

## Właściwości inżynierskich kompozytów cementowych zawierających granulowany żużel wielkopiecowy

### Performance of ground granulated blast-furnace slag based engineered cementitious composites

N. Arivusudar\*, S. Suresh Babu

Department of Civil Engineering, Adhiyamaan College of Engineering, Hosur, Krishnagiri, Tamilnadu-635109, India

\*corresponding author: [arivusudar.nagarajan@yahoo.com](mailto:arivusudar.nagarajan@yahoo.com)

#### Streszczenie

Inżynierskie kompozyty cementowe [IKC] z dodatkiem włókien należą do grupy wysokowartościowych fibrokompozytów. Zawierają one drobnoziarniste składniki: cement, drobny piasek i popiół lotny, natomiast nie zawierają kruszywa grubego. Zawartość cementu w typowym inżynierskim kompozycie cementowym wynosi około 1000 kg/m<sup>3</sup>, co sprawia, że jest to materiał niezgodny z koncepcją zrównoważonego rozwoju. Popiół lotny w mieszankach IKC poprawia właściwości mechaniczne i trwałość, a optymalna ilość popiołu zastępującego cement mieści się w granicach od 30% do 40%. W przeprowadzonych badaniach podjęto próbę dodania do IKC granulowanego żużla wielkopiecowego zastępującego cement, wraz z popiołem lotnym. Przygotowano pięć mieszanek, jedną kontrolną i cztery o różnej zawartości żużla od 10% do 50%, w odstępach co 10%. Zawartość granulowanego żużla wielkopiecowego w takiej zaprawie ma korzystny wpływ na właściwości mechaniczne oraz odporność na uderzenie.

**Słowa kluczowe:** inżynierskie kompozyty cementowe, granulowany żużel wielkopiecowy, wytrzymałość na rozciąganie, uderność

#### Summary

Engineered Cementitious Composites are belonging to the ultra-high performance fiber reinforced composites. Engineered Cementitious Composites are composed of fine grained ingredients like cement, fine sand, fly ash, but don't coarse aggregate. Presence of cement in the typical Engineered Cementitious Composites mix is nearly 1000 kilograms per cubic meter, which make this material to keep far from the sustainability. The content of fly ash in the mix improves the performance of mechanical properties and durability, however, the percentage of replacement of cement has the optimum up to 30 to 40 %. In this study, an attempt is made to add granulated blast furnace slag to Engineered Cementitious Composites mix replacing the cement, along with fly ash. Five different mix proportions are used in this investigation, from 10%, to 50%, at 10% intervals of the granulated blastfurnace slag, replacing cement. The content of granulated blast-furnace slag exhibit remarkable achievement in the mechanical parameters and impact toughness.

**Keywords:** Engineered Cementitious Composites, granulated blast furnace slag, tensile strength, impact toughness

## 1. Wprowadzenie

Inżynierskie kompozyty cementowe [IKC] z dodatkiem włókien należą do grupy fibrokompozytów, które wykazują doskonałą plastyczność przy rozciąganiu, małą szerokość spękań oraz dobrą wytrzymałość na zginanie (1). Unikalnymi właściwościami IKC są: mały udział objętościowy włókien wynoszący 2%, odkształcenie przy rozciąganiu większe od 3% oraz powstawanie mikrospękań wielokrotnych. Zdolność do odkształceń IKC jest 500-600 razy większa niż betonu zwykłego. IKC wymaga modelowania mecha-

## 1. Introduction

Engineered Cementitious Composites [ECC] is belonging to high performance fiber reinforced composites family, which exhibit excellent ductility under uniaxial tensile load, close crack width, flexural behavior (1). Low modulus fiber volume fraction of 2.0%, tensile strain of more than 3% and with multiple micro cracks is the unique properties of ECC. In general, the strain in ECC is 500–600 times higher than the conventional concrete. ECC is required micromechanical modeling to achieve the cement matrix,

nicznego, w celu osiągnięcia odpowiednich właściwości matrycy cementowej, zdolności do odkształceń, powstawania mikrospekkań, które będą mostkowane włóknami oraz małymi spękaniem wielokrotnymi (2), dzięki czemu można uzyskać tak zwany wysokowytrzymałościowy kompozyt cementowy. Zgodnie z właściwościami mechanicznymi nie zaleca się stosowania kruszywa grubego w mieszankach IKC, a kruszywo drobne, o małych wymiarach ziaren, dodaje się w niewielkiej ilości, aby uzyskać odporność matrycy na kruche pękanie. Dzięki kontroli odporności matrycy na kruche pękanie, IKC wykazuje doskonałą plastyczność, zdolność do odkształceń oraz do mostkowania mikrospekkań włóknami (3).

Dotychczasowe doświadczenia obejmowały IKC z dodatkiem popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego oraz innych dodatków mineralnych. Materiały te zapewniają doskonałą zdolność do odkształceń, wytrzymałość na rozciąganie i skłonność do powstawania mikrospekkań wielokrotnych. Yang i in. (4) badali właściwości IKC z dużą zawartością popiołu lotnego, przy czym mieszanki o dużej zawartości popiołu lotnego wykazywały bardzo dobrą plastyczność, zdolność do odkształceń oraz powstawanie mikrospekkań wielokrotnych, przy rozciąganiu. W zaprawach z IKC stosuje się włókna z alkoholu poliwinylowego, polipropylenowe, polietylenowe, stalowe oraz ze szkła (5-10). Powszechnie stosowanymi na świecie dodatkami mineralnymi są popiół lotny, pył krzemionkowy oraz granulowany żużel wielkopiecowy, a każdy z nich ma właściwości wpływające na poprawę wytrzymałości, odporności na korozję i poprawiające trwałość. W typowej mieszance IKC zawartość cementu wynosi około  $1000 \text{ kg/m}^3$ , co powoduje, że IKC nie jest materiałem należącym do koncepcji zrównoważonego budownictwa i należy do 5% globalnego gazu cieplarnianego (11, 12). Na ostatnim forum badawczym podjęto działania mające na celu opracowanie IKC przyjaznego środowisku i przekształcenie go w materiał zgodny z koncepcją zrównoważonego rozwoju, a dzięki wykorzystaniu popiołu lotnego, poprawę jego właściwości mechanicznych, a także zmniejszenie skurczu (13-16).

## 2. Znaczenie badawcze

Zasadniczo, mieszanki z IKC zawierają duże ilości drobnoziarnistych składników, wśród których główną rolę odgrywa cement. Jednak stosowanie dużych ilości cementu niekorzystnie wpływa na środowisko, a produkcja jednej tony cementu portlandzkiego prowadzi do emisji około 0,8 tony dwutlenku węgla. Przeprowadzono wiele badań zapraw z IKC, z dużą zawartością popiołu lotnego. Jako kontynuację badań, w których cement zastępowano dodatkiem mineralnym, podjęto także próbę poprawy właściwości IKC przez dodatek granulowanego żużla wielkopiecowego. Taka matryca jest bezpieczna ekologicznie, zgodna z koncepcją zrównoważonego rozwoju, zmniejsza wpływ na środowisko, a także jest trwała, plastyczna i poprawia właściwości mechaniczne. Badane mieszanki z IKC zawierały od 10% do 50% żużla, w szeregu co 10%, co pozwalało na większy zakres ich zastosowań.

strain hardening, micro cracks, fiber bridging, multiple cracks (2) and it is as called as very high toughness cementitious composite. According to micromechanical theory usage of coarse aggregates are not encouraged in the ECC mixes, and fine aggregates with fine size are applied in very low addition, to control the fracture toughness in the ECC material. By controlling the fracture toughness of matrix in the ECC specimen the excellence ductility, strain hardening parameter, and fiber bridging can be assured (3).

Current research investigated the application of fly ash, silica fume, and other mineral additives in the ECC; these materials were assuring excellent strain hardening, tensile strength, and multiple cracking properties. Yang et al. (4) studied the ECC properties with the high content of fly ash in ECC mixes which can give excellent ductility, strain hardening and multiple cracks formation, under uniaxial tensile load. Polyvinyl Alcohol [PVA], polypropylene, steel, glass, polyethylene fibers are used in the ECC mortars (5-10). The common mineral additives used worldwide are fly ash, silica fume, and granulated blast furnace slag, each having properties to improve the strength, resist to the corrosion and durability. In a typical ECC mix the cement content is around  $1000 \text{ kg/m}^3$ , it leads to ECC as an unsustainable material and also responsible for 5% emission of global greenhouse gas (11, 12). Recent research forum made the effort to develop the green ECC and convert this material as a sustainable. Fly ash usage in the ECC improve the mechanical performance and also minimize the shrinkage (13-16).

## 2. Research significance

In general ECC mixes are developed with a major contribution of fine ingredients, in which the role of cement is the most important. In the other hand, using a huge amount of cement will create environmental impact and the production of one tone of Portland cement releases about 0.8 tone of carbon dioxide. There were large numbers of studies based on usage of high content of fly ash in ECC mortars. Hence an attempt is made to improve the performance of the ECC by application of the ground granulated blast furnace slag [GGBS], replacing cement. This matrix will be an eco-efficiency, sustainable, diminishing the environmental impact and also durable, ductile and improving the micromechanical parameters. In this study, from 10%, to 50%, at 10% intervals of GGBS is added to the ECC mix, premising to use the ECC in a wider range of applications.

## 3. Experimental program

### 3.1. Materials

Ordinary Portland cement of grade 53, class F fly ash received from thermal power plant and GGBS from JSW steel plant, are used in this investigation. Table 1 shows the chemical composition of cement, fly ash, and GGBS. Fig. 1 shows the XRD pattern of GGBS used with a very strong halo confirming the high glass content, practically without crystal phases. The chemical composition

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY CEMENTU, POPIOŁU LOTNEGO I ŻUŻLA, %  
CHEMICAL COMPOSITION OF CEMENT, FLY ASH AND GGBS, IN %

Ingredients	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O
Cement	63.71	22.3	4.51	3.39	1.77	2.59	1.73
Żużel / GGBS	48.53	33.8	7.45	1.19	6.9	2.13	--
Popiół lotny / Fly ash	5.31	55.37	29.74	7.88	1.48	0.22	--

### 3. Program badań

#### 3.1. Materiały

W badaniach zastosowano cement portlandzki klasy 53, zgodny z normą indyjską, popiół lotny klasy F, uzyskany z indyjskiej elektrowni Mettur oraz granulowany żużel wielkopiecowy, z huty stali JSW w Indiach. W tablicy 1 podano skład chemiczny cementu, popiołu lotnego oraz granulowanego żużla wielkopiecowego. Na rysunku 1 pokazano dyfraktogram rentgenowski stosowanego w badaniach żużla wielkopiecowego, na którym „halo” wskazuje na dużą zawartość fazy szklistej, praktycznie bez faz krystalicznych. Skład chemiczny podany w tablicy 1 jest typowy dla granulowanego żużla wielkopiecowego. W tablicy 2 podano właściwości fizyczne i mechaniczne włókien z alkoholu poliwinylowego.

#### 3.2. Składy mieszanek

Proporcje opracowanych mieszanek IKC podano w tablicy 3, a mieszanki te oznaczono jako M1, M2, M3, M4 oraz M5. Mieszanka M1, uznana za kontrolną, zawierała cement oraz popiół lotny,

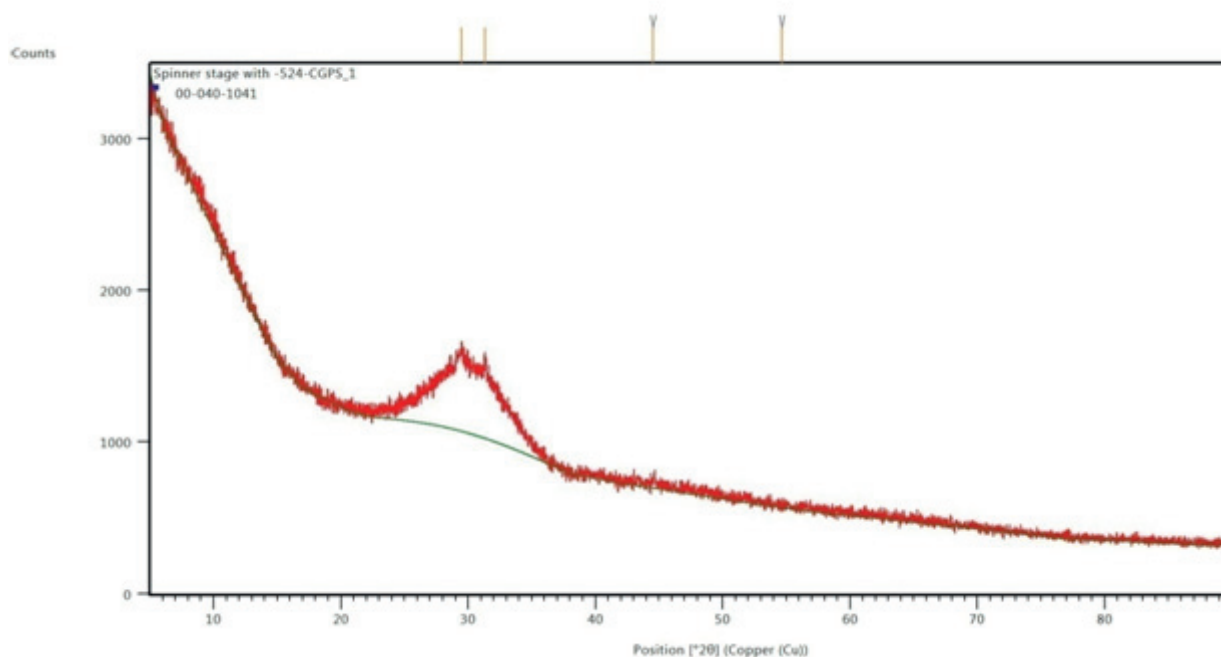
bez dodatku żużla. Mieszanki M2, M3, M4 i M5 zawierały od 10% do 50%, w szeregu co 10%, żużla zastępującego cement, a za-

shown in Table 1 is typical for GGBS. In Table 2. the physical and mechanical properties of PVA fibers are given.

#### 3.2. Mix proportion

Newly developed ECC mixes are shown in the Table.3, mixes are designed as the M1, M2, M3, M4, and M5. Mix M1 is composed of cement, fly ash, but without GGBS and is taken as the reference one. Mixes M2, M3, M4, and M5 have from 10%, to 50%, at 10% intervals of GGBS replacing cement, with the same content of fly ash, in the all mixes. The superplasticizer SP430 from FOSROC was used as a water reducing agent in all ECC mixes, to improve the performance of fresh ECC. Sand from river bed is used as a fine aggregate of specific gravity 2.7 g/cm<sup>3</sup> and conforming to zone-III as per IS-383 code guideline.

Special care to be made while preparing the ECC mixes for the casting of the specimens, powder ingredients: cement, GGBS, fly ash, and fine sand are initially placed in the mixer and mixed as dry materials for 3 minutes. The superplasticizer is mixed with water first properly and then added to the dry mix. Next the another 4-5 minutes wet cement mortar was mixed, later PVA fibers were added to this cement mortar and mixed another 5-7 minutes, to allow the fiber to be uniformly distributed in the wet mix. The mortars were then mixed 15 minutes to avoid the thixotropy of ECC mixes, which will decrease with the mixing time (17). After proper mixing, the ECC mixes were placed in the moulds and cured for 24 hours. Then the specimens will be demoulded and cured in water for 28 days. Fig.2 shows the ECC cube specimen cured inside the plastic containers. After 28 days, the properties of the specimens were tested.



Rys. 1. Dyfraktogram granulowanego żużla wielkopiecowego z dużym „halo” świadczącym o dużej zawartości fazy szklistej

Fig. 1. X-ray pattern of GGBS with a high glass halo

Tablica 2 / Table 2

## WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE I MECHANICZNE WŁÓKIEN

## PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERS

Włókna Fibers	Średnica Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Długość Length [mm]	Smukłość d/s l/d ratio	Gęstość Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Nominalna wytrzymałość na rozciąganie Nominal tensile strength [MPa]	Wydłużenie przy zerwaniu Elongation at break [%]	Moduł Younga Young's modulus [MPa]
PVA	38	12	307	1.31	1600	6	42.5

Tablica 3 / Table 3

## SKŁADY MIESZANEK IKC

## ECC MIX PROPORTION IN VARIOUS MIXES

Mieszanka Mix	Cement	Żużel GGBS	Popiół lotny Fly ash	Piasek Sand	Stosunek w/s Water/binder ratio	Superplastyfikator Superplasticizer [%]	Objętość włókien PVA fiber volume fraction [%]
M1	1	--	0.4	0.8	0.3	1.1	2
M2	0.9	0.1	0.4	0.8	0.3	1.1	2
M3	0.8	0.2	0.4	0.8	0.3	1.1	2
M4	0.7	0.3	0.4	0.8	0.3	1.1	2
M5	0.6	0.4	0.4	0.8	0.3	1.1	2

wartość popiołu lotnego była stała we wszystkich mieszankach. Zastosowano superplastyfikator SP430 firmy FOSROC, który we wszystkich mieszankach stanowił domieszkę zmniejszającą zawartość wody, zastosowany w celu poprawy właściwości świeżych mieszank IKC. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny o ciężarze właściwym  $2,7 \text{ g}/\text{cm}^3$ , należący do kategorii 3 według normy indyjskiej IS-383.

Podczas przygotowania mieszank IKC, które potem umieszczano w formach, zachowano szczególną skrupulatność; składniki sypkie: cement, żużel, popiół lotny oraz drobny piasek umieszczono w mieszarce i mieszano przez 3 minuty. Superplastyfikator dokładnie zmieszano z wodą, a następnie dodano do suchych składników. Tak przygotowaną zaprawę mieszano kolejne 4-5 minut, po czym dodawano włókna z alkoholu poliwinylowego i mieszano jeszcze przez 5-7 minut, w celu równomiernego rozproszenia włókien w zaprawie. Zaprawę mieszano przez kolejne 15 minut, aby zapobiec zjawisku tiksotropii mieszank IKC, którego efekt zmniejsza się ze wzrostem czasu mieszania (17). Po prawidłowym wymieszaniu, mieszanki IKC, które umieszczono w formach, dojrzewały przez 24 h. Po tym okresie próbki rozformowano i przechowywano w wodzie przez 28 dni. Na rysunku 2 pokazano próbki sześciennie dojrzewające w plastikowych pojemnikach. Po 28 dniach twardnienia, zbadano właściwości próbek.

### 3.3. Metody

#### 3.3.1. Wytrzymałość na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie oznaczono na kostkach sześciennych o boku 70,7 mm. Badanie przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania. W tym celu zastosowano prasę do badań wytrzymałości. Próbkę umieszczano w maszynie i poddawano obciążeniu, aż do

### 3.3. Test methods

#### 3.3.1. Compressive strength

ECC cubes of size 70.7 mm x 70.7 mm x 70.7 mm were used to determine the compressive strength. The tests were carried out after 28 days of curing. Compression testing machine is used to test the cube specimen. The specimen is placed in the machine, and load is applied until the specimen collapse. Maximum load before the failure of specimen is taken as a compressive strength.

#### 3.3.2. Direct tensile test

Direct tensile strength of ECC is determined by using a "dog bone" specimen of size 350x60x30 mm (6), after 28 days of curing. Fig. 3 shows the "dog bone" specimen details and test setup for "dog bone" under direct tensile load. "Dog bone" specimen of gauge length of 80 mm with 30 mm x 30 mm of cross-section is used for measurement. "Dog bone" specimen is placed inside the test setup, and then the setup is placed in the 100 ton capacity, servo controlled universal testing machine. Displacement is measured using the cross head movement. Readings are recorded and stored in the system interface.

#### 3.3.3. Modulus of elasticity determination

The prism specimens of the size of 150 mm in diameter and 300 mm in length were used to determine the elastic modulus of ECC mortars. The specimen was placed in the special set-up for modulus of elasticity determination, according to the standard ASTM C469/C469M, and the modulus was determined for each mortar. The tests were carried out after 28 days of samples curing.

zniszczenia. Maksymalne obciążenie, uzyskane tuż przed zniszczeniem próbki, odpowiada wytrzymałości na ściskanie.

### 3.3.2. Wytrzymałość na rozciąganie

Wytrzymałość na rozciąganie IKC, badano metodą bezpośrednią, prowadzono na próbkach w kształcie kości [ang. dog bone] o wymiarach 350x60x30 mm (6), po 28 dniach dojrzewania. Na rysunku 3 przedstawiono szczegółowe wymiary próbki w kształcie kości oraz maszynę wytrzymałościową, w trakcie badania. Do pomiaru stosuje się próbkę o długości pomiarowej 80 mm oraz przekroju 30 mm x 30 mm. Próbkę w kształcie kości umieszcza się w stelażu, który ustawia się w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej o sile 100 ton, z serwonapędem. Przemieszczenie mierzy się na podstawie ruchu trawersy. Wyniki są zapisywane i przechowywane w systemie.

### 3.3.3. Moduł sprężystości

Moduł sprężystości zapraw IKC mierzono na próbkach o średnicy 150 mm i długości 300 mm. Próbki umieszczano w specjalnym urządzeniu do oznaczania modułu sprężystości, zgodnie z normą ASTM C469/C469M. Badania przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania.

### 3.3.4. Odporność na udar

Odporność na udar zapraw IKC określa się na podstawie badania opadu młota stalowego; do tego badania stosuje się próbkę o wymiarach 600 mm x 600 mm x 100 mm. Na rysunku 4 pokazano

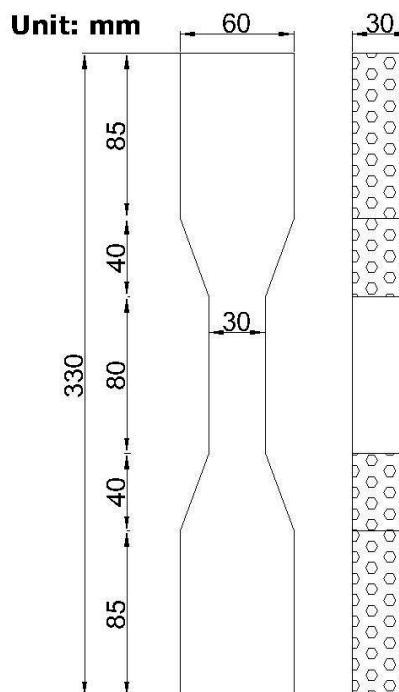


Rys. 2. Próbki sześciennie zapraw IKC podczas dojrzewania

Fig. 2. ECC cubes under curing

### 3.3.4. Impact test

To determine the impact toughness of ECC mortars gravity dropping test was carried out; for this investigation specimen of size 600 mm x 600 mm x 100 mm was used. Fig. 4 shows the test setup for impact. A steel hammer rebound was used, and its freely impact from the height of 1.5 m, at center portion of the slab. The test is continued up to the failure of specimen and number of impacts, required to fail the specimen, was taken into account. From these results, the impact toughness of ECC mixes was calculated.



Rys. 3. Badanie wytrzymałości na rozciąganie oraz szczegółowe wymiary próbki w kształcie kości

Fig. 3. Direct tensile test and „Dog Bone” specimen details

urządzenie do badania odporności na udar. Badanie polegało na odbijaniu się młota stalowego, po zrzuconiu go z wysokości 1,5 m na środkową część badanej próbki. Doświadczenie powtarzano do momentu zniszczenia próbki i rejestrowano ilość uderzeń. Z uzyskanych wyników obliczano odporność na uderzenia zapraw IKC.

## 4. Wyniki badań i dyskusja

### 4.1. Wytrzymałość na ściskanie

Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek IKC przeprowadzono po 28 dniach twardnienia, za pomocą prasy. Pomiar trwał do momentu zniszczenia badanej kostki sześciiennej. Dzięki mechanizmowi mostkowania mikrospekąn przez włókna, kostki sześciennie z IKC zachowują plastyczność podczas ściskania, a pokruszone fragmenty próbki nie gromadzą się wokół niej (18). Ściskano po trzy kostki z każdej mieszanki i obliczano średnią wytrzymałość. Na rysunku 5 przedstawiono krzywe naprężenie-odkształcenie przy ściskaniu wszystkich mieszanek IKC. Wytrzymałość na ściskanie wynosiła 75,2 MPa, 73,56 MPa, 73,4 MPa, 76,29 MPa oraz 64,18 MPa kolejno dla zapraw M1, M2, M3, M4 i M5. Odkształcenie przy ściskaniu próbek M1, M2, M3, M4 oraz M5 wynosiło odpowiednio 5,44, 5,64, 5,71, 5,8 i 5,86. Wyniki wykazały, że największą wytrzymałość miała próbka M4. W uzyskanych wynikach odkształcenia przy ściskaniu zapraw IKC pojawiają się pewne rozbieżności. Zaprawa M5 ma maksymalne odkształcenie wynoszące 5,86, ale jej wytrzymałość na ściskanie jest około 15% mniejsza w porównaniu do zaprawy M1. Odkształcenie rośnie ze wzrostem zawartości żużla, częściowo zastępującego cement.

### 4.2. Wytrzymałość na rozciąganie

Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie, która jest najważniejszym parametrem dla IKC oraz odkształcenia, określa się czy dany materiał należy do IKC. Na podstawie wytrzymałości na rozciąganie i odkształcenia przy rozciąganiu określa się także możliwości zastosowania danego IKC.

Poprawa parametrów naprężenie-odkształcenie przy zginaniu prowadzi do poszerzenia możliwości aplikacyjnych IKC, zarówno konstrukcyjnych jak i naprawczych. Zgodnie z wytycznymi Victora Li (19) mieszanka określona jako IKC powinna osiągnąć maksymalną wytrzymałość na rozciąganie pomiędzy 4 MPa a 12 MPa, po 28 dniach dojrzewania, przy odkształceniu wynoszącym od 1% do 8%. Graniczne naprężenie przy rozciąganiu w zbadanych zaprawach IKC osiągnęło wartości od 4,15 MPa do 4,62 MPa oraz odkształcenie przy rozciąganiu od 3,53 do 4,74. Na rysunku 5 pokazano krzywe naprężenie-odkształcenie przy rozciąganiu wszystkich pięciu mieszanek IKC. Graniczne naprężenie przy rozciąganiu mieszanek M1, M2, M3, M4 i M5 osiągnęło kolejno wartości 4,33 MPa, 4,15 MPa, 4,42 MPa, 4,62 MPa oraz 4,16 MPa, a graniczne odkształcenie przy rozciąganiu odpowiednio 4,34, 3,53, 3,98, 4,23 i 4,74. Z krzywych naprężenie-odkształcenie pokazanych na rysunku 7 wynika, że po przekroczeniu granicy plastyczności, IKC wykazuje zdolność do odkształceń, a obecność żużla nie wpływa

## 4. Results of experiments and discussion

### 4.1. Compressive strength

Compressive strength tests of ECC specimens was carried out after 28 days of curing, using uniaxial compression testing machine. The test is carried out up to the failure of cube specimen. Due to the fibres bridging effect, ECC cube specimens behave ductile under compression and cubes were not losing their fragments around the cube (18). Three specimens per mix are investigated under a compressive load, and the average value is taken as strength. Fig. 5 shows the compressive stress vs strain of different ECC mortars. Compressive strength were 75.2 MPa, 73.56 MPa, 73.4 MPa, 76.29 MPa and 64.18 MPa for mortars M1, M2, M3, M4, and M5 respectively. Compression strain of the mixes M1, M2, M3, M4, and M5 were 5.44, 5.64, 5.71, 5.8 and 5.86 respectively. From the test results, it was found that the strength of M4 ECC was higher than of all remaining mixes. On the other hand, compressive strain in the ECC mixes, produce notable output. Mix M5 exhibit a maximum strain of 5.86, however, the compressive strength of M5 mix is about 15% lower than that of M1 mortar. The strain increases with the increase of the quantity of cement replacement with GGBS.

### 4.2. Direct tensile strength

Tensile strength of ECC is the major parameter, based on the tensile strength and strain behavior only, the material is said to be an ECC. Based on the tensile strength and strain the application of ECC is determined. An increase in tensile strain-stress parameter leads to an increase in the various structural and repair application. According to Victor Li (19) guidelines a mix is said to be ECC, it should attain the ultimate tensile strength between 4 to 12 MPa, after 28 days curing and similarly tensile strain is between 1 to 8%.



Rys. 4. Urządzenie do badania udarnośći próbek IKC

Fig. 4. Impact test setup of ECC slab

na wartości naprężenia i odkształcenia przy rozciąganiu. Typowe zniszczenie po pomiarze wytrzymałości na rozciąganie pokazano na rysunku 6; zniszczenie występuje w części pomiarowej.

#### 4.3. Moduł sprężystości

Moduł sprężystości mieszanek M1, M2, M3, M4 i M5 zmierzono po 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Wartości modułu sprężystości dla mieszanek M1, M2, M3, M4 i M5 po 7 dniach wynosiły odpowiednio 19 GPa, 20,1 GPa, 21,4 GPa, 21,3 GPa oraz 21,1 GPa. Po 14 dniach twardnienia wartości te wynosiły 22,3 GPa, 23,3 GPa, 24,8 GPa, 25,1 GPa oraz 24,3 GPa odpowiednio dla M1, M2, M3, M4 i M5. Z kolei moduł sprężystości po 28 dniach twardnienia zapraw M1, M2, M3, M4 i M5 wynosił odpowiednio 24,6 GPa, 26,2 GPa, 27,7 GPa, 28,9 GPa i 27,9 GPa. Uzyskane wyniki wykazały, że zawartość żużla ma duży wpływ na moduł sprężystości, a co więcej, wartości uzyskane dla IKC są mniejsze w porównaniu do betonu zwykłego; jest to spowodowane brakiem kruszywa grubego w mieszankach IKC (20).

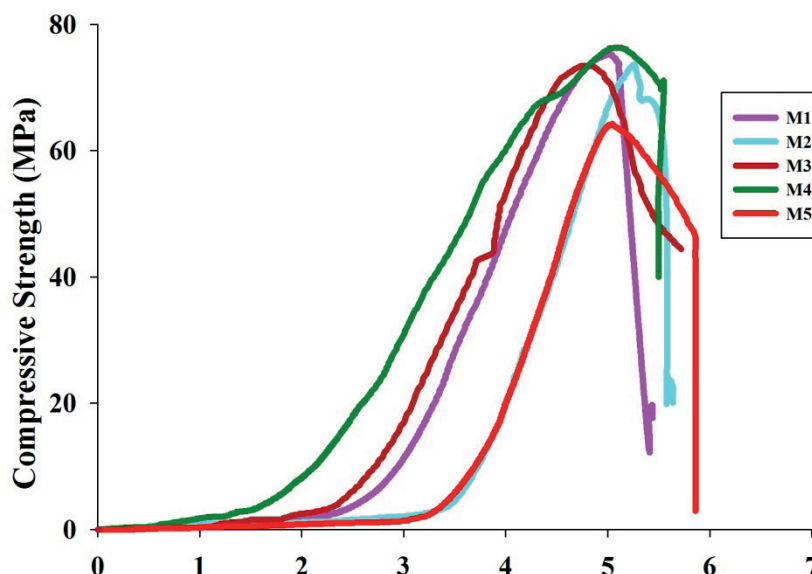
#### 4.4. Odporność na udar

Odporność na udar zapraw IKC w odniesieniu do liczby wykonanych uderzeń podano w tabelicy 4. Wyniki wykazały, że dodatek żużla powoduje wzrost wytrzymałości próbek IKC. Udarność oblicza się poprzez pomnożenie masy młota, wysokości, z której spada młot oraz ilości uderzeń przed zniszczeniem próbki. Odporność na



Rys. 6. Typowe zniszczenie próbki w kształcie kości

Fig. 6. Typical failure crack in „dog bone” specimen



Rys. 5. Krzywe naprężenie-odkształcenie przy rozciąganiu wszystkich mieszanek

Fig. 5. Compressive stress vs strain curve for all mixes

In this study, ECC mixes exhibit the ultimate tensile stress between 4.15 to 4.62 MPa and 3.53 to 4.74 tensile strain. Fig. 7 shows the tensile stress-strain for all the five different mixes. Mixes M1, M2, M3, M4 and M5 exhibit ultimate tensile stress of 4.33 MPa, 4.15 MPa, 4.416 MPa, 4.62 MPa, and 4.16 MPa respectively and ultimate tensile strain of 4.34, 3.53, 3.975, 4.225 and 4.74. From the stress-strain curve shown in Fig. 7, after the yield load, the ECC exhibit strain hardening properties and presence of GGBS does not affect the performance of tensile stress and strain in the ECC mix. The typical failure pattern of ECC is shown in the Fig. 6; failure is occurred in the gauge length.

#### 4.3. Modulus of elasticity

Modulus of elasticity of mixes M1, M2, M3, M4, and M5 are determined after seven days, 14 and 28 days of curing. Modulus value for ECC mixes M1, M2, M3, M4, and M5 after seven days was 19 GPa, 20.1 GPa, 21.4 GPa, 21.3 GPa, and 21.1 GPa respectively. 22.3 GPa, 23.3 GPa, 24.8 GPa, 25.1 GPa and 24.3 GPa was the modulus of elasticity for mixes M1, M2, M3, M4, and M5 respectively, after 14 days of curing. The modulus of elasticity for mixes M1, M2, M3, M4, and M5 were 24.6 GPa, 26.2 GPa, 27.7 GPa, 28.9 GPa, and 27.9 GPa respectively, after 28 days of curing. From these results, it was evident that the content of GGBS has the important influence on the elastic modulus and, moreover, the values of ECC is low when compared with the concrete; this is due to the absence of coarse aggregate in the ECC mix (20).

#### 4.4. Impact toughness

Impact strength of ECC mixes in terms of the number of rebounds taken by slab, is shown in Table 4. From these results it can be stated that the addition of GGBS increases the toughness of the ECC mixes. Impact toughness is calculated by multiplying the mass of rebound hammer, height of the drop and the number of

udar mieszanek M1, M2, M3, M4 i M5 wynoszą kolejno 39552 N·m, 37840 N·m, 39282 N·m, 42796 N·m oraz 43426 N·m.

## 5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań można wysunąć następujące wnioski:

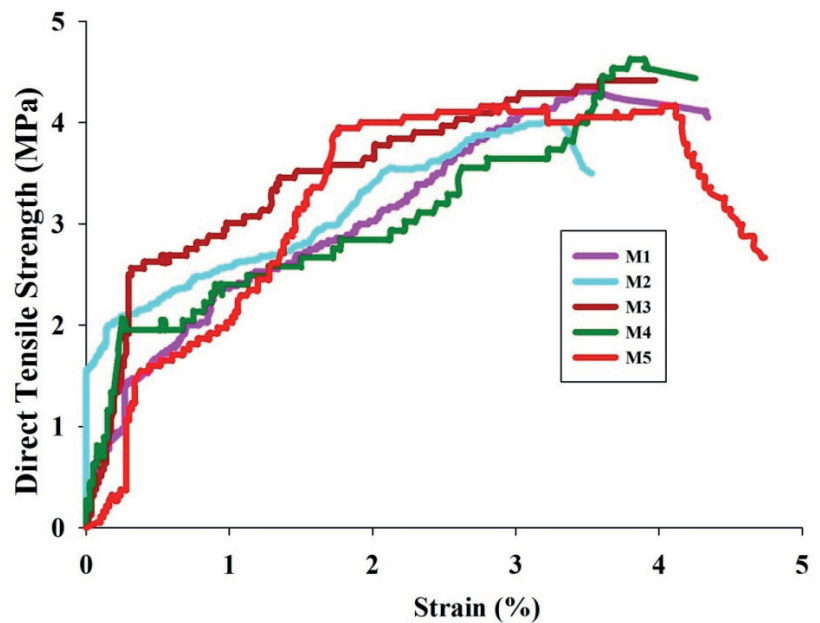
- Dodatek żużla do zapraw IKC ma korzystny wpływ na właściwości mechaniczne oraz odporność na udar. Największą wytrzymałość na ściskanie miała mieszanka M4 zawierająca 40% żużla, zastępującego cement. Natomiast największe odkształcenie przy ścisaniu zaprawy IKC wykazała mieszanka M5; można zatem stwierdzić, że odkształcenie rośnie ze wzrostem zawartości żużla w zaprawach IKC.

- Podobnie jak w przypadku odkształcenia przy ścisaniu, odkształcenie przy rozciąganiu mieszanki M5 o zawartości żużla 50% jest większe niż w przypadku pozostałych mieszanek, a ponadto mieszanki IKC z żużlem wykazują lepszą zdolność do odkształceń.

Mieszanka M4 miała najlepszą wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł sprężystości. Mieszanka M5 miała lepszą odporność na udar, od pozostałych mieszanek, prawdopodobnie ze względu na hydratację dużej zawartości żużla.

## Literatura / References

1. V.C. Li, Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance in E. G. Nawy (ed.) Concrete Construction Engineering Handbook CRC Press (2008).
2. V.C. Li, On engineered cementitious composites (ECC), J. Adv. Concr. Tech. **1**, 215-230 (2003).
3. S. Wang, V.C. Li, Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening, US Patent No. 7,169,224 (2007).
4. E.H. Yang, Y. Yang, V.C. Li, Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness, ACI Mater. J. **104**, 620 (2007).
5. A.R. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural Performance of Hybrid Engineered Cementitious Composite Layered Reinforced Concrete Beams, Periodica Polytech. Civil Eng. **62**, 921-929 (2018).
6. K. Ramasamy, S. Kandasamy, S. Anandakumar, S.M. Jegan, Mechanical performance of hybrid engineered cementitious composites, Cement, Wapno, Beton **24**, 479-486 (2019).
7. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites, Int. J. ChemTech Res. **10**, 314-347 (2017).
8. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, M. Kowsalya, Influence of polymeric and non-polymeric fibers in hybrid engineered cementitious composites, Revista Romana de Materiale, **48**, 507-513 (2018).



Rys. 7. Krzywa naprężenie-odkształcenie przy zginaniu próbek IKC

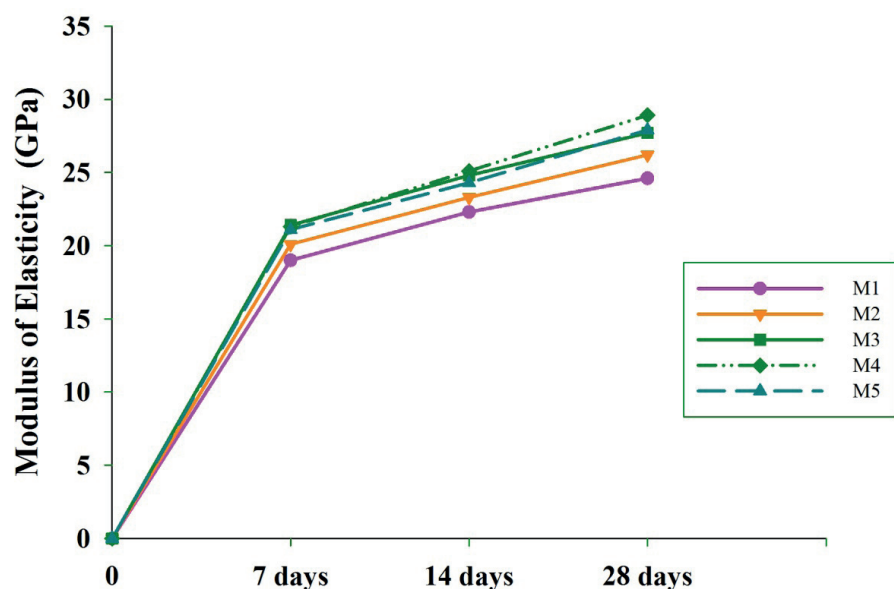
Fig. 7. Direct tensile stress vs strain curves for ECC mixes

Tablica 4 / Table 4

ODPORNOŚĆ NA UDAR MIESZANEK IKC

IMPACT TOUGHNESS FOR ALL THE ECC MIXES

Mieszanka Mix ID	Obciążenie / Load on slab		Wysokość Height, m	Liczba uderzeń Number of rebounds
	Kgs	N		
M1	5.74	56.31	1.6	439
M2	5.74	56.31	1.6	420
M3	5.74	56.31	1.6	436
M4	5.74	56.31	1.6	475
M5	5.74	56.31	1.6	482

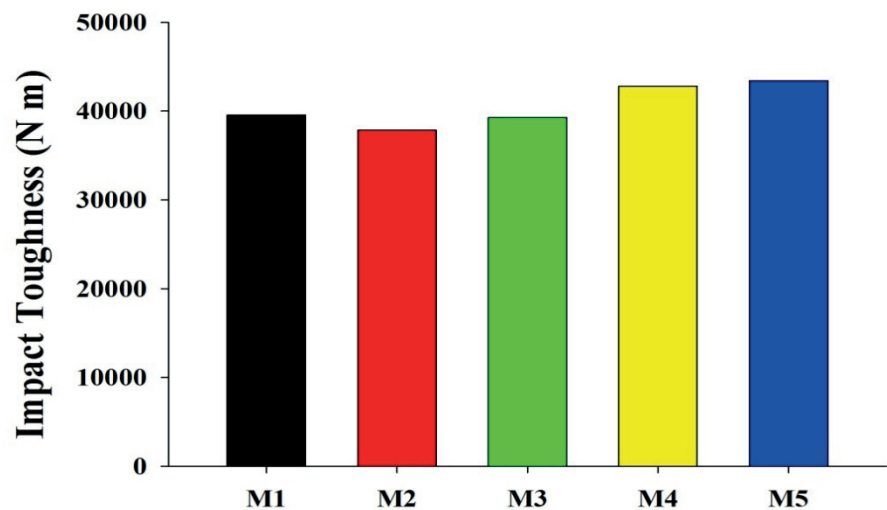


Rys. 8. Moduł sprężystości mieszanek IKC

Fig. 8. Modulus of elasticity of ECC mixes



9. M. Jašek, K. Stejskalová, J. Hurta, J. Brožovský, Research of the fiber reinforced strain hardening cementitious composite with high volume of industrial by-products, *Cement Wapno Beton*, **24**, 471-480 (2019).
10. A. Krishnaraja, S. Kandasamy, Flexural performance of engineered cementitious compositelayered reinforced concrete beams, *Arch. Civil Eng.* **63**, 173-189 (2017).
11. Y. Zhu, Y. Yang, Y. Yao, Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes of fly ash, *Constr. Build. Mater.* **36**, 1076-1081 (2012).
12. H.G. Van Oss, A.C. Padovani, Cement manufacture and the environment: part I: chemistry and technology, *J. Ind. Ecol.* **6**, 89-105. (2002).
13. S. Wang, V.C. Li, Engineered Cementitious Composites with High-volume Fly Ash. *ACI Mater. J.* **104**, 233-241 (2007).
14. O. Kayali, Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete, *Mater. Struc.* **37**, 318-327 (2004).
15. Z. Chen, Y. Yang, Y. Yao, Impact properties of engineered cementitious composites with high volume fly ash using SHPB test, *J. Wuhan Univ. Techn.- Mater. Sci. Ed.* **27**, 590-596 (2012).
16. M. Şahmaran, et al., Effect of fly ash and PVA fiber on microstructural damage and residual properties of engineered cementitious composites exposed to high temperatures, *J. Mater. Civil Eng.* **23**, 1735-1745 (2011).
17. M. Krishnamoorthy, et al., Durability Studies on Polyethylene Terephthalate (PET) Fibre Reinforced Concrete, *Int. J. Civil Eng. Techn.* **8**, 634-640 (2017).
18. H.R. Pakravan, M. Jamshidi, M. Latifi, Study on fiber hybridization effect of engineered cementitious composites with low-and high-modulus polymeric fibers". *Constr. Build. Mater.* **112**, 739-746 (2016).
19. V.C. Li, S. Wang, C. Wu, Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC), *ACI Materials Journal* **98**, 483-492 (2001).
20. K.T. Soe, Y.X. Zhang, L.C. Zhang, Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite. *Constr. Build. Mater.* **43**, 399-407 (2013).



Rys. 9. Odporność na udar mieszanek IKC

Fig. 9. Impact toughness of slabs of different ECC mixes

rebounds taken by the specimen. Mixes M1, M2, M3, M4, and M5 are exhibit impact toughness of 39552 N.m, 37840 N.m, 39282 N.m, 42796 N.m, and 43426 N.m respectively.

## 5. Conclusions

Based on the experimental results, the following conclusions can be made:

- Addition of GGBS to the ECC mix has the high positive influents on the mechanical performance and impact toughness. The compressive strength of mix M4, containing 40% of GGBS replacing cement ,shows the better performance than all other mixes. However, the compressive strain in the mix M5 is higher than in the other mixes; thus it can be stated that the strain increased with an increase of volume of GGBS in the ECC mixes.
- Similar to the compressive strain, the tensile strain of mix M5 with 50% of GGBS exhibit more strain than the other mixes and more over the strain hardening properties of ECC mix with GGBS exhibit notable positive influence. Direct tensile strength and modulus of elasticity of M4 mix is giving better results than the other mixes. In case of impact toughness, M5 mix shows better performance than the other mixes, due to the hydrating of fine GGBS.