for 24 hours at room temperature ($25\pm 2^{\circ}\text{C}$) before it was used for casting, because dissolution of NaOH in water is an exothermic reaction and a heat evolved can influence the concrete behaviour.

3.3. Mix proportions

A design approach used for ordinary concrete was adopted for geopolymer concrete, thus mix designs found in literature were used as guidelines and new mixes were designed considering Indian Standards, alike ordinary cement concrete. In most of the research done until now, heat activation was used as the curing process. During this study, outdoor curing [35°C] is investigated to conclude whether adequate mechanical properties for the geopolymer concrete can be obtained. Outdoor curing is a necessary model for in-situ casting. However, ample research has been carried out on the hydration process and its relation to ingredients of concrete. Several trials are carried out considering the basic criterion to develop concrete composition of average compressive strength around 20 MPa, 30 MPa, 40 MPa, and 50 MPa at 28 days under outdoor curing and at the lower concentration of alkalis.

3.4. Specimen preparation and casting

The dry ingredients of concrete are mixed in suitable proportions, using a rotating drum type 100 kg capacity pan mixer, the alkaline solution and superplasticizer of optimum dosage are added. Homogenous mixing would be ensured by continuous mixing for 5 to 7 minutes and tests were carried out to ensure proper workability of concrete mix. The mixing time and procedure for all mixes was constant, as far as possible, throughout the mixing period to ensure proper consistency. Immediately after mixing, the fresh concrete was placed into moulds, followed by table vibration for a period of 45 seconds. These moulds were kept undisturbed for 24 hours and the specimens are demoulded after 24 hours and cured in outdoor condition for required curing period.

3.5. Curing of geopolymer concrete

The curing procedure of geopolymer concrete depends on the binder composition used in the mix. Heat curing is usually necessary when only siliceous fly ash is used as the binder, i.e. a low calcium

5.2. Metoda projektowania

Celem tego projektu doświadczalnego jest wyznaczenie minimalnej zawartości spoiwa związanej z odpowiednim stosunkiem roztwór alkaliczny/spoiwo [A/B], która pozwoli na uzyskanie optymalnej wytrzymałości.

Zmienne

Do określenia wpływu składników betonu geopolimerowego na ogólne zachowanie betonu, jako zmienne wybrano zawartość spoiwa [popiół lotny i żużel] oraz stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo.

Wpływ zmiennych doświadczalnych na wytrzymałość rozpatrywano dla dwóch następujących przypadków:

1. wpływ zawartości spoiwa [popiół lotny i żużel] na wytrzymałość,
2. wpływ stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo na wytrzymałość.

5.3. Metody projektowania mieszanek z betonu geopolimerowego

Przy różnych zestawieniach wartości zmiennych, uzyskano kilka wykresów. Wykresy będą przedstawiać różne zależności dla danych zmiennych, tj. zawartości popiołu lotnego i żużla oraz stosunku roztworu alkalicznego do spoiwa, zawartości spoiwa, stosunku kruszywo/spoiwo w przypadku stałej temperatury dojrzewania, okresu dojrzewania i stężenia NaOH. Poszczególne krzywe na wykresach będą odnosić się do stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo dla zmiennych jego wartości, dając przy tym różne wytrzymałości. Na podstawie ustalonych wartości czasu dojrzewania, temperatury dojrzewania oraz stężenia NaOH, dążąc do konkretnej wytrzymałości, z wykresu można ustalić stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo. Wszystkie inne proporcje mieszanek mogą być określone na podstawie wielu innych ustalonych zależności na wykresach i w tablicach. W ten sposób można ustalić proporcje mieszanki GPC dla określonej wytrzymałości.

Krok 1: Obliczenie docelowej wytrzymałości (F_t) = $f_{ck} + 1.65 S_d$

F_t = docelowa średnia wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego po 28 dniach.

f_{ck} = characteristic compressive strength at 28 days.

S_d = standard deviation.

Krok 2: Wyznaczenie stosunku alkalicznego roztworu do spoiwa (al: spoiwo)

Roztwór zasadowy jest sumą mas roztworów krzemianu sodu i wodorotlenku sodu. Natomiast spoiwo stanowi sumę mas popiołu lotnego i żużla. Zastosowano serię czterech stosunków: 0,45; 0,50; 0,55 i 0,60 (dla roztworu zawierającego 8 moli/L mieszniny NaOH + Na_2SiO_3). Widoczna jest zależność: stosunku roztworu zasadowego do spoiwa i wytrzymałości na ściskanie. Stosunek: roztwór alkaliczny do spoiwa jest stosunkiem masowym [spoiwo to suma popiołotnego i żużla] stosowanym w mieszankach geopolimerowego betonu i ma znaczny wpływ na właściwości produkowanego

based binder. The majority of the mixes in this study included slag in the matrix and therefore outdoor curing is sufficient. Setting time of geopolymer concrete depends on many factors such as composition of alkaline solution and ratio of alkaline liquid to binder content (fly ash and GGBS) by mass. For outdoor curing, specimens are left out in outdoor (Air dried) at temperature of $35 \pm 2^\circ$ and relative humidity of 75% up to specified age of testing.

4. Testing methods

4.1. Compressive strength test

For compressive strength tests standard cube specimens of size 150 mm × 150 mm × 150 mm are cast and tested under compression using 3000 kN testing machine at standard rate of loading suggested by IS 516 (12). The strength values reported at 28 days are the average of three cube specimens results.

In the present research the effect of GGBS content in binder on the compressive strength of geopolymer concrete is studied, for different alkaline solution to binder ratios. Compressive strength of the cubes is tested at the age of 28 days.

5. Concrete composition designing

5.1. Data required for mix design

1. Compressive strength of geopolymer concrete (f_{ck})
2. For the required target strength find alkaline solution/binder ratio.
3. Aggregate/binder ratio for the required F_t (for selected fly ash: GGBS ratio)
4. Binder content for the required target strength (for selected fly ash : GGBS ratio)
5. Alkaline solution composition and its ratio to binder

5.2. Designing procedure

The purpose of this experimental project is to identify the minimum binder content associated with an appropriate solution/binder ratio (A/B) that results in optimum strength.

Variables

To determine the effect of geopolymer concrete components on overall concrete behavior binder (fly ash and GGBS) content and alkaline solution to binder ratio were selected as variables.

The effect of the experimental variables on strength is considered in two sections;

1. The effect of binder (fly ash and GGBS) content on strength,
2. The effect of solution/binder ratio on strength.

betonu. Mniejszy stosunek roztworu alkalicznego do spoiwa daje mniejszą wytrzymałość i mieszankę trudniejszą do betonowania. W przypadku tego stosunku wynoszącego 0,45 mieszanka jest zbyt sztywna, a 0,60 ulega segregacji.

Krzywe na rysunkach 4-6 pokazują zmiany wytrzymałości na ściskanie geopolimerowego betonu po 28 dniach twardnienia z różną zawartością popiołu lotnego i żużla granulowanego w funkcji stosunku zasadowy roztwór/spoiwo. Przy stosunku popiół lotny/żużel = 70:30 wytrzymałość na ściskanie betonu wzrasta do stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo równe 0,5. Wytrzymałość ulega powolnemu zmniejszeniu aż do stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo = 0,60.

Natomiast w przypadku stosunku roztwór zasadowy/spoiwo wynoszący 0,50 wytrzymałość wzrasta powoli bez względu na stosunek popiołu lotnego do żużla w spoiwie. Jak to można odczytać z krzywych na rysunku 4 aż do stosunku roztwór zasadowy do spoiwa równy 0,60 wszystkie betony geopolimerowe wykazują zmniejszenie wytrzymałości. Z kolei przy stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo wynoszącym 0,50 zmiany wytrzymałości ulegają odwróceniu, to znaczy wzrastają w przypadku wszystkich betonów z różnymi zawartościami żużla granulowanego i popiołu lotnego. Następnie mieszanki betonowe zawierające w spoiwie od 40% do 50% żużla osiągają bardzo dużą wytrzymałość w przypadku stosunku roztwór zasadowy do spoiwa wynoszący 0,50. Ten stosunek roztwór zasadowy/spoiwo wybrano opierając się na osiągnięciu docelowej wytrzymałości, co widać na tym rysunku. Zawartość spoiwa wyliczono w oparciu o stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo i zawartość roztworu. Gdy zawartość roztworu zasadowego wzrasta, zwiększa się także wytrzymałość próbek betonowych. Rysunki 4-6 obejmują cztery stosunki roztwór alkaliczny/spoiwo w przypadku stężenia tego roztworu wynoszącego 8 moli NaOH/L i twardnieniu betonu w warunkach polowych przez 28 dni. Jak wynika z pomiarów gdy stosunek roztwór zasadowy /spoiwo zwiększa się aż do pewnego poziomu, to wytrzymałość na ściskanie zaczyna maleć, zamiast wykazywać ciągły wzrost. Takie same zależności znaleziono także

5.3. Design methodology of geopolymer concrete mixes

In order to reduce the number of trials and there by shortening the mix design of geopolymer concrete. The following procedure is proposed. In the proposed design method of Geopolymer Concrete. The parameters considered include Aggregate/Binder Ratio, Percentage of fly ash and GGBS, Binder Contents. The graphs showing the relation between Alkaline/Binder ratios for different aggregate/Binder Ratios. The table giving the details of the compressive strength Vs binder Contents, Alkaline/Binder, Aggregate/Binder ratio were developed and made use in the designed Geopolymer concrete mix. The design method is illustrated in the following steps

Step 1: Target Strength

Target Strength of required geopolymer concrete mix is calculated as per IS 10262-2009.

$$\text{Target Strength (Ft)} = f_{ck} + 1.65 S_d$$

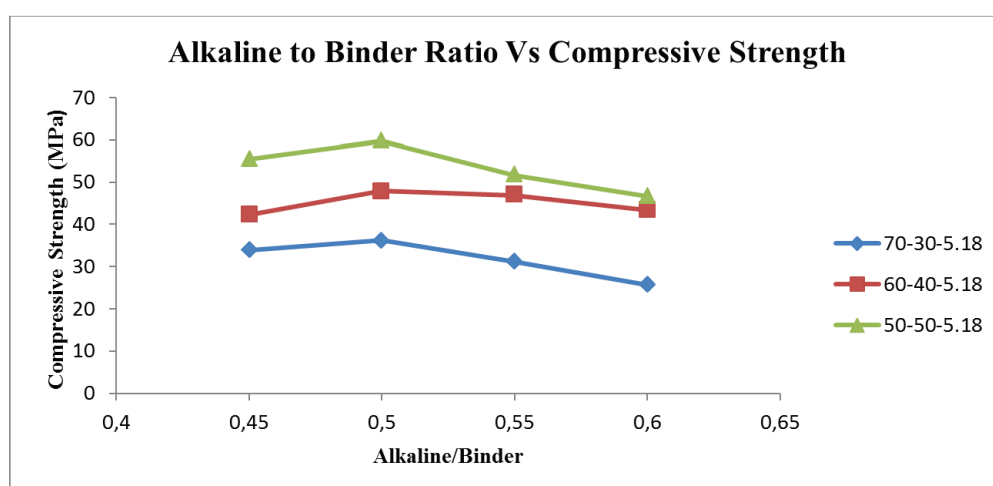
Ft = Target average Compressive Strength of Geopolymer Concrete at 28 days.

f_{ck} = Characteristic Compressive Strength at 28 days.

S_d = Standard Deviation.

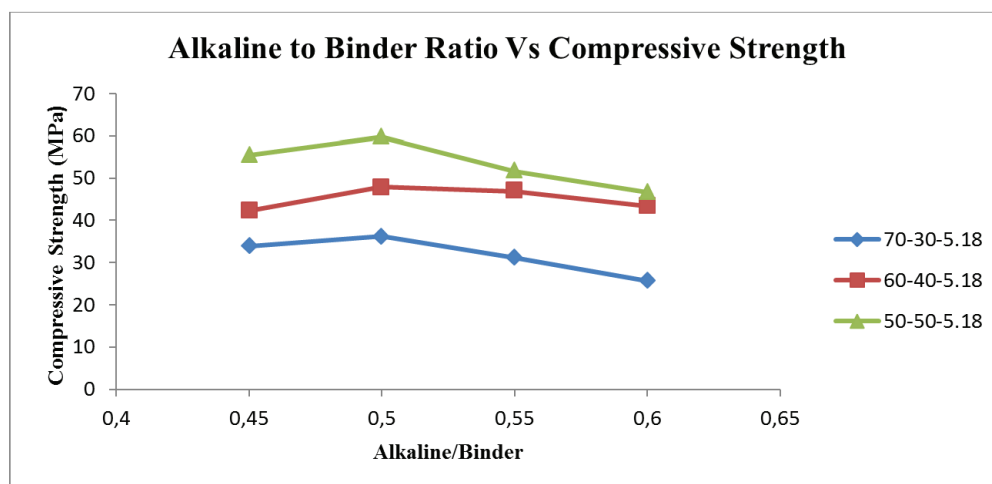
Step 2: Selection of Alkaline Solution to binder Ratio (AL: Binder)

The alkaline solution is the sum of the masses of sodium silicate solution and sodium hydroxide solution. The binder element is the mass of fly ash and GGBS. Four sets of values of this ratio were used, being 0.45, 0.50, 0.55 and 0.60 (for 8 moles/L of NaOH + Na_2SiO_3 mixes). There is a linking factor between the alkaline solution to binder and compressive strength. The alkaline-binder ratio is the ratio of the mass of alkaline solution to the mass of binder



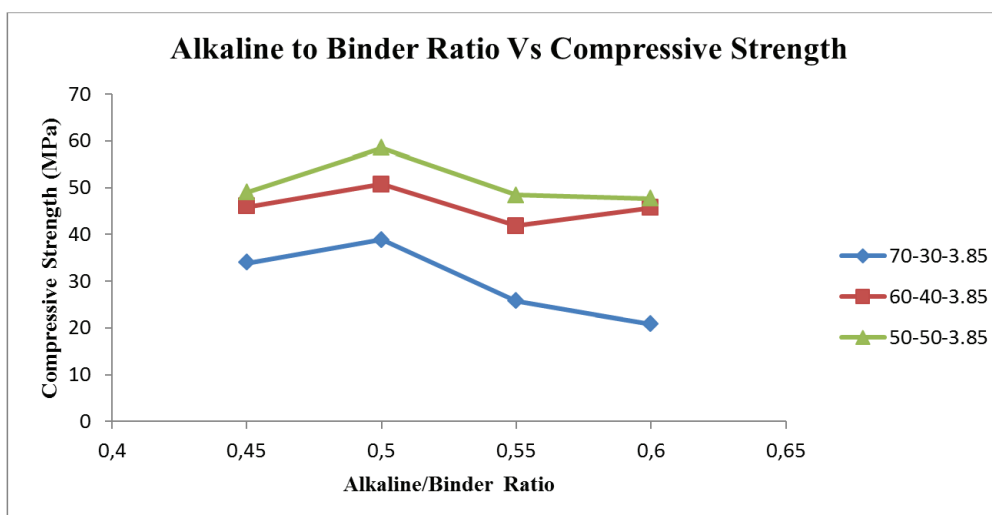
Rys. 4. Wpływ stosunku roztwór zasadowy/spoiwo na wytrzymałość na ściskanie betonu geopolimerowego w przypadku różnej zawartości popiołu lotnego different percentages of fly ash and GGBS [70 – popiół : 30 – żużel aż do 50-50] po 28 dniach twardnienia dla stosunku kruszywo/ spoiwo = 5,18

Fig. 4. Variation of compressive strength for different alkaline solution/binder ratio in geopolymer concrete mixes containing different percentages of fly ash and GGBS at the age of 28 days for an aggregate to binder ratio 5.18.



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie dla różnego stosunku roztwór zasadowy/spoiwo w betonie z różną zawartością popiołu lotnego i żużla, a stosunku kruszywo/spoiwo 4,23

Fig. 5. Variation of compressive strength for different alkaline solution/binder ratio in geopolymer concrete mixes containing different percentages of fly ash and GGBS at the age of 28 days for an aggregate to binder ratio 4.23



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie dla różnego stosunku roztwór alkaliczny/spoiwo w betonie geopolimerowym z różną zawartością popiołu lotnego i żużla o stosunku kruszywo/spoiwo wynoszącym 3,85; po 28 dniach dojrzewania

Fig. 6. Variation of compressive strength for different alkaline solution/binder ratio in geopolymer concrete mixes containing different percentages of fly ash and GGBS at the age of 28 days for an aggregate to binder ratio 3.85

dla wszystkich trzech stosunków popiół lotny/żużel granulowany. Stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo wynoszący 0,55 można uznać za punkt zwrotny, od którego wytrzymałość zaczyna maleć.

Krok 3: Wyznaczenie stosunku roztwór zasadowy/spoiwo dla docelowej wytrzymałości F_t , dla wybranego stosunku popiołu lotny/żużel granulowany.

Tablica 2 podsumowuje pożądaną wytrzymałość na ściskanie betonów geopolimerowych opartych na popiele lotnym i żużlu granulowanym w przypadku różnego stosunku roztworu alkalicznego do spoiwa, a także pokazuje całkowitą zawartość spoiwa, wybraną w celu produkcji betonów. Całkowita zawartość kruszywa niezbędna do produkcji geopolimerowych betonów jest wyznaczona przez wybór zawartości spoiwa. Wyniki prób mających na celu

(fly ash and GGBS) used in a Geopolymer concrete mix and has an important influence on the properties of concrete produced. A lower alkaline-binder ratio leads to lower strength, but the mix more difficult to place. At solution-to-binder ratio of 0.45, the mix was very stiff and at 0.60, the mix was segregated.

Curves on Figs. 4 – 6 shows the changes of compressive strength of geopolymer concrete at the age of 28 days with different content of fly ash and GGBS as a function of alkaline solution/binder ratio. At [fly ash/GGBS = 70:30] content, the compressive strength of concrete increases up to alkaline solution/binder ratio of 0.5. the strength decreases very moderately up to the alkaline solution to binder ratio of 0.60. However, at alkaline solution to binder ratio of 0.50, the strength increases slightly for any binder content of fly

wyznaczenie wpływu zawartości kruszywa na wytrzymałość na ściskanie pokazały, że w przypadku betonów zawierających popiół lotny i żużel granulowany wytrzymałość wzrasta ze zmniejszaniem zawartości kruszywa, a zwiększa się z dodatkiem spoiwa, złożonego z popiołu lotnego i żużla granulowanego. Próbkę betonów z dużym i małym stosunkiem kruszywa do spoiwa wykazały wytrzymałość na ściskanie różniącą się dosyć znacznie, a najlepsza odpowiadała stosunkowi 0,5. Największą wytrzymałość miały próbki betonu o stosunku popiół lotny żużel = 1.

Krok 4. Wyznaczenie zawartości spoiwa dla docelowej wytrzymałości w przypadku wybranego stosunku popiół lotny/żużel granulowany

Trzy mieszanki zawierające 360 kg/m³, 420 kg/m³ i 450 kg/m³ objęto próbami. Stosunek popiołu lotnego do żużla zmieniał się w następującym zakresie: 70:30, 60:40 i 50:50 we wszystkich mieszankach. Zawartość spoiwa obliczono ze stosunku roztwór zasadowy/ spoiwo i z zawartości NaOH. Zbadano zawartość spoiwa dobraną w oparciu o tablicę 2, biorąc pod uwagę wytrzymałość próbek betonu. Wyznaczono tę zawartość na podstawie docelowej wytrzymałości i stosunku popiołu lotnego do żużla biorąc pod uwagę stosunek roztworu zasadowego/spoiwo.

Krok 5: Wyznaczenie zawartości kruszywa drobnego i grubego

Na rysunkach 7 i 8 pokazano wyniki obliczeń zawartości kruszywa. W tej metodzie zawartość piasku oblicza się po dobraniu zawartości kruszywa grubego. Na podstawie zawartości spoiwa i stosunku grubego kruszywa do całkowitej ilości kruszywa można określić zawartość piasku.

ash and GGBS. From Fig.4, it is clear that up to alkaline solution to binder ratio of 0.60, all geopolymer concrete mixes exhibited decreasing strength. Whereas at alkaline solution/binder ratio of 0.50, the strength is reversed, i.e., increasing trend has been noticed in all the geopolymer mixes, with different combinations of fly ash and GGBS. further, the concrete mixes with GGBS contents between 40% and 50% exhibited very high compressive strength at alkaline solution to binder ratio of 0.50 the alkaline solution/binder ratio is selected based on the target strength for geopolymer concrete from above graphs. Binder content is calculated based on the alkaline solution/binder ratio and the alkaline solution content. When the alkaline solution content is increased, the resulting compressive strength of a sample will increase. Figs. 4-6 show the strength plots for four alkaline to binder ratios, with 8M NaOH, found under a curing regime of outdoor curing for 28 days. It is evident that when the alkaline solution to binder ratio is increased up to certain level, then the compressive strength decreases, instead of presenting the continuous increase. Identical behavior was also observed for each of the three ratios of fly ash to GGBS. At alkaline solution to binder ratio equal 0.55 is the point from which the strength begins to decrease.

Step 3: Selection of aggregate/binder ratio for the required Ft [for selected fly ash: GGBS ratio]

Table 2 summarizes the required compressive strength of fly ash and GGBS based geopolymer concrete for different alkaline solution to binder ratios and also show the total binder content chosen for mix production. Total quantity of aggregate required for the preparation geopolymer concrete is known for the required different binder content. Test results to determine the effect of ag-

Tablica 2 / Table 2

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE W MPA BETONU Z RÓŻNĄ ZAWARTOŚCIĄ SPOIWA I RÓŻNYMI STOSUNKAMI: KRUSZYWO/SPOIWO I ROZTWÓR ZASADOWY/SPOIWO

COMPRESSIVE STRENGTH, MPa OF CONCRETE WITH DIFFERENT BINDER CONTENTS AND DIFFERENT AGGREGATE/BINDER AND ALKALINE SOLUTION/BINDER RATIOS

Popiół / żużel Fly ash:/ GGBS	Spoiwo / Binder (kg/m ³)	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
70:30	Agg/Binder	5.18	5.02	4.86	4.70	4.54	4.38	4.23	4.1	3.97	3.85
	0.45	33.83	34.31	34.79	35.27	35.76	36.24	36.69	35.70	34.89	33.81
	0.5	36.19	36.52	36.85	37.18	37.52	37.85	38.16	38.43	38.66	38.96
	0.55	31.11	30.27	29.43	28.60	27.77	26.95	26.17	26.01	25.88	25.71
	0.6	25.71	25.6	25.5	25.40	25.30	25.20	25.11	23.62	22.40	20.76
60:40	0.45	42.32	42.95	43.58	44.21	44.85	45.48	46.08	46.01	45.96	45.88
	0.5	47.92	48.47	47.91	48.75	49.59	50.43	51.22	51.04	50.89	50.69
	0.55	46.87	46.49	46.12	45.75	45.38	45.02	44.67	43.71	42.91	41.85
	0.6	43.38	46.2	46.27	46.35	46.42	46.50	46.57	46.27	46.01	45.68
50:50	0.45	55.37	55.62	55.85	56.11	56.36	56.62	56.86	54.14	51.90	48.91
	0.5	59.79	59.88	59.98	60.08	60.18	60.28	60.38	59.75	59.23	58.53
	0.55	51.61	50.73	49.86	49.00	48.14	47.28	46.48	47.15	47.71	48.45
	0.6	46.68	46.84	46.98	47.13	47.28	47.43	47.57	47.59	47.61	47.64

Grube kruszywo = grube kruszywo/całkowite kruszywo

Zawartość piasku = całkowita zawartość kruszywa – ilość kruszywa

Krok 6. Oznaczenie zawartości zasadowego roztworu

W celu wyznaczenia odpowiednich zawartości składników mieszanki betonowej oparto się na uzyskanych wynikach doświadczeń. Dla każdego stosunku roztwór zasadowy/spoiwo obliczano ilość spoiwa, grubego i drobnego kruszywa postępując zgodnie z metodą podaną w tablicy 2. Na początku wyznaczano ilość spoiwa w kg/m^3 w oparciu o docelową wytrzymałość. Opierając się na oznaczonej zawartości spoiwa obliczano zawartość zasadowego roztworu, wykorzystując jego stosunek do spoiwa. Następnie ilość krzemianu i wodorotlenku sodu dobierano zachowując ich stosunek równy 2,5 masowo.

Przykładowe mieszanki o składzie dobranym według proponowanej metody

Projektowanie mieszanki pokazane w tym punkcie ma służyć jako przykład proponowanej metody. Zakładając, że docelowa wytrzymałość po 28 dniach wynosi 30 MPa w celu jej otrzymania możemy wybierać przyjmując stosunek popiołu lotnego do żużla odpowiednio 70:30, 60:40, 50:50 oraz zawartość spoiwa, stosunku kruszywo/spoiwo, stosunek zasadowego roztworu do spoiwa, które zapewnią uzyskanie wytrzymałości, opierając się na tablicy 2. Stosunek zasadowy roztwór/ spoiwo równy 0,55 w przypadku zawartości spoiwa wynoszącej 370 kg/m^3 , można zastosować w celu otrzymania tej wytrzymałości. Należy przyjąć stosunek roztworu zasadowego do spoiwa równy 0,55; a w przypadku składu spoiwa popiół lotny/żużel 259:111, kruszywo/ spoiwa 5,02.

Podczas gdy mniejszy stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo będzie powodowało zmniejszenie wytrzymałości, będzie ono również pogarszało urabialność. Przeciwnie, zwiększenie stosunku roztwór zasadowy/ spoiwo w celu poprawy urabialności będzie pociągało za sobą wzrost kosztów tego betonu. Tak więc można stosować

gregate content on compressive strength show that, in geopolymer concrete containing fly ash and GGBS, the compressive strength increases with decrease in aggregate content with increase in binder content (fly ash and GGBS). Mixes with high and low aggregate to binder contents, tested at 28 days outdoor curing, yield compressive strengths of 20.76 MPa and 60.38 MPa respectively. The test results also show that in normal-strength geopolymer concrete, compressive strength increases with increase in content of GGBS in Fly ash and GGBS mix.

In Table 2 total quantity of aggregate = total aggregate/binder

Step 4: Selection of binder content for the required target strength (for selected fly ash to GGBS ratio)

Three mixes with fly ash and GGBS content of 360, 420 and 450 kg/m^3 are considered. The ratio of fly ash and GGBS was varied as (70-30, 60-40 and 50-50) for the mixes. The binder content was calculated from the alkaline solution to binder ratio and the alkalis content. The binder content, thus selected from the above table, was then checked again to satisfy the strength requirement. Quantity of binder content selected based on target mean strength and proportion of fly ash and GGBS at alkaline-to-binder ratio.

Step 5: Estimation of coarse aggregate and fine aggregate content

From the above Figs. 7, 8, the studies show that design calculations for aggregates contents. In this method, sand content is calculated after calculating coarse aggregate content. With the quantities of binder content and coarse aggregate/total aggregate ratio of concrete and the sand content in the total aggregate can be determined.

Coarse aggregate = [coarse aggregate/total aggregate]

Sand content = [Total quantity of aggregate] – [coarse aggregate content]

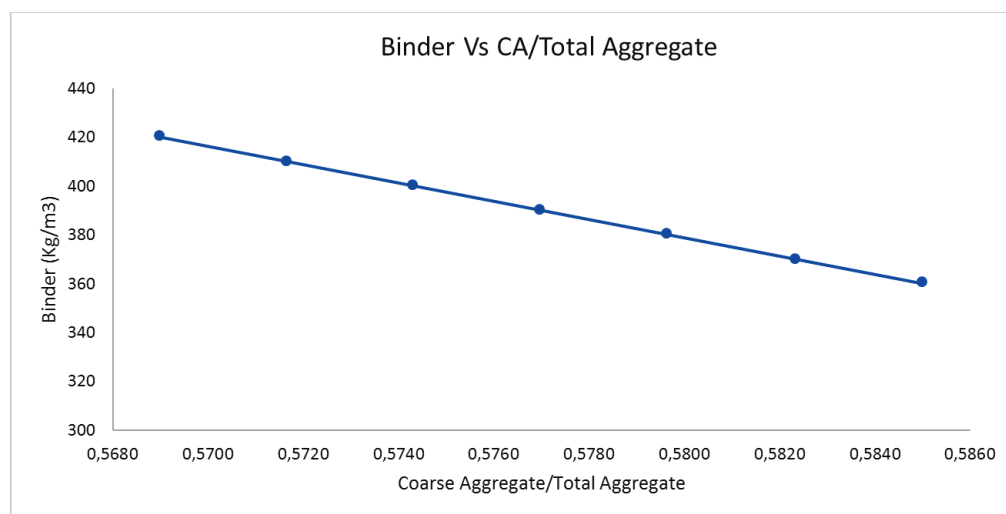


Fig. 7. Zmiany zawartości spoiwa i stosunku grubego kruszywa /całkowitej zawartości kruszywa w zakresie od 360 kg/m^3 do 410 kg/m^3

Rys. 7. Variation of binder content and coarse aggregate/total aggregate ratio ($360\text{--}410 \text{ kg/m}^3$)

mniejszy stosunek roztwór alkaliczny/spoiwo na przykład 0,55 oraz 370 kg spoiwa na m³ betonu.

Rozważmy zawartość spoiwa 370 kg/m³ i stosunek Na₂SiO₃/NaOH równy 2.5.

Całkowitą zawartość roztworu alkalicznego obliczono mnożąc stosunek roztwór zasadowy/spoiwo przez zawartość popiołu lotnego: 0.55 x 370 = 203.5 kg/m³.

Znając stosunek Na₂SiO₃/NaOH równy 2,5 możemy wyliczyć zawartość obu składników tego roztworu:

$$\text{Roztwór NaOH} = 203.5/3.5 = 58.14 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Roztwór Na}_2\text{SiO}_3 = 2.5 \times 58.14 = 145.35 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Stosunek kruszywo/spoiwo} = 5.02$$

$$\text{Całkowita zawartość kruszywa} = 5.02 \times 370 = 1857.4 \text{ kg/m}^3$$

Z krzywej na wykresie można znaleźć:

$$\text{Kruszywo grube/ całkowita ilość kruszywa Total} = 0.582$$

$$\text{Kruszywo grube} = 0.582 \times 1857.4 = 1081 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Kruszywo drobne} = \text{całkowita zawartość kruszywa} - \text{grube kruszywo}$$

$$= 1857.4 - 1081 = 776.39 \text{ kg/m}^3$$

Skład mieszanki betonowej

Ilość kg/m ³	Stosunek/spoiwo	
Spoiwo	370	1
Popiół lotny: żużel	70:30	259:111
Kruszywo grube	1081	2.92
Kruszywo drobne	776.39	2.09
Roztwór alkaliczny	203.5	0.55

Step 6: Find alkaline solution content

To determine the appropriate of the mix component values obtained based on the research mix design the Step 6 is applied. For each alkaline solution/binder, the amount of binder, coarse aggregate and fine aggregates were calculated by following the standard procedure as shown in Table 2. Initially, alkaline content, as mass [kg] per unit volume [m³] of geopolymer concrete, was selected based on the target strength. Based on the quantity of binder [fly ash and GGBS] determined in the previous step, the amount of total solution is obtained using alkaline solution-to-binder ratio by mass. After that, quantity of sodium silicate and sodium hydroxide is decided using sodium silicate to sodium hydroxide ratio of 2.5 by mass.

Example mixes using the proposed procedure

Mix design of GPC is undertaken here so as to serve as an example for the suggested procedure.

Assuming that the target strength required at 28 days is 30 MPa, fly ash, GGBS ratio as 70:30, 60:40, 50:50, and binder content, aggregate to binder ratio, alkaline solution to binder ratio can be used to obtain this strength and Table 2 can be used. Alkaline liquid to binder (AL/binder) ratio of 0.55 for binder content of 370 kg/m³, fly ash: GGBS 259:111, aggregate to binder ratio as 5.02 respectively, can be obtained.

While reducing the alkaline solution to binder ratio would result in less strength, the reduction would also reduce the workability. By contrast, choosing a higher alkaline solution to binder ratio in order to help for higher workability would require a higher alkaline solution/binder ratio resulting in a more costly mixture. Thus, proceeding with the lower alkaline solution/binder ratio set values of 0.55 and 370 binder content has been chosen.

Considering binder quantity as 370 kg/m³ and Na₂SiO₃/NaOH ratio of 2.5.

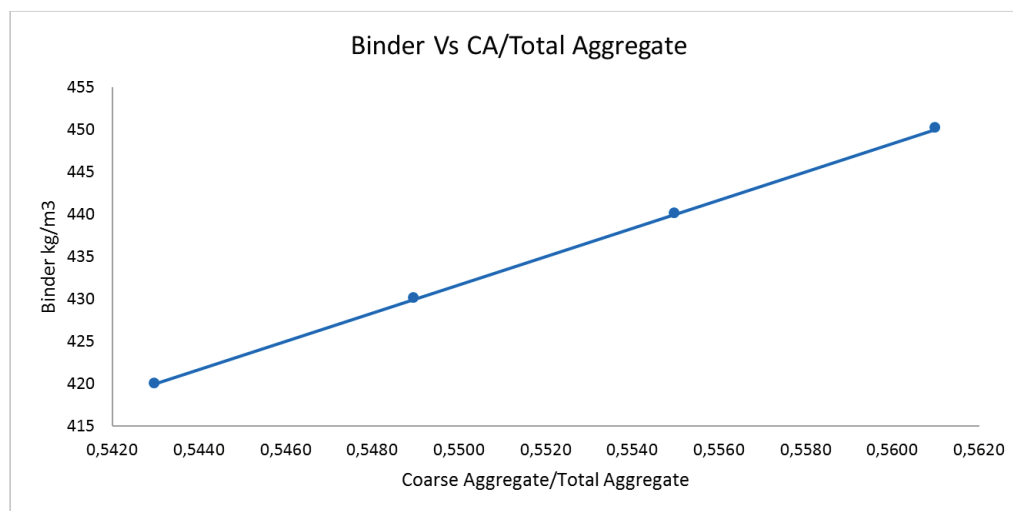


Fig. 8. Zmiany zawartości spoiwa i stosunku kruszywo grube/całkowita zawartość kruszywa w przedziale od 420 kg/m³ do 450 kg/m³

Rys. 8. Variation of binder content and coarse aggregate/total aggregate ratio [420 kg/m³ do 450 kg/m³]

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Dodatek granulowanego żużla wielkopieczowego do betonu geopolimerowego skraca znacznie czas wiązania i przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości.
2. Wytrzymałość betonu geopolimerowego wzrasta ze zwiększeniem zawartości granulowanego żużla wielkopieczowego w mieszance.
3. Beton geopolimerowy daje zadowalające wyniki w przypadku dojrzewania w warunkach polowych gdy popiół lotny zastępuje się żużlem.
4. Ze wzrostem stosunku roztwór zasadowy/ spoiwo powyżej pewnego poziomu wytrzymałość na ścislenie zmniejsza się zamiast rosnać. Ten maksymalny stosunek przekracza 0,45 a jest mniejszy od 0,55.

6. Podziękowania

Przy realizacji tej pracy korzystano z bardzo wartościowych dyskusji z profesorem Sri M. Sudhakar oraz z systematycznej pomocy ze strony wszystkich członków Wydziału Inżynierji, NIT Warangal.

Literatura / References

1. J. Davidovits, "Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminate family and preparation process", US patent 4472199, (1978).
2. Wang SD, Pu XC, Scrivener KL, Pratt PL, "Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems", *Adv Cem. Res.* 27:93–102 (1995).
3. Glukhovskiy VD, "Soil silicates", Gosstroizdat, Kiev, (in Russian 1959).
4. Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw DMJ, and Rangan BV, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete", *ACI Mater J.*, 101(6):467–72 (2004).
5. Pinto, A., "Alkali-activated metakaolin based binders", PhD Thesis. University of Minho, (2004).
6. Rangan BV, "Mix design and production of fly ash based geopolymer concrete"., Indian
7. *Concr J*, 82:7–15, (2008).
8. Anuradha R, Sreevidya V, Venkatasubramani R, Rangan BV, "Modified guidelines for geopolymer concrete mix design using Indian standard"., *Asian J Civil Eng (Build Hous)*, 13 (3):353–364 (2012).
9. Jarvis R. Black, "Mix Design Process for Alkaline-Activated Class F Fly Ash Geopolymer Concrete", University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy, (2012).
10. M. Talha Junaid, Obada Kayali, Amar Khennane, Jarvis Black, "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes", *Const. Build. Mat.*, 79:301–310, (2015).
11. Subhash V. Patankar, Yuwaraj M. Ghugal and Sanjay S. Jamkar, "Mix Design of Fly Ash Based Geopolymer Concrete",
12. IS-383-1970, "Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete".
13. IS: 516–1956 (Reaffirmed 1999), "Indian Standard Methods of Tests for Strength of Concrete".

The total alkali liquid is calculated by multiplying the alkaline solution/binder ratio to the total fly ash quantity: $0.55 \times 370 = 203.5 \text{ kg/m}^3$.

Knowing the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2.5 the individual quantities of each alkaline liquid can be determined

$$\text{NaOH solution} = 203.5/3.5 = 58.14 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ Solution} = 2.5 \times 58.14 = 145.35 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total aggregate/binder ratio} = 5.02$$

$$\text{Total aggregate} = 5.02 \times 370 = 1857.4 \text{ kg}$$

From graph

$$\text{Coarse aggregate/Total aggregate} = 0.582$$

$$\text{Coarse aggregate} = 0.582 \times 1857.4 = 1081 \text{ kgs.}$$

$$\begin{aligned} \text{Fine aggregate} &= \text{total aggregate} - \text{coarse aggregate} \\ &= 1857.4 - 1081 \\ &= 776.39 \text{ kg} \end{aligned}$$

Mix proportions

	Quantity kg/m^3	binder/ratio
Binder	370	1
Fly ash: GGBS	70:30	259:111
Coarse Aggregate	1081	2.92
Fine Aggregate	776.39	2.09
Alkaline Solution	203.5	0.55

5. Conclusions

Based on the experimental work the following conclusions are drawn:

1. Addition of GGBS in geopolymer concrete significantly reduces the setting time and helps in attaining strength.
2. The strength of geopolymer concrete was increased with increase in percentage of GGBS in a mix.
3. Geopolymer concrete gives satisfactory result at Outdoor temperature by the replacement of fly ash with GGBS.
4. When the alkaline liquid to binder ratio is increased up to a certain point, instead of the compressive strength increasing it actually decreases. The ratio of this maximum has been found to be above 0.45 and below 0.55.

6. Acknowledgements

This work is benefited from the helpful discussions with Sri M. Sudhakar, Associate Professor and A Venkatesh PG Student also constant support from all the faculty members of Civil Engineering Department, NIT Warangal.