

## Właściwości mechaniczne i inżynierskie kompozytów cementowych zawierające dodatek dwóch rodzajów włókien

## Mechanical performance of engineered cementitious composites developed with different modulus fibers

A.R. Krishnaraja<sup>1</sup>, M. Harihanandh<sup>2\*</sup>, S. Anandakumar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Kongu Engineering College, Perundurai, Tamilnadu-638052 India.

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Marri Laxman Reddy Institute of Technology and Management, Dundigal, Hyderabad, Telangana, India - 500043

\*Corresponding author, M. Harihanandh, e-mail: [harivmk@gmail.com](mailto:harivmk@gmail.com)

### Streszczenie

W niniejszej pracy podjęto próbę poprawy właściwości cementowych kompozytów konstrukcyjnych [CKK] stosując dodatek dwóch rodzajów włókien. Zbadano pięć różnych dodatków włókien, w tym trzy składy z pojedynczym rodzajem włókien o udziale objętościowym 2,0%, natomiast pozostałe dwie mieszanki hybrydowe zostały opracowane z dwoma rodzajami włókien. Składy hybrydowych CKK ustalono stosując mieszaninę włókien o małym module – włókna z poli(alkoholu winylowego) i włókien o dużym module – stalowych i szklanych. Trzy warianty składu wykonano z włókien metalowych, szklanych i włókien z poli(alkoholu winylowego). Hybrydowe mieszanki włókien przygotowano mieszając 2/3 włókien z poli(alkoholu winylowego) i 1/3 włókna metalicznego w udziale łącznym wynoszącym 2,0% objętościowych oraz 2/3, włókien z poli(alkoholu winylowego) oraz 1/3 włókien szklanych. Ta metoda dała dobry wynik z punktu widzenia właściwości CKK, przy rozciąganiu i zginaniu. Na podstawie tych wyników stwierdzono, że włókno z poli(alkoholu winylowego) w udziale 2/3 i włókno szklane o udziale 1/3, z sumarycznym udziałem objętościowym 2,0%, wykazują korzystne właściwości.

**Słowa kluczowe:** CKK, włókna hybrydowe, włókna o małym module sprężystości, włókna o dużym module sprężystości

### Summary

In this study, an effort was taken to progress the performance of Engineered Cementitious Composites [ECC] mix, by incorporating two different fibers. Five different proportions were subjected to investigation, in this three different proportions were developed with single fiber with 2.0% volume fraction, other two proportions were with two types of fibers. Hybrid ECC proportions were organized through the mixture of low-modulus fibers [poly(vinyl alcohol) fiber] and high-modulus fibers [steel and glass fibers]. Three proportions were made with metallic, glass fiber and poly vinyl alcohol fiber. The hybridation proportions were made with a 2/3 fraction of poly vinyl alcohol fiber and 1/3 fraction of the metal fiber in 2.0% of volume fraction and accompanied with poly vinyl alcohol fiber 2/3 fraction and 1/3 fraction of glass fiber. This procedure has a good rate of success in tensile and bending behavior of ECC mix. From this effort, it was concluded that poly(vinyl alcohol) fiber 2/3 fraction and 1/3 fraction of glass fiber in 2.0% volume fraction, displayed reasonable traits.

**Keywords:** ECC, hybrid fiber, low modulus fiber, high modulus fiber

### 1. Wprowadzenie

Beton o dużej wytrzymałości [BWW] był pod koniec XX wieku bardzo polecany do wszystkich zastosowań konstrukcyjnych, jako materiał wzmacniający. Pomimo, że BWW wykazuje dobrą

### 1. Introduction

High-performance concrete [HPC] was highly recommended for all structural applications as a strengthening material, at the end of twentieth century. Although HPC concrete exhibits good struc-

trwałość strukturalną, to jego kruchość (1), powoduje pękanie konstrukcji. Szczególnie w konstrukcjach odpornych na wstrząsy sejsmiczne, w przypadku, których wymagany jest beton o dużej plastyczności, zastosowanie betonu BWW jest ograniczone, z powodu jego kruchości. Ten warunek prowadzi do rozwoju materiałów cementowych o dużej plastyczności. Zbrojone włóknami cementowe kompozyty konstrukcyjne [CKK] mają lepsze właściwości mechaniczne od innych betonów dzięki doskonałemu twardnieniu przy odkształcaniu i efektowi mostkowania przez włókna, dzięki licznym pęknięciom w strefie rozciągania. Aby zminimalizować uszkodzenia mikrostruktury, mieszanki CKK są głównie produkowane z włóknami polipropylenowymi, polietylenowymi i włóknami z poli(alkoholu winylowego) [WPW].

W ostatnich latach zastosowano różne rozwiązania i podejścia techniczne, aby znacznie poprawić właściwości CKK. CKK zawiera podobne składniki jak beton zbrojony włóknami [BZW], bez kruszywa grubego. W celu uzyskania nowego hybrydowego CKK połączono różne włókna, jednak z WPW uzyskano dobre właściwości mechaniczne, dobrą trwałość, zdolność do samoza-gęszczania przy minimalnym zastosowaniu sprzętu, zwłaszcza przy zastosowaniu w terenie. Technika optymalizacji kompozytów oparta na analizie mikromechanicznej (2,3) zapewniła poprawę właściwości CKK, dzięki dostosowaniu różnych właściwości głównych składników, stosowanych w mieszankach CKK. Różnorodne elementy strukturalne, jak np. połączenie belka-słup (4), pasy CKK w płycie żelbetowej (5), płyta łącząca w mostach (6), okładziny tuneli (7), mur oporowy i kanał przelotowy (8), modernizacja zapory Mitaka (9), przepustnice (10), modernizacja ścian murowanych (11) i konstrukcje o dużej odporności na ścinanie (12), są dobrze znanymi zastosowaniami CKK. Dostępność szerokiej gamy włókien otwiera drogę do rozwoju materiałów kompozytowych, wzmacnianych włóknami (13). Niniejsza praca badawcza ma na celu opracowanie nowych kompozytów włóknistych dzięki połączeniu zalet włókien o małym i dużym module Younga. W tej pracy włókna WPW mają mały moduł Younga, natomiast włókna stalowe i szklane duży moduł Younga. Włókna stalowe i szklane, zastosowane wraz z włóknami z PW w procesie hybrydyzacji, powodują poprawę właściwości mechanicznych (14-18), co z kolei zwiększa wytrzymałość betonu na rozciąganie i zginanie.

## 2. Materiał i metody

### 2.1. Materiały cementowe

Do badań zastosowano cement portlandzki [OPC] klasy 53. Popiół lotny klasy F użyto jako dodatek do cementu, który zwiększa jakość betonu (19). W tablicy 1 podano skład chemiczny cementu portlandzkiego i popiołu lotnego.

### 2.2. Piasek

Jako kruszywo drobne w mieszance CKK stosowano piasek. Zazwyczaj w przypadku CKK nie stosuje się kruszywa grubego, dlatego przy wyborze drobnego kruszywa należy zachować szczególną ostrożność. W niniejszych badaniach użyto piasku,

tural stability, brittleness measured by brittleness number (1) of it, results in cracking of the structure. Specifically in seismic-resistant structures where the requirement of ductile concrete is essential, the usage of HPC is limited, because of its brittleness. This condition leads to the development of high ductile cementitious materials. The evaluation of Engineered Cementitious Concrete [ECC] overdid the work of HPC by possessing the ductility factors such as excellent strain hardening nature, fibre bridging effect, owing to multiple cracks in the tension zone. To minimize the damage of the microstructure, ECC proportions are generally made with the polypropylene, polyethylene fiber and poly(vinyl alcohol) [PVA] fibers.

In the recent years, various strategies and technical approaches are adopted considerably to improve the performance of ECC. ECC contains similar ingredients to Fiber Reinforced Concrete [FRC], without coarse aggregate. A range of fibers were combined to make a new hybrid ECC, but the use of PVA fiber resulted with notable characteristics in mechanical performance, durability, expenditure, self-consolidation, minimum equipment force and field application. The micro-mechanistic based composite optimization technique (2, 3) ensures that the performance of ECC is maximized, by providing guidance in various major parameters of the ingredients, to be present in the ECC mixes. Various infrastructures include beam-column joint (4), ECC strips in RC slab (5), link slab in bridges (6), tunnel linings (7), retaining wall and via duct (8), Mitaka dam retrofit (9), dampers (10), retrofit for masonry wall (11) and shear resistance (12), are the well-known applications of ECC. The availability of vast varieties of fibres opens the way for the advancement of fiber reinforced composite materials (13). This research work intended to develop the new fiber composites by taking advantages of combined contribution of low Young's modulus and high Young's modulus fibers. In this work PVA fiber act as low Young's modulus fiber and high Young's modulus fibers as steel fibers and glass fibers. Steel and glass fibers used as a partial fraction of PVA fibers, by hybridation process, with the improvement in the mechanical properties (14-18), which in turn increases improved tensile strength and flexural strength of concrete.

## 2. Material and methods

### 2.1. Cementitious Materials

Ordinary Portland cement [OPC] of grade 53 was used. Class F fly ash was used as an supplementary cementitious material, which increases the performance of concrete (19). Table 1. shows the OPC and class F fly ash chemical composition.

### 2.2. Sand

Sand was used as a fine aggregate in the ECC mix. Usually ECC is developed without coarse aggregate; so special care has been taken in the selection of fine aggregate. For this study, sand collected from river bed was used. Specific gravity and fineness modulus of sand was 2.67 and 3.27 respectively. Fig. 1. shows the particle distribution of sand determined by sieve analysis.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU PORTLANDZKIEGO I POPIOŁU LOTNEGO KLASY F

CHEMICAL COMPOSITION OF ORDINARY PORTLAND CEMENT AND CLASS F FLY ASH

	Alkalis / Alkalia, Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> , %	SO <sub>3</sub> , %	MgO, %	CaO, %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , (%)	SiO <sub>2</sub> , %
Fly ash / Popiół lotny	--	0.22	1.48	5.31	7.88	29.74	55.37
Cement	1.73	2.59	1.77	63.71	3.39	4.51	22.30

pobranego z dna rzeki. Gęstość i wskaźnik miałości piasku wynosiły odpowiednio 2,67 i 3,27. Rys. 1. pokazuje rozkład wielkości ziaren piasku, na podstawie analizy sitowej.

**2.3. Włókna**

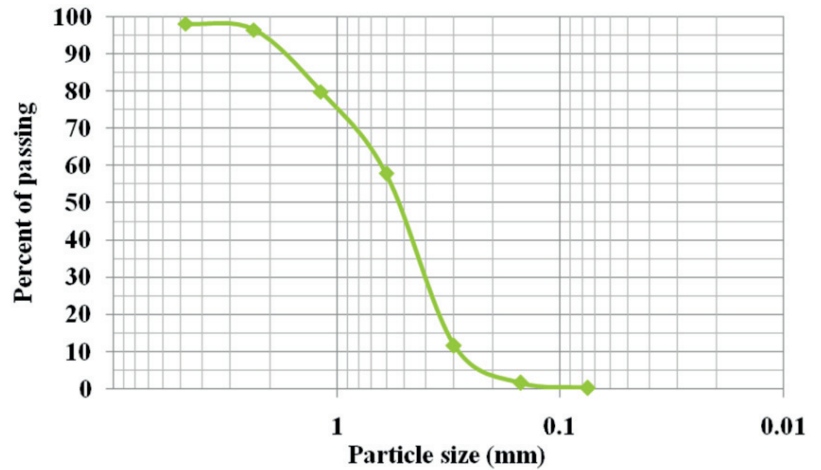
Do tego badania wykorzystano włókna WPW, stalowe i szklane. Włókna WPW są włóknami o małym module Younga, a włókna stalowe i szklane mają duży moduł Younga. Dodatek włókien stalowych poprawia właściwości mechaniczne betonu (20), podobnie jak dodatek włókna szklanego (21, 22). Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien stosowanych w tym badaniu podano w tablicy 2.

**2.4. Superplastyfikator**

Superplastyfikator stosuje się jako środek zmniejszający ilość wody zarobowej, w celu poprawy samozagęszczalności mieszanek CKK. Jako superplastyfikator, w tym badaniu zastosowano produkt SP 430 firmy Fosroc Industries, spełniający wymagania IS 9103 (22).

**2.5. Przygotowanie mieszanki**

Tablica 3 przedstawia składy mieszanek CKK, wypróbowane w niniejszym badaniu. Mieszanki nazwano ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2. Aby uzyskać porównywalne wyniki badań właściwości mechanicznych wzmocnionych kompozytów, dla wszystkich mieszanek przyjęto jeden udział objętościowy włókien wynoszący 2,0% (23). Mieszanki ECC1, ECC2 i ECC3 zawierają 2,0% zbrojenia jednym rodzajem włókien, czyli odpowiednio WPW, szkło i stal. Mieszankę HECC1 wykonano z włókien WPW o udziale 2/3 i włókna szklanego 1/3, o łącznym udziale objętościowy wynoszącym



Rys. 1. Krzywa rozkładu ziarnowego piasku

Fig. 1. Sieve analysis of sand

**2.3. Fibers**

PVA fiber, steel fiber and glass fiber are used for this investigation. PVA fibers acts as low modulus fiber; steel fibers and glass fibers are act as high modulus fibers. Addition of steel fiber increases the mechanical performance of the concrete specimen (20) and likewise glass fiber improves the behavior of concrete, when compared with conventional concrete (21, 22). Physical and mechanical properties of fibers used in this study are shown in Table 2.

**2.4. Superplasticizer**

Superplasticizer was used as water reducing agent, to improve the self-consolidation of the ECC mixes. SP 430 from Fosroc Industries confirming to IS 9103 (22), was used as a superplasticizer for this study.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE WŁÓKIEN

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBRES

Denotation Oznaczenie	Nominal tensile strength Nominalna wytrzymałość na rozciąganie, MPa	Young's modulus Moduł Younga, MPa	Density Gęstość, g/cm <sup>3</sup>	Diameter Średnica (d), µm	Total Length Długość (l), mm	Elongation Wydłużenie, %	l/d ratio Stosunek l/d
PVA	1600	42.5	1.3	39	12	6	308
Steel / Stal	2000	175	7.9	300	12	4.5	40
Glass / Szkło	2200	81.0	2.55	17	10	3.5	588

Mix Mieszanka*	Cement	Fly ash Popiół lotny	Fine aggregate Kruszywo drobne	Water/ (cement & fly ash) ratio Stosunek wodno/spoiwowy	Superplasticizer Superplastyfikator, %	PVA fiber volume fraction Udział objętościowy włókien PVA, %	Glass fiber volume fraction Udział objętościowy włókien szklanych, %	Steel fiber volume fraction Udział objętościowy włókien stalowych, %
ECC1	1	0.425	0.72	0.36	0.9	2.00	0	0
ECC2	1	0.425	0.72	0.36	0.9	0	2.00	0
ECC3	1	0.425	0.72	0.36	0.9	0	0	2.00
HECC1	1	0.425	0.72	0.36	0.9	1.35	0.65	0
HECC2	1	0.425	0.72	0.36	0.9	1.35	0	0.65

\*Pozostawiono nazwy mieszanek takie jak w oryginale angielskim

2,0%. Podobnie przygotowano mieszankę HECC2 z hybrydyzacją 2/3 frakcji włókien WPW i 1/3 frakcji włókien stalowych, i 2,0% udziale objętościowym.

Do przygotowania mieszanek CKK zastosowano typową mieszarkę laboratoryjną. Na początku mieszano przez trzy do pięciu minut cement, popiół lotny i drobne kruszywo. Następnie superplastyfikator zmieszano z wodą, po czym dodano go do mieszanki i pozostawiono na kolejne 5 minut, przy czym pamiętano, że superplastyfikator powinien być dobrze wymieszany z wodą, przed dodaniem do pozostałych składników. Przygotowanie mieszanki kończyło się dodaniem odpowiednich włókien do już przygotowanej mokrej mieszanki i mieszaniu 3 do 4 minut, w celu równomiernego rozprowadzenia włókien.

## 2.6. Mini rozpliw mieszanki betonowej

Przeprowadzono badanie mini rozpliwu mieszanki betonowej w celu określenia optymalnego dodatku superplastyfikatora w mieszance, za pomocą mini stożka rozpliwowego. Jest to forma w rodzaju ściętego stożka o niewielkich rozmiarach: 19 mm średnicy wewnętrznej górnej i 38,1 mm średnicy wewnętrznej dolnej i wysokości wynoszącej 57 mm. Mokłą mieszankę można umieścić na prostokątnej, uformowanej płycie szklanej. Stożek umieszczono na szklanej płytce, a następnie napełniono mieszanką. Po całkowitym napełnieniu stożek powoli uniesiono i mieszance pozwolono rozplynieć się na szklanej płytce. Zmierzone średnicę placka po rozplinięciu i średnią średnicę uznano za miarę konsystencji.

## 2.7. Wytrzymałość na ścislenie jednoosiowe

Wytrzymałość na ścislenie różnych mieszanek CKK określano za pomocą próbek sześciennych o powierzchni obciążenia wynoszącej 50 cm<sup>2</sup>. Po 3, 7, 21 i 28 dniach twardnienia przeprowadzono pomiary, zgodnie z IS 4031- Część 6: 1988 (24). Z każdej mieszanki wykonano i zbadano trzy próbki. Do obliczenia wytrzymałości na

## 2.5. Mix preparation

Table 3 shows the various ECC mix proportions, experimented in this study. The mixtures were named as ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 and HECC2. To obtain the significant result in the mechanical properties of reinforced composites, a 2.0% volume fraction was adopted for all mixes (23). Mixes ECC1, ECC2 and ECC3 were made with 2.0% mono fiber reinforcement, namely PVA, glass and steel respectively. The HECC1 mix was made with PVA fiber with 2/3 fraction and glass fiber 1/3 fraction of 2.0% volume fraction. Similarly, the HECC2 mix was cast with the hybridation of 2/3 fraction of PVA fiber and 1/3 fraction of steel fiber and in 2.0% of volume fraction.

A typical laboratory mixer was used for the preparation of ECC mixes. Initially, OPC, class F fly ash, and fine aggregate were mixed for three to five minutes. Then, the superplasticizer mixed with the water was added to the mix and mixed for another 5 minutes, make sure that the superplasticizer was mixed with water and stirred properly, before adding in the powdered ingredients. At last, mix preparation was finished by including corresponding fibers to the already prepared wet mix and 3 to 4 minutes time was mixed of the fibers, for uniform distribution.

## 2.6. Mini Slump Flow

The mini slump test was conducted to determine the optimum dose of superplasticizer in the mix, and it was done with mini slump cone. A truncated cone type mould was used of following dimensions: 19 mm top internal diameter and 38.1 mm bottom internal diameter with 57 mm height. The cone was placed on the glass plate and then filled with ECC mix. After whole filling, the cone was lifted slowly and the paste was allowed to flow on the glass plate. The diameter of paste, after the flow was stopped, was measured and the average diameter was considered as a mini-slump.





Rys. 2. Stanowisko do pomiarów bezpośredniej próby rozciągania

Fig. 2. Direct tensile test setup

ściskanie użyto średnią wartość obciążenia. Do przeprowadzenia pomiarów stosowano maszynę wytrzymałościową o maksymalnym obciążeniu 200 kN.

### 2.8. Wytrzymałość na rozciąganie

Do oceny wytrzymałości na rozciąganie użyto próbek typu psiej kości, o wymiarach 330 mm x 60 mm x 30 mm (25-30). Pomiarów przeprowadzano po 7, 21 i 28 dniach twardnienia. Do przeprowadzania badań wytrzymałości na rozciąganie stosowano uniwersalną maszynę wytrzymałościową, o nośności 100 kN. Rys. 2 przedstawia stanowisko do badań wytrzymałości na rozciąganie, metodą bezpośrednią. Długość pomiarowa próbki typu kość psa wynosi 80 mm, a wystąpienie uszkodzenia symuluje się w przekroju 30 mm x 30 mm.

### 2.9. Wytrzymałość na zginanie

Pomiary wytrzymałości na zginanie mieszanek CKK wykonano na małych beleczkach, o wymiarach 25 x 60 x 350 mm. Do próby zginania użyto uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100 o nośności 100 kN. Wynik jest średnią uzyskaną dla trzech próbek. Próbka CKK poddana trzypunktowemu obciążeniu zginającemu, jest przedstawiona na rysunku 3. Pomiarów przeprowadzono po 7, 21 i 28 dniach twardnienia, dla wszystkich mieszanek.

## 3. Wyniki i dyskusja

### 3.1. Mini rozplływ mieszanki betonowej

Dla wszystkich mieszanek CKK przeprowadzono badanie mini rozplwy mieszanki betonowej w celu określenia optymalnej dawki superplastyfikatora, jak również dla sprawdzenia względnej płynności

### 2.7. Uniaxial compressive strength

Compressive strength of different ECC mixes was determined by using cube with load conduct area of 50 square centimeter. A test was carried out after 3, 7, 21 and 28 days of curing, according to IS 4031- Part 6: 1988 (24), test procedure was carried out. For every mix, three cubes were casted and tested. An average load value was taken in to account for calculating the compressive strength. A 200 kN compression testing machine was used to conduct the test.

### 2.8. Direct tensile strength

To evaluate the direct tensile strength, dog bone specimen of size 330 mm x 60 mm x 30 mm (25-30) were used. Tests were carried out after 7 days, 21 days and 28 days of curing. A 100 kN capacity universal testing machine was used to carried out the direct tensile strength, Fig. 2 shows the test setup of direct tensile strength. Gauge length of dog bone specimen was 80 mm and occurrence of failure simulated in 30 mm x 30 mm cross section.

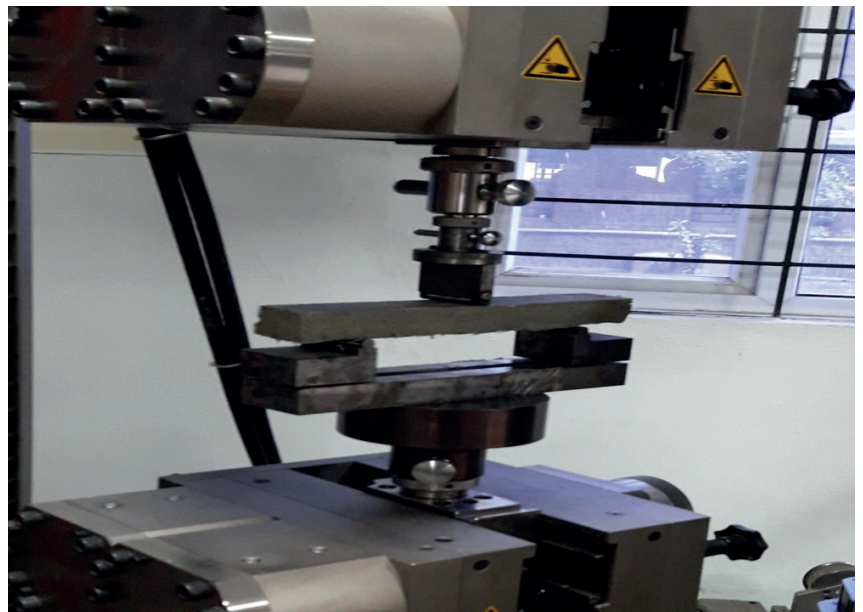
### 2.9. Flexural strength

Small prism of size 25 x 60 x 350 mm was used to determine the flexural performance of ECC mixes. Zwick/Roell Z100 universal testing machine of capacity 100 kN was used for the flexural test. Average value from three specimens, results were taken into account. ECC specimen under three point flexural loading is shown in Fig. 3. Tests were carried out after 7 days, 21 days and 28 days curing, for all the mixes.

## 3. Results and discussion

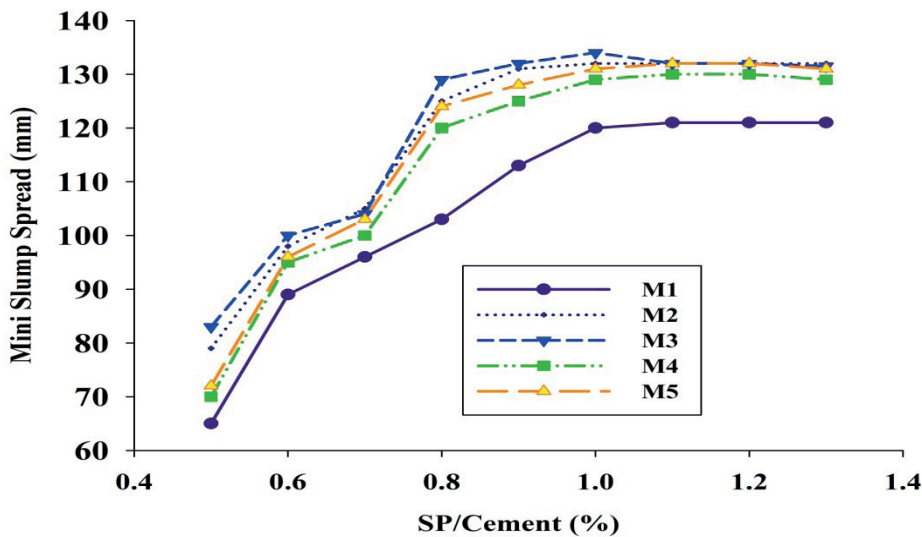
### 3.1. Mini slump flow

The mini slump flow test was performed for all the ECC mixes to determine the optimal dose of superplasticizer and also to check



Rys. 3. Stanowisko do pomiaru trzypunktowego zginania

Fig. 3. Three point flexural load test set up



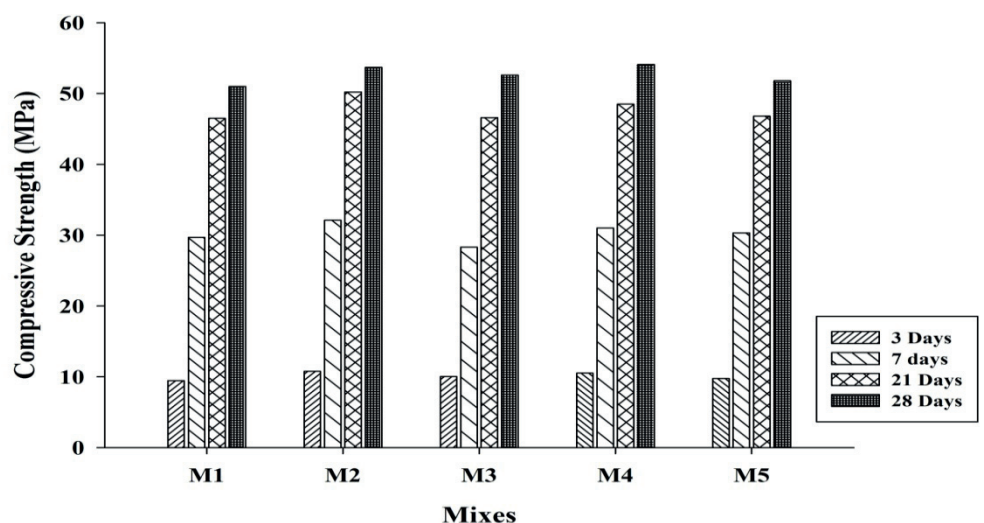
Rys. 4. Mini rozptyły mieszanek CKK

Fig. 4. Mini slump flow of ECC mixes

wszystkich mieszanek ECC, a wyniki przedstawiono na rysunku 4. Dla wszystkich mieszanek stosunek wody do spoiwa został utrzymany na poziomie 0,35, a dozowanie superplastyfikatora rozpoczęto od 0,5% cementu i zwiększano co 0,1%. Wraz ze zwiększeniem dodatku superplastyfikatora zwiększa się mini rozptyw mieszanki betonowej. Po osiągnięciu punktu nasycenia notuje się tylko niewielkie zmiany średnicy rozptywu. Z rysunku 10 jasno wynika, że powyżej 1,0% dodatku domieszki, rozptyw mieszanek zmieniał się bardzo niewiele przy dalszym zwiększaniu superplastyfikatora. Ze względu na zdolność absorpcji wody przez włókna WPW, rozptyw mieszanek z tymi włóknami jest mniejszy w porównaniu z innymi włóknami, jednak mieszanka ECC1 ma ten sam punkt nasycenia.

### 3.2. Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe

Rys. 5 pokazuje wytrzymałość na ściskanie badanych CKK. Mieszanki ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2 miały 28-dniową wytrzymałość na ściskanie odpowiednio 51 MPa, 53,7 MPa, 54,1 MPa i 53,1 MPa. Trzydniowa wytrzymałość na ściskanie wynosi 18,5%, 20,0%, 19,4%, 19,1% i 18,8% 28-dniowej wytrzymałości. Natomiast wytrzymałość po 7 dniach twardnienia wynosi 29,7 MPa, 32,1 MPa, 31 MPa, 27,9 MPa i 29,9 MPa, odpowiednio dla próbek ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2. Rys. 6 przedstawia typowe schematy zniszczenia kostek poddanych próbie ściskania.



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie badanych ECC

Fig. 5. Compressive strength of investigated ECC

the relative fluidity of all the ECC mixes and the results are shown in Fig. 4. For all the mixes, water binder ratio is maintained as 0.35 and the superplasticizer dosage started from 0.5% of cement and increased with a rate of 0.1%. The spread of mini slump is increasing with increase in percentage of dosage. However, small changes in the spread diameter are observed after the optimum dosage. From Fig. 4 it is clearly seen that above 1.0% dose all the curves maintained saturation for further addition. Due to the water absorption capacity of PVA fiber, the spread value is low when compared with other fibers; but mix ECC1 replicates the same saturation value.

### 3.2. Uniaxial compressive strength

Fig. 5 shows the compressive strength of different ECC proportions. Mixes ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 and HECC2 exhibited 28 days compressive strength of 51.0 MPa, 53.7 MPa, 54.1 MPa and 53.1 MPa, respectively. The three days compressive strength were 18.5%, 20.0%, 19.4%, 19.1% and 18.8% of the 28 days strength. In the same way, strength of 7 days curing is 29.7 MPa, 32.1 MPa, 31 MPa, 27.9 MPa and 29.9 MPa of the 28 days compressive strength, for specimens ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 and HECC2, respectively. Fig. 6. shows the typical failure patterns of cubes subjected to compression test.

### 3.3. Direct Tensile Strength

In current circumstance, the function of Engineered Cementitious Composites material in various infrastructural applications is extensive day by day and it is also mandatory to understand the responsibility of ECC mixes, in individual application. Journey of





Rys. 6. Zniszczenie wraz z odkształceniem plastycznym próbek z WPW i zbrojeniem hybrydowym

Fig. 6. Ductility failure of specimen with PVA and hybridation

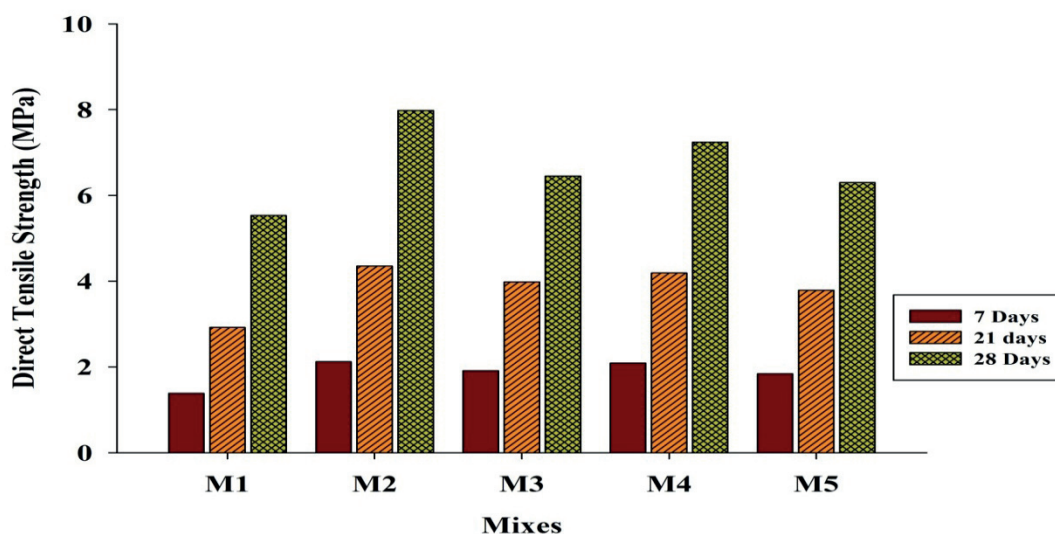
### 3.3. Wytrzymałość na rozciąganie

Obecne funkcje konstrukcyjne materiałów kompozytowych, w różnych zastosowaniach infrastrukturalnych, są coraz większe, dlatego konieczne jest poznanie właściwości mieszanek CKK, w poszczególnych zastosowaniach. Historia CKK zaczyna się początkowo od zastosowań naprawczych, ze względu na jego unikalne właściwości, a przede wszystkim twardnienie przy rozciąganiu, mikropęknięcia, wytrzymałość na rozciąganie, inżynieria zginania, w związku z czym jest on stosowany jako element konstrukcyjny. Konieczna jest poprawa wytrzymałości na rozciąganie, przy różnych proporcjach składu, dla różnych zastosowań. Rys. 7 pokazuje wytrzymałość na rozciąganie badanych CKK. Mieszanka ECC2 wykazuje maksymalną wytrzymałość na rozciąganie 7,98 MPa, która jest 1,44, 1,1, 1,24 i 1,27 razy większa, niż odpowiednio dla mieszanek ECC1, ECC3, HECC1 i HECC2. Po 7 dniach twardnienia uzyskuje się wytrzymałość na rozciąganie 2,89 MPa, 4,35 MPa, 4,22 MPa, 3,98 MPa i 3,79 MPa, odpowiednio dla mieszanek ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2. Zgodnie z zaleceniem Victora Li (3) każda mieszanka, która jest uważana za mieszankę CKK, powinna wykazywać wytrzymałość na rozciąganie od 4 do 12 MPa, po 28 dniach twardnienia. W wytrzymałość na rozciąganie bezpośrednio pięciu zaprojektowanych CKK mieści się w zalecanym zakresie. Rys. 8 przedstawia analizę regresji mieszanek CKK dla wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do bezpośredniej wytrzymałości na rozciąganie. Z analizy regresji

ECC initially starts with repair application due to its unique nature such as tensile strain hardening, micro cracks, tensile strength, flexural engineering. There it is lifted as a structural component. It is necessary to improve the tensile strength of the different proportions for various applications. Figure 7. Shows the tensile strength of different ECC proportions. Mix ECC2 exhibits maximum tensile strength of 7.98 MPa which is 1.44, 1.1, 1.24 and 1.27 times higher than the ECC1, ECC3, HECC1 and HECC2 mixes respectively. After 7 days of curing, tensile strength of 2.89 MPa, 4.35 MPa, 4.22 MPa, 3.98 MPa and 3.79 MPa are obtained, 3.98 MPa and 3.79 MPa for the ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 and HECC2 mixes, respectively. The recommendation given by Victor Li (3) for any mix considered as a ECC mix that it should limited to around 4-12 MPa of ultimate tensile strength, after 28 days of curing and the direct tensile strength of five designed ECC proportions is located in the recommended range. Figure 8. shows the regression analysis of ECC mixes for compressive strength, against the direct tensile strength. From the regression analysis, it is observed that the predicted value of direct tensile strength from the regression equation, is within the range of 0.944 to 1.077 times the experimental value.

### 3.4. Flexural strength

The flexural behavior of any fiber-reinforced specimen replicates the yielding nature of the composites. The flexural strength of the ECC proportions is determined from four-point flexural load test



Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie mieszanek o różnych proporcjach

Fig. 7. Tensile strength of different proportions

wynika, że przewidywana bezpośrednia wytrzymałość na rozciąganie z równania regresji, mieści się w zakresie od 0,944 do 1,077 wartości doświadczalnej.

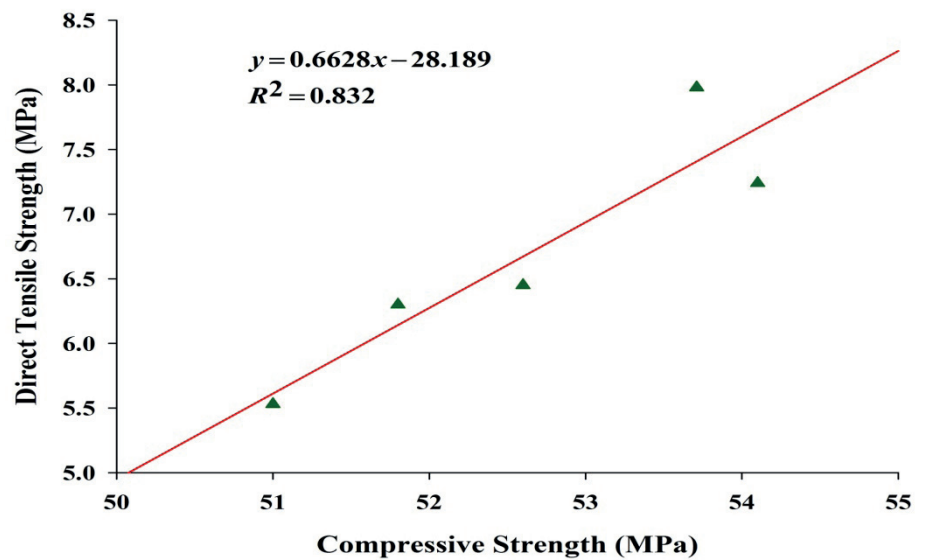
### 3.4. Wytrzymałość na zginanie

Zachowanie przy zginaniu próbek wzmocnionych włóknami, odpowiada ich plastyczności. Wytrzymałość na zginanie CKK o określonych proporcjach, jest ustalana na podstawie czteropunktowego pomiaru obciążenia zginającego beleczki CKK, po 7, 21 i 28 dniach. Rys. 9 przedstawia przygotowanie do zginania mieszanek o różnych proporcjach. Z badań doświadczalnych wynika, że mieszanka CKK, opracowana ze wzmocnieniem włóknem szklanym o frakcji objętościowej 2,0%, wykazuje wytrzymałość na zginanie 25,7 MPa, która jest 1,13, 1,07, 1,02 i 1,08 razy większa niż odpowiednio w przypadku mieszanek ECC1, ECC3, HECC1 i HECC2. Wytrzymałość na zginanie mieszanek ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2 wynosi odpowiednio 19,21 MPa, 22,10 MPa, 21,22 MPa, 22,61 MPa i 21,03 MPa. Rys. 10 przedstawia analizę regresji wytrzymałości na zginanie, w stosunku do wytrzymałości na ściskanie. Z analizy regresji wynika, że przewidywana wytrzymałość na zginanie z równania regresji, mieści się w zakresie od 0,953 do 1,037 wartości doświadczalnej.

## 4. Wnioski

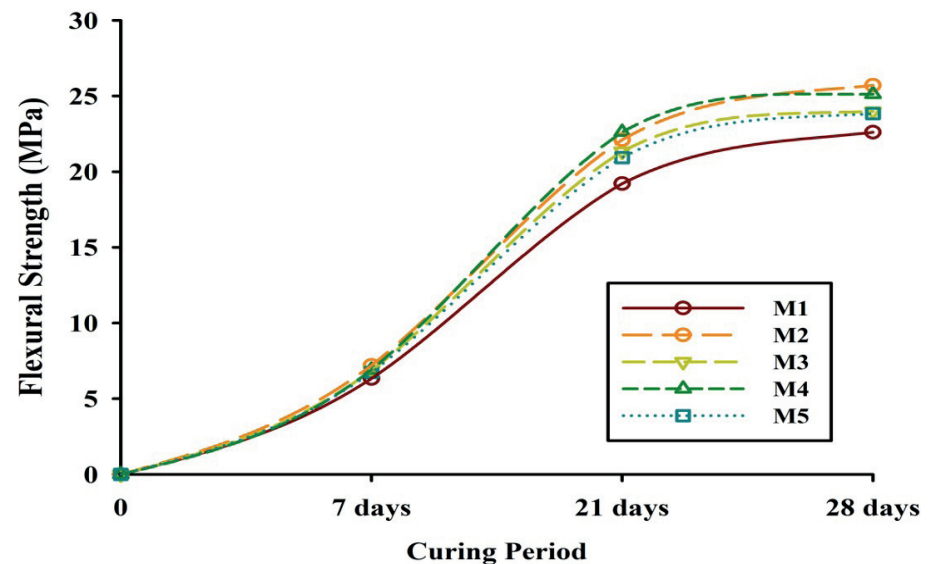
W niniejszej pracy zbadano wpływ różnych modułów włókien, na podstawowe właściwości materiałowe konstrukcyjnych kompozytów cementowych. W oparciu o przeprowadzone doświadczenia nasuwają się następujące wnioski:

1. Punkt nasycenia superplastyfikatora wynosi 0,9% zawartości cementu w mieszankach ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 i HECC2. Płynność mieszanki z włóknami z poli(alkoholu winylowego) jest mniejsza niż mieszanek z pozostałymi włóknami.
2. Wszystkie mieszanki CKK osiągnęły zakładaną wytrzymałość na ściskanie, przy czym dodatek włókien nie miał wpływu na wytrzymałość na ściskanie.
3. Dzięki dodatkowi włókien o dużym module Younga, w mieszance CKK zwiększa się wytrzymałość na rozciąganie. W szczególności mieszanki zawierające dodatek szkła i stali, wykazały doskonałą wytrzymałość na rozciąganie, dzięki większej sile wiązania włókien.
4. Mieszanki ECC2 i HECC1 wykazują znakomite zachowanie pod obciążeniem zginającym, dzięki zawartości włókien szkła-



Rys. 8. Analiza regresji związku ściskania i bezpośrednim rozciąganiem

Fig. 8. Regression analysis between compression and direct tensile

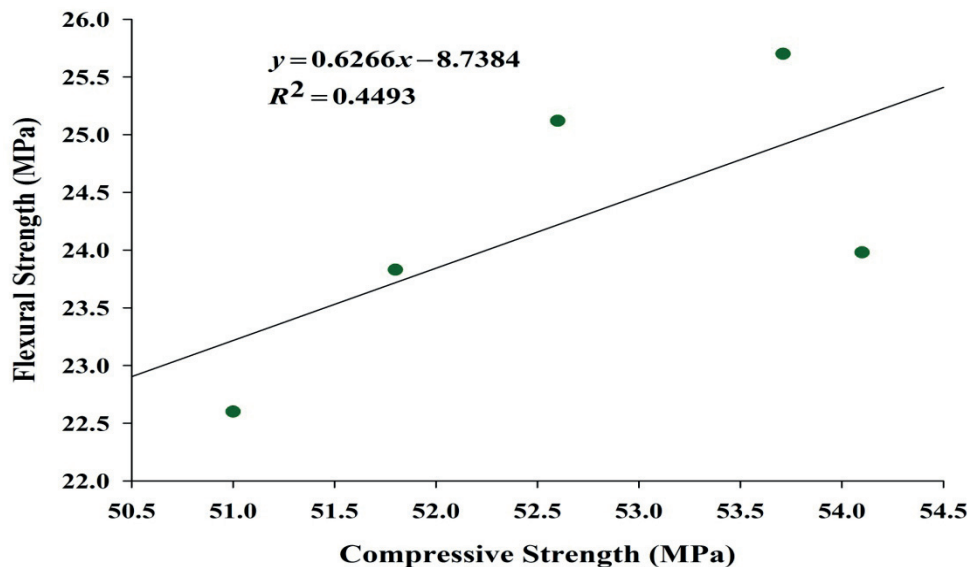


Rys. 9. Wytrzymałość na zginanie próbek różnych CKK, po różnym czasie twardnienia

Fig. 9. Flexural strength of ECC proportions under different curing age

on an ECC prism, after 7, 21 and 28 days. Figure 9 shows the flexural strength of various mixes. From the experimental study, it is inferred that the ECC mix developed with glass fiber reinforcement with 2.0% volume fraction, displays the ultimate flexural strength of 25.7 MPa, which is 1.13, 1.07, 1.02 and 1.08 times higher than the ECC1, ECC3, HECC1 and HECC2, respectively. The flexural strength exhibited by the ECC1, ECC2, ECC3, HECC1 and HECC2 mixes is 19.21 MPa, 22.10 MPa, 21.22 MPa, 22.61 MPa and 21.03 MPa, respectively. Figure 10. shows the regression analysis of flexural strength, against compressive strength. From the regression analysis, it is observed that the predicated value of flexural performance from the regression equation, is within the range of 0.953 to 1.037 times the experimental value.





Rys. 10. Analiza regresji wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do wytrzymałości na zginanie

Fig. 10. Regression analysis compressive strength vs flexural strength

nych i lepszemu wiązaniu matrycy z włóknami. Wytrzymałość na zginanie wzrasta wraz ze zwiększeniem udziału włókien, o dużym module Younga.

## Literatura / References

1. A. Hillerborg, Analysis of one single crack. *Fracture Mechanics of Concrete (Developments in civil engineering)*, 223-249, (1983).
2. Z. Lin and V. C. Li, Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **45**(5), 763-787, (1997).
3. V. C. Li, Engineered cementitious composites-tailored composites through micromechanical modeling. in *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*. N. Banthia, A. Bentur, A. Mufti (Eds.), Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 64-97 (1998).
4. R. Zhang, K. Matsumoto, T. Hirata, Y. Ishizeki, J. Niwa, Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements. *Eng. Struct.* **86**, 146-156, (2015).
5. H. M. E.-D. Afefy M. H. Mahmoud, Structural performance of RC slabs provided by pre-cast ECC strips in tension cover zone. *Constr. Build. Mater.* **65**, 103-113, (2014).
6. Y. Y. Kim, G. Fischer, V. C. Li, Performance of bridge deck link slabs designed with ductile engineered cementitious composite. *ACI Struct. J.* **101**(6), 792-801, (2004).
7. Y. Y. Kim, G. Fischer, Y. M. Lim, V. C. Li, Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcreting process for repair applications. *ACI Mater. J.* **101**(1), 42-49, (2004).
8. H. Inaguma, M. Seki, K. Suda, K. Rokugo. Experimental study on crack-bridging ability of ECC for repair under train loading. in *Proceedings of International Workshop on HPCFRCC in Structural Applications*. Rilem Publications, PRO, (2006).
9. S. Kojima, N. Sakata, T. Kanda, T. Hiraishi, Application of direct sprayed ECC for retrofitting dam structure surface-application for Mitaka-Dam. *Concr. J.* **42**(5), 135-139, (2004).

## 4. Conclusions

This paper investigates the performance of different modulus of fibers on the basic material characteristics of engineered cementitious composites. In connection with the above discussion, the following conclusions are made:

1. The saturation point of the superplasticizer is equal to 0.9% of the cement content in all the mixes investigated. Fluidity of mix developed with PVA fiber is decreased.
2. All ECC mixes exhibit its targeted compressive strength; however there is no impact on the compressive strength owing to the presence of fiber.
3. With the presence of high Young's modulus fiber in the ECC mix, tensile performance is increased. Specifically, mixes developed with glass and steel displayed excellent tensile performance, owing to the greater bond strength of the fibers.
4. The ECC2 and HECC1 mixes exhibit outstanding behaviour beneath the flexural loading, owing to the occurrence of glass fiber, superior bond among the binding matrix and fiber. Flexural strength increases with increases in percentage of the high Young's modulus fiber.

10. M. Maruta, T. Kanda, S. Nagai, Y. Yamamoto, New high-rise RC structure using pre-cast ECC coupling beam. *Concr. J.* **43**(11), 18-26, (2005).
11. H.-K. Choi, B.-I. Bae, C.-S. Choi, Lateral resistance of unreinforced masonry walls strengthened with engineered cementitious composite. *Int. J. Civil Eng.* **14**(6), 411-424, (2016).
12. Y. Zhang, W. Lv, H. Peng, Shear resistance evaluation of strain-hardening cementitious composites member. *Int. J. Civil Eng.* **16**, 255–261, (2018).
13. E. B. Pereira, G. Fischer, J. A. Barros, Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites. *Cem. Concr. Comp.* **34**(10), 1114-1123, (2012).
14. G. A. Krishnaraja. A.R, Hari Prasath.T, Meianbesh. S, Study on New Hybrid Engineered Cementitious Composites for Structural Application. *Int. J. Sci. Eng. Techn.* **6**(4), 132-134, (2017).
15. A. Krishnaraja, N. Sathishkumar, T. S. Kumar, P. D. Kumar, Mechanical behaviour of geopolymer concrete under ambient curing. *Int. J. Sci. Eng. Techn.* **3**(2), 130-132, (2014).
16. S. Somasundaram, K. A. Ramasamy, G. S. Mallika. Development of light weight engineered cementitious composites. in: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, (2020).
17. A. Krishnaraja K. Guru. 3D Printing Concrete: A Review. in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing (2021).
18. M. K. C. Varthi, M. Sivaraja, A. Krishnaraja, M. Jegan, Flexural Performance of Hybrid Fiber Reinforced Concrete Beams using Textile and Steel Fiber (2020).
19. K. Benish, O. Inderyas, and M. Tufail, Performance evaluation of high performance concrete in non-destructive & destructive testing. *Ciencia e Tecnica*, **31**(1), 111-123,
20. S. M. Hama, Effective of chicken wire as a steel fibers on some properties of concrete comparison with commercial steel fibers. *Ciencia e Tecnica*, **31**(2), 227-236, (2016).
21. P. Vignesh, A. Krishnaraja, and N. Nandhini, Study on Mechanical properties of Geo Polymer Concrete Using M-Sand and Glass Fibers. *Int. J. Innovative Res. Sci. Eng. Techn.* **3**(2), 110-116, (2014).
22. IS 9103: Concrete Admixtures. Indian Standard, New Delhi, (1999).
23. H. k. R. Fiaq M. Sarhan Alzwayni, Rana I. K. Zaki, Meta-analysis of fiber impact on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Ciência e Técnica*, **31**(6), 101-113, (2016).
24. IS 4031- Part 6: Methods of physical tests for hydraulic cement. Indian Standard, New Delhi, (1988).
25. J. W. Bang, G. Ganesh Prabhu, Y. I. Jang, Y. Y. Kim, Development of Ecoefficient Engineered Cementitious Composites Using Supplementary Cementitious Materials as a Binder and Bottom Ash Aggregate as Fine Aggregate. *Int. J. Polym. Sci.* **2015**, 12, (2015).
26. S.-J. Jang, D.-H. Kang, K.-L. Ahn, H.-D. Yun, S.-W. Kim, W.-S. Park, Strain-Hardening and Cracking Behavior of Fiber-Reinforced Sustainable Cement Composites under Direct Tension (2015).
27. Z. Pan, C. Wu, J. Liu, W. Wang, J. Liu, Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Constr. Build. Mater.* **78**, 397-404, (2015).
28. A. Krishnaraja, S. Anandakumar, and M. Jegan, Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites. *Cem. Wapno Beton*, **23**(6), 479-486, (2018).
29. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, and M. Kowsalya, Influence of polymeric and non-polymeric fibers in hybrid engineered cementitious composites. *Revista Romana Mater.* **48**(4), 507, (2018).
30. A. R. Krishnaraja, S. Anandakumar, M. Jegan, T. S. Mukesh, K. S. Kumar, Study on impact of fiber hybridization in material properties of engineered cementitious composites. *Matéria (Rio de Janeiro)*, **24**(2) (2019).
31. V. Li, Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Chapter 24 (2008).