

Właściwości mechaniczne betonu z kruszywem ze spiekanych popiołów lotnych

Mechanical and durability properties of sintered fly ash aggregate concrete

S. Siva Chandran^{1*}, K. Chinnaraju²

¹T.J.S Engineering College, Thiruvallur, India

²Division of Structural Engineering, Anna University, Chennai, India

*Corresponding author: S. Siva Chandran, e-mail: ssvn1983@gmail.com

Streszczenie

Ochrona zasobów naturalnych i efektywne zarządzanie odpadami, które mogą szkodzić naszemu środowisku, stanowi nie lada wyzwanie. Niniejsza praca poświęcona jest badaniu różnych właściwości betonu klasy M30, w którym kruszywo grube zostało całkowicie zastąpione dostępnym na rynku kruszywem ze spiekane go popiołu lotnego. Okazało się, że kruszywo to spełnia wymagania wytrzymałości docelowe betonu. W celu dalszej poprawy odporności na pękanie i wytrzymałości na rozciąganie zastosowano włókna bazaltowe. Dodatek włókien poprawił właściwości mechaniczne o około 3-4%. Badanie przepuszczalności chlorków przyspieszoną metodą i absorpcji wody wykazało, że trwałość betonu z kruszywem ze spiekane go popiołu lotnego mieści się w granicach normy.

Słowa kluczowe: kruszywo ze spiekane go popiołu lotnego, lekki beton, włókna bazaltowe, beton przyjazny dla środowiska

Summary

Conservation of natural resources and effective management of waste materials that can harm our environment is a challenging phenomenon. This paper is focused to study the different properties of M30 grade concrete where the coarse aggregate has been completely replaced by commercially available sintered fly ash aggregate and it has proved to meet the target strength. To further improve the crack resisting behavior and tensile strength, basalt fibers was incorporated. The incorporation of fibers has improved the mechanical properties to around 3-4%. The RCPT and water absorption test has proved that the durability properties of sintered fly ash aggregate are within the standard specified.

Keywords: Sintered Fly ash Aggregate; Light Weight Structural Concrete; Basalt Fibre; Eco-Friendly Concrete

1. Wprowadzenie

Beton jest powszechnie stosowanym na świecie materiałem budowlanym, dzięki swojej uniwersalności i stosunkowo niskim kosztom. Głównym składnikiem betonu jest kruszywo, które zajmuje ponad 70% objętości mieszanki betonowej. Wzrost zapotrzebowania na naturalne składniki betonu i szybkie wyczerpywanie się zasobów naturalnych prowadzi do recyklingu odpadów przemysłowych, które w przeciwnym razie stają się odpadami i zagrażają środowisku. Popiół lotny jest jednym z takich materiałów odpadowych, powstałych w elektrociepłowniach węglowych, pozyskiwanych z kominów instalacji spalania węgla. Każdego roku produkuje się około 300-400 milionów ton popiołów lotnych. Indie, USA i Chiny zużywają łącznie około 70% całkowitej ilości produkowanych popiołów lotnych (1), przy czym 74 elektrownie

1. Introduction

Concrete is the most widely used man-made building material in the world due to its versatility and relatively low cost. The main constituent of concrete is aggregate which occupies more than 70% by volume of the concrete mix. The increase in demand for natural ingredients in concrete and the rapid depletion of natural resources lead to the recycling of industrial by-products, which otherwise become waste and threaten the environment. Fly ash is one such waste material generated from the coal thermal power plants, obtained from the chimneys of coal combustion facilities. About 300-400 million tons of fly ash are produced every year. India, the USA and China together use approximately 70% of the total fly ash produced (1) with 74 thermal power plants, located in India itself. In India, the production of fly ash and cement production are

cieplne znajdują się w Indiach. W Indiach produkcja popiołów lotnych i produkcja cementu są niemal na tym samym poziomie, natomiast wykorzystanie popiołów lotnych w stosunku do cementu wynosi zaledwie 5%. Popiół lotny, o uziarnieniu drobniejszym od cementu ma właściwości puzolanowe ze względu na swoją bezpostaciowość, co czyni go odpowiednim materiałem do stosowania w betonie (2-4). Dobrej jakości popiół lotny jest stosowany jako dodatek do cementu, natomiast popiół lotny o gorszych właściwościach używa się do stabilizacji gruntu. Ze względu na to, że utylizacja tych odpadów jest trudna, ich wykorzystanie do produkcji kruszywa, może przyczynić się do poprawy gospodarki odpadami i ochrony naszych zasobów naturalnych (5-7).

Kruszywa z popiołów lotnych są rodzajem lekkich kruszyw, które mogą być efektywnie stosowane w betonach konstrukcyjnych. Kruszywa te mogą być wytwarzane wieloma metodami, najczęściej przez spiekanie lub wiązanie bez obróbki cieplnej. Dodanie spiekane popiołu lotnego do betonu powoduje zmniejszenie masy betonu, w porównaniu z betonem konwencjonalnym, bez zmniejszenia jego wytrzymałości (10).

Proces spiekania pozwala na wykorzystanie dużej ilości popiołu lotnego, zmniejszając tym samym ilość odpadów hańdowanych każdego roku. Popiół lotny, glinę i miął kokosowy spiekano w temperaturze 1200°C do 1300°C, uzyskując kruszywo lekkie (9). Kruszywa ze spiekanych popiołów lotnych mogą mieć zastosowanie zarówno konstrukcyjne, jak i niekonstrukcyjne, a ich komercyjna produkcja rozpoczęła się w latach 60. ubiegłego wieku (8).

Niektóre z dostępnych na rynku kruszyw z popiołów lotnych to Aarelite, Pollytag i Fa-light. Do głównych zalet stosowania kruszywa z popiołu lotnego zalicza się mniejsze obciążenie własne i szybszą budowę.

Wiele wcześniejszych badań wykorzystywało kruszywo z popiołów lotnych do badania wytrzymałości i trwałości betonu (11-14). Beton jako materiał niejednorodny, jest słabo rozciągliwy i ma małą wytrzymałość na rozciąganie (15-17). W celu poprawy tych właściwości, dodaje się do niego włókna.

Włókna poprawiają wytrzymałość mechaniczną i trwałość betonu. Beton zbrojony włóknami ma większą wytrzymałość na pęknięcie, jak również lepszą ogólną wytrzymałość. Do różnych rodzajów włókien stosowanych w betonie należą włókna ze szkła i węglowe. W ciągu ostatnich kilku lat zastosowanie włókien bazaltowych stało się rosnącym kierunkiem, ze względu na ich lepsze właściwości, w porównaniu z innymi włóknami (18). Włókna te mają lepsze właściwości w porównaniu z włóknami ze szkła. Włókna bazaltowe mają większą wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł sprężystości i odporność na ogień (19, 20) oraz lepsze właściwości chemiczne (21, 22). Ze względu na tak atrakcyjne właściwości włókna te stosowane są również w przemyśle morskim i motoryzacyjnym (23, 24). W celu poprawy właściwości i urabialności betonu, przy mniejszym stosunku wodno-cementowym, stosuje się superplastyfikatory (25).

almost the same, while the usage of fly ash compared to cement is only 5%. Fly ash, being finer than cement, possess significant pozzolanic properties, due to its amorphous nature which makes it suitable for concrete applications (2-4). High-quality fly ash is used as supplementary cementitious material, whereas lower-quality fly ash is used for land filling purposes. Since the disposal of these waste materials is difficult, the effective use of these materials as fly ash aggregates, can promote waste management and preserve our natural resources as well (5-7).

Fly ash aggregates are the type of light weight aggregates which can be effectively used for structural concretes. These aggregates can be developed through many methods like sintering and cold bonding. Adding the sintered fly ash to concrete reduces the mass of concrete compared to conventional concrete (10), without reducing the strength properties of concrete.

Sintering process helps the utilisation of a large volume of fly ash, thereby cutting down these waste being dumped over each year. Fly ash, clay and coke breeze was sintered between 1200°C and 1300°C, to produce sintered fly ash light weight aggregate (9). Sintered fly ash aggregates can be used both structural and non-structural applications with the commercial production of these aggregates, begun in 1960s (8).

Some of the commercial fly ash aggregates available in the market include Aarelite, Pollytag and Fa-light. The main advantages of using this sintered fly ash aggregate include a lower dead load and faster construction.

Many previous researches have used the fly ash aggregate, to study the strength and durability of concrete (11-14). The concrete being a heterogeneous material is poor in tension and has a low tensile strength (15-17). In order to improve the tensile properties of concrete fibers are added.

Fibers improve the mechanical strength and durability properties of concrete. Fiber reinforced concrete is better crack arrestors and has improved toughness properties also. Different kinds of fibers used for concrete includes glass and carbon. For the past few years, the use of basalt fibers in concrete have become an emerging trend, due to its superior properties compared to other fibers (18). These fibers have a superior properties compared to glass fibers. Basalt fibers have an improved tensile strength, modulus of elasticity, fire resistance (19, 20) and improved chemical properties (21, 22). Due to such attractive properties these fibers are used in marine and automotive sectors as well (23, 24). To improve the properties and workability of concrete at reduced water cement ratio, super plasticisers are used (25).

The paper mainly focuses on studying the strength and durability properties of sintered fly ash basalt fiber reinforced concrete with superplasticisers used at its optimum dosage, to find out the advantages of using sintered fly ash aggregates and basalt fibers, to enhance the properties of concrete.

W artykule skupiono się głównie na badaniu wytrzymałości i trwałości betonu zbrojonego włóknami bazaltowymi, z dodatkiem spiekanego popiołu lotnego i superplastyfikatora, w odpowiedniej ilości. Analizowano głównie korzyści wynikające z zastosowania kruszyw z popiołu lotnego i włókien bazaltowych, w celu poprawy właściwości betonu.

2. Zastosowane materiały

Wytrzymałość betonu zależy głównie od jakości składników, przede wszystkim cementu, kruszyw – drobnego i grubego i dodatków. Z wyprzedzeniem należy dokonać rozsądnego wyboru tych materiałów, w celu uzyskania betonu o dobrej wytrzymałości.

W badaniach stosowano cement portlandzki zgodny z normą IS 12269:1987 (26), klasy 53. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny o wielkości mniejszej niż 4,75 mm, spełniający wymagania normy IS 383:1970 ZONE III (27), a kruszywo grube o wielkości ziaren 10 mm, zgodnie z normą IS 2386: PART III (28). Do przygotowania betonu, a także do jego dojrzewania, wykorzystano wodę pitną. Przeprowadzono podstawowe badania zastosowanych materiałów, które przedstawiono w tablicy 1.

2.1. Kruszywo ze spiekanego popiołu lotnego

Do badań wykorzystano dostępne w handlu kruszywo ze spiekanego popiołu lotnego. Kruszywo to jest produkowane z następujących materiałów składowych: cement, popiół lotny i woda. Cement i popiół lotny są mieszane w betoniarce – granulator, za pomocą natrysku wody. Zawartość jest dokładnie mieszana w bębnie granulatora, aż do całkowitego uformowania popiołu, do wymaganej wielkości ziaren. Metoda formowania kruszywa z popiołów lotnych polega na granulowaniu i jest procesem zbrylania wilgotnych cząstek w obracającym się bębnie, w celu utworzenia świeżego granulatu. Następnie granulaty przenosi się do pieca laboratoryjnego.

Tablica 1 / Table 1

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU I KRUSZYWA
BASIC PROPERTIES OF CEMENT AND AGGREGATES

Properties of concrete components Właściwości składników betonu	Cement [OPC 53 grade] Cement klasy 53	Sand [Zone II] Piasek [strefa 2]	Coarse aggregate Kruszywo grube	Sintered fly ash aggregate Kruszywo ze spiekanego popiołu lotnego
Fineness Modulus / Wskaźnik miałkości, -	-	2.65	6.76	6.61
Fineness / Miałkość, %	1	-	-	-
Specific Gravity / Ciężar właściwy, -	3.15	2.70	2.69	1.81
Water Absorption / Nasiąkliwość, %	-	0.88	0.79	16.27
Bulk Density / Gęstość nasypowa, kg/m ³	-	1680	1570	961
Compressive Strength / Wytrzymałość na ściskanie, N/mm ²	55	-	-	-
Impact Value / Odporność na rozdrabnianie, %	-	-	11.2	26.85
Crushing value / Odporność na miażdżenie, %	-	-	0.8	4.08
Initial Setting Time / Czas początku wiązania, min	45	-	-	-
Final Setting Time / Czas końca wiązania, min	500	-	-	-
Normal Consistency / wodoządnosc	0.34	-	-	-

2. Materials used

The strength of the concrete components depend on the quality of constituent elements of concrete such as cement, fine aggregate, coarse aggregate and admixtures. Therefore, a wise selection of these materials should be made to obtain the superior strength of concrete.

Ordinary Portland cement confirming to IS 12269:1987 (26) of 53 grade was used in the study. River sand of size lower than 4.75 mm and confirming to IS 383:1970 ZONE III (27) was used as the fine aggregate and coarse aggregates of 10 mm in the size according to IS 2386: PART III (28) are used as coarse aggregates for the study. Potable drinking water was used for mixing of concrete and also for curing. The basic test of the materials used was carried out and are presented in Table 1.

2.1. Sintered fly ash aggregate

Commercially available sintered fly ash aggregate was procured for the entire study. Sintered fly ash aggregate is produced with the constituent materials like cement, fly ash and water. Cement and fly ash are mixed in the concrete mixer [pelletizer] by spraying water. The contents are thoroughly mixed in the pelletizer drum, until complete formation of the required size of fly ash aggregate. The method of formation of fly ash aggregate is called pellatisation which is a process of agglomeration of wetting fines in a rotating drum, to produce fresh pellets. Then the pellets are transferred to sintering machine, where they are sintered at high temperature of about 1100°C to 1200°C. The burning of carbon in the pellets and loss of moisture creates a strong cellular microstructure bonded together by the fusion of fine fly ash particles. Sintered fly ash aggregates having specific gravity 1.45 to 1.65 and loss of ignition of <4% were used in this investigation. Fig. 1 shows the sample of SFA.

nego, w którym jest spiekany w wysokiej temperaturze, około 1100°C do 1200°C. Spalanie węgla w granulacie i utrata wilgoci, tworzy silną mikrostrukturę komórkową, związaną przez drobne cząstki popiołu lotnego. W badaniach wykorzystano kruszywo ze spiekanego popiołu lotnego o ciężarze właściwym od 1,45 do 1,65 i stracie przy prażeniu mniejszej od 4%. Na rys.1 przedstawiono przykładowe kruszywo.

2.2. Włókna bazaltowe

Bazalt składa się z drobnych ziaren, z powodu zbyt szybkiego stygnięcia stopionej skały, aby mogły w niej powstawać większe kryształy. W celu otrzymania włókien skała bazaltowa jest podgrzewana do temperatury 1000°C. Włókna te mają kolor złoto-brązowy i średnicę około 13 μm – rys. 2. Ich wytrzymałość na rozciąganie to 3200 do 3850 MPa, z modułem sprężystości 93 GPa. Gęstość włókien wynosi 2,75 g/cm³. Zastosowano włókna bazaltowe o długości 22 mm. Ponadto na podstawie danych literaturowych ustalono, że optymalna zawartość zastosowanych włókien wynosiła 0,5 % masy betonu. Pozwala to na uzyskanie betonu o dobrych właściwościach, które będą ograniczać pęknięcia i zapewniać odporność na kwasy oraz inne substancje chemiczne.

2.3. Zastosowana domieszka

Adhere mix 700 jest wysokiej klasy superplastyfikatorem o masie właściwej 1,1, a o jego właściwościach decyduje naftalen, który poprawia urabialność i wczesną wytrzymałość betonu. Zalecany przez dostawcę dodatek wynosi od 0,3% do 1,2%, maksymalnie 3%, w stosunku do masy cementu. W badaniach zastosowano dodatek 0,5 % masy cementu.

2.4. Projekt mieszanki

Mieszankę betonową dla betonu klasy M30, zaprojektowano zgodnie z normą IS 10262 – 2009 (29) dla betonu wzorcowego oraz betonu z kruszywem, ze spiekanego popiołu lotnego, poprzez zastąpienie nim tej samej objętości kruszywa grubego. Otrzymane proporcje mieszanki dla betonu referencyjnego wynoszą 1,00:1,48:2,00/0,45, a dla betonu SFa 1,00:1,48:1,68/0,36, w którym zawartość wody została zmniejszona o 20%, dzięki dodatkowi wysokiej klasy superplastyfikatora. Do betonu zbrojonego włókna-
mi dodano, na podstawie doświadczeń, włókno bazaltowe w ilości 0,56% masy betonu. W betonie z wykorzystaniem spiekanego popiołu lotnego, stosunek w/c został zmniejszony, przez dodanie superplastyfikatora, w celu uzyskania odpowiedniej urabialności i wytrzymałości.

3. Program badań

Składniki betonu stosowano zgodnie z projektem mieszanki, opisanym w normie IS: 10262 – 2009 (29), dla cementu referencyjnego, ze stosunkiem w/c = 0,45. W betonie z kruszywem ze spiekanego popiołu lotnego objętość kruszywa zwykłego została całkowicie zastąpiona kruszywem ze spiekanego popiołu lotnego, w stanie powierzchniowo suchym. Do przygotowania próbek sto-



Rys. 1. Kruszywo ze spiekanego popiołu lotnego

Fig. 1. Sintered fly ash aggregate



Rys. 2. Włókna bazaltowe

Fig. 2. Basalt fiber

2.2. Basalt fibre

Basalt has a fine-grained mineral texture due to the molten rock cooling too rapidly for larger crystals to grow. The basalt rock is heated up to 1000°C, to prepare this fibre. It is available in golden brown colour with a diameter of 13 μm [Fig. 2], has a tensile strength of 3200 to 3850 MPa and elastic modulus of 93 GPa. Density of these fibres is 2.75 g/cm³. Basalt fibres of 22 mm length were used and based on literature, the optimized fibre content was 0.5 % by the mass of the concrete. It helps to bring the eco-friendly properties to the concrete which will act as a crack arrestor and offer resistance against acid and other chemical attacks.

2.3. Admixture

Adhere mix 700 is a high grade superplasticizer with a specific gravity of 1.1 and it is based on naphthalene which can increase workability and early age strength of concrete. The dosage recommended by the supplier ranges from 0.3% to 1.2%, with a maximum of 3% by mass of cement. In this study the dosage of 0.5 % by weight of cement was used.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE BETONU REFERENCYJNEGO I BETONU ZAWIERAJĄCEGO SPIEKANY POPIÓŁ LOTNY, Z DODATKIEM I BEZ DODATKU WŁÓKIEN BAZALTOWYCH

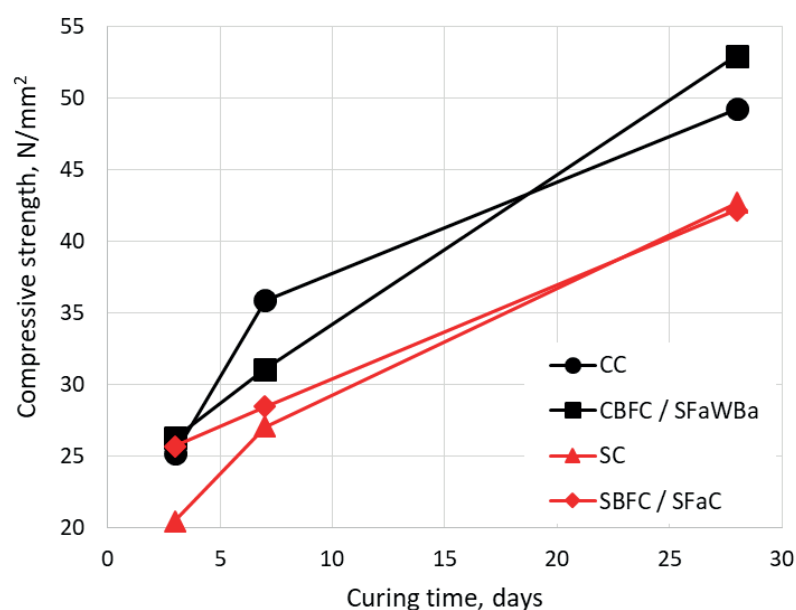
MECHANICAL PROPERTIES OF CONTROL AND SINTERED FLY ASH CONCRETE WITH AND WITHOUT BASALT FIBRE

Designation Oznaczenia	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie, N/mm ²			Age of curing: 28 days / Okres twardnienia: 28 dni				
	Age of curing, days Okres twardnienia, dni			Split tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, N/mm ²	Flexural strength Wytrzymałość na zginanie, N/mm ²	Young's modulus Moduł Younga, GPa	Bond strength Wytrzymałość na odrywanie od podłoża N/mm ²	
	3	7	28				for 0.025 mm slip dla poślizgu 0,025 mm	for 0.25 mm slip dla poślizgu 0,25 mm
CC	25.17	35.9	49.27	5.06	5.44	30.5	6.72	14.75
CBFC / SFaWBa	26.27	31.07	52.97	4.43	6.35	35.3	10.61	15.48
SC	20.43	27.03	42.70	3.76	6.87	22.6	10.92	15.66
SBFC / SFaC	25.67	28.47	42.20	3.91	6.56	25.4	10.62	18.78

sowano cztery rodzaje mieszank: beton referencyjny [BR], beton referencyjny z włóknami bazaltowymi [BRWB], beton zawierający kruszywo ze spiekane go popiołu lotnego [SFa] oraz beton zawierający spiekany popiół lotny z włóknami bazaltowymi [SFaWB]. Średnie właściwości mechaniczne betonu referencyjnego i betonu z zastosowaniem spiekane go popiołu lotnego z dodatkiem i bez dodatku włókien bazaltowych, podano w tablicy 2.

3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Przygotowane próbki o wymiarach 100 x 100 x 100 mm twardniały w wodzie i badano je po 3, 7 i 28 dniach, zgodnie z normą



Rys. 3. Średni przyrost wytrzymałości na ściskanie w funkcji wieku betonu
Fig. 3. Average compressive strength development over age of concrete.

2.4. Mix Design

Concrete mix for M30 grade concrete was designed as per IS 10262 – 2009 (29) for controlled concrete and sintered fly ash aggregate concrete, by replacing the equal volume of coarse aggregate with sintered fly ash aggregates. The obtained mix proportions for control concrete is 1.00:1.48:2.00/0.45 and for SFA concrete is 1.00:1.48:1.68/0.36, where water content was reduced by 20% due to the addition of high grade superplasticizer. Basalt fibre of 0.56% by mass of concrete was added for fibre reinforced concrete based on trials. In sintered fly ash concrete, w/c ratio was reduced by adding superplasticizer, to maintain workability and strength.

3. Experimental program

Concrete ingredients were proportioned as per the mix design IS: 10262 – 2009 (29), for control concrete with water cement ratio of 0.45. In sintered fly ash aggregate concrete, the equal volume of normal aggregate was fully replaced by sintered fly ash aggregate, at saturated surface dry condition. Four types of mixes, viz. control [CC], control concrete with basalt fibre [CBFC], sintered fly ash aggregate concrete [SC] and sintered fly ash concrete with basalt fibre [SBFC], were used for the preparation of test specimens. Average mechanical properties of control and sintered fly ash concrete with and without basalt fibre are given in Table 2.

3.1. Compressive strength

Specimens of size 100 x 100 x 100 mm were cast and were water cured and tested, at the age of 3 days, 7 days and

IS 516:1959 (30). Stosowano cyfrową maszynę wytrzymałościową do prób ściskania, o nośności 1000 KN. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wszystkich czterech mieszanek przedstawiono w tabeli 2, a zmiany tej wytrzymałości w funkcji czasu twardnienia, dla wszystkich czterech mieszanek, pokazano na rys. 3.

3.2. Wytrzymałość na zginanie

Beleczki o wymiarach 100 x 100 x 500 mm poddano próbie obciążenia czteropunktowego, zgodnie z normą IS 516:1959 (30). Przyjęto rozpiętość efektywną 400 mm i punkt obciążenia w odległości przęśła/3. Miernik tarczowy z dokładnością do 0,01 mm został umieszczony w połowie belki, w celu pomiaru ugięcia w różnych odstępach czasu obciążania. W tabeli 2 i na rys 4 przedstawiono zachowanie wszystkich czterech mieszanek, przy zginaniu.

3.3. Badanie modułu sprężystości

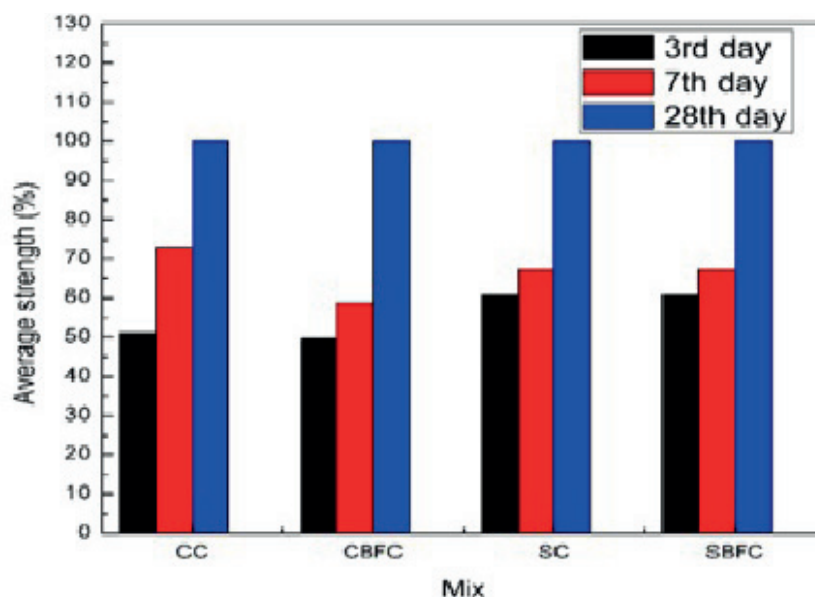
W celu oceny właściwości naprężenie-odkształcenie wszystkich czterech mieszanek przeprowadzono badania próbek cylindrycznych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, zgodnie z normą IS 516:1959 (30). Tensometr mechaniczny [DEMEG], o długości pomiarowej 200 mm, zastosowano do pomiaru wielkości odkształcenia, w różnych przedziałach obciążenia. Na rys. 5 pokazano krzywe naprężenie-odkształcenie dla mieszanek: kontrolnej CC, kontrolnej z włóknami bazaltowymi KBCWBa, ze spiekanego Fa i kontrolnej próbki betonu z włóknami bazaltowymi KBCWBa.

3.4. Próba wrywania pręta stalowego – naprężenie wiązania

Kostki betonowe o wymiarach 100 x 100 x 100 mm, z umieszczonym w środku prętem stalowym o średnicy 12 mm, wykorzystano do badania wrywania pręta stalowego – "pull out" [rys. 6] zgodnie z normą IS: 2770 (Part-1) (32) i badano po 28 dniach twardnienia, wszystkie cztery mieszanki. Naprężenia wiązania mieszanek przy poślizgu 0,025 i 0,25 mm dla CC, BRWBa, SC i SFaWBa, podano w tabelicy 2 i na rys. 6.

3.5. Badanie nasiąkliwości

Badanie nasiąkliwości przeprowadzono na próbkach w formie kostek o wymiarach 100 x 100 x 100 mm, dla czterech rodzajów mieszanek zgodnie z normą IS 1124:1974 (33). Próbki betonowe ze wszystkich rodzajów mieszanek po 28 dniach, suszono w suszarce z gorącym powietrzem, w temperaturze $100 \pm 10^\circ\text{C}$ przez 24 godziny, w celu usunięcia wody. Po 24 godzinach suszenia próbki wyjęto z pieca i pozostawiono do wystygnięcia do temperatury pokojowej. Zmierzono masę ochłodzonej próbki. Następnie wszystkie próbki zanurzano w wodzie i ważono w odstępach co 10 minut, przez 500 minut. Pomiaru masy



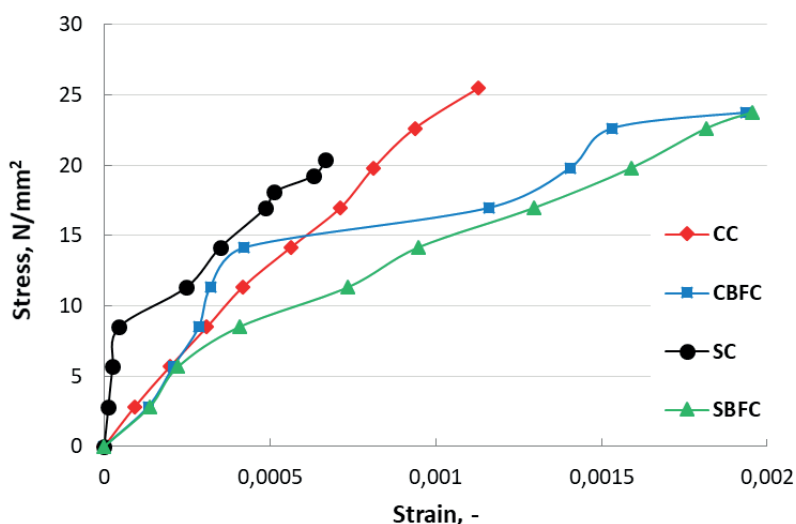
Rys. 4. Względne wytrzymałości na zginanie w funkcji czasu dojrzewania, w %, dla wszystkich czterech mieszanek

Fig. 4. Relative flexural strength gained over age in % for all four mixes

28 days, according to IS 516:1959 (30) using a digital compression testing machine of 1000kN load capacity. The compressive strength test results for all four mixes are presented in Table 2 and compressive strength development over age for all four mixtures is presented in Fig. 3.

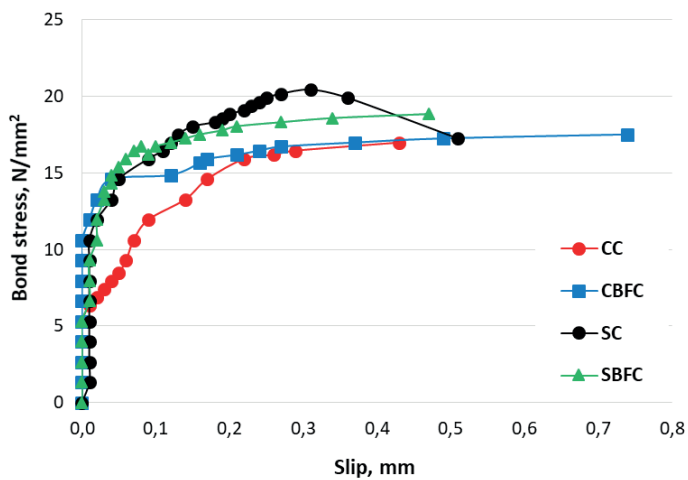
3.2. Flexural strength

Flexural beams of size 100 x 100 x 500 mm were tested under four-point load test according to IS 516:1959 (30). Effective span of 400 mm and load point at distance of span/3 was adopted. A dial gauge with least count of 0.01 mm was placed at mid span of the beam at bottom, to measure the deflection at different load



Rys. 5. Krzywe odkształcenia pod obciążeniem mieszanek CC, BRWBa, SC i KBCWBa

Fig. 5. Compressive stress-strain behaviour for CC, CBFC, SC and SBFC mixes



Rys. 6. Krzywe przedstawiające napężenie w badaniu wyciągania pręta stalowego przy poślizgu 0,025 i 0,25 mm dla mieszanek CC, BRWBa, SC i KBCWBa

Fig. 6. Curves depicting bond stress of mixes at 0.025 and 0.25 mm slip for CC, CBFC, SC and SBFC.

przeprowadzono również po 24, 48 i 72 godzinach. Rys. 7 i 8 przedstawiają szybkość wchłaniania wody w czasie oraz maksymalną nasiąkliwość po 24, 48 i 72 godzinach, dla wszystkich czterech mieszanek.

3.6. Badanie podciągania kapilarnego

Badanie kapilarnego podciągania wody przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach 100 x 100 x 100 mm, dla wszystkich mieszanek. Próbki kostek suszono w piecu gorącym powietrzem, w temperaturze 100°C przez 24 godziny. Po 24 godzinach suszenia próbki ochłodzono do temperatury pokojowej. Z wyjątkiem powierzchni górnej i dolnej, powierzchnie boczne zostały pokryte żywicą epoksydową, aby zapobiec przedostawaniu się i wydostawaniu się wody. Po polimeryzacji próbki pokryte żywicą ważono. Próbki zanurzano w wodzie tak, aby tylko 10 mm próbki było w wodzie – rys. 9.

W odstępach co 10 minut ważono próbki po usunięciu wody powierzchniowej, za pomocą suchej szmatki. Badanie kontynuowano przez 350 minut. Po 350 minutach ważenie przeprowadzono po 24, 48 i 72 godzinach – rys. 10.

3.7. Badanie przepuszczalności chlorków metodą przyspieszoną

Badanie przepuszczalności chlorków szybką metodą [SMPC], po raz pierwszy zaproponowana przez Whitinga, została przyjęta przez American Association of State Highways and Transport Officials (AASHTO) z symbolem I227-83 oraz American Society for Testing Materials (ASTM) o nazwie C-1202. Badanie opiera się na koncepcji polegającej na tym, że transport chlorków przez próbkę betonową odbywa się w warunkach nachylenia i może być przyspieszony przez przyłożenie pola elektrycznego,

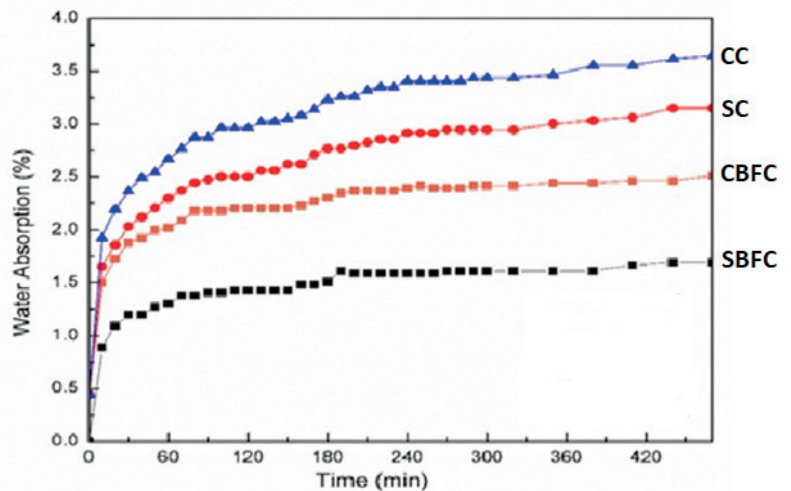
intervals. Table 2 and Fig. 4 present the flexural properties for all four mixtures.

3.3. Modulus of elasticity test

To evaluate the stress-strain properties of all the four mixes 150 mm diameter and 300 mm high cylindrical specimens were tested according to IS 516:1959 (30). Mechanical strain gauge [DEMEG gauge] with 200 mm gauge length was used to measure the strain values, at different load intervals. Fig 5 shows the stress strain curves for CC, CBFC, SC and SBFC mixes.

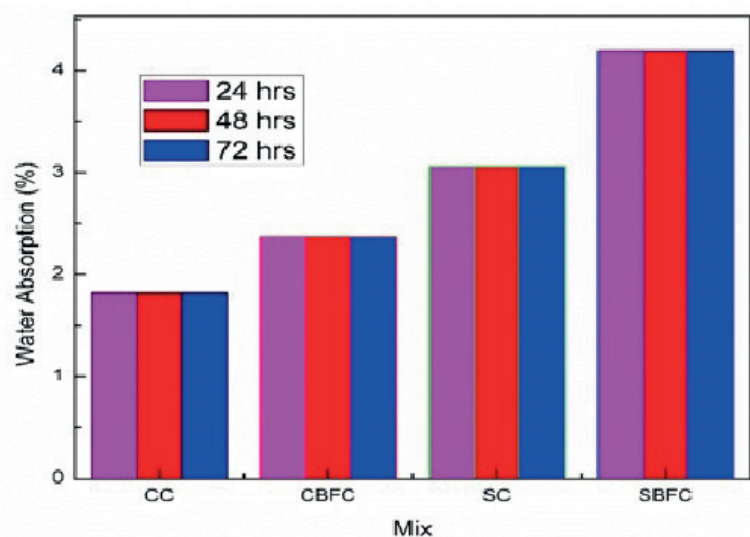
3.4. Pull-out test - bond stress

Concrete cubes of 100 x 100 x 100 mm test specimen and 12 mm diameter steel rod placed at the centre, were used in pull out specimens, confirming to IS: 2770 (Part-1) (32) and tested after 28 days curing for all the four mixtures. The test was performed after 28 days curing and the bond stress of mixes at 0.025 and 0.25 mm slip for CC, CBFC, SC and SBFC are given in Table 2 and Fig. 6.



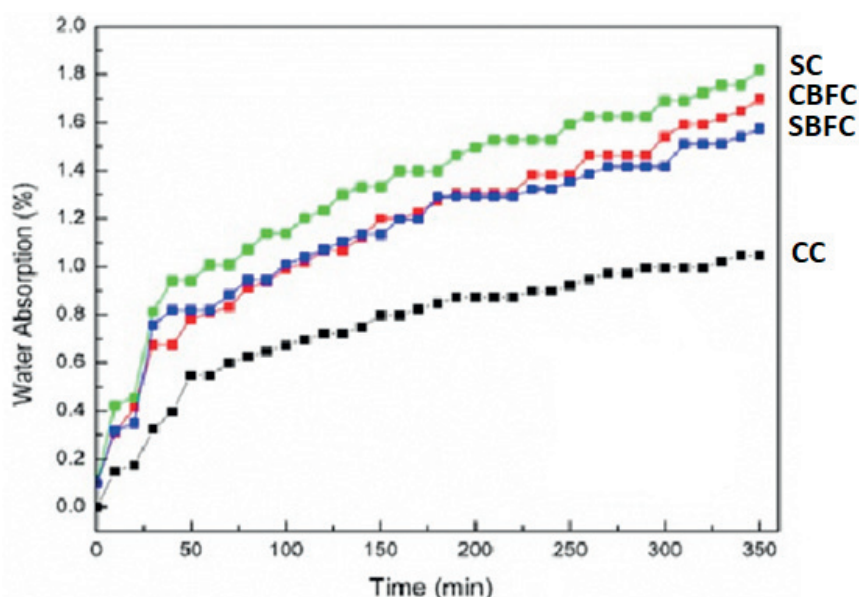
Rys. 7. Szybkość wchłaniania wody przez próbki betonowe

Fig. 7. Rate of water absorption for concrete mixtures



Rys. 8. Absorpcja wody przez beton po 24, 48 i 72 godzinach

Fig. 8. Water absorption at 24, 48 and 72 hours of concrete



Rys. 9. Szybkość podciągania kapilarnego przez próbki betonowe

Fig. 9. Rate of capillary rise for concrete mixtures

a całkowita migracja jonów chlorkowych w określonym czasie, jest odzwierciedlona w odpowiednim skumulowanym prądzie, przewodzonemu w tym czasie. W tej próbie potencjał elektryczny 60 V był przyłożony do betonowej tarczy o średnicy 100 mm i grubości 50 mm, która została zamocowana pomiędzy dwoma przezroczystymi plastikowymi ogniwami, po nasyceniu próbki wodą. Na końcach betonowej tarczy były zamontowane elektrody z siatki miedzianej, a ogniwa uszczelnione gumową uszczelką i odpowiednimi uszczelniającami, aby zapobiec wyciekom. Jedno z ogniw wypełnione było 3% roztworem NaCl, a drugie 0,3M roztworem NaOH – rys. 11. Elektrody z siatki miedzianej podłączono do zewnętrznego źródła prądu stałego o napięciu 60 V i rejestrowano przebieg prądu, w odstępach co 30 minut. Całkowity ładunek przenoszony przez okres 6 godzin oblicza się stosując zasadę Simpsona.

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Określono średnią wytrzymałość na ściskanie dla czterech różnych mieszanek (30) i zestawiono w tabeli 2 oraz przedstawiono na rys. 2 po 3, 7 i 28 dniach twardnienia. Z uzyskanych wyników wyraźnie widać, że wszystkie cztery mieszanki osiągnęły docelową zaprojektowaną wytrzymałość. Stwierdzono, że mieszanka kontrolna ma większą wytrzymałość na ściskanie, od betonu z kruszywem ze spiekane go popiołu lotnego. A dodatek włókien bazaltowych do mieszanki z betonu cementowego, jeszcze bardziej zwiększył jego wytrzymałość, o około 7,5%. Jednak ten sam dodatek do mieszanki betonu początkowo zwiększył jego wytrzymałość na ściskanie, w okresie

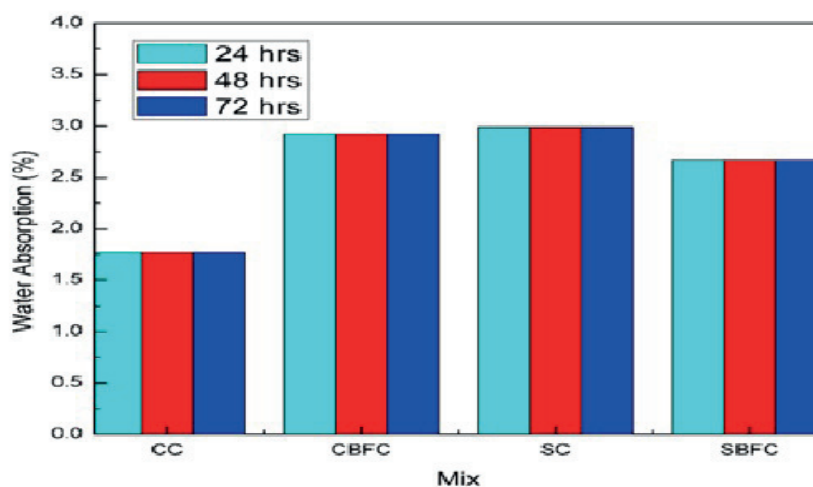
3.5. Water absorption test

Water absorption test was carried out on cube specimens of size 100 x 100 x 100 mm, for the four types of mixtures according to IS 1124:1974 (33). Concrete specimens from all the types of mixtures after 28 days were dried in a hot air oven at $100 \pm 10^\circ\text{C}$ for 24 hours, to remove moisture of the specimens. After 24 hours of drying, specimens were taken out from the hot air oven and kept for cooling to room temperature. Mass of cooled specimen was taken. All the specimens were immersed in water and weighed at every 10 minutes interval, for 500 minutes. Masses were also taken at 24, 48 and 72 hours. Figs. 7 and 8 show the rate of water absorption over time and maximum water absorption at the period 24,48 and 72 hours respectively, for all the four mixtures.

3.6. Capillary rise test

Capillary rise of water test was conducted on 100 x 100 x 100 mm cube specimens, for all the mixtures. Cube specimens were dried in the hot air oven at 100°C for 24 hours. After 24 hours drying, specimens were allowed for cooling to room temperature. Except top and bottom surfaces, side surfaces were coated with epoxy resin, to prevent water to enter and exit. After polymerization of resin coated specimens were weighed. Specimens were immersed in water such that only 10 mm of the bottom was immersed in water [Fig. 9].

At every 10 minutes interval, the samples were weighed after drying the surface water with a dry cloth. Test was continued up to 350 minutes. After 350 minutes, the mass was measured at 24, 48 and 72 hours [Fig. 10].



Rys. 10. Absorpcja wody przez próbki betonu, w wyniku podciągania kapilarnego po 24, 48 i 72 godzinach

Fig. 10. Water absorption through capillary rise at 24, 48 and 72 hours of concrete



Rys. 11. Stanowisko badawcze przepuszczalności chlorków metodą przyspieszoną

Fig. 11. RCPT set up

prawie do 7 dni, podczas gdy po 28 dniu badania wykazał niewielki spadek wytrzymałości betonu, o około 1%. Zastąpienie kruszywa grubego spiekany popiołem lotnym spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie o około 13,3% do 16,5%.

4.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Przeprowadzono badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (31), a wyniki badań różnych mieszank przedstawił w tabeli 2. Zastąpienie kruszywa w betonie kruszywem ze spiekane popiołu lotnego spowodowało zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie, przy rozłupywaniu. Może to wynikać z niewłaściwej orientacji włókien. Spadek wytrzymałości kruszywa w stosunku do próbki kontrolnej wynosi około 22% do 25%. Natomiast wprowadzenie włókien bazaltowych zmniejszyło bardzo znacznie spadek wytrzymałości, do około 3%. Większą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu stwierdzono dla mieszanki kontrolnej [BK]. Dodatek włókien w BK zmniejszył wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, natomiast w przypadku próbki kontrolnej [PK], spowodował jej wzrost. Choć istnieje wiele różnic dla różnych mieszank, wszystkie mieszanki osiągnęły zadowalający wynik zwiększenia docelowej wytrzymałości betonu, prawie o 10% do 15%.

4.3. Wytrzymałość na zginanie

Próbki wszystkich czterech mieszank badano w celu określenia wytrzymałości na zginanie (30). Wyniki badań jednoznacznie wykazały, że największą wytrzymałość na zginanie wykazuje kontrolna mieszanka betonowa KMB, która jest o 13,55% i 8,05% większa, niż w przypadku próbki kontrolnej CC i BCWBa, ta ostatnia zawiera włókna bazaltowe [WBa]. Natomiast dodatek włókna bazaltowego do CC nie zwiększa wytrzymałości, a raczej ją zmniejsza, do około 4,5%. Zmienność ta wynika głównie z rodzaju pęknięć, pochodzących z międzyfazowej strefy przejściowej, spowodowanych odkształceniem przy rozciąganiu wywołanym obciążeniem. Pomimo spadku wytrzymałości na zginanie, spełniła ona wymagania norm, a nawet zwiększyła docelową wytrzymałość na zginanie do około 5%-25%.

3.7. Rapid chloride permeability test

The Rapid Chloride Permeability Test [RCPT] which was first proposed by Whiting, was adopted by American Association of State Highway and Transport Officials [AASHTO] under the designation I227-83 and American Society for Testing and Materials [ASTM] under the designation C-1202. The test is based on the principle that the process of transport of chloride through a concrete specimen is under a gradient and could be accelerated by the application of an electric field and the total migration of chloride ions over a certain duration of time is reflected in the corresponding cumulative current, conducted over the duration. In this test, an electrical potential of 60 V was applied across a 100 mm diameter and 50 mm thick concrete disc specimen, which is fixed between two transparent plastic cells, after the specimen was saturated with water. The end faces of the concrete disc are mounted with copper mesh electrodes and the cells are sealed with rubber gasket and suitable sealants, to prevent leakage. One of the cell is filled with a 3% NaCl solution, while the other is filled with 0.3M NaOH solution [Fig. 11]. The copper mesh electrodes are connected to 60 V external DC power source and the current conducted is recorded at every 30 minutes interval. The total charge carried over a period of 6 hours is computed, by applying the Simpson's rule.

4. Results and discussions

4.1. Compressive strength

The average compressive strength for four different mixes was determined (30) and presented in Table 2 and depicted in Fig. 2 for the third, seventh, and 28th day of curing. From the result, it is clearly noticeable that all the four mixes have attained the target strength of the designed mix. The control mix has been found to have higher compressive strength, than the concrete with sintered fly ash aggregate. Incorporating basalt fibre into the CC mix has even more increased the strength of concrete to about 7.5%. But the same when incorporated in SC mix has initially increased the compressive strength of concrete up to nearly 7 days whereas at 28th day testing it has shown marginal decrease in strength of concrete of about 1%. Replacing coarse aggregate with sintered fly ash has decreased the compressive strength by approximately 13.3%-16.5%.

4.2. Split tensile strength

The test to determine the split tensile strength was conducted (31) and test results of various mixes are presented in Table 2. Replacing CA with sintered fly ash aggregate has shown the decrease in the split tensile strength. This may be due to the improper orientation of the fibre. The decrease in strength of SC than CC is around 22% to 25%. But inducing basalt fibre has decreased the reduction in strength, to around 3%. The higher split tensile is found for the mix CC. Incorporating fibre in CC has decreased the split tensile strength, whereas for SC it has increased the strength. Though there are much variations for different mix; all the mix have found

4.4. Moduł sprężystości

Przeprowadzono badania mające na celu określenie modułu sprężystości próbek betonowych [30]. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6 jako zależność naprężenie – odkształcenie; można wyraźnie zauważyć, że zastąpienie kruszywa grubego spowodowało zmniejszenie wartości E betonu. Wynika z tego, że zamiana może zmniejszyć sztywność betonu. Pomimo spadku wartości E, wartość ta wzrasta po dodaniu włókien bazaltowych. Stwierdzono, że wzrost wartości E wynosi około 3,2% - 5,5%. Spadek wartości E dla SC i SFaC wynosi odpowiednio około 7,5% -10% CC i BRFC. Wartość modułu Younga dla SC i SFaC wynosi odpowiednio 22,6 GPa i 25,4 GPa, co oznacza, że mieszanka SC i SFaC może być uznana za beton lekki dla betonu klasy M30.

4.5. Próba wrywania pręta stalowego

Badanie to przeprowadza się zgodnie z normą IS 2770 w celu oceny wytrzymałości na rozciąganie wiązania pomiędzy zbrojeniem a betonem (32-35). Uzyskane wyniki badań zestawiono w tabeli 2, a zależność pomiędzy poślizgiem a naprężeniem wiązania, przedstawiono w postaci wykresu na rys. 8. Wyższe naprężenie wiązania odnotowano dla mieszanki SC dla poślizgu 0,025 mm, co stanowi wartość około 38,46% większą niż w przypadku mieszanki CC i 2,8% niż w przypadku SFaWB. Można również wyraźnie wywnioskować, że dodanie włókien bazaltowych zwiększyło naprężenie wiązania CC do około 36%. Jednak dodanie go do mieszanki SC nie spowodowało większych zmian w naprężeniu wiązania dla poślizgu 0,025 mm, natomiast dla 0,25 mm zwiększyło wytrzymałość wiązania w betonie do około 1,5% [36,37]. Zmiana naprężenia wiązania dla poślizgu 0,25 mm pomiędzy różnymi mieszankami jest stosunkowo mała, a inaczej rzecz ma się w przypadku poślizgu 0,025 mm. Głównym powodem wysokiego naprężenia wiązania dla mieszanki SC jest spoistość materiału, który w ten sposób utrzymuje cząstki razem, zmniejszając naprężenie ścinające i zwiększając naprężenie wiązania pomiędzy spoiwem lub betonem a prętem stalowym. Jak omówiono wcześniej w wyniku badania wytrzymałości na ściskanie, „ulepszona” hydratacja zwiększa gęstość betonu poprzez wypełnienie porów drobnymi wypełniaczami.

5. Trwałość

5.1. Badanie nasiąkliwości

Oznaczenie nasiąkliwości wody przeprowadzono w oparciu o standardowe metody (33). Na rys. 7 przedstawiono szybkość absorpcji wody przez mieszanki betonowe uwarunkowane przepuszczalnością przez ok. 8 h, a na rys. 8 szybkość absorpcji wody przez 24 h, 48 h i 72 h. Z obu wykresów można wywnioskować, że do 8 godzin następuje wzrost procentu absorpcji wody, ale później, tj. przez 1 dzień, 2 dni i dłużej procent absorpcji wody jest stały (38,39). Można więc stwierdzić, że w miarę starzenia się betonu zmniejsza się szybkość absorpcji wody przez beton. Absorpcja wody dla mieszanki SFaWB jest bardzo duża, w po-

to achieve the satisfactory result of increasing the target strength of concrete nearly 10% to 15%.

4.3. Flexural strength

The specimens of all four mixtures were tested to determine the flexural strength (30). The results have clearly shown the highest flexural strength lies for the mix SC which is nearby 13.55% and 8.05% higher than that of CC and CBFC, respectively. Whereas adding basalt fibre to SC does not increase the strength, rather decreases the strength to around 4.51%. This variation is mainly due to the fracture pattern originating from the interfacial transition zone, caused because of the tensile strain induced when loaded. Though there is decrease in the flexural strength it has met the standards and even have increases the targeted flexural strength to around 5%-25%.

4.4. Modulus of elasticity

The test to determine the modulus of elasticity of the concrete specimens were carried out (30) and presented in Table 2. The result obtained is depicted in the Fig. 6 as the stress strain relationship and can be clearly noticed that the replacement of coarse aggregate has decreased the E value of concrete. This infers that the replacement may decrease the stiffness properties of the concrete. Though there is fall of E value, it is increased when basalt fibre is incorporated. The increase in E value is found to be around 3.2%-5.5%. The decrease in E value for SC and SBFC is around 7.5%-10% for CC and CBFC, respectively. The value of Young's modulus for SC and SBFC is 22.6 GPa and 25.4 GPa, respectively which imparts that the mix SC and SBFC can be considered as light weight concrete for M30 grade concrete.

4.5. Pull-out test

This test is conducted according to IS 2770, to evaluate the bond tensile strength between reinforcement and concrete (32-35). The test results obtained are presented in Table 2 and the relationship between the slip and bond stress is depicted in the form of graph in Fig. 6. The higher bond stress is been noticed for the mix SC for 0.025mm slip around which is around 38.46% higher than CC mix and 2.8% than CBFC. It can also be clearly inferred that adding basalt fibre has increased the bond stress of CC, to about 36%. But adding it to SC mix has not much variation in bond stress for 0.025 mm slip whereas for 0.25 mm, it has increased the bond strength in concrete to about 1.5% (36,37). The variation of bond stress for 0.25 mm slip between various mix is comparatively low than for 0.025 mm slip. The main reason for high bond stress for SC mix is mainly due to the cohesive nature of the material which will thereby hold tight the particle together decreasing the shear stress and increasing the bond stress between the binder or the concrete and the steel bar. As discussed in compressive strength result the improved hydration increases the densities in concrete, by filled the pores with fine fillers.

równaniu z pozostałymi mieszankami. Choć w porównaniu z innymi mieszankami, SFaWB ma większy procent absorpcji, wyniki mieszczą się w zakresie określonym przez normę ASTM C 140. Wynika z tego, że średnia absorpcja próbek nie przekracza 7%. Główną przyczyną wzrostu nasiąkliwości – w % dla SC i SFaWB jest fakt, że mimo iż kruszywo z popiołów lotnych może wytworzyć odpowiednie uziarnienie, głowica dociskowa działająca na powierzchni zwiększa przepuszczalność wody w betonie ze względu na niską sztywność. Jednak ten wzrost absorpcji wody może być zmniejszony w miarę dojrzewania, z powodu późniejszego zwiększenia sztywności materiału.

5.2. Podciąganie kapilarne

Pomiar szybkości absorpcji wody w betonie przeprowadzono obserwując przyrost masy próbki wynikający z absorpcji wody w funkcji czasu na eksponowanej powierzchni (33). Choć właściwość przepuszczalności betonu jest badana przez poprzednio omówione wyniki, ważne jest również, aby zbadać działanie kapilarne w betonie, które może również wpływać na trwałość betonu. Z rys. 9 i 10 wynika, że do 8 godz. następował stopniowy wzrost procentowego udziału absorpcji wody kapilarnej, ale po 24 godz., 48 i 72 godz. udział ten ustabilizował się (40,41). Porównując wynik z procentową wartością absorpcji wody przez przepuszczalność, zmniejsza się absorpcja wody przez zasysanie lub podciąganie kapilarne (42). Dla mieszanek CC, SC i SFaWB został on zmniejszony odpowiednio do 2%, 2,4% i 57%. Jednak po dodaniu włókien bazaltowych w CC absorpcja wody przez zasysanie jest o 24% wyższa niż przez przepuszczalność. Dodatek włókna bazaltowego do S.C. – to jest do mieszanki SFaWB spowodował zmniejszenie procentowej chłonności wody, natomiast w przypadku SBFaC jej zwiększenie. Różnice te wynikają głównie z niewłaściwej orientacji i rozmieszczenia włókien. Pomimo niewielkiego wzrostu procentowej absorpcji wody dla betonu z substytutem kruszywowym, mieści się ona w zakresie akceptowalnym.

5.3. Badanie penetracji chlorków metodą przyspieszoną

Tabela 3 wyraźnie podaje ładunek przekazany w kulombach dla różnych mieszanek w 28 dniu.

Na podstawie wyników badań można wnioskować, że dodatek włókna bazaltowego zwiększył intensywność penetracji chlorków (41). Może to być spowodowane losową orientacją włókien, co prowadzi do tworzenia się niewielkich porów, które umożliwiają penetrację chlorków. Pomimo wzrostu penetracji chlorków, ocena penetracji chlorków (wg AASHTO C 1202) jest mała, a dla betonu z dodatkiem spiekane go popiołu lotnego, jako kruszywa grubego jest bardzo niska, co potwierdza, że beton ten może być stosowany w budownictwie, gdzie w pewnym stopniu wymagana jest odporność na korozję (43,44). Wzrost szybkości penetracji chlorków dla SFaWB w stosunku do CC wynosi około 87%. Zmniejszenie penetracji chlorków przy całkowitym zastąpieniu kruszywa grubego spiekany m popiołem lotnym wynosi około 46%. Zmniejszenie penetracji chlorków przy całkowitym zastąpieniu kruszywa grubego spiekany m popiołem lotnym wynosi około 46%.

5. Durability properties

5.1. Water absorption test

Determination of water absorption was carried out based on standard methods (33). The Fig. 7 depicts the rate of water absorption for concrete mixtures due to permeability for about 8 hrs and the Fig. 8 depicts the rate of water absorption for 24 hrs, 48 hrs and 72 hrs. From both graphs it is inferred that till 8hrs there is increase in the percentage of water absorption but later on that is for 1 day, 2 day etc., the percentage of water absorption is constant (38,39). Thus it may be concluded that as the concrete is matured, the rate of water absorption in concrete is decreased. The water absorption for SBFC mix is very high, compared to the other mix. Though comparing with the other mix, SBFC has the higher percentage of absorption, the results are within the range specified in ASTM C 140. It is clear from the result that the average absorption of the specimens is not greater than 7%. The main reason for the increase in water absorption for SC and SBFC is that though fly ash aggregate can produce proper grading the pressure head acting in the surface increases the water permeability in concrete due to the low stiffness. But this increase in water absorption can be decreased as it ages due to later stiffening of the material.

5.2. Capillary rise

Measurement of the rate of water absorption in concrete was carried out by founding the increase in mass of specimen, resulting from absorption of water as a function of time, over the exposed surface (33). Though permeability property of concrete is studied through previous discussed result, it is also vital to study the capillary action in concrete which could also affect the durability of concrete. From the Figs. 9 and 10 it can be clearly understood that till 8 hrs there was gradual increase in the percentage of capillary water absorption but after 24 hrs, 48 hrs and 72 hrs it has become steady (40,41). Comparing the result with the percentage of water absorption through permeability, the water absorption through suction or capillary rise is reduced (42). For the mix CC, SC and SBFC it has been reduced at 2%, 2.4% and 57% respectively. But adding basalt fibre in CC the water absorption through suction is 24% higher than through permeability. Incorporating basalt fibre in SC i.e. for mix SBFC, has reduced the percentage of water absorption but for CBFC it has increased. This variation is mainly due to the improper orientation and distribution of fibre. Though there is slight increase in the percentage of water absorption for aggregate replaced concrete, it is within the acceptance range.

5.3. Rapid chloride penetration test

Table 3 clearly shows the charge passed in Coulombs for various concrete at 28th day. From the test result it can be inferred that addition of basalt fibre has increased the amount of chloride penetration (41). This may be due to the random orientation of fibre thus leading to formation of small pores which allows the chloride penetration. Though there is increase in chloride penetration, the rating for chloride penetration, according to AASHTO C 1202, is

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI BADANIA PRZEPUSZCZALNOŚCI CHLORKÓW METODĄ PRZYSPIESZONĄ, DLA WSZYSTKICH CZTERECH BADANYCH MIESZANEK
RAPID CHLORIDE PERMEABILITY TEST RESULTS OF ALL THE FOUR MIXTURES INVESTIGATED

Designation Oznaczenie	Age of curing, days Okres twardnienia, dni	Charge passed, coulombs Przepuszczony ładunek, kulomby	Rating for chloride permeability Ocena przepuszczalność
CC	28	1045.8	Low / Niska
CBFC / SFaC	28	1974.6	Low / Niska
SC	28	558.0	Very Low / Bardzo niska
SBFC / SFaWB	28	781.2	Very Low / Bardzo niska

6. Wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach właściwości mechanicznych mieszanek CC, SFaC, SC i SFaWB sformułowano następujące wnioski.

- 1) Na podstawie właściwości mechanicznych, stwierdzono zadowalającą wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywa lekkiego klasy M30, po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskanego kruszywa lekkiego gwarantuje jego zastosowanie w betonie konstrukcyjnym, w elementach rozciąganych. Wytrzymałość na zginanie uzyskanego kruszywa lekkiego wykazała 13% wzrost wytrzymałości, w porównaniu z betonem referencyjnym.
- 2) Przeprowadzono badania naprężenie-odkształcenie i ustalono akceptowalne wartości modułu sprężystości mieszanek CC, SC, SFaC i SFaWB dla 40% obciążenia granicznego, w odniesieniu do normy ASTM C-369.
- 3) Naprężenia wiązania obliczono dla poślizgu 0,025 mm i 0,25 mm. Naprężenie wiązania dla SC wzrosła o 50% dla poślizgu 0,025 mm i o 22,9% dla poślizgu 0,25 mm, w porównaniu do CC. Jednak w przypadku SFaC nastąpił spadek o 24% dla poślizgu 0,025 mm i wzrost o 15%, w porównaniu z SFaWB.
- 4) Z punktu widzenia trwałości, absorpcja wody przez lekki beton kruszowy okazała się większa niż w przypadku betonu referencyjnego, ale nadal procent absorpcji mieści się w normach określonych w ASTM C 140.
- 5) Wyniki SMPC dowiodły, że ten rodzaj lekkiego betonu kruszowego może być istotnym przełomem w dziedzinie betonów lekkich o wyższej odporności na penetrację chlorków, ponieważ wykazał znacznie niższą przepuszczalność chlorków niż beton referencyjny.
- 6) W oparciu o uwagi końcowe, wstępne prognozy wynikające z niniejszej pracy są takie, że lokalna dostępność popiołów lotnych i kruszyw z nich wykonanych, będzie w przyszłości szeroko wykorzystywana do produkcji betonu

low and that for the concrete with sintered fly ash as coarse aggregate is very low, which confirm that the concrete can be used for construction where corrosion resistant is required to some extent (43,44). The increase in the rate of chloride penetration for CBFC to that of CC is around 87%. And the decrease in chloride penetration when the coarse aggregate is completely replaced with sintered fly ash, is around 46%. The chloride penetration for SC and SBFC is very low.

6. Conclusion

Based on the results obtained from the experimental investigations of mechanical and durability properties of CC, CBFC, SC and SBFC the following are the major conclusions drawn.

- 1) Considering the mechanical properties, the compressive strength of M30 grade light weight aggregate concrete was found satisfactory during 3 days, 7 days and 28 days of curing. The split tensile strength of the light weight aggregate obtained ensures its use as structural concrete, in tension members. The flexural strength of the light weight aggregate obtained, showed a 13% increase in strength, when compared to controlled concrete.
- 2) The study of stress strain behaviour was carried out and accepted values of modulus of elasticity of CC, SC, CBFC and SBFC are found under 40% of the ultimate load with reference to ASTM C-369.
- 3) The bond stress values were calculated for a slip of 0.025 mm and 0.25 mm and the bond stress value for SC increase 50% for a slip of 0.025 mm and 22.9 % increase for a slip of 0.25 mm, compared to CC. But in the case of SFaC there was a decrease of 24 % for a slip of 0.025 mm and an increase of 15 % compared to CBFC.
- 4) From the durability point of view, the water absorption of light weight aggregate concrete was found higher than the controlled concrete but still the percentage of absorption is within the standards specified as per ASTM C 140.

konstrukcyjnego, który jest mocny, ale lekki, odporny chemicznie, nieprzepuszczalny, wysoce trwały, a także ekonomiczny i przyjazny dla środowiska.

Literatura / References

1. Z.T. Yao, X.S. Ji, P.K. Sarker, J.H. Tang, L.Q. Ge, M.S. Xia, Y.Q. Xi, A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth Sci. Rev.* **141**, 105–121 (2015).
2. S.Sahoo, B.B. Das, Mineralogical Study of Concretes Prepared Using Carbonated Fly ashes Part Replacement of Cement.In: B. Das, N. Neithalath (Eds) *Sustainable Construction and Building Materials. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 25. Springer, Singapore. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_45.
3. C.-H. Huang, S.-K. Lin, C.-S. Chang, H.-J. Chen, Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Constr. Build. Mater.* **46**, 71–78 (2013).
4. G.S.Ryu, Y.B. Lee, K.T.Koh, Y.S. Chung, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Constr. Build. Mater.* **47**, 409–418 (2013).
5. N.U. Kockal, T. Ozturan, Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes. *J. Hazard. Mater.* **179**, 954–965 (2010).
6. E.Soco, J.Kalembkiewicz, Investigations of sequential leaching behaviour of Cu and Zn from coal fly ash and their mobility in environmental conditions. *J. Hazard. Mater.* **145**, 482–487 (2007).
7. C.W. Babbitt, A.S. Lindner, A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida. *J. Clean. Prod.* **13**, 903–912 (2005).
8. M.S. Nadesan, P. Dinakar, Structural concrete using sintered fly ash lightweight aggregate: A review. *Constr. Build. Mater.* **154**, 928–944 (2017).
9. M.S. Nadesan, P. Dinakar, Influence of type of binder on high-performance sintered fly ash lightweight aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* **176**, 665–675 (2018).
10. M.N. Haque, H. Al-Khaiat, O. Kayali, Strength and durability of lightweight concrete. *Cem. Concr. Comp.* **26**, 307–314 (2004).
11. H. Al-Khaiat, M.N. Haque, Effect Of Initial Curing On Early Strength And Physical Properties Of A Lightweight Concrete. *Cem. Concr. Res.* **28**(6), 859–866 (1998).
12. O. Kayali, M.N. Haque, B. Zhu, Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* **29**, 1835–1840 (1999).
13. O. Kayali, M.N. Haque, B. Zhu, Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cem. Concr. Comp.* **25**, 207–213 (2003).
14. B. Chiaia, J.G.M. van Mier and A. Vervuurt, Crack Growth Mechanisms In Four Different Concretes: Microscopic Observations And Fractal Analysis. *Cem. Concr. Res.* **28**(1), 103–114 (1998).
15. M.E.Arslan, Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement. *Constr. Build. Mater.* **114**, 383–391 (2016).
16. C. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen, Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Mater. Des.* **58**, 187–193 (2014).
17. J. Branston, S. Das, S.Y. Kenno, C. Taylor, Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **124**, 878–886 (2016).

- 5) RCPT results have proven that this type of light weight aggregate concrete could be a major breakthrough in light weight concrete with higher resistance against chloride penetration as it has shown much lower chloride permeability than controlled concrete.
- 6) Based on concluding remarks the initial anticipation from this paper is that the local availability of fly ash and the aggregates made from, it will be used extensively in future for the production of structural concrete, which is strong but light in weight, chemical resistant, impermeable, highly durable, also economical and eco-friendly.

18. V.Dhanda, G. Mittala, K.Y. Rhee, D. Hui, A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. *Compos. B* **73**, 166-180 (2014). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>.
19. J. Sim, C. Park, D.Y. Moon, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Compos. B* **36**, 504–512 (2005).
20. V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, A. Valenza, A review on basalt fibre and its composites, *Compos. B* **74**, 74-94 (2015).
21. J.J. Lee, J. Song, H. Kim, Chemical Stability of Basalt Fiber in Alkaline Solution. *Fibers Polym.* **15**(11), 2329-2334 (2014).
22. B.Wei, H. Cao, S. Song, Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Mater. Sci. Eng. A* **527**, 4708–4715 (2010).
23. V. Fiore, G. Di Bella, A. Valenza, Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Mater. Des.* **32**, 2091–2099 (2011).
24. A. Esnaola, I. Ulacia, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea, I. Gallego, Quasi-static crush energy absorption capability of E-glass/polyester and hybrid E-glass-Basalt/polyester composite structures. *Mater. Des.* **76**(5), 18-25 (2015). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.044>.
25. J. Chakkamalayath, M.Santhanam, R.Gettu, Cement-superplasticiser compatibility - Issues and challenges. *Indian Concr. J.* **85**(7):48-60 (2011).
26. IS 12269: 1987 Specification -For 53 Grade Ordinary Portland cement, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
27. IS: 383-1970 - Specification For Coarse And Fine Aggregates From Natural Sources For Concrete, Bureau Of Indian Standards, New Delhi, India.
28. IS: 2386 (Part III) – 1963, Specific Gravity, Density, Voids, Absorption And Bulking ,Bureau Of Indian Standards, New Delhi,India.
29. IS 10262 (2009): Guidelines for concrete mix design proportioning, Bureau Of Indian Standards, New Delhi,India.
30. IS: 516 – 1959- Methods of Tests for Strength Of Concrete, Bureau Of Indian Standards, New Delhi, India.
31. IS 5816 (1999): Method of Test Splitting Tensile Strength of Concrete, Bureau Of Indian Standards, New Delhi, India.
32. IS 2770-1 (1967): Methods of testing bond in reinforced concrete, Part 1: Pull-out test, Bureau Of Indian Standards, New Delhi, India.
33. IS 1124 (1974): Method of test for determination of water absorption, apparent specific gravity and porosity of natural building stone, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
34. L. Krishnaraj,P.T. Ravichandran, Characterisation of ultra-fine fly ash as sustainable cementitious material for masonry construction. *Ainsham Eng. J.* **12**, 259–269 (2021)
35. L.Krishnaraj, R. Niranjana, S.K. Rajendran, K.G. Prem,Characterization study of Zinc Sulphate's Influence and Retarding Mechanism with Coarser and Finer Fly Ash Particles in Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering.* **24**, 2751–2766 (2020).
36. L. Krishnaraj, R. Niranjana, G. Prem Kumar, S. Kumar Rajendran, Numerical and experimental investigation on mechanical and thermal behaviour of brick masonry: An efficient consumption of ultrafine fly ash. *Constr. Build. Mater.* **253**, 119232 (2020).
37. L. Krishnaraj, P.T. Ravichandran, Investigation on grinding impact of fly ash particles and its characterization analysis in cement mortar composites. *Ain Shams Eng. J.* **10**, 267–274 (2019).
38. L. Krishnaraj,P.T. Ravichandran, Impact of Chloride Grinding Aid with Modified Fly Ash using Top down Nanotechnology on Grinding Performance. *Constr. Build. Mater.* **199**, 225–233, (2019).
39. L. Krishnaraj, P T Ravichandran, S.Sagadevan, Synthesis and Characterization of Grinding Aid Fly Ash Blended Mortar Effect on Bond Strength of Masonry Prisms. *Mater. Res. Express*, **5**, 045052 (2018).
40. L. Krishnaraj, P. T. Ravichandran, P. R. Kannan Rajkumar, P. KeerthyGovind, Effectiveness of Alkali Activators on Nano Structured Fly ash in Geopolymer Mortar. *Indian J. Sci. Techn.* **9**(33), 1-7 (2016).
41. P. R. Kannan Rajkumar, P. T. Ravichandran, J. K. Ravi, L. Krishnaraj, Investigation on the Compatibility of Cement Paste with SNF and PCE based Superplasticizers. *Indian J. Sci. Techn.* **9**(34), 1-5 (2016).
42. N. Arivusudar, S. Suresh Babu, Performance of ground granulated blast-furnace slag based engineered cementitious composites. *Cem. Wapno Beton*, **25**, 94-102 (2020). doi: <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.2.2>.
43. A.R.Krishnaraja, S Kandasamy, S Anandakumar, S.M.Jegan, Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites. *Cem. Wapno Beton* **23**, 479-486 (2018).
44. N. Arivusudar, S. Suresh Babu, Mechanical properties of engineered cementitious composites developed with silica fume. *Cem. Wapno Beton* **25**(4), 282-291(2020). doi: <https://doi.org/10.32047/cwb.2020.25.4.3>.