

Badanie właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych wzmocnionych włóknami PVA

A study on the mechanical performance of PVA fiber reinforced engineered geopolymer composites

Swamy Yadav Golla¹, Rathish Kumar Pancharathi^{1,*}, P Swamy Naga Ratna Giri²

¹ National Institute of Technology Warangal, Telangana, 506004, India

² SR University, Warangal, Telanagana, 506371, India

*Corresponding author: R.K. Pancharathi, e-mail: rateeshp@nitw.ac.in

Streszczenie

Ze względu na to, że wykorzystanie betonu w budownictwie gwałtownie wzrosło, znaczący wpływ przemysłu cementowego na emisję CO₂ i zmiany klimatyczne skłonił do poszukiwania alternatywnych materiałów. Beton geopolimerowy stał się obiecującym substytutem betonu z cementu portlandzkiego w budownictwie w kontekście zrównoważonego rozwoju. W niniejszym badaniu analizowano zalety dodawania włókien PVA do kompozytów geopolimerowych w optymalnych proporcjach w celu poprawy właściwości mechanicznych, co skutkuje uzyskaniem betonu o zwiększonej wytrzymałości na zginanie przy rozłupywaniu. Poprzez systematyczną zmianę udziału włókien PVA od 0% do 1,5% w odstępach co 0,5%, wraz z różnymi roztworami o zmiennym stężeniu molowym w zakresie od 8 do 12, w dwóch mieszankach 1:1 i 1:3, oceniono kilka kluczowych właściwości, w tym wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na zginanie oraz krzywą obciążenia i ugięcia. Wyniki eksperymentów wykazały, że dodanie włókien miało znikomy wpływ na wytrzymałość na ściskanie. Zanotowano jednak znaczną poprawę wytrzymałości na zginanie, absorpcji energii i ciągliwości. Następnie opracowano model projektu mieszanki dla kompozytów geopolimerowych, uwzględniając wpływ udziału włókien PVA i molarności roztworu. Model został zweryfikowany przy użyciu techniki statystycznej zwanej metodologią powierzchni odpowiedzi [RSM], zapewniając jego dokładność i wiarygodność. Badanie dostarcza cennych informacji na temat optymalizacji udziału włókien PVA w kompozytach geopolimerowych, umożliwiając produkcję zrównoważonego i wzmocnionego włóknami betonu.

Słowa kluczowe: kompozyty geopolimerowe, włókno PVA, stężenie molowe, ciągliwość, metodologia powierzchni odpowiedzi, RSM

Summary

The utilization of concrete in construction has seen a rapid increase due to its widespread use. However, the cement industry's significant contribution to CO₂ emissions and climate change has prompted the exploration of alternative materials. Geopolymer concrete has emerged as a promising substitute to Portland cement in the construction industry in the wake of sustainability. In this study, the advantage of incorporating PVA fibers in geopolymer composites in optimum proportions to improve the overall mechanical properties resulting in ductile concrete is being investigated. By systematically varying the PVA fiber dosage from 0 % to 1.5 % in increments of 0.5 %, along with different molarities ranging from 8 to 12 in two Mixes 1:1 and 1:3, several key properties, including compressive strength, tensile strength, flexural strength, and load-deflection curve were evaluated. The experimental results indicated that the addition of fibers had a negligible impact on compressive strength. However, a significant improvement was observed in flexural strength, energy absorption and ductility factor. Subsequently, a mix design model for geopolymer composites was developed, considering the influence of PVA fiber dosage and molarities. The model was validated using a statistical technique called Response Surface Methodology [RSM], ensuring its accuracy and reliability. Overall, the study provides valuable insights into optimizing the dosage of PVA fibers in geopolymer composites, enabling production of sustainable and reinforced bendable concrete.

Keywords: geopolymer composites, PVA fiber, molarity, ductility, response surface methodology, RSM

1. Wprowadzenie

Produkcja cementu przyczynia się do emisji 8% gazów cieplarnianych, wyczerpuje zasoby odnawialne, co dodatkowo pogarsza wpływ na środowisko (1-3). W samych Indiach elektrownie ciepłe wytwarzają około 200 milionów ton popiołu lotnego rocznie, a huty stali produkują 20 milionów ton żużla (4, 5). Niestety, składowanie przemysłowych produktów ubocznych na składowiskach powoduje zanieczyszczenie atmosfery. Aby złagodzić te zagrożenia dla środowiska, rośnie zainteresowanie wykorzystaniem tych odpadów, takich jak popiół lotny, GGBS [mielony granulowany żużel wielkopiecowy] i popiół z łusek ryżowych, jako pełnowartościowych substytutów cementu portlandzkiego [OPC] w celu stworzenia zrównoważonych spoiw (6). Jednak dzięki wykorzystaniu właściwości produktów ubocznych przemysłowych i przekształceniu ich w spoiwa geopolimerowe można znacznie zmniejszyć wpływ produkcji betonu na środowisko (7-9). Betony geopolimerowe znalazły wiele zastosowań, jednak nadal wykazują pewne podstawowe wady, w szczególności kruchość i podatność na pękanie pod obciążeniem rozciągającym (10).

Inżynierskie kompozyty cementowe [z ang. *Engineered cementitious composites* ECCs] to materiały cementowe zbrojone włóknami, znane ze swojej wyjątkowej wytrzymałości na rozciąganie, plastyczności i zdolności do kontroli pękania. Kompozyty te są szeroko stosowane w celu zwiększenia nośności i trwałości konstrukcji (11). Jednak typowa receptura mieszanki ECCs wymaga od dwóch do trzech razy większej zawartości cementu niż tradycyjny beton. Duża zawartość cementu w ECC ma niepożądane konsekwencje, w tym zwiększoną emisję CO₂, która przyczynia się do globalnego ocieplenia. Dlatego też realnym i przyjaznym dla środowiska podejściem do tworzenia ekologicznych ECCs jest zastąpienie spoiwa cementowego alternatywnym spoiwem bezcementowym, takim jak geopolimer (12). Geopolimer stanowi bardzo obiecujący i zrównoważony substytut cementu portlandzkiego. Dzięki zastosowaniu różnych dodatków, takich jak włókna [np. włókna PVA], mikrowypełniacze i domieszki, można znacznie poprawić wytrzymałość na rozciąganie i plastyczność kompozytów geopolimerowych (13). Te specjalnie opracowane kompozyty cementowe stanowią rozwiązanie problemów związanych z kruchością betonu geopolimerowego, dzięki czemu nadają się do szerszego zakresu zastosowań w budownictwie. Dzięki poprawie właściwości rozciągania i plastyczności materiały te oferują zwiększoną trwałość i odporność, przyczyniając się tym samym do zrównoważonych praktyk budowlanych (14).

Kompozyty geopolimerowe [*Engineered geopolymer composite* EGCs] stanowią zrównoważoną alternatywę dla kompozytów o dużej zawartości cementu ze względu na mniejszą emisję CO₂, mniejsze zapotrzebowanie na energię i wykorzystanie właściwości twardnienia przy odkształcaniu. Surowce do produkcji spoiw geopolimerowych mogą pochodzić ze źródeł naturalnych lub odpadów, dzięki czemu te ostatnie są przyjazne dla środowiska (15). EGCs, aktywowane aktywatorami - związkami sodu lub potasu i zawierające popiół lotny, wykazują zwiększoną rozciągliwość

1. Introduction

Production of cement contributes to 8 % of greenhouse gases, depletes renewable resources, further exacerbating the environmental impact (1-3). In India alone, thermal power plants generate around 200 million tons of fly ash annually, while steel plants produce 20 million tons of slag (4, 5). Unfortunately, the deposition of these industrial by-products on land contaminates the atmosphere. To mitigate these environmental hazards, there is a growing interest in utilizing these waste materials, such as fly ash, GGBS [Ground Granulated Blast Furnace Slag], and rice husk ash, as complete substitutes for Ordinary Portland Cement [OPC] in order to create sustainable binders (6). However, by harnessing the properties of industrial by-products and transforming them into geopolymer binders, one can significantly reduce the environmental impact associated with concrete production (7-9). Geopolymer concretes have found numerous applications; however, they still exhibit certain fundamental drawbacks, notably brittleness and susceptibility to rapid fracture under tensile loads (10).

Engineered Cementitious Composites [ECCs] are cement-based materials known for their exceptional tensile strength, ductility, and crack control capabilities. These composites have been widely employed to enhance the loading capacity and durability of structures (11). However, a typical ECC mix design requires two to three times more cement content than traditional concrete. The high cement content in ECCs has undesirable consequences, including increased CO₂ emissions, which contribute to global warming. Therefore, a viable and environmentally friendly approach to creating eco-friendly ECCs is to replace the cement binder with an alternative cement-less binder such as geopolymer (12). Geopolymer represents a highly promising and sustainable substitute for conventional OPC binders. Through the incorporation of various additives, such as fibers [e.g., PVA fibers], micro-reinforcements, and mineral admixtures, the tensile strength and ductility of geopolymer composites can be significantly improved (13). These engineered cementitious composites provide a solution to the brittleness issues associated with geopolymer concrete, making them suitable for a wider range of applications in the construction industry. By enhancing the tensile properties and ductility, these materials offer improved durability and resilience, thereby contributing to sustainable construction practices (14).

Engineered Geopolymer Composites [EGCs], serve as a sustainable alternative to high-cement-content composites due to their lower CO₂ emissions, reduced energy requirements, and their primary reliance on strain hardening properties. Geopolymer binders can be derived from natural sources or waste materials, making them environmentally friendly (15). EGCs, activated with sodium-based or potassium-based activators and incorporating fly ash, exhibit enhanced ductility and superior tensile strain capacity. Moreover, they demonstrate lower CO₂ emissions and energy requirements. Engineered geopolymer composites exhibit ultra-high ductility and displays a tensile strain-hardening behavior characterized by the presence of multiple cracks before failure occurs (16, 17). EGCs

i doskonałą odporność na rozciąganie. Ponadto są mniej emisyjne i mają mniejsze zapotrzebowanie na energię. Inżynierskie kompozyty geopolimerowe wykazują bardzo dużą ciągliwość i zdolność utwardzania przy rozciąganiu, mając zdolność do wytworzenia wielu pęknięć przed wystąpieniem finalnego zniszczenia (16, 17). EGC są zgodne z zasadami mechaniki włókien i matrycy oraz mechaniki pęknięcia, dzięki czemu kompozyty te wykazują pozorne wzmocnienie przy odkształceniu [PSH] (18-22). Aby uzyskać pozorne wzmocnienie przy odkształceniu, muszą być spełnione dwa kryteria: kryterium energetyczne i kryterium wytrzymałościowe. Podczas gdy większość badaczy skupiała się głównie na badaniu właściwości mechanicznych EGC z popiołem lotnym i żużlem GGBS, niniejsza praca dotyczy opracowania kompozytów geopolimerowych z wykorzystaniem popiołu lotnego, GGBS, pyłu krzemionkowego i metakaolinu jako prekursorów. Projekt mieszanki obejmuje różne molarności roztworów aktywatorów i procentowe zawartości spoiwa, przy czym jako aktywatory służą wodorotlenek sodu i krzemian sodu.

2. Znaczenie badań

Niniejsze badania koncentrują się na opracowaniu inżynierskich kompozytów geopolimerowych [EGCs] z wykorzystaniem zrównoważonych prekursorów, takich jak popiół lotny, żużel wielkopieczowy [GGBS], pył krzemionkowy oraz metakaolin, przy jednoczesnej optymalizacji poprzez modyfikację stężeń aktywatorów i udziału spoiwa. Analiza obejmuje również ocenę właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych w odniesieniu do ich konkretnych zastosowań. Wyniki badań są znaczące dla branży budowlanej w kontekście praktyk przyjaznych środowisku oraz tworzenia nowych, zrównoważonych materiałów budowlanych o zwiększonej ciągliwości i odporności.

adhere to the principles of fiber-to-matrix micromechanics and fracture mechanics, enabling these composites to exhibit resilient pseudo strain-hardening [PSH] characteristics (18-22). To achieve pseudo-hardening behavior, two criteria must be satisfied: energy criteria and strength criteria. While most researchers have primarily focused on investigating the mechanical properties of EGCs with fly ash and GGBS, the present work involves developing Engineered Geopolymer Composites using fly ash, GGBS, silica fume, and metakaolin as precursors. The mix design involves varying molarities and percentages of binder contents, with sodium hydroxide and sodium silicate serving as activators.

2. Research significance

The present investigation focuses on the development of Engineered Geopolymer Composites [EGCs] from sustainable precursors such as fly ash, GGBS, silica fume, and metakaolin, aiming at optimizing through modifying the molarities and binder concentrations. The study also looks at the mechanical properties of geopolymer composites to specific application needs. This study's findings have ramifications for the construction industry in terms of environmentally friendly practices and creation of new and sustainable building material with enhanced ductility and resilience.

2.1. Comparative analysis on various fibers in terms of economic and environmental impacts:

Table 1 presents a comparative assessment of the economic and environmental impacts of various fibers used in concrete production. The cost of fibers is influenced by factors such as production scale, regional availability, and market demand. Production process and energy consumption are critical parameters, as fibers requiring higher energy inputs are generally associated

Tablica 1/ Table 1
EKONOMICZNE I ŚRODOWISKOWE ODDZIAŁYWANIE RÓŻNYCH WŁÓKIEN.
ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF VARIOUS FIBRES.

Typ włókna Fiber Type	Koszt za kg Cost per kg	Biodegradowalność Biodegradability	Wpływ na środowisko Environmental impact	Źródło Reference
Włókno PVA PVA fiber	\$3–\$7	Biodegradowalne w określonych warunkach Biodegradable under certain conditions	Mniejszy wpływ na środowisko niż wiele włókien syntetycznych / Lower environmental impact than many synthetic fibers	(25)
Włókno węglowe Carbon fiber	\$20–\$50	Niebiodegradowalne Non-biodegradable	Duży ślad węglowy, ale trwałe / High carbon footprint, but durable	(26)
Włókno polipropylenowe Polypropylene fiber	\$1.50–\$3	Niebiodegradowalne Non-biodegradable	Średni wpływ na środowisko, oparte na paliwach kopalnych / Medium environmental impact, fossil-fuel based	(27)
Włókno bazaltowe Basalt fiber	\$5–\$10	Niebiodegradowalne Non-toxic, natural	Mniejsze zużycie energii i minimalny wpływ na środowisko Lower energy demand and minimal environmental impact	(28)
Włókno szklane Glass fiber	\$2–\$5	Niebiodegradowalne Non-biodegradable	Średni wpływ na środowisko, pozyskiwane z zasobów naturalnych / Medium environmental impact, derived from natural resources	(29)

2.1. Analiza porównawcza różnych włókien pod względem wpływu ekonomicznego i środowiskowego

Tablica 1 przedstawia porównawczą ocenę ekonomicznych i środowiskowych aspektów różnych włókien stosowanych w produkcji betonu. Koszt włókien zależy od takich czynników, jak skala produkcji, dostępność regionalna oraz popyt rynkowy. Proces produkcji i zużycie energii stanowią kluczowe kwestie, ponieważ włókna wymagające większych nakładów energetycznych zazwyczaj wiążą się z większym śladem węglowym. Biodegradowalność określa zdolność włókna do naturalnego rozkładu w środowisku. Polialkohol winylowy [PVA] wykazuje pod tym względem przewagę, podczas gdy włókna syntetyczne, takie jak węglowe czy polipro-

with larger carbon footprints. Biodegradability indicates the ability of the fiber to naturally decompose in the environment; polyvinyl alcohol [PVA] demonstrates an advantage in this aspect, while synthetic fibers such as carbon and polypropylene are predominantly non-biodegradable. Recyclability evaluates the feasibility of reusing or processing fibers at the end of their service life; carbon and glass fibers pose significant challenges in recycling compared to relatively easier options like PVA or polypropylene. Finally, the overall environmental impact considers energy intensity, carbon emissions, and sustainability performance. Among the fibers examined, carbon fiber and polypropylene show higher environmental burdens, whereas basalt fiber is identified as one of the more sustainable and eco-friendly alternatives.

Tablica 2 / Table 2

ASPEKTY TRWAŁOŚCI I ICH WPŁYW DLA RÓŻNYCH WŁÓKIEN.

DURABILITY ASPECTS AND THEIR IMPACTS OF VARIOUS FIBRES.

Typ włókna Fiber Type	Badany aspekt trwałości Durability aspect studied	Główne wnioski dotyczące trwałości / Main findings on durability	Źródło Reference
Włókno PVA PVA fiber	Chlorki, siarczany, cykle zamrażania-rozmrażania, przenikanie wody Chloride, sulphate, freeze-thaw, water penetration	Poprawa trwałości i wytrzymałości mechanicznej, zwłaszcza w połączeniu z nanokrzemionką; zwiększona odporność na ataki chemiczne i cykle Improved durability and mechanical strength, especially with nano silica; enhanced resistance to chemical attacks and cycles	(30)
	Wytrzymałość mechaniczna przy wczesnym dojrzewaniu Mechanical toughness under early-age curing	Poprawa wytrzymałości na zginanie i kontrola pęknięć; krótsze włókna zapewniały lepsze właściwości przy wczesnym pękaniu / Improved flexural strength, crack control; shorter fibers gave better early-age fracture performance	(31)
	Odporność na kwasy i skurcz w mieszankach wysokowytrzymałościowych Acid resistance and shrinkage in high-strength mixes	Lepsza odporność na kwasy niż włókno stalowe; pomaga ograniczyć skurcz, zależnie od składu mieszanki / Better acid resistance than steel fiber; helps reduce shrinkage, though depends on mix composition	(32)
Włókno polipropylenowe Polypropylene Fiber	Wytrzymałość i trwałość w długim okresie w warunkach otoczenia Long-term strength and durability under ambient conditions	Przy zawartości 1,0% znacząco poprawia wytrzymałość na zginanie i odporność na degradację środowiskową; idealne do geopolimerowego betonu dojrzewającego w warunkach otoczenia At 1.0 % content, significantly improved flexural strength and resistance to environmental degradation; ideal for ambient-cured geopolymer concrete	(33)
Włókno bazaltowe Basalt Fiber	Energia pęknięcia, kontrola pęknięć, wytrzymałość na rozciąganie / Fracture energy, crack control, tensile performance	Przy 5% objętości znacząco zwiększa odporność na pękanie i pochłanianie energii; poprawia właściwości sprężyste i odporność na pękanie / At 5 % volume, significantly increased fracture toughness and energy absorption; improved elastic properties and resistance to cracking	(34)
	Wytrzymałość połączenia w podwyższonych temperaturach Bond strength at elevated temperatures	Poprawa strefy kontaktu między GFRP a matrycą geopolimerową; szkło nieco lepsze od bazaltu w utrzymaniu wytrzymałości w wysokich temperaturach / Improved bond between GFRP and geopolymer matrix; glass slightly better than basalt in strength retention at elevated temps	(35)
Włókno szklane Glass Fiber	Wytrzymałość połączenia z prętami GFRP w wysokiej temperaturze High-temperature bond performance with GFRP bars	Zwiększona wytrzymałość połączenia w wysokich temperaturach; dobra kompatybilność z matrycą geopolimerową; w niektórych testach nieco lepsze niż bazalt / Increased bond strength at high temperatures; good compatibility with geopolymer matrix. Slightly outperformed basalt in some tests	(35)
Włókno PVA + Nano-SiO ₂ PVA + Nano-SiO ₂	Przenikanie chlorków, erozja siarczanowa, odporność na cykle zamrażania-rozmrażania Chloride ingress, sulphate erosion, freeze-thaw resistance	Efekt synergiczny znacząco poprawił wszystkie parametry trwałości; ulepszona mikrostruktura i odporność na przenikanie jonów oraz erozję Synergistic effect improved all durability parameters significantly; enhanced microstructure and resistance to ion ingress and erosion	(30)

pylenowe, są w większości niebiodegradowalne. Potencjał do recyklingu ocenia możliwość ponownego użycia lub przetwarzania włókien po zakończeniu ich okresu eksploatacji; włókna węglowe i szklane stwarzają znaczne trudności w recyklingu w porównaniu z relatywnie łatwiejszymi pod tym względem włóknami PVA czy polipropylenowymi. Ostatecznie, ogólny wpływ na środowisko uwzględnia energochłonność, emisję dwutlenku węgla oraz ogólną efektywność zrównoważonego rozwoju. Spośród analizowanych włókien włókna węglowe i polipropylenowe cechują się większym obciążeniem środowiskowym, natomiast włókno bazaltowe jest identyfikowane jako jedno z bardziej zrównoważonych i przyjaznych dla środowiska rozwiązań.

Porównawcze badania różnych włókien w kompozytach geopolimerowych wykazują, że wzmocnienie zapewniane przez włókna znacząco zwiększa trwałość wobec różnych czynników środowiskowych i mechanicznych, co przedstawiono w tablicy 2. Włókna PVA, szczególnie w połączeniu z nano-SiO₂, wykazują wyjątkową odporność zarówno na degradację chemiczną, jak i na cykle zamrażania i rozmrażania. Włókna polipropylenowe są skuteczne w zwiększaniu długoterminowej trwałości i właściwości mechanicznych w warunkach dojrzewania w temperaturze otoczenia. Włókna bazaltowe charakteryzują się zwiększoną odpornością na zginanie i stabilnością termiczną, natomiast włókna szklane poprawiają wytrzymałość strefy kontaktowej i zachowanie w podwyższonych temperaturach. Podsumowując, wybór włókna powinien być dostosowany do konkretnych wymagań, przy czym hybrydowe lub synergiczne kombinacje, takie jak PVA w połączeniu z nano-SiO₂, oferują znaczące korzyści.

3. Część doświadczalna

Do zaprojektowania składu kompozytów wykorzystano materiały zrównoważone, takie jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy [GGBS], metakaolin oraz pył krzemionkowy. Opracowano dwa różne składy, przedstawione w tablicy 3. Mieszanka A w stosunku [spoiwo:piasek] 1:1 oraz mieszanka B w stosunku 1:3. W obu przypadkach, przy stałej całkowitej zawartości spoiwa, procentowy udział popiołu lotnego, GGBS, metakaolinu i pyłu krzemionkowego ustalono na poziomie odpowiednio 40%, 30%, 20% i 10%. Jako drobne kruszywo zastosowano piasek zgodny ze strefą II według normy IS 383 (23), o gęstości względnej 2,62 i gęstości nasypowej 1645 kg/m³. Stężenie molowe roztworu alkalicznego wynosiło odpowiednio 8, 10 i 12, przy stałym stosunku [NaOH i Na₂SiO₄] wynoszącym 2,5. Aby zbadać wpływ włókien polialkoholu winylowego [PVA],

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK KOMPOZYTÓW GEOPOLIMEROWYCH.
MIX PROPORTIONS FOR GEOPOLYMER COMPOSITES.

Składnik / Compound	MIX A	MIX B
	kg/m ³	
Spoivo / Binder	638.4	478.8
Kruszywo drobne / Fine Aggregate	638.4	1436.4
Roztwór alkaliczny / Alkaline solution	287.28	275.31

The comparative examination of various fibers in geopolymer composites elucidates that the reinforcement provided by fibers considerably augments durability in the face of varying environmental and mechanical stressors are shown in Table 2. PVA fibers, especially when amalgamated with nano-SiO₂, demonstrate exceptional resistance to both chemical degradation and freeze-thaw cycles. Polypropylene fibers exhibit effectiveness in augmenting long-term durability and mechanical performance in conditions characterized by ambient curing. Basalt fibers are characterized by their enhanced fracture resistance and thermal stability, while glass fibers facilitate improved bond strength and performance at elevated thermal conditions. In conclusion, the choice of fiber must be tailored to the specific durability demands of the application, with hybrid or synergistic combinations [such as PVA integrated with nano-SiO₂] offering considerable advantages.

3. Experimental

Sustainable materials such as fly ash, GGBS, metakaolin, and silica fume were utilized in the mix proportions. Two different mixes were developed as shown in Table 3. Mix A with a ratio of 1:1 [Binder: Sand] and Mix B with a ratio of 1:3 [Binder: Sand]. In both cases, with a total binder content was kept constant for a certain proportion, the percentages of fly ash, GGBS, metakaolin, and silica fume were set at 40 %, 30 %, 20 %, and 10 %, respectively. Fine aggregate conforming to zone-II as per IS 383 (23), codal provisions with specific gravity 2.62 and bulk density 1645 kg/m³ is used for investigation. The molarity of the alkaline solution [NaOH and Na₂SiO₃] was varied as 8, 10, and 12, while keeping the ratio constant at 2.5. To investigate the influence of Poly Vinyl Alcohol [PVA] fiber, the percentages of PVA fiber was varied from 0 % to 1.5 % in increments of 0.5 % for each mix. The results of a total of 36 different mixes are examined. Specimens including mortar cubes with dimensions of 70.7 mm × 70.7 mm, cylinders with a diameter of 100 mm and height of 200 mm, and prisms measuring 100 mm x 4.5 mm x 500 mm were adopted. The specimens were tested for compressive strength, split tensile strength and flexural strength after 28 days of curing according to IS 516 [Part-1 Sec-I] (24).

4. Results and discussion

4.1 Compressive strength results

Figures 1 and 2 illustrate a comparison of compressive strength among different concentrations of activator and PVA fiber dosages for Mixes A and B. The plot provides a visual representation of the relationship between these variables and the resulting compressive strength of the engineered geopolymer composites. With increase in the molarity of mix and PVA fiber content, the compressive strength increases. From Table 4, It is also evident that up to a PVA fiber content of 1 %, the dispersion of fibers in the mix is uniform, resulting in the maximum compressive strength across all the mixes.

Tablica 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK I WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BADANYCH KOMPOZYTÓW.

VARIOUS QUANTITIES OF BINDERS AND COMPRESSIVE STRENGTH OF GIVEN MIXES.

Mix	Spoiwo / Binder				Stężenie molowe Molarity, mol/dm³	Na ₂ SiO ₃ /NaOH, -	Roztwór alkaliczny Alkaline solution, kg/m³	% PVA	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa
	Popiół lotny Fly ash, kg/m³	GGBS, kg/m³	Metakaolin, kg/m³	Pył krzemionkowy Silica fume, kg/m³					
A0	255.36	191.52	127.68	63.84	8	2.5	287.28	0	23.43
A1								0.5	24.54
A2								1.0	25.64
A3								1.5	23.45
A6					10			0	33.64
A7								0.5	34.32
A8								1.0	35.56
A9								1.5	34.58
A12					12			0	38.81
A13								0.5	39.83
A14								1.0	40.56
A15								1.5	38.87
B0	191.52	143.64	95.76	47.88	8	2.5	275.31	0	20.42
B1								0.5	21.65
B2								1.0	22.56
B3								1.5	21.34
B6					10			0	28.11
B7								0.5	30.32
B8								1.0	32.51
B9								1.5	31.64
B12					12			0	33.43
B13								0.5	34.56
B14								1.0	35.65
B15								1.5	35.28

procentowy udział w każdej mieszance zmieniano od 0% do 1,5% z przyrostem 0,5%. Przeanalizowano wyniki łącznie 36 różnych mieszanek.

Do badań zastosowano próbki w postaci kostek zaprawy o wymiarach 70,7 mm × 70,7 mm, walców o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm oraz belek o wymiarach 100 mm × 45 mm × 500 mm. Próbkę poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie przy rozłupywaniu i zginanie po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą IS 516 [Część 1, Sekcja I] (24).

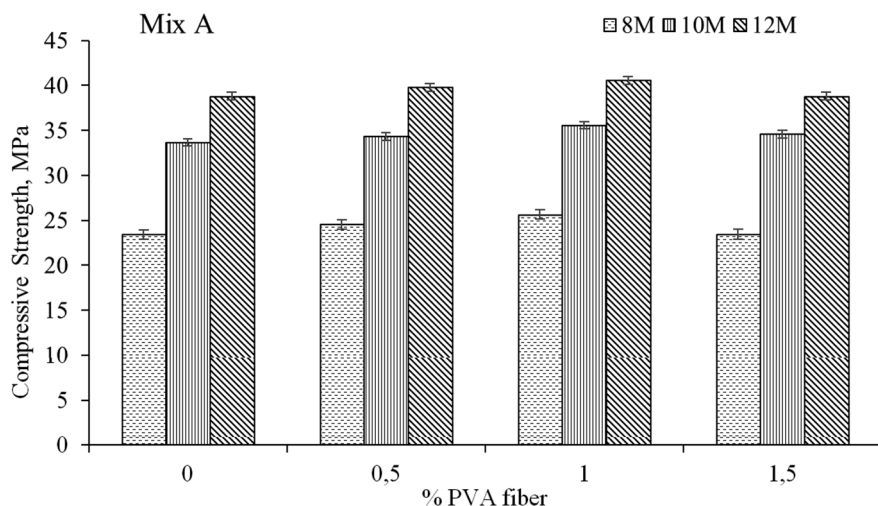
4. Wyniki i dyskusja

4.1. Wyniki wytrzymałości na ściskanie

Rysunki 1 i 2 przedstawiają porównanie wytrzymałości na ściskanie dla różnych stężeń molowych aktywatora i różnych zawartości włókien PVA w próbkach A i B. Wykres ilustruje zależność między tymi zmiennymi a uzyskaną wytrzymałością na ściskanie kompozytów geopolimerowych. Wraz ze wzrostem stężenia molowego aktywatora i zawartości włókien PVA, wytrzymałość na ściskanie

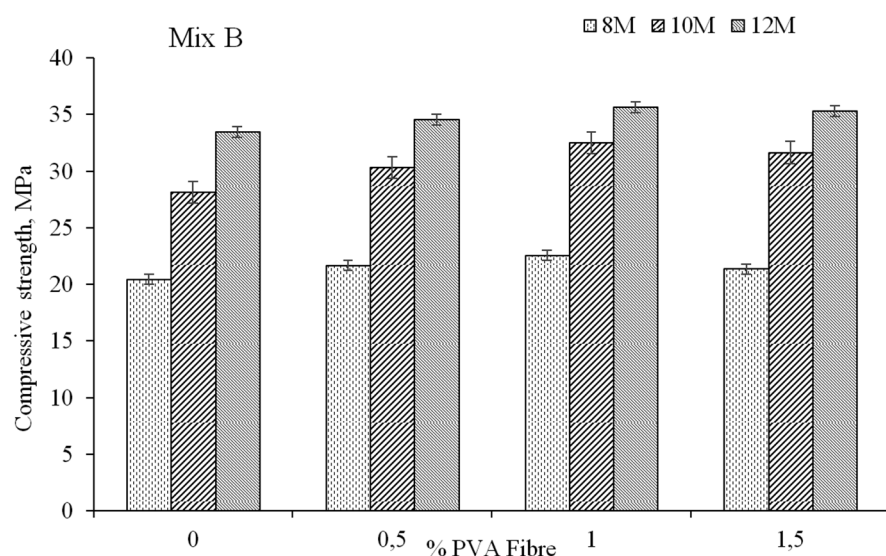
However, beyond this fiber content, the compressive strength decreased. This reduction can be attributed to the improper bond between the fiber and geopolymer matrix due to non-uniform dispersion. In Mix A, with 1 % PVA fiber content, there was an enhancement of 9.4 % in compressive strength at 8 molarity, 5.7 % increase at 10 molarity, and a 4.5 % at 12 molarity. Comparing with a plain mix with 8 molarity [no fiber] to a mix with 12 molarity and 1 % PVA fiber, there is a remarkable enhancement of 73.1 % in compressive strength.

In Mix B, the addition of 1 % PVA fiber alone resulted in an enhancement of 10.5 % in compressive strength at 8 molarity, 15.7 % increase at 10 molarity, and a 6.6 % increase at 12 molarity. Furthermore, when compared with plain mix with 8 molarity and no fiber to a mix with 12 molarity and 1 % PVA fiber, there is a substantial enhancement of 74.6 % in compressive strength. These results emphasize the positive impact of incorporating PVA fiber in geopolymer composites. The presence of PVA fiber contributed to the improved compressive strength, particularly at higher molarities. Comparing the plain mix with no fiber with a mix including PVA fiber at a higher molarity, there is a significant increase in mecha-



Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie w zależności od stężenia molowego aktywatora i zawartości włókien PVA dla serii A.

Fig. 1. Variation of compressive strength with molarity and % PVA fiber for Mix A.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości na ściskanie w zależności od stężenia molowego aktywatora i zawartości włókien PVA dla serii B.

Fig. 2. Variation of compressive strength with molarity and % PVA fiber for Mix B.

rośnie. Z tablicy 4 wynika również, że przy zawartości włókien PVA do 1% ich dyspersja w mieszanke jest najbardziej homogeniczna, co skutkuje maksymalną wytrzymałością na ściskanie we wszystkich mieszankach. Jednak powyżej tej zawartości włókien wytrzymałość na ściskanie spada. Spadek ten można przypisać niewłaściwej strefie kontaktowej między włóknem a matrycą geopolimerową, wynikającej z nierównomiernej dyspersji. W próbce A, przy zawartości włókien PVA na poziomie 1%, odnotowano wzrost wytrzymałości na ściskanie o 9,4% przy stężeniu molowym 8, o 5,7% przy 10 oraz

nical properties, highlighting the effectiveness of the combination. These findings underscore the importance of carefully selecting the molarity and PVA fiber dosage in Mix A and B to achieve optimal compressive strength in the engineered geopolymer composites.

4.2. Split tensile strength results

Figures 4 and 5 shows the results of split tensile strength for Mixes A and B, respectively, with varying dosages of PVA fiber. The test findings indicate that Mix A exhibits higher split tensile strength compared to Mix B. However, with increase in dosage of PVA fiber, there is a consistent increase in split tensile strength regardless of the binder strength. This demonstrates the positive influence of PVA fiber on enhancing the tensile performance of both Mixes. Additionally, the results are indicative of the fact that increasing the molarity of geopolymer composite mix leads to an overall increase in the strength of material. This implies that higher molarities result in improved tensile strength in both Mixes A and B. Moreover, when compared to specimens with a 1 % dosage of PVA fiber with no fiber specimens, a significant improvement of 57.5 % in split tensile strength is observed, regardless of the molarity and mix type. This demonstrates substantial enhancement in tensile strength that can be achieved by incorporating PVA fibers in the geopolymer composite mixes.

Overall, the results highlight the positive impact of PVA fibers on the split tensile strength of geopolymer composites. The increase in fiber dosage and higher molarities contribute to improved tensile strength, emphasizing the potential of PVA fibers as a reinforcing element



Rys. 3. [a–d]. Cylindry z różną zawartością włókien po zniszczeniu.

Fig. 3. [a–d]. Cylinders with various dosage of fibers after failure.

o 4,5% przy 12. Porównując próbki bez włókien o stężeniu molowym 8 z próbkami z aktywatorem o stężeniu molowym 12 i 1% włókien PVA, zauważalny jest znaczący wzrost wytrzymałości na ściskanie o 73,11%.

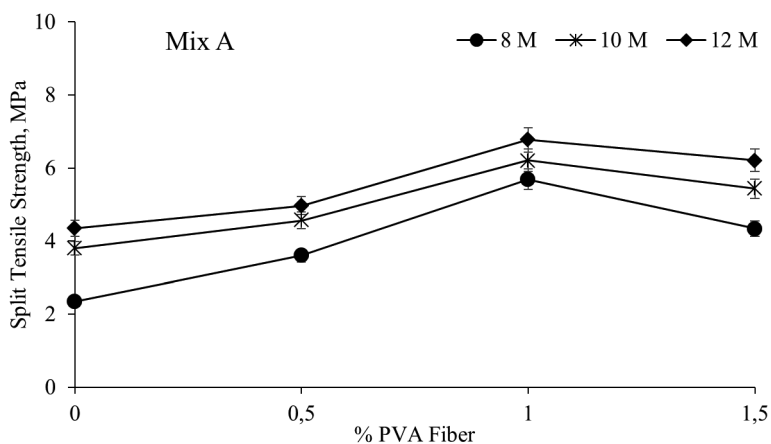
W próbce B, dodanie samego 1% włókien PVA spowodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie o 10,48% przy stężeniu molowym 8, o 15,7% przy 10 oraz o 6,6% dla 12. Ponadto, porównując próbki bez włókien z aktywatorem o stężeniu molowym 8 z próbką o stężeniu molowym 12 i 1% włókien PVA, stwierdzono znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie o 74,6%. Wyniki te podkreślają pozytywny wpływ wprowadzenia włókien PVA do kompozytów geopolimerowych. Obecność włókien PVA przyczyniła się do poprawy wytrzymałości na ściskanie, szczególnie przy wyższych stężeniach. Porównując próbki bez włókien z próbkami zawierającymi włókna PVA przy większych stężeniach molowych, stwierdzono istotny wzrost właściwości mechanicznych, co uwydatnia skuteczność tego połączenia. Wyniki te podkreślają znaczenie starannego doboru stężenia aktywatora i zawartości włókien PVA w próbkach A i B, aby osiągnąć optymalną wytrzymałość na ściskanie w kompozytach geopolimerowych.

4.2. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Rysunki 4 i 5 przedstawiają wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu dla próbek A i B o różnej zawartości włókien PVA. Wyniki badań wskazują, że próbki A mają wyższą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu do próbek B. Jednak wraz ze wzrostem zawartości włókien PVA obserwuje się stały wzrost wytrzymałości na rozciąganie, niezależnie od wytrzymałości na ściskanie. Wskazuje to na pozytywny wpływ włókien PVA na poprawę właściwości rozciągających obu serii próbek.

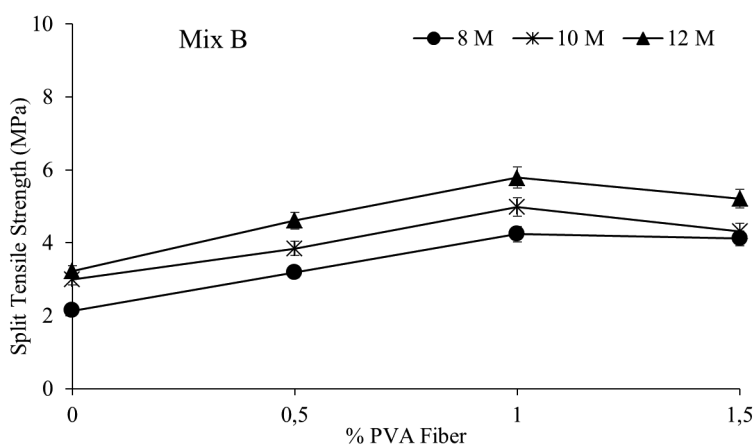
Dodatkowo wyniki sugerują, że zwiększenie stężenia aktywatora w kompozycie geopolimerowym prowadzi do ogólnego wzrostu wytrzymałości materiału. Oznacza to, że wyższe stężenia skutkują poprawą wytrzymałości na rozciąganie zarówno w serii A, jak i B. Co więcej, w porównaniu z próbkami bez włókien, próbki z zawartością 1% włókien PVA wykazują znaczną poprawę wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu o 57,5%, niezależnie od stężenia aktywatora i typu mieszanki. Wskazuje to na istotne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, jakie można osiągnąć dzięki wprowadzeniu włókien PVA do mieszanek kompozytów geopolimerowych.

Wyniki podkreślają pozytywny wpływ włókien PVA na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu kompozytów geopolimerowych. Wzrost zawartości włókien i wyższe stężenia aktywatora przyczyniają się do poprawy wytrzymałości na rozciąganie, co podkreśla potencjał włókien PVA jako elementu wzmacniającego w poprawie właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych. Wprowadzenie włókien PVA odgrywa kluczową rolę w przekształceniu



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w zależności od stężenia molowego aktywatora i zawartości włókien PVA dla serii A.

Fig. 4. Variation of split tensile strength with molarity and % PVA fiber for Mix A.



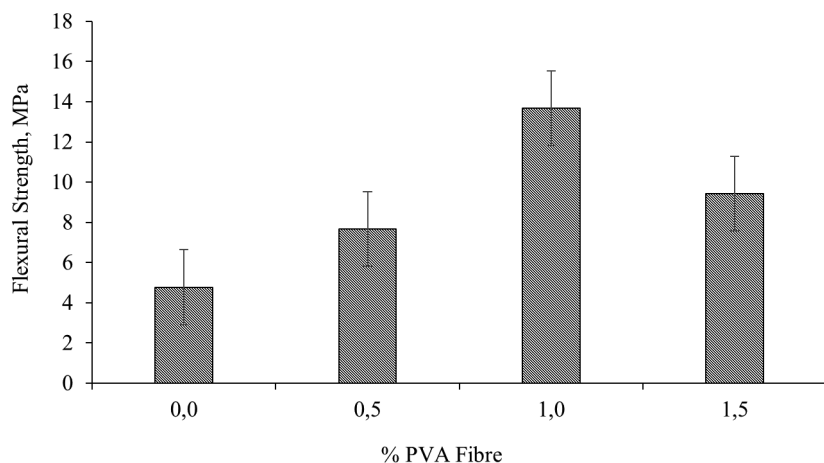
Rys. 5. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w zależności od stężenia molowego aktywatora i zawartości włókien PVA dla serii B.

Fig. 5. Variation of split tensile strength with molarity and % PVA fiber for Mix B.

in enhancing the mechanical performance of geopolymer composites. The incorporation of PVA fibers in the geopolymer composites plays a crucial role in transforming brittle failure into a ductile failure, as observed in Fig. 3[a]. Samples without PVA fibers Fig. 3[d] fail abruptly without forming visible cracks.

4.3. Flexural strength results

Fig. 6 illustrates the flexural strength results of Mix A specimens with a 12-molar solution, with varying percentages of PVA fibers. The plot clearly demonstrates that there is a continuous increase in flexural strength up to a dosage of 1 % of PVA fibers. Moreover, the behavior of the specimens with 1 % PVA fiber dosage is superior to other dosages, indicating the presence of an optimum fiber dosage for developing geopolymer composites. These results highlight that addition of 1 % PVA fibers lead to a significant improvement in behavior of the composite, with an enhancement of approximately 70 % in flexural strength. These findings emphasize the critical role



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie w zależności od zawartości włókien PVA dla serii A.

Fig. 6. Variation of flexural strength for different % of PVA fiber of Mix A.

kruche pękania w uszkodzenia ciągłe, co można zaobserwować na rys. 3[a]. Próbki bez włókien PVA [rys. 3[d]] ulegają nagłemu zniszczeniu bez powstawania widocznych pęknięć.

4.3. Wyniki wytrzymałości na zginanie

Rys. 6 przedstawia wyniki wytrzymałości na zginanie próbek A z 12-molowym, dla różnej zawartości włókien PVA. Wykres wyraźnie pokazuje, że wytrzymałość na zginanie stale rośnie aż do zawartości 1% włókien PVA. Ponadto, właściwości próbek z zawartością 1% włókien PVA są lepsze niż przy innych udziałach, co wskazuje na istnienie optymalnej ilości włókien dla projektowania kompozytów geopolimerowych.

Wyniki te podkreślają, że dodanie 1% włókien PVA prowadzi do istotnej poprawy właściwości kompozytu, z przyrostem wytrzymałości na zginanie o około 70%. Odkrycia te uwydatniają kluczową rolę włókien PVA w zwiększaniu wytrzymałości na zginanie i ogólnej wydajności kompozytu geopolimerowego. Optymalna dawka 1% włókien PVA skutkuje materiałem wysoko wzmocnionym, zdolnym do przenoszenia większych obciążeń i wykazującym lepsze zachowanie pod wpływem naprężeń zginających.

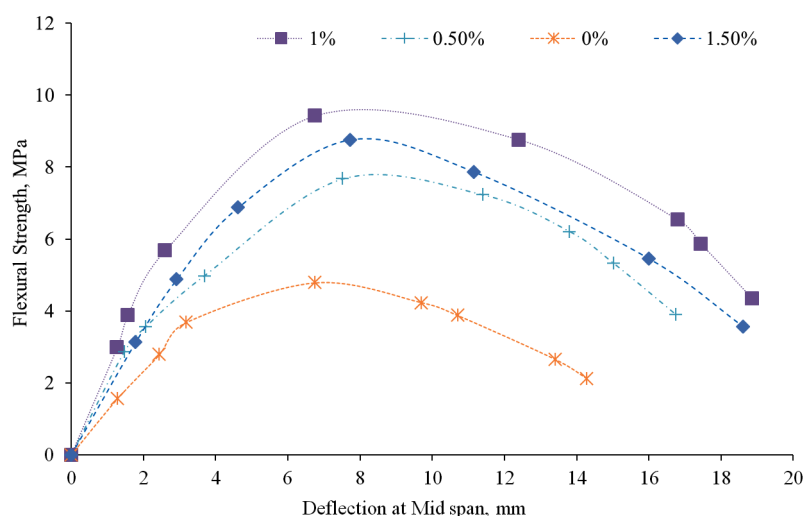
Rys. 7 przedstawia krzywe zależności obciążenia od odkształcenia dla różnych zawartości włókien PVA w próbkach serii A [1:1] z roztworem o stężeniu molowym 12. Wykresy wyraźnie pokazują, że próbki z udziałem 1% włókien PVA osiągają największą nośność w porównaniu do pozostałych udziałów. Natomiast dodanie 1,5% włókien PVA do kompozytów geopolimerowych skutkuje zmniejszeniem wytrzymałości. Porównując próbki z 1% włókien PVA z próbkami bez włókien, notuje się znaczący wzrost nośności przy punkcie granicznym o około 45%, co podkreśla korzystny wpływ włókien na kompozyty geopolimerowe. Efekt ten dodatkowo zwiększa ciągliwość materiału, umożliwiając mu przenoszenie większych obciążeń i lepsze właściwości przy odkształceniu.

of PVA fibers in enhancing the flexural strength and overall performance of the geopolymer composite. The optimum dosage of 1 % PVA fibers results in a highly reinforced material is capable of withstanding higher loads and exhibiting superior behavior under flexural stress.

Fig. 7 presents load vs. deflection curves for various dosages of PVA fibers in Mix A [1:1] with a 12-molarity solution. The plots clearly show that the 1 % PVA fiber dosage achieves the maximum load-carrying capacity compared to other dosages. Conversely, the addition of 1.5 % PVA fibers in geopolymer composites results in a decrease in load-carrying capacity. Comparing the 1 % PVA dosage with no fiber, there is a remarkable increase of approximately 45 % in the load at the ultimate point, highlighting the

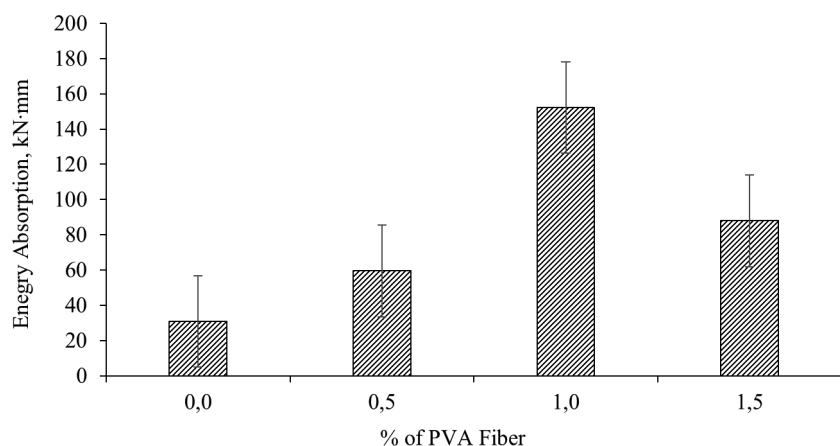
beneficial effect of fibers on geopolymer composites. This effect further enhances the ductility of the material, enabling it to withstand higher loads and exhibiting better performance under deformation. The load vs. deflection curves provide valuable insights into the behavior of engineered geopolymer composites under varying PVA fiber dosages. The findings emphasize the significance of an optimal PVA dosage [1 %] to achieve superior load-carrying capacity and improved ductility, making PVA fibers a critical component in enhancing the performance of geopolymer composites. This substantial increase in flexural strength directly translates to an increased load carrying capacity of the geopolymer composite.

Fig. 8 and 9 highlights the energy absorption and stiffness of Mix A specimens with a 12-molar solution, varying the percentages of PVA fibers. The results unequivocally reveal that the maximum energy absorption occurs with a 1 % PVA fiber dosage, showcasing a remarkable 82 % improvement compared to 0 % PVA fiber. Moreover, in terms of stiffness, the 1 % PVA fiber dosage also attains the highest value when compared with other fiber dosages. This noteworthy finding clearly illustrates the significant effect of PVA



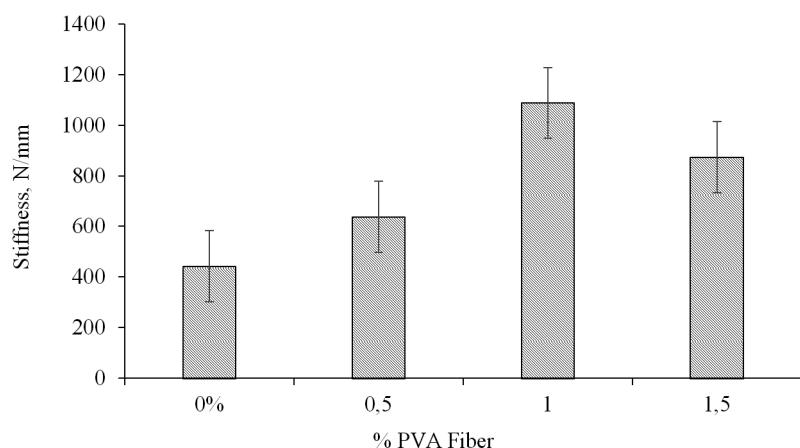
Rys. 7. Zależność obciążenia od odkształcenia dla różnych zawartości włókien PVA w serii A.

Fig. 7. Load vs deflection for different % of PVA fiber dosages of Mix A.



Rys. 8. Absorpcja energii dla różnych zawartości włókien PVA w serii A.

Fig. 8. Energy absorption for different % of PVA fiber dosages of Mix A.



Rys. 9. Sztywność dla różnych zawartości włókien PVA w serii A.

Fig. 9. Stiffness for different % of PVA fiber dosages of Mix A.

Krzywe obciążenie–odkształcenie dostarczają cennych informacji na temat zachowania kompozytów geopolimerowych różniących się udziałem włókien PVA. Wyniki podkreślają znaczenie optymalnego udziału PVA [1%] w celu osiągnięcia lepszej nośności i zwiększonej ciągliwości, czyniąc włókna PVA kluczowym składnikiem poprawiającym właściwości kompozytów geopolimerowych. Ten istotny wzrost wytrzymałości na zginanie bezpośrednio przekłada się na zwiększoną nośność kompozytu geopolimerowego.

Rys. 8 i 9 przedstawiają absorpcję energii oraz sztywność próbek serii A z roztworem 12-sto molowym o różnej zawartości włókien PVA. Wyniki jednoznacznie pokazują, że maksymalna absorpcja energii występuje przy udziale 1% włókien PVA, wykazując imponującą poprawę o 82% w porównaniu do 0% włókien PVA.

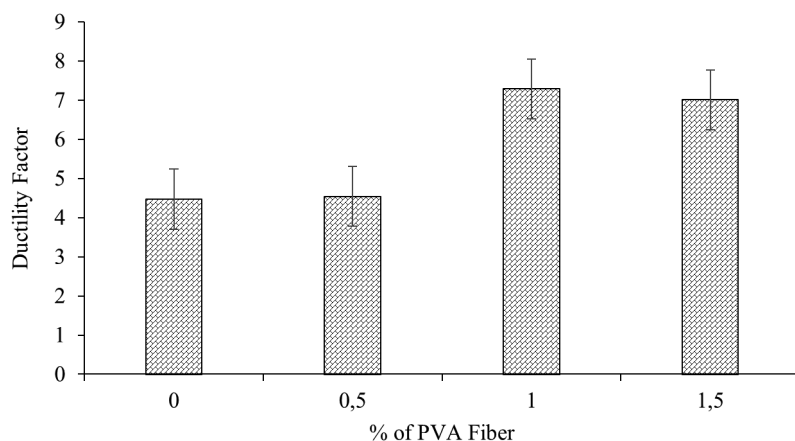
Ponadto, jeśli chodzi o sztywność, próbki o udziale 1% włókien PVA również osiągają najwyższą wartość w porównaniu z pozostałymi. To wyraźnie pokazuje istotny wpływ włókien PVA na zwiększenie zdolności absorpcji energii przez kompozyty.

fibers in enhancing the energy enhancing capacity of the composites. The observed increase in energy absorption and stiffness for the 1 % PVA fiber dosage is attributed to the reinforcing effect of the fibers. The PVA fibers act as bridging elements, effectively arresting crack propagation and dissipating energy during deformation. This results in an overall improvement in the mechanical properties, making the composites more resilient and capable of withstanding higher loads and deformation. The combined results from Figures 8 and 9 underscore the importance of the 1 % PVA fiber dosage in optimizing both energy absorption and stiffness, thereby enhancing the overall mechanical behavior of the Mix A geopolimer composites. This reinforces the significance of PVA fibers as a valuable reinforcement material in developing high-performance and durable engineered geopolimer composites.

Fig. 10 depicts the ductility factor, calculated from the load-deflection curve shown in Figure 7, as a ratio of ultimate to yield deflections. The results clearly indicate that increasing the dosage of fibers leads to a gradual improvement in the ductility factor, peaking at the 1 % fiber dosage. The data demonstrates a significant enhancement in ductility for geopolimer composites, with an increase of approximately 56 % compared to 0 % fiber dosage. This substantial improvement in ductility is a direct result of the proper bridging of cracks and enhanced reinforcing effect achieved by the optimal 1 % PVA fiber dosage. The incorporation of 1 % PVA fibers results in a remarkable increase in ductility, making

these composites better-suited for applications where crack resistance and deformation capacity are crucial factors.

The presence of PVA fibers in the specimens promotes a bridging action between the mortar and fibers, resulting in the development of cracks before ultimate failure occurs. This bridging mechanism enhances the ductility of the geopolimer composites, making



Rys. 10. Współczynnik ciągliwości dla różnych zawartości włókien PVA w serii A.

Fig. 10. Ductility factor for different % of PVA fiber dosages of Mix A.

Zanotowany wzrost absorpcji energii i sztywności przy udziale 1% włókien PVA przypisuje się efektowi wzmacniającemu włókien. Włókna PVA działają jak elementy mostkujące, skutecznie hamując propagację pęknięć i rozpraszając energię podczas odkształcenia. Skutkuje to ogólną poprawą właściwości mechanicznych, czyniąc kompozyty bardziej odporne i zdolne do przenoszenia większych obciążeń oraz odkształceń.

Wyniki przedstawione na rysunkach 8 i 9 podkreślają znaczenie udziału 1% włókien PVA w optymalizacji zarówno absorpcji energii, jak i sztywności, co przekłada się na lepsze właściwości mechaniczne kompozytów geopolimerowych serii A. Potwierdza to rolę włókien PVA jako wartościowego materiału wzmacniającego w tworzeniu wysokowydajnych i trwałych kompozytów geopolimerowych.

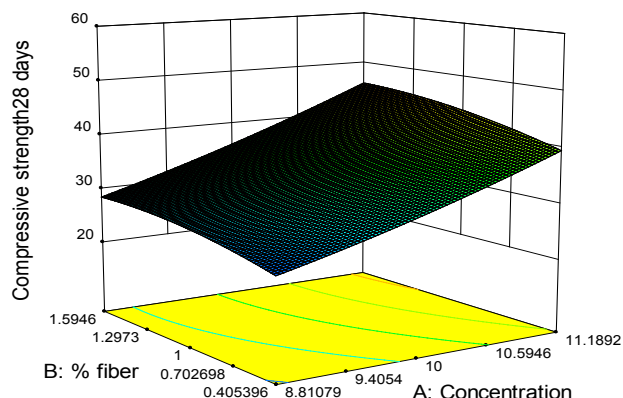
Rysunek 10 przedstawia współczynnik ciągliwości, obliczony na podstawie krzywej obciążenie–odkształcenie pokazanej na rysunku 7, jako stosunek ugięć przy granicy nośności do ugięć przy granicy plastyczności. Wyniki wyraźnie pokazują, że wzrost zawartości włókien prowadzi do stopniowej poprawy współczynnika ciągliwości, osiągając maksimum przy udziale 1% włókien.

Dane wskazują na znaczną poprawę ciągliwości kompozytów geopolimerowych, z przyrostem około 56% w porównaniu do próbek bez włókien. Ten istotny wzrost ciągliwości jest bezpośrednim efektem prawidłowego mostkowania pęknięć oraz efektu wzmocnienia uzyskanego dzięki optymalnemu udziałowi 1% włókien PVA.

Wprowadzenie 1% włókien PVA skutkuje znacznym zwiększeniem ciągliwości, czyniąc te kompozyty lepiej przystosowanymi do zastosowań, w których kluczowe są odporność na pękanie oraz zdolność do odkształceń.

Obecność włókien PVA w próbkach sprzyja efektowi mostkowania między zaprawą a włóknami, prowadząc do powstawania pęknięć przed osiągnięciem granicznej wytrzymałości. Mechanizm mostkowania zwiększa ciągliwość kompozytów geopolimerowych, czyniąc je bardziej odpornymi na nagłe uszkodzenia. Wyniki wskazują, że dodatek włókien PVA znacząco poprawia wszystkie właściwości, w tym wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie oraz wytrzymałość na zginanie. Warto jednak zauważyć, że wytrzymałość na rozciąganie i zginanie wykazuje bardziej wyraźny wzrost w porównaniu do wytrzymałości na ściskanie. Oznacza to, że włókna PVA odgrywają kluczową rolę w zwiększaniu odporności na naprężenia rozciągające i zginające, co skutkuje bardziej trwałymi i odpornymi kompozytami geopolimerowymi. Wyniki podkreślają korzystny wpływ włókien PVA na poprawę właściwości mechanicznych kompozytów geopolimerowych, szczególnie pod względem absorpcji energii, sztywności i ciągliwości. Wprowadzenie włókien PVA zmienia zachowanie materiału z kruchego na ciągliwe, oferując lepszą wydajność konstrukcyjną oraz większą odporność na pękanie i odkształcenia.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Compressive strength28 days
● Design points below predicted value
50.09
21.65
X1 = A: Concentration
X2 = B: % fiber
Actual Factor
C: Mix proportion = 2



Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od zawartości włókien i stężenia roztworu według metody RSM.

Fig. 11. Compressive strength Vs % of fiber and solution concentration in RSM.

them more resistant to sudden failure. The findings lead to the conclusion that the addition of PVA fibers significantly improves all properties, including compressive strength, tensile strength, and flexural strength. However, it is noteworthy that the tensile and flexural strengths exhibit a more substantial increase compared to compressive strength. This indicates that the PVA fibers play a pivot role in enhancing the resistance to tensile and flexural stresses, resulting in more durable and resilient geopolymer composites. Overall, the results highlight the beneficial effects of PVA fibers in improving the mechanical properties of geopolymer composites, particularly in terms of energy absorption, stiffness, and ductility. The introduction of PVA fibers transforms the material's behavior from brittle to ductile, offering enhanced structural performance and better resistance to cracking and deformation.

4.4. Optimizing the mix design parameters through RSM

The Response Surface Method [RSM] is employed to optimize the strength, fiber dosage, and molarity of Engineered Geopolymer Composites. By analyzing the interactions between these variables, RSM helps identify the optimal combination to achieve the desired mechanical properties and performance in geopolymer composites.

Figure 11 presents the compressive strength results with respect to fiber dosage and molarity of the solution. The data in Table 5 reveals that the performance analysis from response surface methodology [RSM] yields a standard deviation of 0.89 and an impressive R^2 value of 0.99. This indicates the accuracy of the results in predicting the required strength of the engineered geopolymer composite. In the context of RSM, Figs. 12 and 14 displays a normal plot of residuals, which helps assess the adequacy of the statistical model fitted to the data. The residuals' normal probability plot indicates a linear pattern, with predicted values closely aligning with actual values. This further validates the accuracy and reliability

Tablica 5 / Table 5

ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE WEDŁUG METODY RSM.

PERFORMANCE ANALYSIS ON COMPRESSIVE STRENGTH IN RSM.

Odchylenie standardowe Std. Dev.	0.89	Współczynnik determinancji / R-Squared	0.9925
Średnia / Mean	34.66	Skorygowany współczynnik determinancji Adj R-Squared	0.9858
C.V. %	2.58	Przewidywany współczynnik determinancji Pred R-Squared	0.9391
Prasa / PRESS	65.06	Precyzja / Adeq Precision	45.680
Logarytm wiarygodności -2 Log Likelihood	38.45	BIC	68.410
		AICc	82.890

4.4. Optymalizacja właściwości kompozytu przy użyciu RSM

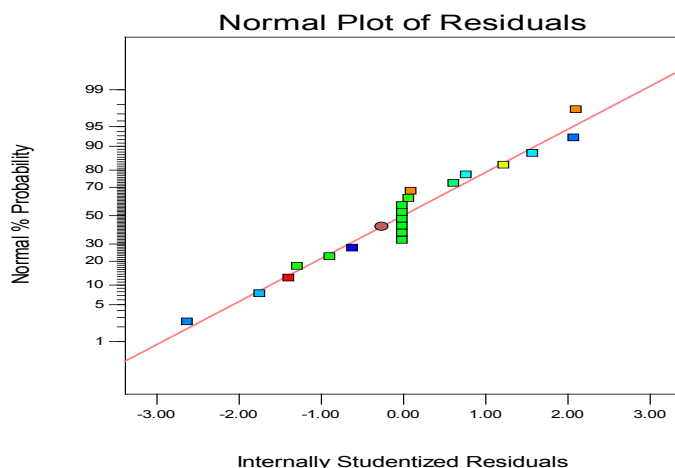
Metoda powierzchni odpowiedzi [ang. Response Surface Method, RSM] jest stosowana w celu optymalizacji wytrzymałości, udziału wprowadzonych włókien i stężenia molowego roztworu w kompozytach geopolimerowych. Analiza interakcji między tymi zmiennymi pozwala RSM zidentyfikować optymalną kombinację parametrów, umożliwiając osiągnięcie pożądanych właściwości mechanicznych i wydajności kompozytów geopolimerowych.

Rys. 11 przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie w zależności od udziału włókien i stężenia molowego roztworu. Dane z tablicy 5 pokazują, że analiza wydajności przy użyciu metody RSM daje odchylenie standardowe wynoszące 0,89 oraz imponującą wartość R^2 równą 0,99. Wskazuje to na dokładność wyników pomocną w przewidywaniu wymaganej wytrzymałości kompozytu geopolimerowego.

W kontekście RSM, rysunki 12–14 przedstawiają normalny wykres reszt, który pomaga ocenić adekwatność dopasowanego modelu statystycznego do danych. Wykres prawdopodobieństwa reszt wskazuje liniowy trend, z wartościami przewidywanymi ściśle pokrywającymi się z wartościami rzeczywistymi. Dodatkowo potwierdza to dokładność i wiarygodność modelu w przewidywaniu wytrzymałości na ściskanie kompozytu geopolimerowego.

Podobnie, badania nad wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu są przedstawione na rysunku 13 oraz w tablicy 6. Analiza wydajności według me-

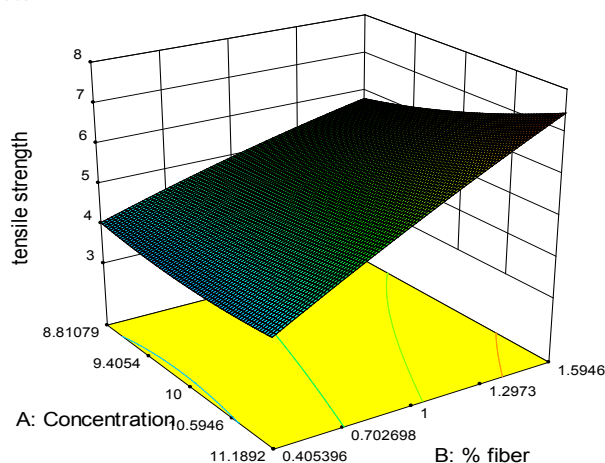
Design-Expert® Software
Compressive strength28 days
Color points by value of
Compressive strength28 days:
50.09
21.65



Rys. 12. Normalne wykresy reszt [różnica między wartością obserwowaną a wartością przewidywaną przez model] dla wytrzymałości na ściskanie.

Fig. 12. Normal plot of residuals for compressive strength.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
tensile strength
● Design points below predicted value
7.69
3.11
X1 = A: Concentration
X2 = B: % fiber
Actual Factor
C: Mix proportion = 2



Rys. 13. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w funkcji zawartości włókien i stężenia roztworu w metodzie RSM.

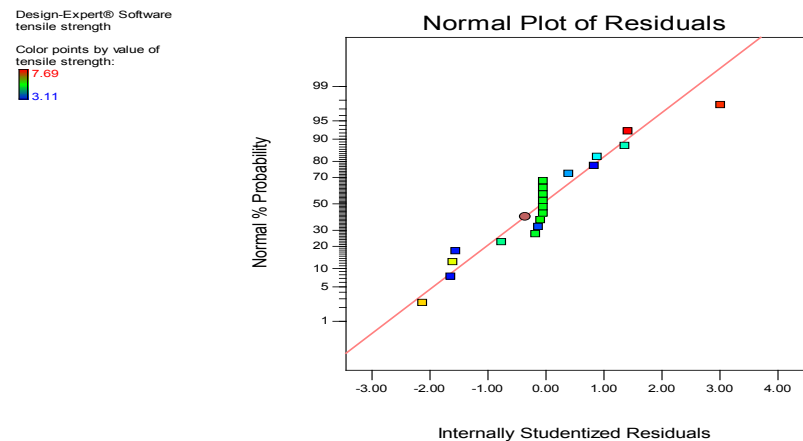
Fig. 13. Split tensile strength Vs % of fiber and solution concentration in RSM.

of the model in predicting the compressive strength of the geopolymer composite.

Similarly, the study conducted on split tensile strength is supported by Fig. 13 and Table 6. The Performance Analysis from RSM shows a standard deviation of 0.50 and an R^2 value of 0.92, affirming the accuracy of the results in predicting the strength of the engineered geopolymer composite. Finally, Tables 7 and 8 provide equations for predicting the compressive and split tensile strength, respectively, based on the optimum dosage of fiber and molarity of alkali solution. These equations serve as valuable tools for optimizing the mix design parameters of engineered geopolymer composites, contributing to enhanced material performance and potential applications in sustainable construction practices. Overall,

Tablica 6 / Table 6
ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU W METODZIE RSM.
PERFORMANCE ANALYSIS ON SPLIT TENSILE STRENGTH IN RSM.

Odchylenie standardowe Std. Dev.	0.50	Współczynnik determinacji / R-Squared	0.9260
Średnia / Mean	5.06	Skorygowany współczynnik determinacji Adj R-Squared	0.8593
C.V. %	9.91	Przewidywany współczynnik determinacji Pred R-Squared	0.4387
Prasa / PRESS	19.05	Precyzja / Adeq Precision	12.681
Logarytm wiarygodności -2 Log Likelihood	15.26	BIC	45.22
		AICc	59.71



Rys. 14. Normalne wykresy reszt dla wytrzymałości na zginanie przy rozłupywaniu.
Fig. 14. Normal plot of Residuals for Tensile strength.

tody RSM wskazuje odchylenie standardowe na poziomie 0,50 oraz wartość R² równą 0,92, co potwierdza dokładność wyników w przewidywaniu wytrzymałości kompozytów geopolimerowych.

Tablice 7 i 8 zawierają równania umożliwiające przewidywanie wytrzymałości na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu, odpowiednio, w oparciu o optymalny udział włókien oraz stężenie molowe roztworu alkalicznego. Równania te stanowią cenne narzędzie do optymalizacji parametrów składu mieszanki kompozytów geopolimerowych, przyczyniając się do poprawy właściwości materiału oraz jego zastosowań w zrównoważonym budownictwie.

Podsumowując, badania podkreślają potencjał inżynierskich kompozytów geopolimerowych [EGC] jako materiałów budowlanych przyjaznych środowisku i o wysokiej wydajności. Wprowadzenie

the study underscores the potential of Engineered Geopolymer Composites as eco-friendly and high-performance construction materials. The incorporation of PVA fibers, optimization of molarity, and utilization of RSM contribute to enhanced material properties, making EGCs a promising solution for sustainable construction practices.

5. Future scope of the study

Future research on hybrid fiber-reinforced geopolymer concrete should emphasize its long-term durability and resistance to environmental conditions. Specific areas of investigation include the performance of these composites under aggressive exposures such as freeze–thaw cycles, chloride penetration, and sulfate attack, as well as their thermal resistance at elevated temperatures with respect to fire endurance and residual strength. Moreover, the chemical stability of different fibers, including PVA, steel, basalt, polypropylene, and carbon, within the alkaline geopolymer matrix requires further examination to ensure long-term compatibility. Finally, large-scale and in-situ studies are essential to validate laboratory findings and to establish the field performance of hybrid fiber-reinforced geopolymer concretes under real service conditions.

Tablica 7 / Table 7
PREDYKCJA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE PRZY UŻYCIU METODY RSM.
COMPRESSIVE STRENGTH PREDICTION USING RSM.

Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach Compressive strength 28 days	=
+7.83553	
-4.55870	*Stężenie / Concentration
+7.86639	* Udział włókien / % fiber
+7.45397	* Skład mieszanki / Mix proportion
+0.87858	* Stężenie / Concentration * Udział włókien / % fiber
-0.037123	*Stężenie / Concentration * Skład mieszanki / Mix proportion
-2.59862	* Udział włókien / % fiber * Skład mieszanki / Mix proportion
+0.52839	* Stężenie / Concentration ²
-3.55144	* Udział włókien % fiber ²
-0.50644	* Skład mieszanki / Mix proportion ²

6. Conclusions

The study on Engineered Geopolymer Composites [EGCs] with PVA fiber reinforcement and varying molarities of the alkali solution reveal the following significant findings.

włókien PVA, optymalizacja stężenia molowego aktywatora oraz zastosowanie RSM przyczyniają się do poprawy właściwości, czyniąc EGC obiecującym rozwiązaniem dla zrównoważonych praktyk budowlanych.

5. Zakres przyszłych badań

Przyszłe badania nad kompozytami geopolimerowymi z włóknami hybrydowymi powinny koncentrować się na ich długoterminowej trwałości oraz odporności na warunki środowiskowe. Konkretnie obszary badań obejmują: zachowanie tych kompozytów przy agresywnych ekspozycjach, takich jak cykle zamrażania i rozmrażania, przenikanie chlorków czy atak siarczanów, a także ich odporność termiczną w wysokich temperaturach, w kontekście odporności ogniowej i zachowania wytrzymałości pozostałej po ekspozycji. Ponadto, stabilność chemiczna różnych włókien, w tym PVA, stali, bazaltu, polipropylenu i węgla, w alkalicznej matrycy geopolimerowej wymaga dalszego badania, aby zapewnić długoterminową kompatybilność. Wreszcie, badania na dużą skalę oraz badania in-situ są niezbędne do weryfikacji wyników laboratoryjnych i ustalenia rzeczywistej wydajności hybrydowych kompozytów geopolimerowych z włóknami w warunkach rzeczywistych.

6. Wnioski

Badania nad inżynierskimi kompozytami geopolimerowymi [EGC] zbrojonymi włóknami PVA i zmiennym stężeniem roztworu alkalicznego wykazały następujące istotne wyniki.

1. Wyniki wskazują, że dodanie włókien PVA do 1% prowadzi do niewielkiego wzrostu wytrzymałości na ściskanie we wszystkich mieszankach. Powyżej tej zawartości włókien obserwuje się spadek wytrzymałości na ściskanie z powodu niewłaściwej przyczepności włókien z matrycą geopolimerową spowodowanej nierównomiernym rozproszaniem włókien w objętości.
2. Zwiększenie stężenia molowego aktywatora przyczynia się do ogólnej poprawy wytrzymałości na ściskanie kompozytów geopolimerowych. Porównanie mieszanki bez włókien z mieszankami zawierającymi optymalną ilość włókien PVA przy wyższych stężeniach [8 i 12] pokazuje znaczną poprawę wytrzymałości na ściskanie, z przyrostami od 4,5% do 73,1% dla serii A oraz od 10,5% do 74,6% dla serii B.
3. Dodatek włókien PVA do kompozytów geopolimerowych prowadzi do istotnej poprawy wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Próbkę z 1% włókien PVA wykazały wzrost wytrzymałości na rozciąganie o 57,5%, niezależnie od stężenia roztworu i typu mieszanki.
4. Wprowadzenie 1% włókien PVA do kompozytów geopolimerowych powoduje istotny wzrost wytrzymałości na zginanie rzędu 70%, wskazując na optymalny udział dla uzyskania najlepszej wydajności.
5. Dodatek 1% włókien PVA skutkuje znaczną poprawą absorpcji energii, wynoszącą około 82% w porównaniu do kompozytów bez włókien. Ten wzrost jest przypisywany efektowi wzmocnienia

Tablica 8 / Table 8

PREDYKCJA WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE WZDŁUŻNE PRZY UŻYCIU METODY RSM.

SPLIT TENSILE STRENGTH PREDICTION USING RSM.

Tensile strength	=
+8.56046	
-2.23651	*Stężenie / Concentration
-2.64808	* Udział włókien / % fiber
+6.35233	* Skład mieszanki / Mix proportion
+0.60281	* Stężenie / Concentration * Udział włókien / % fiber
-0.097227	*Stężenie / Concentration * Skład mieszanki / Mix proportion
-0.30759	* Udział włókien / % fiber * Skład mieszanki / Mix proportion
+0.11046	* Stężenie / Concentration ²
-0.28317	* Udział włókien % fiber ²
-1.28817	* Skład mieszanki / Mix proportion ²

1. The results indicate that the inclusion of PVA fibers up to 1 % leads to a marginal increase in compressive strength across all the mixes. Beyond this fiber content, there is a decline in compressive strength due to improper bond between the fiber and geopolymer matrix caused by non-uniform dispersion.
2. Increasing the molarity of mix contributes to an overall enhancement in the compressive strength of geopolymer composites. A Comparison between plain mixes with no fiber and mixes with optimal PVA fiber at higher molarities [8 and 12] reveal significant improvements in compressive strength, with percentage enhancements ranging from 4.5 % to 73.1 % for Mix A and 10.5 % to 74.6 % in Mix B.
3. The addition of PVA fibers in geopolymer composites leads to a significant improvement in split tensile strength. 1 % dosage specimens of PVA fiber exhibited significant improvement of 57.5 % in split tensile strength regardless of the molarity and mix type.
4. The inclusion of 1 % PVA fibers in geopolymer composites lead to a significant enhancement of the order of 70 % in flexural strength, indicating an optimum dosage for superior performance.
5. The addition of 1 % PVA fibers in geopolymer composites results in a remarkable improvement of approximately 82 % energy absorption compared to composites with no fiber. This significant enhancement is attributed to the reinforcing effect of PVA fibers, which effectively bridge microcracks and dissipate energy during deformation.
6. The ductility of geopolymer composites experience a substantial enhancement of approximately 56 % with the addition of 1 % PVA fibers compared to composites with no fiber. Proper bridging of cracks with PVA fibers enhances the ductility, allowing the composites to undergo larger deformations before failure occurs.

jącemu włókien PVA, które skutecznie mostkują mikropęknięcia i rozpraszają energię podczas odkształcenia.

6. Ciągliwość kompozytów geopolimerowych zwiększa się o około 56% przy dodaniu 1% włókien PVA w porównaniu do kompozytów bez włókien. Prawidłowe mostkowanie pęknięć przez włókna PVA zwiększa ciągliwość, pozwalając kompozytom na większe odkształcenia przed osiągnięciem granicy wytrzymałości.
7. Zastosowanie metody powierzchni odpowiedzi [RSM] pozwala na dokładne przewidywanie wytrzymałości kompozytów geopolimerowych, a wysokie wartości R^2 wskazują na wiarygodność modeli.

Ogólnie, obecność 1% włókien PVA skutkuje poprawą absorpcji energii, większą sztywnością oraz zwiększoną ciągliwością, co czyni te kompozyty bardziej wytrzymałymi, odpornymi i odpowiednimi do różnych zastosowań konstrukcyjnych.

Oświadczenie o braku konfliktu interesów

Autorzy oświadczają, że nie mają znanych konkurencyjnych interesów finansowych ani relacji osobistych, które mogłyby wpłynąć na wyniki przedstawione w niniejszej pracy.

Literatura / References

1. V. Shobeiri, B. Bennett, T. Xie, P. Visintin, A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete. *J. Clean. Prod.* **297**, 126669 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>
2. N. Shehata, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Sci. Total Environ.* **762**, 143166 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>
3. M. S. Imbabi, C. Carrigan, S. McKenna, Trends and developments in green cement and concrete technology. *Int. J. Sustain. Built Environ.* **1**, 194-216 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001>
4. S. Grzeszczyk, The truth about the geopolymers. *Cem. Wapno Beton* **26**, 101-108 (2021). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.2.7>
5. P. S. Reddy, N. G. Reddy, V. Z. Serjun, B. Mohanty, S. K. Das, K. R. Reddy, B. H. Rao, Properties and assessment of applications of red mud (bauxite residue): current status and research needs. *Waste Biomass Valorization* **12**, 1185-1217 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01089-z>
6. A. Golek, A. Guła, Effect of the alkali-activated binder on plant growth. *Cem. Wapno Beton* **25**, 242-254 (2020). <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.3.7>
7. R. P. Venkatesan, K. C. Pazhani, Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE J. Civ. Eng.* **20**, 2384-2391 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0564-0>
8. K. Rajczyk, G. Janus, Microstructure and properties of geopolymers formed in the alkali activation process of fly ash. *Cem. Wapno Beton* **26**, 279-293 (2021). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.2>
9. M. Albitar, P. Visintin, M. S. Mohamed Ali, M. Drechsler, Assessing behaviour of fresh and hardened geopolymer concrete mixed with class-F fly ash. *KSCE J. Civ. Eng.* **19**, 1445-1455 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12205-014-1254-z>

7. The use of Response Surface Methodology [RSM] yields accurate predictions for the strength of the geopolymer composites, with high R^2 values indicating the reliability of the models.
8. Overall, the presence of 1 % PVA fibers results in improved energy absorption, higher stiffness, and increased ductility, making these composites more robust, resilient, and suitable for various structural applications.

Disclosure statement

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

10. İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, C. D. Atiş, Very high strength Na₂SiO₃ and NaOH activated fly ash based geopolymer mortar. *1*, 1-10 (2020). <http://hdl.handle.net/20.500.11787/5963>
11. A. R. Krishnaraja, M. Harihanandh, S. Anandakumar, Mechanical performance of engineered cementitious composites developed with different modulus fibers. *Cem. Wapno Beton* **26**, 493-502 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4>
12. F. A. Khan, S. W. Khan, I. Said, S. Hussain, An Economical Engineered Cementitious Composite (ECC) prepared with fine quarry sand and a nominal amount of PVA fibers. *Cem. Wapno Beton* **26**, 323-339 (2022). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.4.5>
13. V. Afrouhsabet, L. Biolzi, T. Ozbakkaloglu, High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *J. Mater. Sci.* **51**, 6517-6551 (2016). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-016-9917-4>
14. D. Y. Yoo, N. Banthia, Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* **73**, 267-280 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
15. J. Cai, J. Pan, J. Han, X. Wang, Mechanical behaviors of metakaolin-based engineered geopolymer composite under ambient curing condition. *J. Mater. Civ. Eng.* **34**, 04022152 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004304](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004304)
16. B. C. Lyu, C. Ding, L. P. Guo, B. Chen, A. G. Wang, Basic performances and potential research problems of strain hardening geopolymer composites: A critical review. *Constr. Build. Mater.* **287**, 123030 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123030>
17. C. C. ECC, Engineered Cementitious Composites. *Dict. Concr. Technol.* **29**, 521 (2024). <https://link.springer.com/reference-work/10.1007/978-981-97-2998-2>
18. Y. Ling, K. Wang, W. Li, G. Shi, P. Lu, Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Compos. Part B Eng.* **164**, 747-757 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>
19. M. Ohno, V. C. Li, An integrated design method of Engineered Geopolymer Composite. *Cem. Concr. Compos.* **88**, 73-85 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.001>
20. B. Nematollahi, J. Sanjayan, F. U. A. Shaikh, Matrix design of strain hardening fiber reinforced engineered geopolymer composite. *Compos. Part B Eng.* **89**, 253-265 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.039>
21. N. Elmesalami, K. Celik, A critical review of engineered geopolymer composite: A low-carbon ultra-high-performance concrete. *Constr. Build. Mater.* **346**, 128491 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128491>
22. H. Zhong, M. Zhang, Engineered geopolymer composites: A state-of-the-art review. *Cem. Concr. Compos.* **125**, 104850 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104850>
23. IS 383: 2016. Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete.
24. IS 516: Part 1: Sec 1: 2021. Hardened concrete methods of test part 1 testing of strength of hardened concrete section 1 compressive, flexural and split tensile strength.
25. S. Li, L. Liang, C. Guan, Optimization design and evaluation of polymer-modified hybrid fiber-reinforced cement-based composites. *Constr. Build. Mater.* **462**, 139915 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139915>
26. M. Ateeq, A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite. *Compos. Part C: Open Access* **12**, 100412 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100412>
27. Z. Ahmad, S. Alsulamy, A. Raza, S. Salmi, M. Abid, A. F. Deifalla, K. M. Elhadi, Life cycle assessment (LCA) of polypropylene fibers (PPF) on mechanical, durability, and microstructural efficiency of concrete incorporating electronic waste aggregates. *Case Stud. Constr. Mater.* **18**, e01979 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01979>
28. P. Jagadeesh, S. M. Rangappa, S. Siengchin, Basalt fibers: An environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites. *Constr. Build. Mater.* **436**, 136834 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136834>
29. Y. Tao, S. A. Hadigheh, Y. Wei, Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis. *Structures* **53**, 1540-1556 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.018>
30. K. Wang, P. Zhang, J. Guo, Z. Gao, Single and synergistic enhancement on durability of geopolymer mortar by polyvinyl alcohol fiber and nano-SiO₂. *J. Mater. Res. Technol.* **15**, 1801-1814 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.155>
31. A. Gheithasi, T. D. Ngo, Effect of Fiber Type and Length on Strength, Fracture Energy, and Durability of Microwave-Cured Geopolymer Mortars. *Buildings* **12**, 3723 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12123723>
32. S. Hussain, J. Matthews, S. Amritphale, R. Edwards, E. Matthews, N. Paul, J. Kraft, Influence of steel and poly vinyl alcohol fibers on the development of high-strength geopolymer concrete. *Minerals* **14**, 1007 (2024). <https://doi.org/10.3390/min14101007>
33. S. P. Radebe, M. M. Madirisha, B. D. Ikotun, O. R. Dada, Durability and Strength Improvement of Ambient-Cured Geopolymer Concrete Using Polypropylene Fibers. *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.* **1**, 1-20 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01987-z>
34. K. S. Natarajan, K. Vellaipandian, Effect of fracture and elastic modulus properties on geopolymer concrete reinforced with basalt fibers for an ecofriendly environment. *Innov. Infrastruct. Solut.* **8**, 150 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01103-y>
35. D. Ertürkmen, H. Ürünveren, A. Beycioğlu, N. Ibadov, H. Y. Aruntaş, A. Garbacz, Bond Performance of GFRP Bars in Glass and Basalt Fiber-Reinforced Geopolymer Concrete Under Hinged Beam Tests. *Materials* **18**, 498 (2025). <https://doi.org/10.3390/ma18030498>