

Wpływ dodatku włókien PVA na właściwości mieszanki oraz stwardniałego betonu alkalicznie aktywowanego zawierającego żużel i popiół lotny, dojrzewającego w temperaturze pokojowej

Effect of PVA fiber dosage on fresh and mechanical characteristics of alkali activated slag-fly ash concrete cured under room temperature

Mangalapuri Venkateswarlu^{1,*}, T.D. Gunneswara Rao¹

¹Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, Telangana 506004, India

*Corresponding author: M. Venkateswarlu, e-mail: mv718113@student.nitw.ac.in

Streszczenie

W pracy zbadano wpływ włókien z alkoholu poliwinylowego [PVA] na właściwości mieszanki betonowej i właściwości mechaniczne alkalicznie aktywowanego betonu z żużla i popiołu lotnego [AASFC], dojrzewającego w warunkach otoczenia. Opracowano skład betonu o wytrzymałości 40 MPa przy użyciu 100% mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego [GGBFS], oraz betonu, w którym GGBFS zastąpiono 0%, 20%, 40%, 60%, 80% i 100% popiołu lotnego. Włókna PVA wprowadzono do wszystkich mieszank w ilościach: 0,00%, 0,15%, 0,30%, 0,45% i 0,60%. Zbadano konsystencję [rozplływ] i właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, wytrzymałość na zginanie, zależność naprężenie-odkształcenie, naprężenie maksymalne, odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym, moduł sprężystości [MOE] i zdolność pochłaniania energii [EAC]. Znaleziono korelację między wytrzymałością na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu i zginanie wszystkich mieszank, a uzyskane zależności porównano z poprzednimi badaniami i wymaganiami normowymi. Zgodnie z wynikami badań rozplływ mieszank wzrósł wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego, ale zmniejszył się wraz ze wzrostem zawartości włókien we wszystkich badanych mieszankach. Właściwości mechaniczne poprawiły się wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA dla udziałów 0,15% i 0,30%, natomiast w przypadku większych udziałów 0,45% i 0,60% pogorszyły się. Z badań wynika, że we wszystkich przypadkach najlepsze właściwości mechaniczne uzyskano stosując 0,30% włókien PVA.

Słowa kluczowe: mielony granulowany żużel wielkopieczowy, popiół lotny, włókna PVA, alkalicznie aktywowany beton z żużla i popiołu lotnego, urabialność, właściwości mechaniczne

Summary

This paper examines the effect of polyvinyl alcohol [PVA] fibres on the fresh and engineering characteristics of alkali-activated slag-fly ash concrete [AASFC] that has been cured under ambient conditions. In this paper, 40 MPa grade of concrete was developed using 100% ground-granulated blast furnace slag [GGBFS], GGBFS was replaced with 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, and 100 % fly ash. PVA fibres were incorporated into all mixtures in the following percentages: 0.00 %, 0.15 %, 0.30 %, 0.45 %, and 0.60 %. Fresh properties workability [slump flow] and mechanical properties such as compressive strength, split tensile strength, flexural strength, stress-strain relation, peak stress, strain at peak stress, modulus of elasticity [MOE], and energy absorption capacity [EAC] were studied. A correlation was established between the compressive, split tensile, and flexural strengths of all mixes, and the resulting relationships were compared to previous studies and code requirements. According to the test results, the workability of mixes increased as the fly ash content increased but decreased as the fibre content increased in all mixes. Mechanical properties enhanced as PVA fibre content increased from 0.15 % to 0.30 %, while they decreased at 0.45 % and 0.60 %. From the overall results, the best mechanical properties were obtained in all mixtures at 0.30 % PVA fibres.

Keywords: GGBFS, fly ash, PVA fibres, alkali-activated slag-fly ash concrete, workability, mechanical properties

1. Wprowadzenie

Proces produkcji cementu powoduje emisję dużej ilości dwutlenku węgla [CO₂], który ma negatywny wpływ na środowisko. Aby złagodzić negatywne skutki dla środowiska, zastępuje się cement portlandzki [OPC] bardziej zrównoważonymi materiałami cementowymi. Różne dodatki mineralne, w tym GGBFS, popiół lotny i metakaolin, mogą być stosowane zamiast cementu w produkcji betonu zmniejszając tym samym powierzchnię składowisk i wpływając korzystnie na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska (1). Gdy materiały takie jak GGBFS, popiół lotny i metakaolin, są aktywowane roztworami alkalicznymi, powstała mieszanina jest określana jako geopolimer lub mieszanka aktywowana alkalicznie. Beton geopolimerowy produkowany jest z popiołu lotnego [FGPC] a beton aktywowany alkalicznie z żużla [SAAC]. Oba betony są kompozytami bezcementowymi. Badania wykazały, że właściwości mechaniczne betonu geopolimerowego [GPC] i betonu aktywowanego alkalicznie [AAC] są porównywalne z właściwościami betonu z OPC. Istnieje ogromne zapotrzebowanie na badanie właściwości mechanicznych betonu, ponieważ są to podstawowe parametry wymagane do projektowania elementów konstrukcyjnych (2). Przeprowadzono już wiele badań dotyczących właściwości mechanicznych FGPC, SAAC, mieszanek z popiołu lotnego i żużla geopolimerowego/aktywowanych alkaliami [zapraw i betonów] bez włókien, a wyniki tych badań pokazują, że wartości modułu sprężystości wzrastały wraz ze wzrostem zawartości GGBFS, ale wzrost ten był mniejszy niż w przypadku kompozytów z cementu portlandzkiego (3-9).

Wprowadzenie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien do zwykłego betonu zmniejsza kruchość, poprawia wytrzymałość na rozciąganie, zmniejsza ilość powstałych mikropęknięć i pęknięć, minimalizuje ich rozprzestrzenianie się, a w konsekwencji zwiększa wytrzymałość, zwiększa moduł sprężystości i kontroluje pęknięcia (10,11). Od bardzo dawna praktykuje się wykorzystanie włókien w celu poprawy właściwości materiałów budowlanych (12,13). Beton zbrojony włóknami [FRC] wytwarzano przy użyciu różnych dostępnych w handlu włókien, w tym włókien stalowych, celulozowych, azbestowych, aramidowych, polipropylenowych, szklanych i z polialkoholu winylowego [PVA], a także włókien węglowych, drewnianych i bazaltowych. Właściwości mechaniczne FRC wykonanego z włókien porównano z właściwościami zwykłego betonu (14-16). Beton po dodaniu włókien staje się bardziej jednorodny, izotropowy i zmienia się jego reologia (17). Właściwości betonu FRC różnią się od zwykłego betonu w zależności od ułamka objętościowego, rozmiaru, rodzaju, właściwości sprężystych i kształtu włókien (18,19). Większość obecnych badań koncentruje się na włóknach PVA, ponieważ mają one wiele zalet w porównaniu z innymi włóknami. Wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wysoki moduł sprężystości, duża hydrofilowość, doskonała dyspersyjność, nietoksyczność i lepsza przyczepność do zaczynu to niektóre z ich cech (20-22). Ponadto włókna PVA mają dobrą odporność na kwasy i zasady. Cechy te są korzystne dla geopolimerów lub kompozytów aktywowanych alkaliami (23). B.Y. Lee i in. (24) zbadali zależność naprężenie-odkształcenie zapraw żużlowych

1. Introduction

The cement manufacturing process emits a large amount of carbon dioxide [CO₂], which has a negative impact on the environment. To mitigate these negative environmental effects [CO₂], ordinary Portland cement [OPC] requires sustainable supplementary cementitious materials. Various cementitious building materials, including GGBFS, fly ash, and metakaolin, can be used in place of OPC in concrete production to reduce landfill burden and environmental pollution (1). When cementitious materials such as GGBFS, fly ash, and metakaolin are activated with alkaline solutions, the resulting mixture is referred to as geopolymer or alkali activated mixtures. Fly-ash-based geopolymer concrete [FGPC] and slag-based alkali activated concrete [SAAC] are produced without Portland cement. Several investigations have revealed that the mechanical qualities of geopolymer concrete [GPC] and alkali activated concrete [AAC] are on par with those of OPC concrete. There is a tremendous demand for the study of the mechanical properties of concrete as they are the basic parameters required for structural element design (2). Many studies have already been conducted on mechanical characteristics of FGPC, SAAC, fly ash-slag geopolymer/alkali activated mixtures (mortars and concretes) without fibres, and test results show that modulus elasticity values increased as GGBFS content increased, but the increased values were lower than those of OPC-based composites (3-9).

Incorporating randomly distributed discrete fibres into plain concrete decreases brittleness, improves tensile strength, reduces the microcracking mechanism of cracks, and minimises crack propagation, consequently enhancing strength, increasing ductility, enhancing elastic modulus, and controlling cracks (10,11). It has been practised for a very long time to incorporate fibres to enhance the characteristics of building materials (12,13). Fibre-reinforced concrete [FRC] has been produced using a variety of commercially available fibres, including steel, cellulose, asbestos, aramid, polypropylene, glass, and polyvinyl alcohol [PVA] fibres, as well as carbon, wood, and basalt fibres. The mechanical aspects of the FRC made with fibres were compared to that of concrete (14-16). Concrete becomes more homogeneous, isotropic, and changes from brittle to ductile when fibres are added (17). FRC qualities differ from ordinary concrete of the same mix depending on the volume fraction, size, type, elastic properties, and aspect ratio of the incorporated fibres (18,19). Most current studies are focused on polyvinyl alcohol fibres [PVAs] because they have many advantages over other fibres. High tensile strength, high elastic modulus, great hydrophilicity, excellent dispersibility, nontoxicity, and better bonding qualities with cementitious materials are some of their characteristics (20-22). Furthermore, PVA fibres have good acidity and alkalinity resistance; these features are favourable for the properties of geopolymers or alkali activated composites (23). B.Y. Lee et al. (24) investigated strain hardening behaviour of slag-based alkali-activated mortars by adding of PVA fibres. According to the findings, the addition of PVA fibres to mortars significantly improved tensile strength, load at first crack, tensile strain hardening capacity, and ductility characteristics. similar kind of behaviour

aktywowanych alkaliami poprzez dodanie włókien PVA. Zgodnie z wynikami, dodanie włókien PVA do zapraw znacznie poprawiło wytrzymałość na rozciąganie, obciążenie przy pierwszym pęknięciu, zdolność materiału do odkształcenia plastycznego przy zewnętrznych obciążeniach i charakterystykę ciągliwości. Podobne zachowanie zaobserwowano w kompozytach geopolimerowych z popiołu lotnego (25). F.U.A. Shaikh (26) przeprowadził badania nad tempem twardnienia przy ugięciu betonu geopolimerowego wzmocnionego włóknem z popiołu lotnego. Wyniki wskazują, że wytrzymałość na zginanie i zachowanie materiału przy działaniu zewnętrznych naprężeń betonu geopolimerowego wzmocnionego włóknem PVA, były wyższe. Zaobserwowano również słabszą strefę kontaktu między włóknem PVA a zaczynem cementowym w porównaniu do strefy kontaktu między włóknem PVA a matrycą geopolimerową. Dodanie krótkich włókien [6 mm] do kompozytów geopolimerowych z popiołu lotnego i metakaolinu znacznie poprawiło wytrzymałość na zginanie stwardniałych kompozytów geopolimerowych. Podobnie, dodanie włókien PVA o większej objętości zmienia mechanizm pęknięcia próbek przy uderzeniu z kruchego na ciągliwy, co skutkuje większym wzrostem wytrzymałości na uderzenia (27).

G. Masi (28) badała wpływ włókien PVA na właściwości geopolimerów aktywowanych glinianem. Na podstawie wyników stwierdzono, że włókna PVA znacząco poprawiają wytrzymałość na zginanie i ściskanie kompozytu geopolimerowego. H. Tanyildizi i Y. Yonar (29) badali właściwości mechaniczne GPC zawierającego włókna PVA dojrzewającego w wysokich temperaturach. Na podstawie badań stwierdzono, że właściwości mechaniczne GPC zawierającego popiół lotny wzrastały wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA. Obserwowano również spadek ich właściwości mechanicznych po działaniu wyższych temperatur. M.M. Al-Mashhadani i in. (30) zbadali właściwości mechaniczne i mikrostrukturę zapraw geopolimerowych z popiołu lotnego [FGPM] zawierających włókna różnego rodzaju. Zgodnie z badaniami dodanie włókien PVA do zapraw spowodowało niewielki wzrost wytrzymałości na ściskanie i znaczny wzrost wytrzymałości na zginanie. P. Zhang i in. (31) badali właściwości mechaniczne i pęknięcie aktywowanych alkalicznie zapraw zawierających popiół lotny i metakaolin z dodatkiem włókien PVA. Z badań wynika, że dodanie włókien PVA poprawia właściwości mechaniczne i odporność na pęknięcie, ale jednocześnie zmniejsza urabialność zaprawy. Większość wcześniejszych badań koncentrowała się na właściwościach mieszanek AAC lub GPC wykonanych wyłącznie z popiołu lotnego lub GGBFS oraz właściwościach mechanicznych stwardniałych betonów. Wciąż niewiele wyników można znaleźć dla betonów GPC i AAC, w których użyto zarówno popiół lotny, jak i GGBFS. Wcześniejsze badania koncentrowały się głównie na podstawowych właściwościach geopolimerów wzmocnionych włóknami PVA lub zapraw i betonów aktywowanych alkalicznie [AAM], a mianowicie ich właściwościach mechanicznych, charakterystyce pęknięcia i trwałości. W wielu badaniach udowodniono, że stosowanie jednocześnie różnego rodzaju spoiw i dodatków mineralnych może tworzyć efekt synergii i dawać lepsze wyniki. W dotychczasowych badaniach włókna PVA były stosowane w dużych ilościach, głównie w zaprawach geopo-

observed in fly ash based geopolymer composites (25). F.U.A. Shaikh (26) carried work on deflection hardening behaviour of fibre reinforced fly ash based geopolymer concrete. From the results the flexural strength and deflection hardening behaviour of PVA fibre reinforced geopolymer concrete were higher also there is a weaker bond between PVA fibre and cement than between PVA fibre and geopolymer matrix was observed. Addition of 6 mm long short fibres to fly ash and metakaolinite-based geopolymer composites significantly improved the ductility of the hardened geopolymer composites. Similarly, the addition of higher volume fraction PVA fibres changes the samples' impact failure mode from brittle to ductile, resulting in a greater increase in impact toughness (27).

G. Masi (28) studied the influence of PVA fibres on the properties of activated aluminate geopolymers. From the results, PVA fibres significantly improve the flexural strength and toughness of the geopolymer composite. H. Tanyildizi and Y. Yonar (29) studied the mechanical characteristics of GPC containing PVA fibres cured at high temperatures. The study concluded that the mechanical properties of GPC based on fly ash increased as the content of PVA fibres increased. Also, it revealed the worsening of their mechanical properties after exposure to higher temperatures. M.M. Al-Mashhadani et al. (30) investigated mechanical and microstructural properties of fly ash-based geopolymer mortars [FGPM] by adding different fibres. According to the study, adding PVA fibres to mortar mixtures resulted in a slight increase in compressive strength, but a significant increase in flexural strength. P. Zhang et al. (31) studied the mechanical and fracture parameters of fly ash and metakaolinite-based alkali-activated mortars with the addition of PVA fibres. From the test results, the addition of PVA fibres increases the mechanical and fracture properties but decreases the workability of the mortar. The majority of earlier investigations focused on the mechanical and fresh characteristics of AACs or GPCs made solely of fly ash, or GGBFS. Using both fly ash and GGBFS as binders, very little research has been done on GPC and AAC. Similarly previous studies have mostly focused on the basic parameters of PVA-fibre reinforced geopolymer or alkali activated mortars [AAM] and concretes, namely their mechanical, fracture, and durability properties. Even those studies mostly focused on fly ash- or slag- or Meta kaolinite-based GPC, geopolymer mortar [GPM], or AAM, AAC. But only in very few studies have these binder materials been blended and used. It has been proven in many studies that blending binders rather than using them alone can form a better synergy and give better results. In the studies so far, PVA fibres have been used in high amounts mostly in geopolymer/alkali activated mortars, but in very few studies, these fibres have been used in geopolymer/alkali activated concrete.

In addition to its basic mechanical properties, concrete's stress-strain behaviour is significant in the design of a structural elements. Previously, the stress-strain behaviour of various fibres used in conventional and geopolymer/alkali activated mortars and concrete was investigated. Mechanical characteristics and stress-strain relation, on the other hand, have not been examined with the addition of PVA fibres at varying GGBFS and fly ash fractions, as in this study. Therefore, in this study, low dosages of PVA fibres

limerowych aktywowanych alkaliami, ale w bardzo niewielu badaniach włókna te były stosowane w betonach geopolimerowych/aktywowanych alkaliami.

Poza podstawowymi właściwościami mechanicznymi, również zachowanie betonu pod wpływem naprężenia i odkształcenia ma istotne znaczenie w projektowaniu elementu konstrukcyjnego. Badano już zachowanie betonu pod wpływem naprężenia i odkształcenia przy stosowaniu różnych włókien w konwencjonalnych i geopolimerowych/aktywowanych alkalicznie zaprawach i betonach. Jednakże, charakterystyka mechaniczna i zależność naprężenie-odkształcenie dla tych kompozytów zawierających PVA oraz różniących się udziałem GGBFS i popiołu lotnego nie była przedmiotem szczegółowych badań. Dlatego właściwości te zbadano w prezentowanym artykule.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

W badaniach wykorzystano mieszaninę mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego [GGBFS] i popiołu lotnego. GGBFS zgodny z IS: 12089-1987 pochodził z cementowni JSW Warangal (32). Popiół lotny zgodny z IS: 3812-1981 pozyskano z elektrowni Ramagundam w Telanganie (33). Wykorzystano także kruszywo grube zgodne z IS: 383 [1970] (34) o maksymalnym wymiarze ziarna 12,5 mm. Z kolei kruszywo drobne to piasek o maksymalnym wymiarze ziarna 4,75 mm, zgodny z IS: 383 [1970] (34). Skład chemiczny GGBFS i popiołu lotnego przedstawiono w tabelicy 1. Właściwości fizyczne spoiw i kruszyw pokazuje tablica 2. W tym badaniu użyto superplastyfikatora zawierającego polimery z sulfonowanego naftalenu [SP], tj. Conplast SP430 zgodny z IS: 9103-1999 (35) i BS: 5075 Część 1 (36). Udział SP we wszystkich mieszankach wynosił 6%. Właściwości włókien stalowych i PVA przedstawia tablica 3.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY GGBFS I POPIOŁU LOTNEGO.

CHEMICAL COMPOSITION OF BINDERS GGBFS AND FLY ASH.

Spoivo / Binder	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	LOI
Żużel wielkopieczowy / GGBFS	34.21	33.46	20.40	0.8	0.9	7.77	0.13	0.38
Popiół lotny / Fly ash	1.82	62.32	26.53	4.22	0.37	1.03	0.21	0.86

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE MATERIAŁÓW.

PHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS.

Materiał / Material	Gęstość / Density, kg/m ³	Gęstość / Density, g/cm ³	Powierzchnia właściwa / Specific surface area, m ² /kg
Żużel / GGBFS	1300	2.90	355
Popiół lotny / Fly ash	1200	2.11	450
Kruszywo drobne / Fine aggregate	1650	2.63	-
Kruszywo grube / Coarse aggregate	1700	2.73	-

were added to alkali activated concretes made of different GGBFS and fly ash to study the mechanical properties as well as the stress strain behaviour.

2. Experimental program

2.1. Materials

In this study, ground granulated blast furnace slag [GGBFS] and fly ash were used as binding material. GGBFS was taken from JSW cements Warangal and conforms to IS: 12089-1987 (32). Fly ash was obtained from the Ramagundam thermal power plant in Telangana and conforms to IS: 3812-1981(33). Coarse aggregates of nominal size of 12.5 mm and this conforms IS: 383 [1970] (34) were used. The nominal size of fine aggregate is 4.75 mm and this confirms IS: 383 [1970] (34). GGBFS and fly ash chemical composition are shown in Table 1. The physical properties of binders and aggregates are mentioned in Table 2. In this study sulphonated naphthalene based polymer was used as superplasticizer [SP] i.e., Conplast SP430 and this SP complies with IS: 9103-1999 (35) and BS: 5075 Part 1 (36) and which was obtained from Fosroc Chemicals. The dosage of 6 % of SP was used in all the mixtures. The properties of steel and PVA fibres are shown in Table 3.

2.2. Mixing of alkali activated solution and mix proportions of AASFC

The alkali activator was a mixture of sodium hydroxide [NaOH] and sodium silicate [Na₂SiO₃] solutions. Molarity of 2M of NaOH solution were used in all mixes, a fixed alkaline ratio [AR] of 1.5 was used in all mixes, which was decided by previous studies (37-39). Both samples of NaOH and Na₂SiO₃ solutions were mixed before 24 h to obtain proper mixing.

Six main mixes were considered in the present study. They are B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80 and B-00/100. This

2.2. Skład aktywatorów oraz AASFC

Aktywator alkaliczny stanowił roztwór wodorotlenku sodu [NaOH] i krzemianu sodu [Na₂SiO₃]. Stężenie aktywatora we wszystkich mieszankach wynosiło 2M NaOH a stosunek alkalia/spoiwo [AR] wynosił 1,5. Taki skład ustalono w badaniach wstępnych (37-39). Oba roztwory NaOH i Na₂SiO₃ zostały przygotowane 24 godzin wcześniej, aby uzyskać właściwą homogenizację. Zaprojektowano sześć różnych betonów o symbolach: B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80 i B-00/100. Przygotowanie próbek odbyło się w trzech etapach. W pierwszym etapie wykonano beton referencyjny z 100% zawartością GGBFS jako spoiwa [B-100/00]. Pożądana wytrzymałość na ściskanie próbki referencyjnej to 40 MPa. W ramach drugiego etapu zawartość GGBFS zastąpiono w 20%, 40%, 60%, 80% i 100% popiołem lotnym. W trzecim etapie do wszystkich mieszanek wprowadzono włókna PVA w ilości: 0,00%, 0,15%, 0,30%, 0,45% i 0,60%. Przygotowano łącznie 30 próbek o zróżnicowanym składzie. Przyjęta do obliczeń gęstość betonu aktywowanego alkaliem [AAC] wynosiła 2400 kg/m³ (8,38). Skład badanych próbek przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK, WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE, WYTRZYMAŁOŚĆ NA ZGINANIE, ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU.
MIX PROPORTIONS, COMPRESSIVE STRENGTH, FLEXURAL STRENGTH, AND SPLIT TENSILE STRENGTH VALUES.

Oznaczenie Mix designation	% Udział włókien PVA PVA fibres addition	GGBFS, kg/m ³	Popiół lotny Fly ash, kg/m ³	Kruszywo Aggregate, kg/m ³	Kruszywo drobne Fine aggregate, kg/m ³	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength, MPa	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu / Split tensile strength, MPa
B-100/00	0.00 %	400	-	1001	819	49.51	4.34	3.16
	0.15 %					51.24	5.27	3.68
	0.30 %					53.35	6.76	3.91
	0.45 %					51.96	5.92	3.76
	0.60 %					50.55	5.38	3.66
B-80/20	0.00 %	320	80	1001	819	44.00	4.28	3.12
	0.15 %					45.63	5.25	3.64
	0.30 %					47.35	6.72	3.89
	0.45 %					46.12	5.89	3.72
	0.60 %					44.56	5.47	3.65
B-60/40	0.00 %	240	160	1001	819	40.01	4.20	3.08
	0.15 %					41.65	5.27	3.47
	0.30 %					42.96	6.64	3.80
	0.45 %					41.32	5.87	3.63
	0.60 %					40.35	5.47	3.52
B-40/60	0 %	160	240	1001	819	31.43	3.56	2.56
	0.15 %					32.56	4.28	2.72
	0.30 %					33.86	5.12	2.92
	0.45 %					32.16	4.73	2.76
	0.60 %					31.82	4.46	2.71
B-20/80	0 %	80	320	1001	819	17.57	1.94	1.64
	0.15 %					18.18	2.25	1.71
	0.30 %					18.82	2.63	1.78
	0.45 %					18.10	2.42	1.74
	0.60 %					17.65	2.36	1.71
B-00/100	0 %	-	400	1001	819	6.08	1.10	0.85
	0.15 %					6.26	1.27	0.87
	0.30 %					6.45	1.33	0.90
	0.45 %					6.30	1.27	0.88
	0.60 %					6.21	1.22	0.88

Tabela 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI WŁÓKIEN PVA.

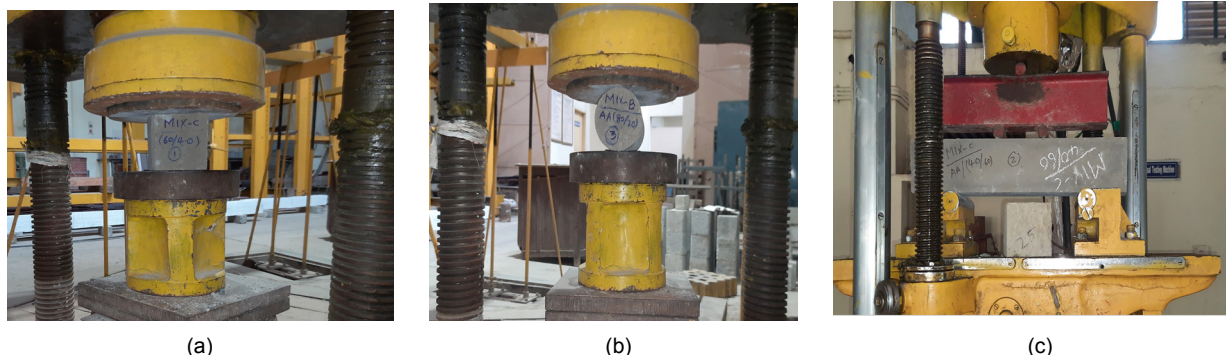
PROPERTIES OF PVA FIBRES.

Właściwość / Properties	Wartości / Details
Typ włókien / Type of fibre	PVA fibres
Średnica / Diameter	40 µm
Długość / Length	12 mm
Współczynnik proporcji / Aspect Ratio	300
Gęstość / Density	1290 kg/m ³
Ciężar właściwy / Specific gravity	1.26
Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength	1600 MPa
Wydłużenie / Elongation	7 %
Typ włókna / Fibre type	Filament

whole mix proportioning took place in three stages. In the first stage, 100 % GGBFS content was used in mixture [B-100/00]. Similarly, this mix is considered as reference mix and B-100/00 is designed for 40 MPa target compressive strength using 100 %

2.3. Formowanie, dojrzewanie i badania AASFC

Proces mieszania AASFC jest taki sam jak w przypadku betonu konwencjonalnego (40,41). Najpierw przez 2-3 minuty mieszano materiały wiążące - GGBFS i popiół lotny. Następnie dodano drobne i grube kruszywo i mieszano przez kolejne 3-4 minuty. W następnej kolejności dodano roztwór alkaliczny i superplastyfikatory i kontynuowano mieszanie przez kolejne 5-6 minut, aby uzyskać homogeniczną mieszankę. Część materiału wykorzystano do badań urabialności a pozostałą część zaformowano w formach sześciennych o wymiarach 100 x 100 x 100 mm oraz w formach cylindrycznych o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Wykonano także belki o wymiarach 100 mm x 100 mm x 500 mm. Po stwardnieniu próbek, wyjęto je z form i pozostawiono do dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych w temperaturze pokojowej [dojrzewanie w temperaturze otoczenia]. W przypadku wytrzymałości na ściskanie próbki sześciennie badano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Tinius-Olsen [TOTM], zgodnie z indyjską normą: 516 – 1959 (42). W przypadku wytrzymałości na ściskanie wynik stanowił średnią z trzech pomiarów. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano również na tej samej maszynie wytrzymałościowej, zgodnie z indyjską normą IS: 5816 (43). Wynik był średnią z trzech pomiarów. W przypadku badania zależności naprężenie-odkształcenie badano po trzy próbki cylindryczne. W przypadku testu wytrzymałości na zginanie test obciążenia trzypunktowego wykonano dla belek na cyfrowej uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej. Nośność maszyny wynosiła 200 kN. Test ten wykonano zgodnie z normą ASTM C - 293-02, 2002 (44). Stanowiska badawcze przedstawiono na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Stanowiska badawcze (a) próbki sześciennie (b) próbki cylindryczne (c) belki.

Fig. 1. Specimens testing (a) cube testing (b) cylinder testing (c) prism testing.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wpływ włókien PVA na właściwości mieszanki

Konsystencja której miarą jest wartość opadu stożka zależy od dodatku włókien PVA, zawartości GGBFS i udziału popiołu lotnego. Wyniki badań przedstawiono na rys. 3. Wraz ze wzrostem PVA opad stożka zmniejszał się we wszystkich badanych próbkach różniących się udziałem GGBFS i popiołu lotnego. W rezultacie potwierdzono, że wszystkie mieszanki stały się mniej urabialne, gdy udział włókien PVA wzrósł z 0,15% do 0,60%. Jednocześnie zaobserwowano, że wraz ze wzrostem udziału popiołu lotnego konsystencja ulegała poprawie. Spadek wartości opadu stożka

GGBFS as binder material. As part of the second stage, the GGBFS content was replaced with 20 %, 40 %, 60 %, 80 % and 100 % fly ash content. In third stage, PVA fibres were incorporated into all of the mixtures in the following percentages: 0.00 %, 0.15 %, 0.30 %, 0.45 %, and 0.60 % in all mixtures. Total 30 mixes were prepared. The density of alkali activated concrete [AAC] for this mix proportioning was taken to be 2400 kg/m³. And the mix proportioning was determined from that density and this density was taken from some previous studies (8,38). Finally corresponding mix proportioning details shown in Table 4.

2.3. AASFC specimens casting, curing and tests conducted

Mixing process of AASFC is same as conventional concrete (40,41). First, mix binder materials GGBFS and fly ash well for 2-3 minutes. After that, add fine aggregate and coarse aggregate to the binder material and mix well for another 3-4 minutes. Alkaline solution and superplasticizers were then added. Mixing was allowed for another 5-6 minutes to get uniform and homogeneous mixture. Obtained mixture used for test the workability of the particular mix and this concrete mixture was again thoroughly mixed and cast into the required moulds. In the present study, used cube moulds measuring 100 x 100 x 100 mm, cylinder moulds of size 100 mm diameter and 200 mm height. Prism moulds of sizes 100 mm x 100 mm x 500 mm were used. Finally, after all samples were dry, they were removed from the moulds and left to air cure at room temperature [ambient cure]. For the compressive strengths, cube specimens tested by using the Tinius-Olsen Testing Machine [TOTM],



Rys. 2. Stanowisko do badań zależności naprężenie - odkształcenie betonu.

Fig. 2. Testing of cylinder specimen under compression for stress-strain behaviour.

był nieznaczny przy udziale PVA wynoszącym 0,15% i 0,30% natomiast dla 0,45% i 0,60% spadek był już dużo większy. Obserwacje mieszanek pozwoliły na stwierdzenie wyjątkowo sztywnej konsystencji przy 0,45% i 0,60% zawartości włókien PVA. Zaobserwowano także efekt zbrzylenia, który był jedną z przyczyn spadku urabialności mieszanek. Dlatego z perspektywy urabialności, korzystniejsze jest dodawanie PVA w ilości do 0,30%. We wszystkich mieszankach, niezależnie od proporcji GGBFS/popiołu lotnego, zaobserwowano spadek urabialności mieszanek wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA oraz zwiększenie napowietrzenia mieszanki. Dodatkowo włókna PVA są hydrofilowe, co może mieć wpływ na adsorpcję wody na ich powierzchni (45). Obecność włókien w kompozytach powoduje, że tworzy się mikrostruktura przypominająca sieć włókien zapobiegająca segregacji (46). Ponadto Yew i in. (46) oraz Amin i in. (47) zanotowali również spadek urabialności mieszanek wraz ze wzrostem udziału włókien PVA w konwencjonalnym FRC.

3.2. Wpływ włókien PVA na właściwości mechaniczne

3.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

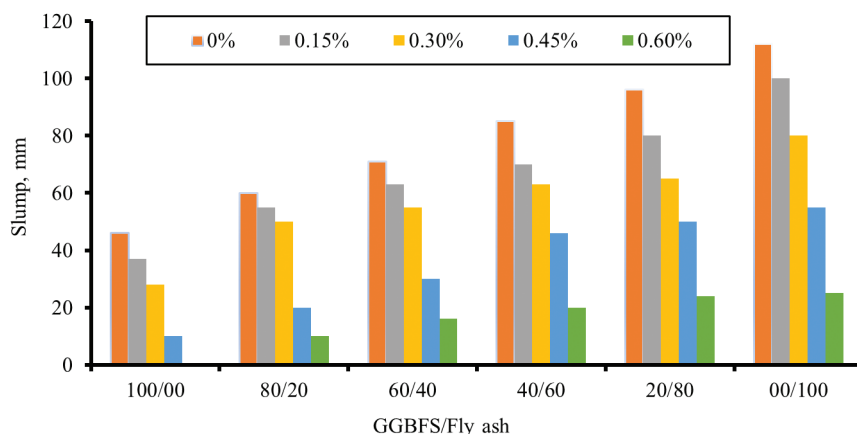
Wpływ dodatku włókien PVA na wytrzymałość na ściskanie betonów różniących się udziałem GGBFS i popiołu lotnego przedstawiono na rys. 4. Na podstawie wyników badań przedstawionych na rys. 4 ustalono, że wraz ze wzrostem udziału włókien PVA z 0,15% do 0,30% wytrzymałość na ściskanie we wszystkich mieszankach wzrosła, natomiast w przypadku wprowadzenia 0,45% i 0,60% PVA wytrzymałości na ściskanie były mniejsze w porównaniu do betonu referencyjnego. Zgodnie z literaturą, zwiększanie udziału włókien powyżej pewnej wartości nie ma już większego wpływu na wytrzymałość na ściskanie (48,49). Kompozyty zawierające włókna PVA w ilościach między 0,15 a 0,30 % miały wyższą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do próbek bez włókien PVA oraz do próbek, w których udział włókien był większy. Dzieje się tak, ponieważ przy większym udziale włókna mogą łączyć się ze sobą dłuższymi płaszczyznami ścinania (50). Mieszanki zawierające większy udział włókien [0,4% i 0,5%] miały niższą wytrzymałość na ściskanie, ponieważ wpływały one na stopień zagęszczenia i formowanie (51). Podobne obserwacje dotyczyły wytrzymałości na ściskanie gdy udział popiołu lotnego wzrastał z 0% do 100%. Chociaż wytrzymałość na ściskanie malała wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego, docelowa średnia wytrzymałość na ściskanie wynosząca 40 MPa została osiągnięta, gdy 40% GGBFS zastąpiono popiołem lotnym. Wzrost zawartości włókien PVA z 0,15% do 0,30% zwiększył wytrzymałość na ściskanie o około 2% do 8% przy wszystkich proporcjach GGBFS/popiołu lotnego. Maksymalne wartości wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego zaobserwowano w przypadku wprowadzenia 0,3% włókien PVA, a procentowy wzrost przy tej ilości wyniósł odpowiednio 7,8%, 7,6%, 7,37%, 7,7%, 7,1% i 6,1% odpowiednio w mieszankach

and its capacity is 2000 kN as per Indian standard: 516 – 1959 (42). For the compressive strength, three cubes were tested. The split tensile strength test was also performed on same testing machine as per Indian standard IS: 5816 (43). Three cylinders were tested. For the stress-strain behaviour three cylinders were tested under compression testing machine. Similarly, for flexural strength test, three-point loading test performed on prisms on a digital universal testing machine. Capacity of machine was 200 kN. This test was performed in accordance with ASTM C - 293-02, 2002 (44). Test setups for all tests in this study are shown in Figs. 1 and 2.

3. Results and discussion

3.1. Effect of PVA fibres on fresh properties

Workability in terms of slump values is influenced by the addition of PVA fibres in different GGBFS and fly ash, as shown in Figure 3. As the dose of PVA increased in all proportions of GGBFS and fly ash, the slump values decreased. As a result, it is confirmed that all mixes became less workable as PVA fibre dose rose from 0.15 % to 0.60 %. But slump values improved significantly as the fly ash dosages increased from 20 % to 100 %. Slump values' decreasing was slower at the PVA dosages of 0.15 % and 0.30 %, but the decrement was faster at 0.45 % and 0.60 %. The mixes were also found to be extremely stiff at 0.45 % and 0.60 % PVA fibres, and a balling effect was seen, which was one of the causes for the decline in workability of the mixes. Therefore, from the perspective of workability, it is preferable to add PVA up to 0.30 %. Irrespective of the GGBFS/fly ash proportions in all of the mixes, a decrease in workability of mixtures was seen as PVA fibre dosage increased because there were more voids in the mixtures when PVA fibre incorporation occurred and because PVA fibres are hydrophilic, which means that their large surface areas cause the mixture to absorb water (45). As a result, a structure resembling a fibre network forms in the composites, preventing segregation and flow (46). Additionally, Yew et al. (46) and Amin et al. (47) also observed the workability of mixtures decreased as PVA fibre dosage increased in conventional FRC.



Rys. 3. Opad stożka mieszanek betonowych.

Fig. 3. Slump values.

B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60 i B-20/80, B-00/100. Amin i in. (48) stwierdzili, że wytrzymałości na ściskanie badanych betonów wzrosły o 7,5% po dodaniu 0,25% włókien PVA o długości 12 mm. Dodanie większej ilości włókien powoduje ich nieefektywną dyspersję (50), co zwiększa prawdopodobieństwo koncentracji porów w matrycy (48), a także osłabienie strefy kontaktu włókno - zaczyn, które może spowodować zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie. Wytrzymałość kompozytów cementowych zależy od mikrostrukturalnych cech, takich jak porowatość całkowita i rozkład wielkości porów (52). W innych badaniach Amina i in. (48) oraz Atahana i in. (50) wykazano, że wprowadzenie włókien PVA zmniejsza wytrzymałość na ściskanie.

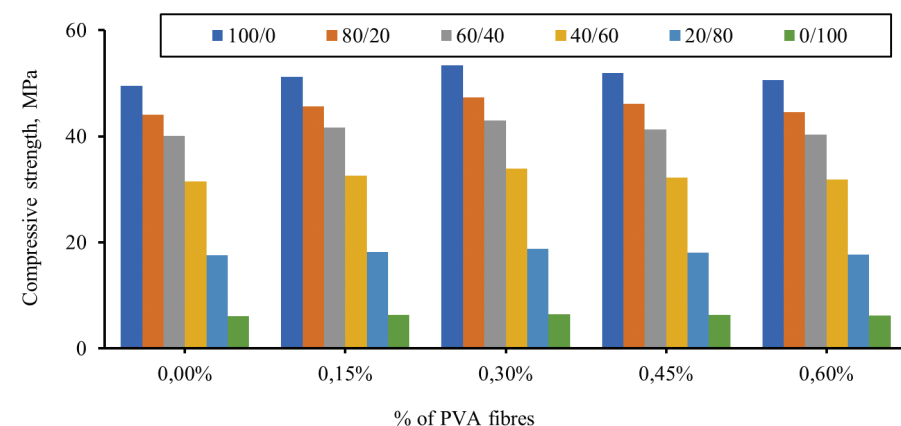
3.2.2. Wytrzymałość na zginanie

Rys. 5 i 6 przedstawiają wpływ dodatku włókien PVA na wytrzymałości na zginanie i rozciąganie betonów różniących się udziałem GGBFS i popiołu lotnego. Na podstawie wyników badań [rys. 5] stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości włókien z 0,15% do 0,30%, wytrzymałości na zginanie wszystkich betonów znacznie wzrosły, z 21,4% do 57% przy stosunkach GGBFS/popioł lotny 100/00, 80/20 i 60/40 oraz z 15,5% do 43,8% przy stosunkach 40/60, 20/80 i 00/100. Wytrzymałości na zginanie wzrastają o 21,4% do 55,8% w serii B-100/00, 22,7% do 57,0% w serii B-80/20, 21,9% do 55,2% w serii B-60/40, 20,2% do 43,8% w serii B-40/60, 16,0% do 35,6% w serii B-20/80 oraz 15,5% do 20,9% w serii B-00/100. Gdy do mieszanek wprowadzono włókna PVA o długości 12 mm, pełnią one funkcję mostkowania pęknięć, co odpowiada za wzrost wytrzymałości na zginanie. Ponadto dodanie włókien PVA zwiększa sztywność betonu i poprawia odporność na powstawanie i propagowanie mikropęknięć (28, 30). Wytrzymałość na zginanie uległa poprawie wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA z 0,15% do 0,30%. Jednocześnie, gdy udział popiołu lotnego wzrósł z 20% do 100% procentowy wzrost wytrzymałości na zginanie względem próbki referencyjnej zmniejszył się. Wzrost wytrzymałości na zginanie przy udziale 0,3% włókien zanotowano dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego i wyniósł on odpowiednio 55,8%, 57,0%, 55,2%, 43,8%, 35,6% i 20,9% w betonach B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60 i B-20/80, B-00/100. W betonach w których 40% GGBFS zastąpiono popiołem lotnym

3.2. Effect of PVA fibres on mechanical properties

3.2.1. Compressive strength

The effect of PVA fibre addition on compressive strength values at various GGBFS and fly ash proportions is depicted in Fig. 4. Based on Fig. 4, it was determined that as PVA fibre dosage increased from 0.15 % to 0.30 %, compressive strength in all mixes greatly increased. At dosages of 0.45 % and 0.60 % PVA, these compressive strength values were, therefore, somewhat decreased. According to data on compressive strength, increasing fibres over a certain point has no positive effects on compressive strength (48,49). It can be observed that composites with smaller volume fractions of PVA fibres between 0.15 and 0.30 percent had higher compressive strengths when specimens with and without PVA fibres are compared. This is because the shear planes can be held together by a limited effect produced by the volume percentage of small PVA fibres, which operate as minor reinforcements against the shear forces generated in a specimen under homogeneous compression loads (50). Higher volume fraction mixes [0.4 % and 0.5 %] had lower compressive strengths because the inclusion of additional PVA fibres complicated vibration and consolidation (51). Similarly, compressive strength values were substantially reduced when fly ash dosages increased from 0 % to 100 %. Although compressive strength decreased as fly ash increased, target mean compressive strength of 40 MPa was achieved when up to 40 % of the GGBFS was replaced with fly ash. The inclusion of PVA fibres from 0.15 % to 0.30 % increased compressive strength values increased approximately 2 % to 8 % at all GGBFS/fly ash proportions. The maximum compressive strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3 % PVA fibres, and the percentage increases at 0.3 % PVA fibres were 7.8 %, 7.6 %, 7.4 %, 7.7 %, 7.1 %, and 6.1 % in mixes B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively. Amin et al. (48) reported that the compressive strength values increased by 7.5 % when 0.25 % of 12 mm-length PVA fibres were added to the mixes compared to control mixes. With a high-volume fraction addition, PVA fibres become at risk of inefficient fibre dispersion (50), which enhances the chance of pore concentration in the matrix (48) and also results in a weak fibre-matrix interface



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie.

Fig. 4. Compressive strength values.

that reduces compressive strengths when subjected to compressive loads. The strength attributes of a material are principally determined by its micro-structural characteristics, such as porosity and pore size distribution (52). Previous research by Amin et al. (48) and Atahan et al. (50) found that the amount of PVA fibre decreased compressive strength.

3.2.2. Flexural strength

Fig. 5 and Fig. 6 demonstrate the effect of PVA fibre addition on flexural and split tensile strength values at various GGBFS and fly ash proportions. From the Fig. 5, it was determined that as the fibre content increased from 0.15 %

wzrosty wytrzymałości były niewielkie. Dzieje się tak, ponieważ wyższa zawartość popiołu lotnego powoduje pogorszenie strefy kontaktu włókno - zaczyn. Wytrzymałości na zginanie nieznacznie spadły w przypadku wyższych udziałów procentów włókien, takich jak 0,45% i 0,60%. Podobne wyniki uzyskano we wcześniejszych badaniach przedstawionych w literaturze (28, 30). Dzieje się tak, ponieważ większy udział procentowy włókien w mieszance powoduje gorszą homogeniczność mieszanki.

3.2.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Z rys. 6 wynika, że wraz ze wzrostem zawartości włókien z 0,15% do 0,30%, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wszystkich mieszanek znacznie wzrosły, jednak przy większych udziałach włókien - 0,45% i 0,60% wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zmniejszyły się. Podobnie, w miarę wzrostu udziału popiołu lotnego względem GGBFS wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zmniejszyły się. Dodatek włókien PVA w ilości od 0,15% do 0,30% zwiększył wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu o 12,7% do 24,7% przy proporcjach GGBFS/popioł lotny 100/00, 80/20 i 60/40 oraz od 2,5% do 14,1% przy proporcjach 40/60, 20/80 i 00/100 w porównaniu z mieszanką kontrolną [bez włókien]. Wyniki potwierdzają również obserwacje uzyskane przez Amina i in. (48), którzy stwierdzili, że dodanie 0,25 procent włókien PVA o długości 12 mm zwiększyło wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu o 27,0% w porównaniu z mieszanką bez włókien. Wynika to z faktu, że dodanie włókien PVA powyżej określonego limitu powoduje efekt zbrylania, który prowadzi do niewłaściwego zagęszczenia betonu, zwiększenia udziału powietrza w mieszance oraz osłabienia strefy kontaktu włókno – zaczyn. W rezultacie, mieszanki o wysokiej zawartości włókien PVA mają niższą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (28,30,50). Największe wartości wytrzymałości dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego zaobserwowano przy wprowadzeniu 0,3% włókien PVA, a procentowe wzrosty wynosiły odpowiednio 23,7%, 24,7%, 23,4%, 14,1%, 8,5% i 5,9% w mieszankach B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60 i B-20/80, B-00/100. Potwierdzono, że mieszanki z udziałem popiołu lotnego do 40% i włóknami PVA mają wyższy wskaźnik wzrostu wytrzymałości niż mieszanki z popiołem lotnym w ilościach ponad 40%. Choć wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu uległa poprawie wraz ze wzrostem udziału włókien PVA z 0,15% do 0,30%, procentowy wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zmniejszył się, gdy zawartość popiołu lotnego wzrosła z 0% do 100%.

3.3. Korelacja właściwości mechanicznych

3.3.1. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałość na ścislenie

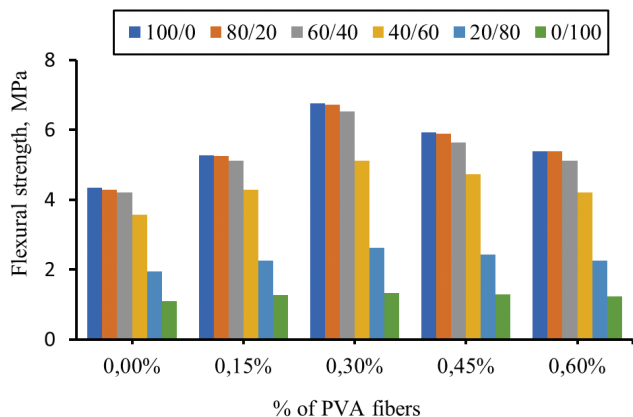
Zweryfikowano korelacje między doświadczalnie wyznaczonymi wartościami wytrzymałości na ścislenie [f_c] i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu [f_{st}] [rys. 7]. Ustalono zależność:

$$f_{st} = 0,50 [f_c]^{0,5} \text{ i } R^2 = 0,99 \quad [1]$$

to 0.30 %, the flexural strength values of all the mixes greatly increased. With the inclusion of PVA fibres from 0.15 % to 0.30 %, flexural strength values were increased approximately from 21.4 % to 57 % at 100/00, 80/20, and 60/40 GGBFS/fly ash proportions and from 15.5 % to 43.8 % at 40/60, 20/80, and 00/100 GGBFS/fly ash proportions. Flexural strength values increase by 21.4 % to 55.8 % in B-100/00, 22.7 % to 57.0 % in B-80/20, 21.9 % to 55.2 % in B-60/40, 20.2 % to 43.8 % in B-40/60, 16.0 % to 35.6 % in B-20/80, and 15.5 % to 20.9 % in B-00/100. When PVA fibres of small length, such as 12 mm, are introduced to the mixtures, these fibres serve as a crack-bridging mechanism, which accounts for the increase in flexural strength. Moreover, the addition of PVA fibres increases the stiffness of concrete and demonstrates resistance to the growth of microcracks (28, 30). Although the flexural strength improved as the PVA fibre dose increased from 0.15 % to 0.30 %, the percentage increase in flexural strength decreased when the fly ash percentage increased from 20 % to 100 %. The flexural strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3% PVA fibres, and the percentage increases at 0.3% PVA fibres were 55.8 %, 57.0 %, 55.2 %, 43.8 %, 35.6 %, and 20.9 % in mixes B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively. Even if PVA fibres are added, the improvement in flexural strength is very minimal if more than 40 % of fly ash is used in place of GGBFS. This is because higher fly ash content causes the interface between concrete and fibre to deteriorate. These flexural strength values decreased slightly for higher fibre percentages, such as 0.45 % and 0.60 % PVA. Similar results were seen in the earlier study (28, 30). This is because greater fibre percentages in the mixture cause the balling effect, which also causes the mixture to be non-homogeneous.

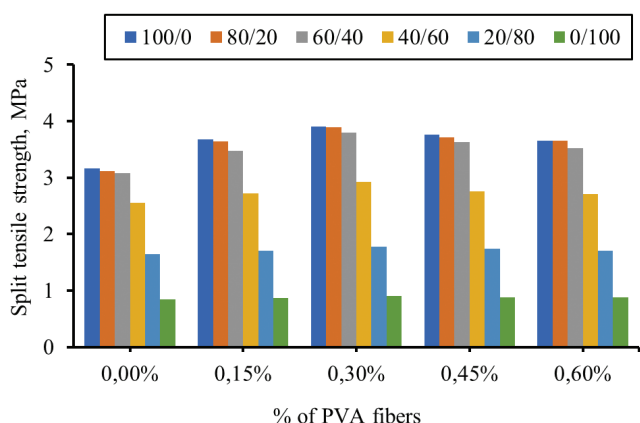
3.2.3. Split tensile strength

From Fig. 6, it was found that as the fibre content increased from 0.15 % to 0.30 %, the split tensile strength values of all the mixes greatly increased. At dosages of 0.45 % and 0.60 % PVA, these split tensile strength values were, therefore, somewhat decreased. Similarly, split tensile strength values were slightly reduced when fly ash dosages increased from 0 % to 100 %. The inclusion of PVA fibres from 0.15 % to 0.30 % increased split tensile strength values by approximately 12.7 % to 24.7 % at 100/00, 80/20, and 60/40 GGBFS/fly ash proportions and 2.5 % to 14.1 % at 40/60, 20/80, and 00/100 GGBFS/fly ash proportions compared to control mix [without fibres]. The results are almost identical to those found in Amin et al.'s study (48), which found that adding 0.25 percent 12 mm long PVA fibres increased concrete's split tensile strength by 27.0 % in comparison to mix without fibres. This is due to adding PVA fibres above a particular limit causes a balling effect that leads to inappropriate concrete compaction, internal voids, and weak fibre-matrix interfaces. As a result, mixtures with a high PVA fibre content have lower split tensile strength (28,30,50). The maximum split tensile strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3 % PVA fibres, and the percentage increases at 0.3 % PVA fibres were 23.7 %, 24.7 %, 23.4 %, 14.1 %, 8.5 %, and 5.9 % in mixes B-100/00, B-80/20, B-60/40,



Rys. 5. Wytrzymałość na zginanie.

Fig. 5. Flexural strength values.



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie przy rozłupywaniu.

Fig. 6. Split tensile strength values.

Współczynnik determinacji proponowanej zależności $[R^2]$ wynosi 0,99. Sugeruje to, że istnieje istotna zależność między wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałością na ścisnienie. Uzyskane równanie empiryczne [1] niedoszacowuje zależności ACI 318 (53) i Euro Code (54) oraz AS 3600 (55) i Lee i in. (4), ale idealnie spełnia zależność proponowaną przez Sofi i in. (56).

3.3.2. Wytrzymałość na zginanie a wytrzymałość na ścisnienie

Zweryfikowano korelację doświadczalnie wyznaczonych wartości wytrzymałości na ścisnienie $[f_c]$ i wytrzymałości na zginanie $[f_{fs}]$ na rys. 8. Ustalona zależność została przedstawiona w następujący sposób za pomocą analizy korelacyjnej:

$$f_{fs} = 0,79 [f_c]^{0,5} \text{ i } R^2 = 0,96 \quad [2]$$

Proponowany współczynnik determinacji $[R^2]$ wynosi 0,96. Sugeruje to, że istnieje istotna zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ścisnienie. Uzyskane równanie empiryczne [1] lepiej koreluje w porównaniu do zależności ACI 318 (53), AS 3600 (55) i Diaz Loya et al. (57), gorzej zaś koreluje względem zależności Nath i Sarker (58).

B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively. This confirmed that mixes with up to 40 % fly ash replacements and PVA fibres have a higher strength increment rate than mixes with more than 40 % fly ash and fibres. Although the split tensile strength improved as the PVA fibre dose increased from 0.15 % to 0.30 %, the percentage increase in split tensile strength decreased when the fly ash percentage increased from 0 % to 100 %.

3.3. Correlation studies on mechanical strengths

3.3.1. Split tensile strength and compressive strength

A correlation study was carried out on the experimentally determined values of compressive strength $[f_c]$ and splitting tensile strength $[f_{st}]$ in Fig. 7. The established relationship was shown as follows by correlation analysis:

$$f_{st} = 0.50 [f_c]^{0.5} \text{ and } R^2 = 0.99 \quad [1]$$

The proposed relationship's coefficient of determination $[R^2]$ is 0.99. This suggests that there is a significant relationship between split tensile strength and compressive strength. The obtained empirical equation [1] underestimates the ACI 318 (53) and Euro Code (54) relations, overestimates the AS 3600 (55) and Lee et al. (4) relationship, but almost perfectly satisfies the proposed relationship by Sofi et al. (56).

3.3.2. Flexural strength and compressive strength

A correlation study was carried out on the experimentally determined values of compressive strength $[f_c]$ and flexural strength $[f_{fs}]$ in Fig.8. The established relationship was shown as follows by correlation analysis:

$$f_{fs} = 0.79 [f_c]^{0.5} \text{ and } R^2 = 0.96 \quad [2]$$

The proposed relationship's coefficient of determination $[R^2]$ is 0.96. This suggests that there is a significant relationship between flexural strength and compressive strength. The obtained empirical equation [1] overestimates the ACI 318 (53), AS 3600 (55) and Diaz Loya et al. (57) relations, underestimates the Nath and Sarker (58) relationship.

3.3.3. Split tensile strength and flexural strength

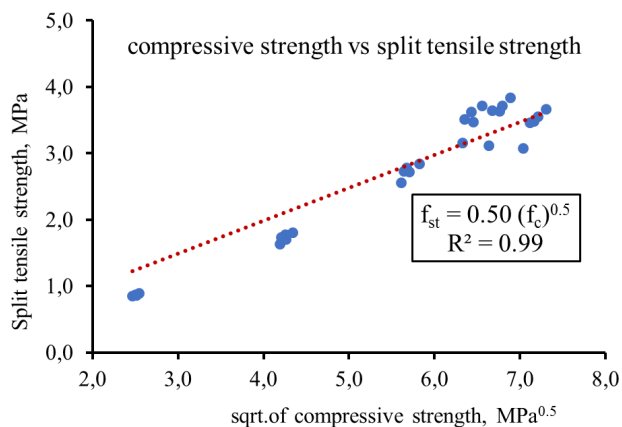
A correlation study was carried out on the experimentally determined values of split tensile strength $[f_{st}]$ and flexural strength $[f_{fs}]$ in Fig. 9. The established relationship was shown as follows by correlation analysis:

$$f_{st} = 1,38 [f_{fs}]^{1,13} \text{ and } R^2 = 0.94 \quad [3]$$

The proposed relationship's coefficient of determination $[R^2]$ is 0.94. This suggests that there is a significant relationship between flexural strength and split tensile strength

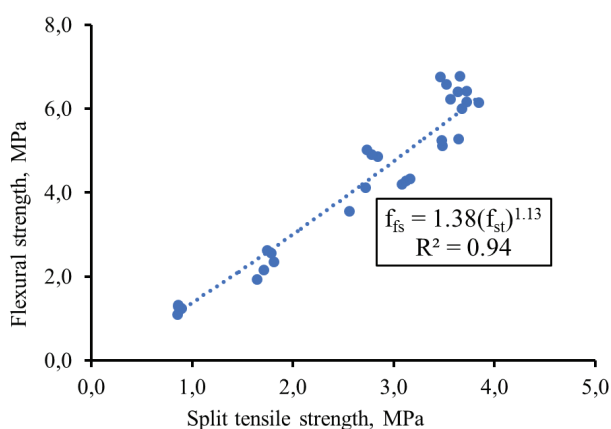
3.3.4. Comparison studies

The empirical relationship curves between the compressive strength and split tensile strength of conventional concrete [CC],



Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie vs wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Fig. 7. Compressive strength vs split tensile strength.



Rys. 9. Korelacja między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu.

Fig. 9. Correlation between flexural strength vs split tensile strength.

3.3.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałość na rozciąganie

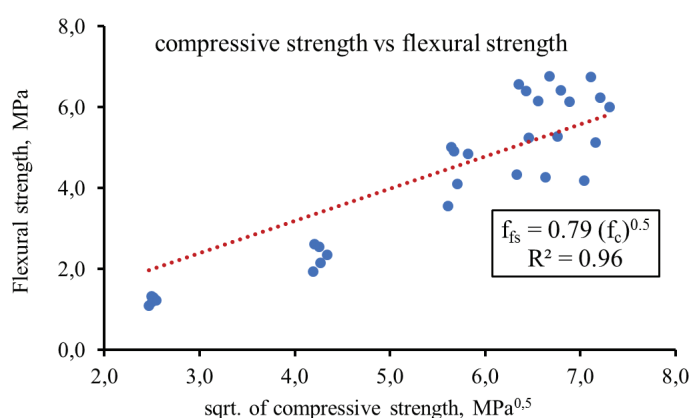
Weryfikowano korelacje eksperymentalnie wyznaczonych wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu [f_{st}] i wytrzymałości na zginanie [f_{fs}] [rys. 9]. Ustalona zależność:

$$f_{fs} = 1,38[f_{st}]^{1,13} \text{ i } R^2 = 0,94 \quad [3]$$

Proponowany współczynnik determinacji [R^2] wynosi 0,94. Sugeruje to, że istnieje istotna zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu.

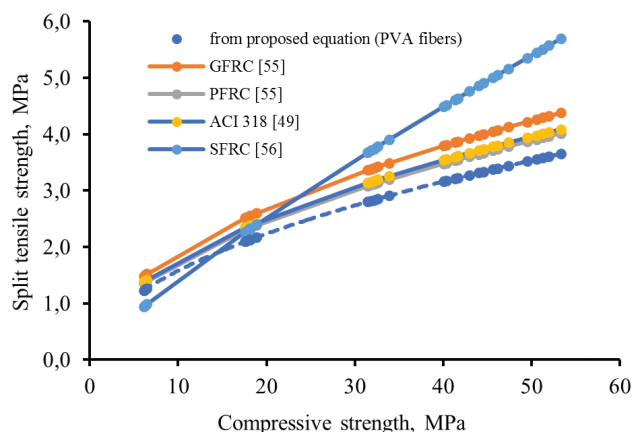
3.3.4. Studium porównawcze

Krzywe zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu konwencjonalnego [CC], betonu zbrojonego włóknami polipropylenowymi [PFRC], betonu zbrojonego włóknami szklanymi [GFRC], betonu zbrojonego włóknami stalowymi [SFRC] oraz betonu z żużlem i popiołem lotnym aktywowanym alkali wzmocnionego włóknami polialkoholu winylowego pokazano na rys. 10. Z porównania wynika, że zależności empiryczne dla betonu konwencjonalnego [CC]



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie vs wytrzymałość na rozciąganie.

Fig. 8. Compressive strength vs flexural strength.



Rys. 10. Porównanie istniejących równań z proponowanym równaniem dla różnych włókien.

Fig. 10. Comparison of proposed equation with existed equations for different fibres.

polypropylene fibre reinforced concrete [PFRC], glass fibre reinforced concrete [GFRC], steel fibre reinforced concrete [SFRC] and polyvinyl alcohol fibre reinforced alkali activated slag-fly ash concrete are shown in Fig. 10. From this it is understood that the empirical relationships between conventional concrete [CC] and fibre-reinforced concrete [FRC] are not the same, and it is inferred that the experimental curve obtained in this study is slightly underestimated when compared to earlier studies and codes.

3.4. Stress-strain behaviour

Figs. 11 [a], [b], [c], [d], [e] and [f] depict the experimental compressive stress-compressive strain behaviour of mixes B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80 and B-00/100. The stress-strain curves are created using the experimental load and displacement data that were captured by the DAC system. In this experiment, displacements were measured using linear variable displacement transducers [LVDTs], while loads were determined using a load cell. The test setup to obtain the stress strain behaviour demonstrated in Fig. 2. In all mixtures, up to 60-70% of the maximum peak load, load on test specimens rose sharply during test, then increased more slowly until it reached the maximum peak load. The test was

i betonu zbrojonego włóknami [FRC] nie są takie same i można wnioskować, że krzywa eksperymentalna uzyskana w pracy jest nieznacznie niedoszacowana w porównaniu z wcześniejszymi badaniami i normami.

3.4. Zależność naprężenie-odkształcenie

Rys. 11 [a], [b], [c], [d], [e] i [f] przedstawia zależność naprężenia ściskającego i odkształcenia mieszanek B-100/00, B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80 i B-00/100. Krzywe naprężenie-odkształcenie sporządzono używając danych doświadczalnych obciążenia i przemieszczenia, które zostały rejestrowane przez system DAC. Przemieszczenia mierzono za pomocą pomiaru przemieszczeń liniowych [LVDT], podczas gdy obciążenia oznaczano za pomocą czujnika siły. Stanowisko pomiarowe służące do pomiarów zależności naprężenie-odkształcenie pokazano na rys. 2. We wszystkich mieszankach, do 60-70% maksymalnego obciążenia szczytowego, obciążenie na próbkach testowych gwałtownie rosło podczas, a następnie przyrost był mniejszy, aż osiągnęło obciążenie maksymalne. Badanie kontynuowano po osiągnięciu maksymalnego obciążenia próbek, do momentu aż spadło ono do

continued after determining the maximum peak load of the samples until the maximum peak load dropped to between 40 and 50% of the maximum peak load in most of the mixes. At 60-70% of the maximum peak, a number of nonlinear vertical cracks were seen on the surface of the specimens. All of the mixes had linear elastic compressive stress-strain behaviour up to a peak stress of 65–70% before changing to nonlinear behaviour after the failure stress was reached. The load dropped after reaching its peak stress. This load dropped abruptly in some mixes while gradually dropping in others with increasing compressive strain. Peak stress values in every mix dropped as the replacement value of the fly ash content replacement increased. These peak stress values decreased greatly when more than 40% fly ash was replaced. Compared to the remaining mixes, the samples having 100% GGBFS displayed a higher brittle behaviour and a faster crack propagation. Increasing the GGBFS reduces the ductility of the specimen while increasing its stiffness and resistance to deformation at peak stress. Furthermore, as the GGBFS increased, the ultimate strain decreased after peak stress (58,59). This is because those mixes have more GGBFS volume than other mixes do. The percentage of decreasing peak stress and the corresponding increasing strain up to 40 % fly ash

Tablica 5 / Table 5

NAPRĘŻENIE MAKSYMALNE, ODKSZTAŁCENIE PRZY MAKSYMALNYM NAPRĘŻENIU, WSPÓŁCZYNNIK NAPRĘŻENIA, WSPÓŁCZYNNIK ODKSZTAŁCENIA, WARTOŚCI MOE I EAC.

PEAK STRESS, STRAIN AT PEAK STRAIN, STRESS RATIO, STRAIN RATIO, MOE AND EAC VALUES.

Mix Designation	Dodatek włókien PVA, % % PVA fibres addition	Naprężenie szczytowe / Peak stress, MPa	Odkształcenie przy szczytowym obciążeniu Strain at peak stress, -	Obciążenie względne Stress ratio, -	Odkształcenie względne Strain rate, -	MOE, MPa	EAC, MPa
B-100/00	0.00%	49.06	0.00258	1.000	1.000	24.29	0.113
	0.15%	50.82	0.00312	1.036	1.211	25.75	0.168
	0.30%	53.35	0.00404	1.087	1.565	27.44	0.228
	0.45%	51.26	0.00364	1.045	1.412	25.53	0.192
	0.60%	49.12	0.00302	1.001	1.173	25.34	0.160
B-80/20	0.00%	42.69	0.00265	1.000	1.000	21.15	0.106
	0.15%	44.64	0.00320	1.046	1.206	22.52	0.156
	0.30%	46.68	0.00427	1.093	1.609	23.80	0.222
	0.45%	45.66	0.00374	1.070	1.408	22.78	0.179
	0.60%	44.5	0.00312	1.042	1.176	22.63	0.138
B-60/40	0.00%	39.27	0.00276	1.000	1.000	18.75	0.102
	0.15%	40.93	0.00341	1.042	1.234	19.87	0.141
	0.30%	42.83	0.00442	1.091	1.603	20.96	0.201
	0.45%	41.88	0.00392	1.066	1.419	20.09	0.160
	0.60%	40.25	0.00321	1.025	1.162	19.86	0.129
B-40/60	0%	29.46	0.00287	1.000	1.000	13.38	0.079
	0.15%	30.3	0.00338	1.029	1.179	13.93	0.106
	0.30%	31.74	0.00449	1.077	1.564	14.80	0.151
	0.45%	31.02	0.00394	1.053	1.372	14.18	0.124
	0.60%	30	0.00323	1.018	1.125	13.94	0.090
B-20/80	0%	17.08	0.00301	1.000	1.000	7.27	0.048
	0.15%	17.46	0.00348	1.022	1.155	7.54	0.064
	0.30%	18.25	0.00455	1.069	1.511	7.76	0.089
	0.45%	17.75	0.00406	1.039	1.346	7.62	0.078
	0.60%	17.25	0.00329	1.010	1.092	7.52	0.050
B-00/100	0%	5.64	0.00322	1.000	1.000	2.24	0.017
	0.15%	5.73	0.00358	1.016	1.110	2.30	0.021
	0.30%	5.97	0.00469	1.059	1.455	2.34	0.029
	0.45%	5.81	0.00425	1.030	1.319	2.30	0.025
	0.60%	5.7	0.00358	1.011	1.110	2.27	0.019

40–50 procent szczytowego obciążenia. Przy 60–70% maksymalnego obciążenia na powierzchni próbek zaobserwowano szereg nieliniowych pęknięć. Wszystkie mieszanki wykazały liniowe charakterystyki zależności naprężenia ściskającego-odkształcenia do ok. 60-70 % naprężenia maksymalnego. Po osiągnięciu naprężenia maksymalnego w niektórych mieszankach, obciążenie malało gwałtownie podczas gdy w innych przypadkach spadało stopniowo ze wzrostem odkształcenia ściskającego. Wartości naprężeń maksymalnych spadały wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego. Te wartości naprężeń szczytowych spadały bardziej, gdy stosowano powyżej 40% popiołu lotnego w składzie betonów. Próbki zawierające 100% GGBFS wykazywały większą kruchość i szybszą propagację pęknięć. Zwiększenie udziału GGBFS zmniejsza ciągliwość próbki, jednocześnie zwiększając jej sztywność i odporność na odkształcenia przy naprężeniu szczytowym. Ponadto, wraz ze wzrostem zawartości GGBFS, odkształcenia graniczne zmniejszały się po naprężeniu szczytowym (58,59). Procentowa zmiana zmniejszającego się naprężenia szczytowego i odpowiadającego mu rosnącego odkształcenia do 40% zastąpienia popiołem lotnym wynosi odpowiednio 20,0% i 9,3%. Powyżej 40% zastąpienia popiołem lotnym, procentowa zmiana zmniejszającego się naprężenia szczytowego wynosiła 88,5%, a zmiana odkształcenia szczytowego wynosiła 20,7%. Pokazuje to, że zachowanie naprężenie-odkształcenie zwykłego AASFC jest zależne od zawartości popiołu lotnego w składzie.

3.5. Naprężenie maksymalne, odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym

Próbki zawierające włókna PVA wykazały wyższe wartości odkształcenia przy maksymalnym naprężeniu końcowym w porównaniu do próbek bez włókien. Z kolei mieszanki zawierające 0,15%, 0,45% i 0,60% włókien PVA miały mniejsze wartości naprężenia po osiągnięciu naprężenia maksymalnego w porównaniu do betonów zawierających 0,30% włókien PVA. Mieszanki zawierające 0,30% włókien PVA wykazały wyższe szczytowe naprężenie i najniższe odkształcenie przy szczytowych wartościach naprężenia. Szczytowe naprężenie i odpowiadające mu szczytowe wartości odkształcenia wzrosły kiedy udział PVA wzrósł z 0,15% do 0,30%, ale spadły przy 0,45% i 0,60% udziale włókien PVA. Procentowy wzrost szczytowego naprężenia i odkształcenia przy szczytowym naprężeniu względem mieszanki kontrolnej dla betonów z 0,30% włókien PVA wynosił odpowiednio: 8,7% i 56,5% w mieszance B-100/00, 9,4% i 60,9% w mieszance B-80/20, 9,1% i 60,3% w mieszance B-60/40, 7,7% i 56,5% w mieszance B-20/80, 6,9% i 51,2% w mieszance B-00/100 oraz 5,9% i 45,5% w mieszance B-00/100. Oznacza to, że dodanie włókien PVA znacznie poprawiło zdolność do osiągnięcia większej sztywności próbek betonu z żużla i popiołu lotnego wzmocnionego włóknami z poli(alkoholu winylowego) w porównaniu do próbek betonu z 0% włókien PVA. Spośród wszystkich mieszanek, mieszanka B-100/00 zawierająca włókna PVA wykazała lepsze zależności naprężenie/odkształcenie w porównaniu z innymi mieszankami. W porównaniu do kompozytów B-100/00, kompozyty B-80/20 i B-60/40 również wykazały lepsze zachowanie materiału pod wpływem obciążeń zewnętrz-

replacement is 20.0 % and 9.3 % respectively. Beyond 40 % fly ash replacement levels, the percentage of decreasing peak stress was 88.5 % and the percentage of increasing peak strain was 20.7 %. This shows that the plain AASFC's stress-strain behaviour is significantly affected by the greater replacement amounts of fly ash.

3.5. Peak stress and strain at peak stress

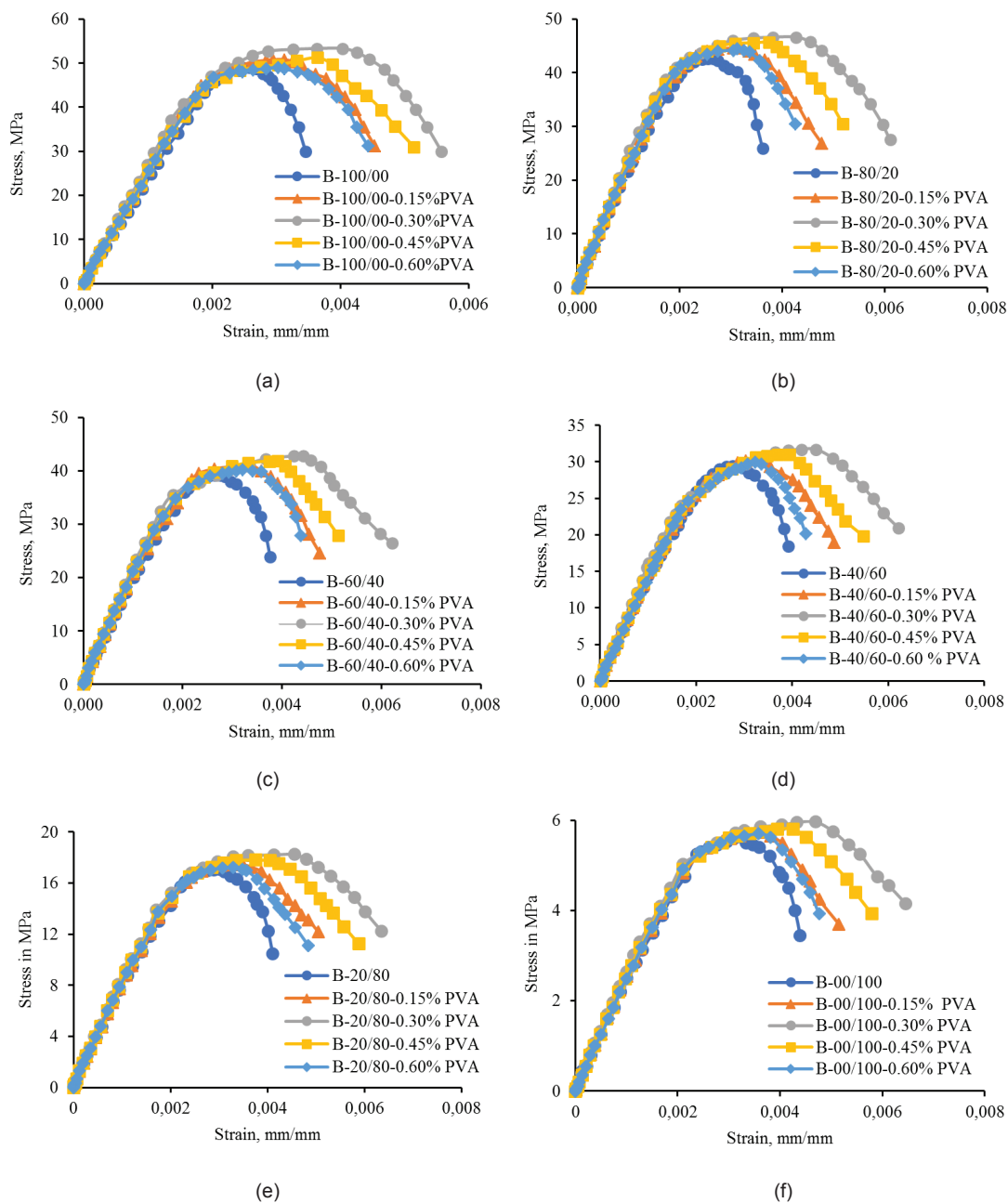
From Table 5, compared to non-fibrous samples, samples having PVA fibre content displayed higher strain values at ultimate peak stress with higher post-peak behaviour. Similarly, mixes having 0.15%, 0.45%, and 0.60% PVA fibres showed less post-peak behaviour than mixes having 0.30% PVA fibre dosage. Mixes with 0.30% PVA fibre content exhibited higher peak stress and lowest strain at peak stress values. The peak stress and the corresponding strain peak stress values increase from 0.15 % to 0.30 % PVA, but these values decreased with addition of 0.45 % and 0.60 % of PVA fibres. The percentage increase in peak stress and strain at peak stress for 0.30 % PVA fibres compared to control mix [0% PVA fibres] was 8.7 % and 56.5 % in B-100/00 mix, 9.4 % and 60.9 % in B-80/20 mix, 9.1 % and 60.3 % in B-60/40 mix, 7.7 % and 56.5 % in B-20/80 mix, 6.9 % and 51.2 % in B-00/100 mix, and 5.9 % and 45.5 % in B-00/100 mix, respectively. This means that the addition of PVA fibres greatly improved the strain-hardening behaviour of polyvinyl alcohol fibre reinforced alkali activated slag-fly ash concrete specimens as compared to 0% PVA fibre concrete specimens. Among all mixtures, the B-100/00 containing PVA fibres showed improved strain hardening behaviour compared to other mixtures. When compared to the B-100/00 composites with PVA fibres, the B-80/20 and B-60/40 composites with PVA fibres also showed improved strain behaviour, but there was a slight decrease in strain hardening and the percentage of the decrease was smaller. The strain hardening capability is considerably diminished when more than 40 % fly ash is employed.

3.6. Stress ratio and strain ratio

Using the experimentally determined peak stress and strain at peak stress values for each combination, stress ratios and strain ratios were calculated. In Table 4, the calculated values are also given. Fig.12 illustrates the variations in the strain ratio and stress ratio caused by the addition of PVA fibres to all control mixtures [0% PVA]. According to the test results, when PVA fibres were added up to 0.3 %, all mixes improved more in strain ratio than in stress ratio. This suggests that PVA fibre addition can enhance the sample's deformation capacity. Similarly, with the addition of PVA fibres, B-100/00, B-80/20, and B-60/40 show better stress and strain ratios than B-40/60, B-20/80, and B-00/100 mixes. Even with the addition of fibres, replacing more than 40 % fly ash cannot be expected to achieve better results.

3.7. Modulus of elasticity

Following ACI 318 (49), the modulus of elasticity [MOE] was calculated. By drawing a tangent from the origin to 45 % stress at the peak stress and computing the modulus of elasticity value for each mix, the sample's modulus of elasticity is represented by the



Rys. 11. Krzywe naprężenia-odkształcenia przy różnych proporcjach GGBFS i popiołu lotnego: (a) 100/20, (b) 80/20, (c) 60/40, (d) 40/60 (e) 20/80 i (f) 00/100

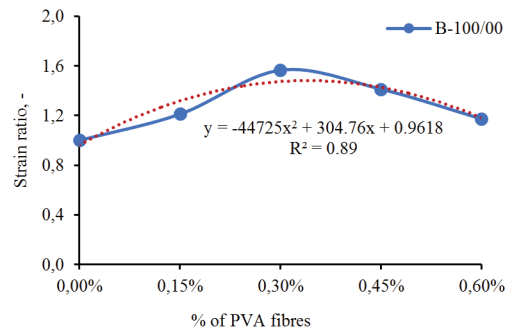
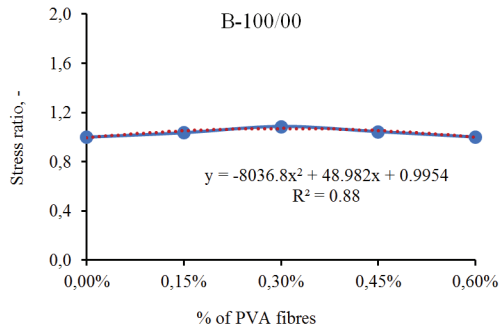
Fig. 11. Stress-strain curves at various GGBFS and fly ash proportions: (a) 100/20, (b)80/20, (c) 60/40, (d) 40/60 (e) 20/80 and (f) 00/100

nych. Zdolność materiału do odkształcania plastycznego przy obciążeniach mniejszych od niszczących jest znacznie zmniejszona, gdy dodatek popiołu jest większy niż 40%.

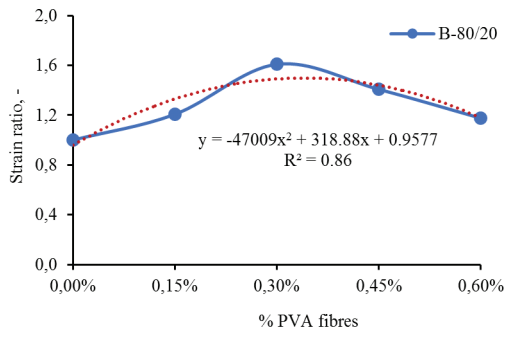
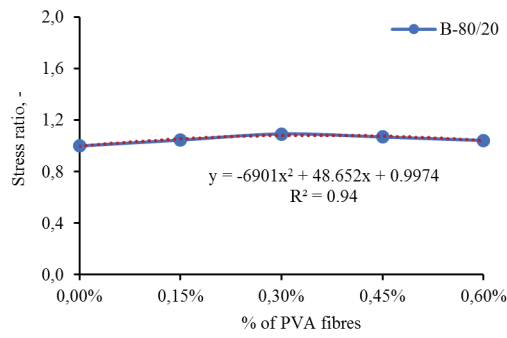
3.6. Współczynnik naprężenia i współczynnik odkształcenia

Wykorzystując doświadczalnie określone szczytowe naprężenia i odkształcenia przy szczytowych wartościach naprężeń dla każdej kombinacji, obliczono współczynniki naprężeń i odkształceń. W tabelicy 4 podano również obliczone wartości a rys. 12 ilustruje zmiany współczynnika odkształcenia i współczynnika naprężeń spowodowane dodaniem włókien PVA do wszystkich mieszanek kontrolnych [0% PVA]. Zgodnie z wynikami testu, gdy włókna PVA dodano w ilości do 0,30%, wszystkie mieszanki miały większy

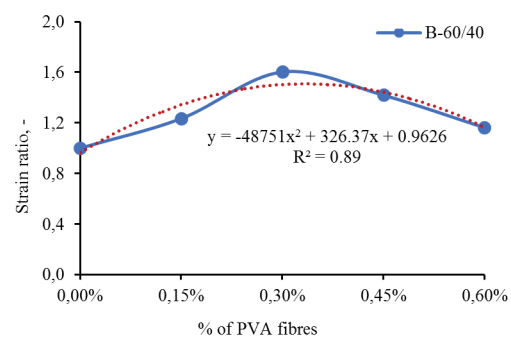
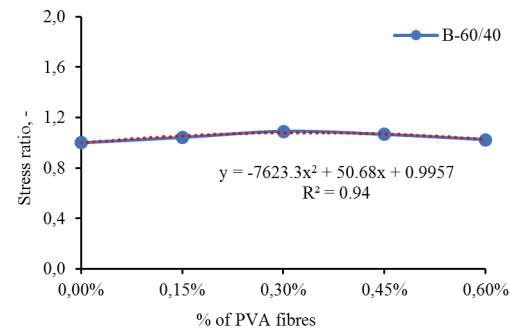
slope of the tangent. The modulus of elasticity values for mix B with and without PVA fibres from 0.0 % to 0.60 % are shown in Fig. 13 and Table 5. When 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, and 100 % fly ash were substituted for GGBFS and fibres were not added, the MOE values of mix B were 24.29 GPa, 21.15 GPa, 18.75 GPa, 13.38 GPa, 7.27 GPa, and 2.24 GPa and 1.42 GPa, respectively. As the fly ash increased from 0-100 % in each mix, the MOE values dropped significantly. One of the reasons for this could be that compressive strength values decrease as the percentage of fly ash increases. As the fly ash increased from 0-40 %, the MOE values also gradually decreased. When more than 40 % fly ash was introduced, the MOE values fell extremely down. According to their respective compressive strength values, the MOE values obtained in the AASFC mixes are lower than the normal concrete



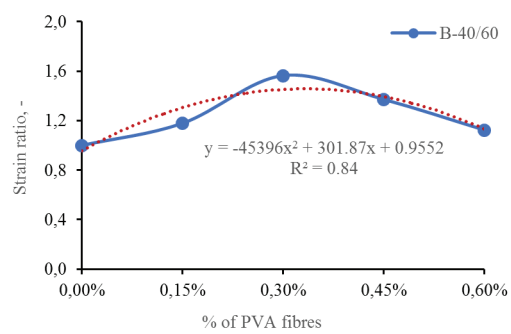
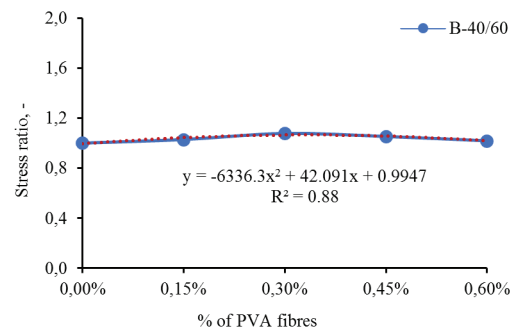
(a) B-100/00



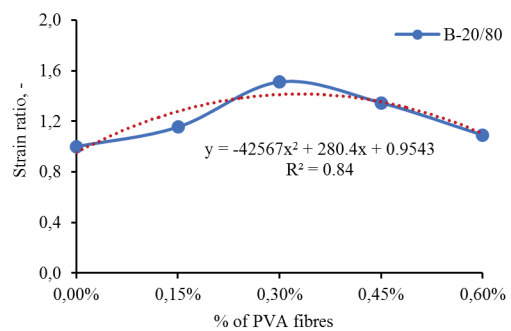
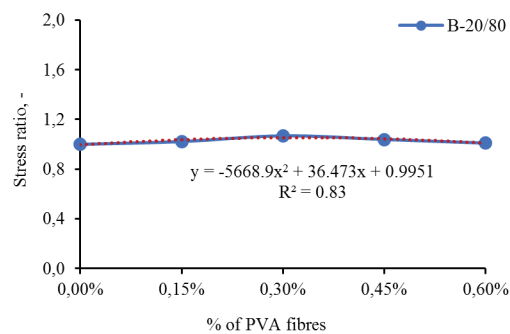
(b) B-80/20



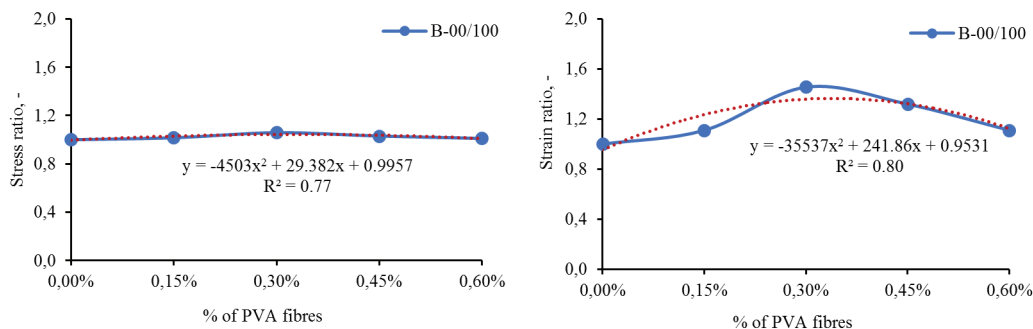
(c) B-60/40



(d) B-40/60



(e) B-20/80



(f) B-00/100

Rys. 12. Zmiana współczynnika naprężenia i współczynnika odkształcenia w odniesieniu do procentowej zawartości włókien PVA.

Fig. 12. Variation in stress ratio and strain ratio with respect to % of PVA fibre content.

współczynnik odkształcenia niż współczynnik naprężeń. Sugeruje to, że wprowadzenie włókien PVA może zwiększyć zdolność próbek do odkształceń pod wpływem zewnętrznych naprężeń. Podobnie, po dodaniu włókien PVA, mieszanki B-100/00, B-80/20 i B-60/40 wykazują lepsze współczynniki naprężeń i odkształceń niż mieszanki B-40/60, B-20/80 i B-00/100. Nawet po dodaniu włókien nie można oczekiwać, że wprowadzenie ponad 40% popiołu lotnego przyniesie korzystne rezultaty.

3.7. Moduł sprężystości

Obliczono moduł sprężystości [MOE] zgodnie z ACI 318 (49). Wartości wyznaczono poprzez wykreślenie stycznej do krzywej eksperymentalnej do 45% naprężenia szczytowego i obliczono wartości modułu sprężystości dla każdej mieszanki, który jest reprezentowany przez nachylenie stycznej. Wartości modułu sprężystości dla mieszanki B z włóknami PVA i bez nich od 0,0% do 0,60% pokazano na rys. 13 i w tabelicy 5. W betonach bez włókien, gdy wprowadzono 0%, 20%, 40%, 60%, 80% i 100% popiołu lotnego zastępując GGBFS, wartości MOE mieszanki B wynosiły odpowiednio 24,29 GPa, 21,15 GPa, 18,75 GPa, 13,38 GPa, 7,27 GPa, 2,24 GPa i 1,42 GPa. Wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego od 0 do 100% wartości MOE znacząco malały. Jednym z powodów może być spadek wytrzymałości na ściskanie wynikający z wprowadzenia popiołu lotnego względem GGBFS. Wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego od 0 do 40%, wartości MOE spadały nieznacznie, jednak gdy wprowadzono ponad 40% popiołu lotnego, wartości MOE spadły do bardzo niskiego poziomu. Zgodnie z ich odpowiednimi wartościami wytrzymałości na ściskanie, wartości MOE uzyskane w mieszankach AASFC są niższe niż wartości MOE normalnego betonu [OPC]. Poprzednie badania nad betonami geopolimerowymi aktywowanymi alkaliami potwierdzają obserwowane różnice (36,57,58,60).

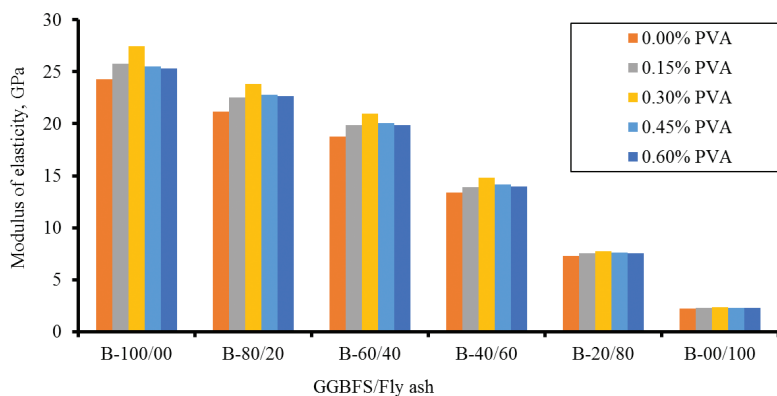
We wszystkich betonach wartości MOE znacznie wzrosły, gdy udział włókien PVA zwiększył się z 0,15% do 0,30%, jednak spadły przy 0,45% i 0,60% zawartości włókien PVA. Prawdopodobnie ze względu na niejednorodność mieszanki i efekt pęcznienia, który występuje wraz ze wzrostem zawartości włókien. Wprowadzenie 0,30% włókien PVA spowodowały wzrost wartości MOE: 13,0%

MOE values [OPC]. Previous research on alkali-activated geopolymer concretes found similar results (36,57,58,60).

In all mixes, MOE values increased significantly when PVA fibres addition increased from 0.15 % to 0.30 %, however, these MOE values decreased somewhat at 0.45 % and 0.60 % PVA fibres. Because of the mix's nonuniformity and the bulking effect that occurs as the fibre content increases, strength cannot be effectively achieved. When 0.30 % of PVA fibres were added to each mix, the MOE values increased as follows: 13.0 % in mix B-100/00, 12.5 % in mix B-80/20, 11.8 % in mix B-60/40, 10.6 % in mix B-40/60, 6.7 % in mix B-20/80, and 4.5 % in mix B-00/100. When fibres are introduced with more than 40 % fly ash, the rate of increase in modulus of elasticity values is significantly lower than when fibres are added with less than 40 % fly ash. This could be because the interface between the binder and the fibres is too weak when fly ash levels are high.

3.8. Energy absorption capacity [EAC]

The EAC of all samples caused by the addition of PVA fibres was calculated using the area under the experimental stress-strain curves. Table. 5 and Fig.14 illustrate the improvements in energy absorption capacity [EAC] in all mixes. According to the findings, the EAC achieved by incorporating PVA fibres into all the mixes was greater than the EAC of the control mixes. This is due to the fact that PVA fibres increase both the area under the stress-strain curves and the post-peak behaviour of the concrete



Rys. 13. Moduł sprężystości

Fig. 13. Modulus of Elasticity values

w mieszance B-100/00, 12,5% w mieszance B-80/20, 11,8% w mieszance B-60/40, 10,6% w mieszance B-40/60, 6,7% w mieszance B-20/80 i 4,5% w mieszance B-00/100. Gdy włókna są wprowadzane do betonów zawierających ponad 40% popiołu lotnego, szybkość wzrostu wartości modułu sprężystości jest znacznie niższa niż w przypadku dodania włókien do betonów zawierających mniej niż 40% popiołu lotnego. Może to być spowodowane strefą kontaktu między zaczynem a włóknami, która jest słabsza gdy udziały popiołu lotnego są wysokie.

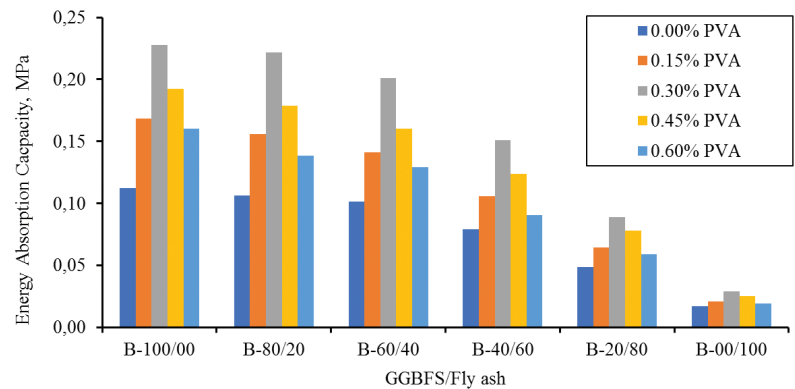
3.8. Zdolność absorpcji energii [EAC]

EAC wszystkich próbek zawierających włókna PVA obliczono, używając pola powierzchni pod doświadczalnie uzyskanymi krzywymi naprężenie-odkształcenie. Tablica 5 i rys. 14 ilustrują różnice w zdolności pochłaniania energii [EAC] we wszystkich betonach. Zgodnie z wynikami, EAC po wprowadzeniu włókien PVA była większa niż EAC mieszanek kontrolnych. Wynika to z faktu, że pole pod krzywymi naprężenie-odkształcenie jest większe dla próbek zawierających PVA (17). Dodanie włókien PVA do betonu zwiększa jego zdolność do kontroli pęknięć i EAC, mimo, że nie poprawia jego nośności. To samo stwierdzono we wcześniejszych badaniach (59). Najwyższe średnie wartości EAC odnotowano dla mieszanki B-100/00, następnie dla mieszanek B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80 i B-00/100, których wartości wynosiły odpowiednio 0,228 MPa, 0,222 MPa, 0,201 MPa, 0,151 MPa, 0,089 MPa i 0,029 MPa przy 0,30% zawartości włókien PVA. Dodanie 0,30% włókien PVA do wszystkich mieszanek spowodowało poprawę EAC o 102,2% w mieszance B-100/00, 108,5% w mieszance B-80/20, 97,6% w mieszance B-60/40, 90,6% w mieszance B-40/60, 83,7% w mieszance B-20/80 i 72,5% w mieszance B-00/100 w porównaniu do próbek kontrolnych [bez włókien]. Wynika to z faktu, że dodatek włókien PVA znacząco poprawia zachowanie tych mieszanek po osiągnięciu maksymalnego naprężenia i pole pod krzywą naprężenie-odkształcenie jest większe, co tłumaczy większe wartości EAC w mieszankach B-100/00 i B-80/20. Prowadzi to do wniosku, że dodanie 0,3% włókien PVA jest najbardziej korzystane ze względu na największe wartości EAC w porównaniu do pozostałych badanych betonów.

4. Wnioski

W pracy zbadano wpływ włókien polialkoholu winylowego [PVA] na właściwości mieszanki i stwardniałego, alkalicznie aktywowanego betonu z żużla i popiołu lotnego [AASFC] dojrzewającego w warunkach naturalnych. Wyniki badań pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

- Urabialność betonu stopniowo wzrastała wraz ze wzrostem popiołu lotnego z 0% do 100%, ale malała wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA od 0,15% do 0,60%.
- Dla wszystkich proporcji GGBFS/popioł lotny nastąpił znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na zginanie i wytrzymałości na rozciąganie przy zastosowaniu 0,3% włókien



Rys. 14. Zdolność absorpcji energii.

Fig.14. Energy Absorption Capacity values.

member's stress-strain curve (17). As a result, adding PVA fibres to the concrete improves its ability to control cracks and EAC rather than improving its load capacity. The same was stated in an earlier investigation (59). The greatest average EAC values were found for the B-100/00 mix, followed by the B-80/20, B-60/40, B-40/60, B-20/80, and B-00/100 mixes with values of 0.228 MPa, 0.222 MPa, 0.201 MPa, 0.151 MPa, 0.089 MPa, and 0.029 MPa, respectively with 0.3 % PVA fibres. The addition of 0.30 % PVA fibres to all mixtures resulted in EAC reading improvements of 102.2 % in mix B-100/00, 108.5 % in mix B-80/20, 97.6 % in mix B-60/40, 90.6 % in mix B-40/60, 83.7 % in mix B-20/80, and 72.5 % in mix B-00/100 when compared to the control mixes [mixes without fibres]. This is due to the fact that the addition of PVA fibres significantly improves the post-peak behaviour of these mixes and increases the area under the stress-strain curve, which accounts for the higher EAC values in mixes B-100/00 and B-80/20. This leads to the conclusion that, when compared to mixtures with PVA fibres at various percentages, those with 0.3 % PVA fibres had the greatest EAC values.

4. Conclusions

In this study, effect of polyvinyl alcohol [PVA] fibres on the fresh and mechanical characteristics of alkali-activated slag-fly ash concrete [AASFC] that has been cured under ambient conditions experimentally. From this study, the following conclusions were made.

- In all GGBFS and fly ash ratios, workability gradually increased as fly ash dosages increased from 0 % to 100 %, but decreased as PVA fibre dosages increased from 0.15 % to 0.60 %.
- In all GGBFS and fly ash ratios, there was a significant increase in compressive strength, flexural strength, and split tensile strength at 0.3 % PVA fibres. Similarly, the values of maximum stress, strain to maximum stress, modulus of elasticity, and energy absorption capacity were also greatly improved with 0.30 % PVA fibres. Based on this, the optimum fibre dosage in this study was determined at 0.30 % PVA fibre percentage.
- The maximum compressive strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3 % PVA fibres, and the percentage increases at 0.3 % PVA fibres were 7.8 %, 7.6 %, 7.4 %, 7.7 %, 7.1 %, and 6.1 % in mixes B-100/00,

- PVA. Wartości naprężenia maksymalnego, odkształcenia przy naprężeniu maksymalnym, modułu sprężystości i zdolności pochłaniania energii również znacznie się poprawiły przy użyciu 0,30% włókien PVA. Na tej podstawie optymalną dawkę włókien w tym badaniu określono dla 0,30% zawartości włókien PVA.
- Maksymalne wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego zanotowano przy uwzględnieniu 0,3% włókien PVA, a wzrost procentowy względem próbki referencyjnej wyniósł odpowiednio 7,8%, 7,6%, 7,4%, 7,7%, 7,1% i 6,1% w mieszankach B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60 i B-20/80, B-00/100.
 - Maksymalne wytrzymałości na zginanie dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego zanotowano dla 0,3% dodatku włókien PVA, a procentowy wzrost względem próbki referencyjnej wyniósł odpowiednio 55,8%, 57,0%, 55,2%, 43,8%, 35,6% i 20,9% w mieszankach B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60 i B-20/80, B-00/100.
 - Maksymalne wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla wszystkich proporcji GGBFS/popiołu lotnego zanotowano dla dodatku 0,3% włókien PVA, a wzrost procentowy względem próbki referencyjnej wyniósł odpowiednio 23,7%, 24,7%, 23,4%, 14,06%, 8,5% i 5,9% w mieszankach B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60 i B-20/80, B-00/100.
 - Po dodaniu 0,30% włókien PVA do każdej mieszanki wartości MOE wzrosły następująco: 12,97% w mieszance B-100/00, 12,53% w mieszance B-80/20, 11,8% w mieszance B-60/40, 10,6% w mieszance B-40/60, 6,7% w mieszance B-20/80 i 4,5% w mieszance B-00/100.
 - Dodanie 0,30% włókien PVA do wszystkich mieszanek spowodowało poprawę EAC o 102,2% w mieszance B-100/00, 108,5% w mieszance B-80/20, 97,6% w mieszance B-60/40, 90,6% w mieszance B-40/60, 83,7% w mieszance B-20/80 i 72,5% w mieszance B-00/100 w porównaniu do mieszanek kontrolnych [mieszanek bez włókien].
 - Wyżej wymienione właściwości mechaniczne nieznacznie pogarszają się przy zastosowaniu 0,45% i 0,60% włókien PVA ze względu na aglomerowanie i osłabienie strefy kontaktu między włóknami a zaczynem.
 - Na podstawie zależności naprężenia-odkształcenia, stwierdzono, że dodanie włókien PVA do wszystkich mieszanek znacznie poprawiło zachowanie materiału po osiągnięciu naprężenia maksymalnego. Najlepsze wyniki uzyskano dla 0,30% włókien PVA.
 - W przyszłości zaleca się dalsze badania nad właściwościami mieszanek oraz mechanicznymi właściwościami stwardniałych geopolimerów aktywowanych alkaliami z dodatkiem różnych rodzajów włókien, włókien hybrydowych, spoiw, aktywatorów alkaliów i warunków utwardzania, ponieważ pomimo prowadzenia szeroko zakrojonych badań nie opracowano spójnych zależności ani równań między właściwościami mechanicznymi B-80/20, B-6040, B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively.
 - The maximum flexural strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3 % PVA fibres, and the percentage increases at 0.3 % PVA fibres were 55.8 %, 57.0 %, 55.2 %, 43.8 %, 35.6 %, and 20.9 % in mixes B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively.
 - The maximum split tensile strength values for all GGBFS/fly ash proportions were seen with the inclusion of 0.3 % PVA fibres, and the percentage increases at 0.3 % PVA fibres were 23.7 %, 24.7 %, 23.4 %, 14.1 %, 8.5 %, and 5.9 % in mixes B-100/00, B-80/20, B-6040, B-40/60, and B-20/80, B-00/100, respectively.
 - When 0.30% of PVA fibres were added to each mix, the MOE values increased as follows: 13.0 % in mix B-100/00, 12.5 % in mix B-80/20, 11.8 % in mix B-60/40, 10.6 % in mix B-40/60, 6.74% in mix B-20/80, and 4.5 % in mix B-00/100.
 - The addition of 0.30 % PVA fibres to all mixtures resulted in EAC reading improvements of 102.2 % in mix B-100/00, 108.5 % in mix B-80/20, 97.6 % in mix B-60/40, 90.6 % in mix B-40/60, 83.7 % in mix B-20/80, and 72.5 % in mix B-00/100 when compared to the control mixes [mixes without fibres].
 - However, the values of the above-mentioned mechanical characteristics are slightly reduced at 0.45 % and 0.60 % PVA fibres due to the occurrence of balling effects in the mixes at higher PVA percentages and a weak interface between the matrix and fibres.
 - Based on the stress-strain behaviour, the addition of PVA fibres to all mixes significantly improved the post-peak behaviour. And the post-peak behaviour was much better at 0.30 % PVA fibre percentage as compared to other PVA percentages.
 - More research on fresh, mechanical properties of alkali-activated geopolymer composites using different types of fibres, hybrid fibres, binders, alkali activators, and curing conditions is advised in the future because, despite extensive research being conducted, no consistent relationships or equations have been developed between the mechanical characteristics.

Acknowledgement

The authors acknowledge the support from NIT Warangal and the staff members of the material testing and Concrete Laboratory of the Department of Civil Engineering, NIT Warangal.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the publication of this paper.

Podziękowania

Autorzy dziękują za wsparcie ze strony NIT Warangal oraz pracowników Laboratorium Testowania Materiałów i Betonu Wydziału Inżynierii Lądowej NIT Warangal.

Konflikt interesów

Autorzy oświadczają, że nie pozostają w konflikcie interesów w związku z publikacją niniejszego artykułu.

Literatura / References

1. P. Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, J.S. Van Deventer, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cem. Concr. Res.* **37**(12), 1590-1597 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
2. N. Ganesan, P.V. Indira, Engineering properties of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Adv. Concr. Constr.* **1**(4), 305 (2013). <https://doi.org/10.12989/acc2013.1.4.305>
3. N.K. Lee, H.K. Lee, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Constr. Build. Mater.* **47**, 1201-1209 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107>
4. G. Fang, W.K. Ho, W. Tu, M. Zhang, Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Constr. Build. Mater.* **172**, 476-487 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008>
5. J.A. Fernandez, A. Palomo, H. Lopez, Engineering properties of alkali activated fly ash concrete. *ACI Mater. J.* **103**(2), 106-112 (2006). <https://doi.org/10.14359/15261>
6. S.A. Bernal, R.M. de Gutiérrez, A.L. Pedraza, J.L. Provis, E.D. Rodriguez, S. Delvasto, Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. *Cem. Concr. Res.* **41**(1), 1-8 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.017>
7. K. Neupane, Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of Portland cement in concrete industry. *Mech. Mater.* **103**, 110-122 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.09.012>
8. M. Venu, T.G. Rao, An experimental investigation of the stress-strain behaviour of geopolymer concrete. *Slovak J. Civ. Eng.* **26**(2), 30-34 (2018). <https://doi.org/10.2478/sjce-2018-0011>
9. A. Bentur, S. Mindess, Fibre reinforced cementitious composites. CRC Press, 2006.
10. F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R.N. Swamy, Stress-strain behavior of steel fibre reinforced concrete in compression. *J. Mater. Civil Eng.* **20**(3), 255-263 (2008). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:3\(255\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:3(255))
11. ACI Committee 544, State of the art report of fibre reinforced concrete. *Concr. Int. Des. Constr.* **4**(5), 9-30 (1982).
12. A.E. Naaman, Fibre reinforcement for concrete. *Concr. Int.: Des. Constr.* **7**(3), 21-25 (1985).
13. ACI Committee 544 State-Of-The-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 1996.
14. E.G. Nawy, Concrete construction engineering handbook. CRC Press, 2008.
15. T. Lin, D. Jia, P. He, M. Wang, In situ crack growth observation and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites. *Mater. Sci. Eng. A*, **527**(9), 2404-2407 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.12.004>
16. F.F. Wafa, S.A. Ashour, Mechanical properties of high-strength fibre reinforced concrete. *ACI Mater. J.*, **89**(5), 449-455 (1992). <https://doi.org/10.14359/2390>
17. L. Sun, Q. Hao, J. Zhao, D. Wu, F. Yan, Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression. *Constr. Build. Mater.* **188**, 349-360 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.128>
18. S. Wang, V.C. Li, Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. In Proc., Int'l Workshop on HPFRCC Structural Applications, Hawaii, 2005. <https://doi.org/10.1617/2912143942.008>
19. V.C. Li, S. Wang, C. Wu, Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC). *Mater. J.* **98**(6), 483-492 (2001). <https://doi.org/10.14359/10851>
20. B.Y. Lee, C.G. Cho, H.J. Lim, J.K. Song, K.H. Yang, V.C. Li, Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar—a feasibility study. *Constr. Build. Mater.* **37**, 15-20 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.007>
21. M. Ohno, V.C. Li, A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.* **57**, 163-168 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005>
22. F.U.H. Shaikh, Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites. *Mater. Des.* **50**, 674-682 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.063>
23. Z. Yunsheng, S. Wei, L. Zongjin, Z. Xiangming, C. Chungkong, Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Constr. Build. Mater.* **22**(3), 370-383 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.006>
24. G. Masi, W.D. Rickard, M.C. Bignozzi, A. Van Riessen, The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. *Comp. B* **76**, 218-228 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.023>
25. H. Tanyildizi, Y. Yonar, Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.* **126**, 381-387 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.001>
26. M.M. Al-Mashhadani, O. Canpolat, Y. Aygörmez, M. Uysal, S. Erdem, Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.* **167**, 505-513 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.061>
27. P. Zhang, K. Wang, J. Wang, J. Guo, S. Hu, Y. Ling, Y. Mechanical properties and prediction of fracture parameters of geopolymer/alkali-activated mortar modified with PVA fiber and nano-SiO₂. *Cer. Int.* **46**(12), 20027-20037 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.074>
28. IS: 12089-1987, Specification for Granulated Slag for The Manufacture of Portland Slag Cement.
29. IS 3812 (Part 1) :2003, Indian Standard Pulverized Fuel Ash Specification Part 1 for use as Pozzolana in Cement, Cement Mortar and Concrete.
30. IS 383, "Indian Standard Coarse and Fine Aggregate for Concrete," Bureau of Indian Standards, (2016).
31. IS 9103: 1999, Indian Standard Concrete Admixtures – Specification.
32. BS 5075-1: Concrete Admixtures Part 1: Specification for Accelerating and Retarding Water-Reducing Admixtures.

33. C.S. Thunuguntla, T.D. Gunneswara Rao, Appraisal on strength characteristics of alkali-activated GGBFS with low concentrations of sodium hydroxide. *Iranian J. Sci. Techn.* **42**, 231-243 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0113-4>
34. C.S. Thunuguntla, T.D. Gunneswara Rao, Mix design procedure for alkali-activated slag concrete using particle packing theory. *J. Mater. Civ. Eng.* **30**(6), 04018113 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002296)
35. G. Mallikarjuna Rao, T. D. Gunneswara Rao, Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arab. J. Sci. Eng.* **40**(11), 3067-3074 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1757-z>
36. G. Fang, W.K. Ho, W. Tu, M. Zhang, Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature. *Constr. Build. Mater.* **172**, 476-487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008>
37. P. Nath, P.K. Sarker, Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Constr. Build. Mater.* **66**, 163-171 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
38. IS: 516 – 1959, Indian Standard methods of tests for strength of concrete.
39. IS 5816, "Indian Standard Splitting Tensile Strength of Concrete Method of Test," Bureau of Indian Standards, (1999).
40. ASTM C-293-02, "Standard Test Method for Flexural Strength of concrete (using Simple Beam with Center-Point Loading)," International Standard Organization, (2002).
41. Y. Ling, P. Zhang, J. Wang, Y. Chen, Effect of PVA fiber on mechanical properties of cementitious composite with and without nano-SiO₂. *Constr. Build. Mater.* **229**, 117068 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117068>
42. M.K. Yew, H. Bin Mahmud, B.C. Ang, M.C. Yew, Effects of low volume fraction of polyvinyl alcohol fibers on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2015**, 425236 (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/425236>
43. A. Noushini, K. Vessalas, G. Arabian, B. Samali, Drying shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete incorporating polyvinyl alcohol fibres and fly ash. *Adv. Civ. Eng.* **2014**, 836173 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/836173>
44. A. Noushini, B. Samali, K. Vessalas, Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **49**, 374-383 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035>
45. V.C. Li, A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. *Cem. Concr. Comp.* **14**(2), 131-141 (1992). [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(92\)90006-H](https://doi.org/10.1016/0958-9465(92)90006-H)
46. N.H. Atahan, B.Y. Pekmezci, E.Y. Tuncel, Behavior of PVA fiber-reinforced cementitious composites under static and impact flexural effects. *J. Mater. Civ. Eng.*, **25**(10), 1438-1445 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000691](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000691)
47. D.V. Soulioti, N.M. Barkoula, A. Paipetis, & T.E. Matikas, (2011). Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Strain*, **47**, e535-e541. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>
48. M. A. O. Mydin, S. Soleimanzadeh, Effect of polypropylene fiber content on flexural strength of lightweight foamed concrete at ambient and elevated temperatures. *Adv. Appl. Sci. Res.*, **3**(5), 2837-2846 (2012).
49. ACI Committee. (2005). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute.
50. P. Code, Eurocode 2: design of concrete structures-part 1–1: general rules and rules for buildings. British Standard Institution, London, 2005.
51. Standards Australia 2001. Concrete Structures, AS3600-2001.
52. M. Sofi, J.S.J. Van Deventer, P.A. Mendis, G.C. Lukey, Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cem. Concr. Res.* **37**(2), 251-257 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008>
53. E.I. Diaz-Loya, E.N. Allouche, S. Vaidya, Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete. *ACI Mater. J.* **108**(3), 300 (2011). <https://doi.org/10.14359/51682495>
54. P. Nath, P.K. Sarker, Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **130**, 22-31 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>
55. Y. Choi, R.L. Yuan, Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC. *Cem. Concr. Res.* **35**(8), 1587-1591 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.010>
56. B.W. Xu, H.S. Shi, Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **23**(12), 3468-3474 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.017>
57. J. Xie, J. Wang, R. Rao, C. Wang, C. Fang, Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Comp. B* **164**, 179-190 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067>
58. R.J. Thomas, S. Peethamparan, Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behaviour. *Constr. Build. Mater.* **93**, 49-56 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.039>
59. J.S. Lawler, T. Wilhelm, D. Zampini, S.P. Shah, Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar. *Mater. Struct.* **36**, 197-208 (2003). <https://doi.org/10.1007/BF02479558>
60. S.G. Gök, I. Kilic, Ö. Sengül, Properties of alkali-activated roller compacted concretes produced from waste aggregates. *Cem. Wapno Beton* **26**(4) 352-363 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.7>