

dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz¹⁾

ORCID: 0000-0001-5114-7932

dr inż. Jarosław Kalinowski¹⁾

ORCID: 0000-0001-8922-4788

dr inż. Mariusz Kosin^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2683-7784

Characteristics of selected mechanical parameters of the resin-based conglomerate

Charakterystyka wybranych parametrów mechanicznych konglomeratu na osnowie żywicznej

DOI: 10.15199/33.2025.11.14

Abstract. The aim of the study was to determine the influence of aggregate composition on the mechanical properties of resin-based conglomerate. The tests used three-component aggregate mixtures with different proportions of grain fractions and a two-component epoxy resin. Conglomerate samples were prepared according to the established recipe and then subjected to compressive and bending strength tests. Analysis of the results showed that the greatest influence on the mechanical parameters is the void content of the mixture – the lower the void content, the higher the strength of the material. Conglomerates with optimized granulation achieved compressive strength values exceeding 64 MPa and bending resistance above 26 MPa. The obtained results confirm that the selection of the appropriate aggregate grain size is crucial for the design of composites with high strength parameters. Due to their favorable functional properties, the analyzed conglomerates can be widely used in civil engineering as an alternative to classic concrete mixtures.

Keywords: resin conglomerate; composites; aggregate; voids; composition optimization; compressive strength; bending strength.

Streszczenie. W artykule opisano wpływ składu kruszywa na właściwości mechaniczne konglomeratu na osnowie żywicznej. W badaniach wykorzystano trzykomponentowe mieszanki kruszywa o różnych proporcjach frakcji ziarnowych oraz dwuskładnikową żywicę epoksydową. Próbkę konglomeratu wykonano zgodnie z ustaloną recepturą, a następnie przeprowadzono testy wytrzymałościowe na ściskanie i zginanie. Analiza wyników wykazała, że największy wpływ na parametry mechaniczne ma jamistość mieszanki – im mniejsza, tym większa wytrzymałość materiału. Konglomeraty o zoptymalizowanej granulacji osiągały wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 64 MPa i na zginanie większą od 26 MPa. Potwierdza to, że dobór odpowiedniego uziarnienia kruszywa jest kluczowy przy projektowaniu kompozytów o dużej wytrzymałości. Ze względu na korzystne właściwości użytkowe, analizowane konglomeraty mogą być powszechnie stosowane w inżynierii lądowej jako alternatywa klasycznych mieszanek betonowych.

Słowa kluczowe: konglomerat żywiczny; kompozyty; kruszywo; jamistość; optymalizacja składu; wytrzymałość na ściskanie; wytrzymałość na zginanie.

Composite materials, also known as composites, are materials composed of at least two components with different physicochemical properties, which when combined form a material with functional characteristics superior to those of the individual constituents [1, 2]. In typical composites, two main components are distinguished: the matrix, which provides shape and structural integrity, and the dispersed phase – most often a filler – that reinforces the material and affects its mechanical properties [3, 4].

One category of composites is **conglomerates** – artificial stone materials that contain natural or industrial aggregates bound with a binder [5]. In recent decades, epoxy, polyester, and acrylic resins have increasingly served as the matrix in such materials, owing to their high mechanical strength, chemical resistance, and excellent adhesion to various mineral substrates.

Resin-based conglomerates are widely used in fields such as construction, interior architecture, the furniture industry, and road engineering [6 ÷ 8]. In construction, they are employed in the production of kitchen and laboratory

materials kompozytowe, zwane również kompozytami, to tworzywa składające się z co najmniej dwóch składników o odmiennych właściwościach fizykochemicznych, które po połączeniu tworzą materiał o cechach użytkowych lepszych niż komponenty składowe [1, 2]. W typowych kompozytach wyróżnia się osnowę (matrycę), odpowiadającą za nadanie kształtu i integralność strukturalną, oraz fazę rozproszoną – najczęściej wypełniacz, który wzmacnia materiał i wpływa na jego właściwości mechaniczne [3, 4].

Jedną z kategorii kompozytów są **konglomeraty**, czyli sztuczne materiały kamienne zawierające kruszywa naturalne lub przemysłowe spójne lepiszczem [5]. W ostatnich dekadach coraz powszechniej rolę osnowy pełnią żywice epoksydowe, poliestrowe i akrylowe, charakteryzujące się dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością chemiczną oraz doskonałą adhezją do różnorodnych podłoży mineralnych.

Konglomeraty na osnowie żywicznej są powszechnie stosowane m.in. w budownictwie, architekturze wnętrz, przemyśle meblarskim i drogownictwie [6 ÷ 8]. W budownictwie wykorzystywane są do produkcji blatów kuchennych i laboratoryjnych, okładzin ściennych i podłogowych, elementów prefabrykowanych (np. schodów, parapetów), paneli elewa-

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Correspondence address: mariusz.kosin@pcz.pl

countertops, wall and floor claddings, prefabricated elements (e.g., stairs, window sills), façade panels, as well as in resin flooring systems-particularly in industrial and medical facilities [9 ÷ 11]. Due to their formability and aesthetic qualities, these materials are becoming an increasingly popular alternative to natural stone and concrete [12]. The use of such materials in civil engineering can be especially advantageous in applications requiring high durability, chemical resistance, and visual appeal.

For the practical application of resin-based conglomerates, it is crucial to understand their mechanical properties-such as compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, and surface hardness. These properties are strongly dependent on the material's composition. Research has shown that the appropriate selection of aggregate proportions and resin type significantly affects the final strength parameters of the composite [13, 14]. In light of these characteristics, attention should also be given to the potential areas of application of these materials in Civil engineering. These may include prefabricated structural elements, expansion joint fillings, protective components in transportation infrastructure, and elements resistant to chemically aggressive environments [12, 15, 16]. Thanks to their high strength, durability, and aesthetic appeal, such composites represent an attractive alternative to traditional construction materials.

The main objective of the study presented in this article was to determine the relationship between the adopted aggregate proportions and the compressive and flexural strength of the resulting resin concrete. The paper describes the materials used, the research methodology, the measurement results, and their analysis in the context of potential applications in engineering practice.

Materials and Methods

To produce the resin-based conglomerate, synthetic and mineral components with precisely defined physicochemical properties were used. These components have a direct impact on the final mechanical properties of the composite material.

Resin and Hardener. In the study, a resin system [17] designed for the production of conglomerates, technical molds, and laminates was used. The system consists of two components: a low-viscosity, highly transparent epoxy resin resistant to UV radiation – minimizing yellowing and surface degradation under outdoor conditions-and a hardener that chemically reacts with the resin at room temperature, leading to the formation of a three-dimensional polymer network. The gel time of the system ranges from 30 to 45 minutes, depending on ambient temperature, while full curing occurs after 24 hours. The system is characterized by low viscosity, which facilitates the wetting and penetration of aggregates, a post-curing compressive strength exceeding 80 MPa, strong adhesion to mineral materials, and chemical resistance to oils, alkalis, and weak acids.

Mineral Aggregate. As the filler, natural decorative aggregate with grain sizes of 0 – 2 mm, 2 – 4 mm, and 4 – 6 mm was used. The selected types of aggregate consist

cyjnych, a także w systemach posadzek żywicznych, szczególnie w obiektach przemysłowych i medycznych [9 ÷ 11]. Ze względu na możliwość dowolnego formowania oraz estetykę, materiały te stają się coraz popularniejszą alternatywą dla kamienia naturalnego oraz betonu [12]. Zastosowanie tego typu materiałów w inżynierii lądowej może być szczególnie korzystne w miejscach, gdzie wymagana jest duża trwałość, odporność chemiczna i estetyka.

W przypadku praktycznego wykorzystania konglomeratów żywicznych kluczowe jest poznanie ich właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na ściskanie, zginanie, odporność na ścieranie oraz twardość powierzchniowa. Właściwości te są ściśle uzależnione od składu materiału. Badania wykazały, że odpowiedni dobór proporcji kruszyw i rodzaju żywicy w istotny sposób wpływa na końcowe parametry wytrzymałościowe kompozytu [13, 14]. W kontekście przedstawionych właściwości należy również zwrócić uwagę na potencjalne obszary zastosowania tych materiałów w inżynierii lądowej. Mogą to być m.in. prefabrykowane elementy konstrukcyjne, wypełnienia szczelin dylatacyjnych, elementy ochronne w infrastrukturze komunikacyjnej oraz komponenty odporne na środowiska agresywne chemicznie [12, 15, 16]. Dzięki dużej wytrzymałości, trwałości i estetyce, kompozyty te stanowią atrakcyjną alternatywę tradycyjnych materiałów budowlanych.

Głównym celem pracy prezentowanej w artykule było określenie zależności pomiędzy przyjętymi proporcjami kruszywa a wytrzymałością na ściskanie i zginanie uzyskanego betonu żywicznego. Opisano zastosowane materiały, metodę badań, wyniki pomiarów oraz ich analizę w kontekście potencjalnego zastosowania w praktyce inżynierskiej.

Materiały i metody badań

Do wytworzenia konglomeratu na osnowie żywicznej zastosowano komponenty syntetyczne i mineralne o ściśle określonych właściwościach fizykochemicznych, które mają bezpośredni wpływ na końcowe właściwości mechaniczne materiału kompozytowego.

Żywica i utwardzacz. W badaniach zastosowano system żywiczny [17], przeznaczony do produkcji konglomeratów, form technicznych i laminatów. Skład systemu obejmuje dwa komponenty: epoksydową żywicę o małej lepkości i dużej przezroczystości, odporną na działanie promieniowania UV, co ogranicza efekt żółknięcia i degradacji powierzchni w warunkach zewnętrznych, oraz utwardzacz reagujący chemicznie z żywicą w temperaturze pokojowej, prowadzący do utworzenia trójwymiarowej sieci polimerowej. Czas żelowania systemu wynosi 30 – 45 min w zależności od temperatury otoczenia, natomiast pełne utwardzenie następuje po 24 h. System ten charakteryzuje się małą lepkością ułatwiającą zwilżanie i penetrację kruszyw, wytrzymałością na ściskanie po utwardzeniu przekraczającą 80 MPa, dużą adhezją do materiałów mineralnych oraz odpornością chemiczną na działanie olejów, zasad i słabych kwasów.

Kruszywo mineralne. Jako wypełniacz zastosowano naturalne kruszywo dekoracyjne o uziarnieniu 0 – 2; 2 – 4 oraz 4 – 6 mm. Wybrane typy kruszywa składają się głównie

mainly of quartzite and granite. They are carefully selected and rounded, which makes them suitable for use in composites with high aesthetic requirements. The aggregates are characterized by a hardness greater than 6 on the Mohs scale, water absorption below 0.5%, high abrasion resistance, and an attractive appearance.

Design of Aggregate Mixtures. To optimize the physical and mechanical properties of the conglomerate, aggregate mixtures were designed to achieve the lowest possible void content in the compacted state. Three fractions were used: K1 (0 – 2 mm), K2 (2 – 4 mm), and K3 (4 – 6 mm), assuming an apparent density of $\rho_p = 2.65 \text{ g/cm}^3$ [18, 19]. The mixtures were designed so that one fraction predominated (60% by mass), while the remaining two together accounted for 40%, with varying proportions of 30%/10%, 20%/20%, and 10%/30%. This selection aimed to obtain aggregate mixtures with the lowest possible void ratio. Granulometric analysis was performed using the sieve method in accordance with EN 933-1 [20], while bulk density and void content measurements were conducted according to PN-EN 1097-3: 2000 [21]. The results for the individual configurations (M1, M2, M3), corresponding to three variants of aggregate proportions-with one dominant fraction and varying shares of the remaining ones-are summarized in Table 1.

Composition of Conglomerate Mixtures. Based on the optimal aggregate proportions, conglomerate mixtures were prepared and designated as series B1–B3 (Table 2), in which the resin content accounted for 10% of the total mixture mass. The resin-to-hardener ratio was 71.43% to 28.57%, respectively. For each series, three samples were prepared, and their compressive and flexural strengths were tested. This allowed the determination of the average values of the mechanical parameters.

Table 2 presents the detailed composition of each conglomerate mixture from series B1-B3, including both the percentage share of aggregate fractions and their corresponding mass in grams. This compilation serves as the basis for

z kwarcytu i granitu. Są starannie wyselekcjonowane i zaokrąglone, co sprzyja ich stosowaniu w kompozytach o dużych wymaganiach estetycznych. Cechują się twardością powyżej 6 w skali Mohsa, nasiąkliwością mniejszą niż 0,5%, dużą odpornością na ścieranie oraz atrakcyjnym wyglądem.

Projektowanie mieszanek kruszywa. W celu zoptymalizowania właściwości fizycznych i mechanicznych konglomeratu, zaprojektowano skład mieszanek kruszywa o możliwie najmniejszej jamistości w stanie zagęszczonym. Wykorzystano trzy frakcje: K1 (0 – 2 mm); K2 (2 – 4 mm) oraz K3 (4 – 6 mm), przy założonej gęstości pozornej $\rho_p = 2,65 \text{ g/cm}^3$ [18, 19]. Mieszanki projektowano tak, aby dominowała jedna z frakcji (60% masy), natomiast pozostałe dwie stanowiły łącznie 40%, przy zróżnicowanych proporcjach: 30%/10%, 20%/20% i 10%/30%. Dobór ten miał na celu uzyskanie mieszanek kruszyw o możliwie najmniejszej jamistości.

Analizę granulometryczną wykonano metodą sitową zgodnie z normą EN 933-1 [20], natomiast pomiary gęstości nasypowej i jamistości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1097-3:2000 [21]. Wyniki poszczególnych układów (M1, M2, M3), które odpowiadają trzem wariantom proporcji kruszywa z dominującą frakcją oraz zmiennym udziałem pozostałych, zestawiono w tabeli 1.

Skład mieszanek konglomeratu. Na podstawie optymalnych proporcji kruszywa wykonano mieszanki konglomeratu, oznaczone jako serie B1 – B3 (tabela 2), w których zawartość żywicy stanowiła 10% całkowitej masy mieszanki. Proporcje żywicy do utwardzacza wynosiły odpowiednio 71,43 do 28,57%. W przypadku każdej serii wykonano po trzy próbki i zbadano ich wytrzymałość na ściskanie oraz zginanie, co umożliwiło określenie średnich wartości parametrów mechanicznych.

W tabeli 2 przedstawiono szczegółowy skład każdej z mieszanek konglomeratu z serii B1 – B3, uwzględniając zarówno procentowy udział frakcji kruszywa, jak i odpowiadającą mu masę w gramach. Zestawienie to

Table 1. Characteristics of aggregate mixtures

Tabela 1. Charakterystyka mieszanek kruszywa

Designation of mixtures and aggregates/ Oznaczenie mieszanek i kruszywa	Fractions [mm]/ Frakcje [mm]	Percentage share [%]/ Procentowy udział [%]	Average/Średnia	
			bulk density of aggregate after compaction [g/cm ³]/ gęstość nasypowa kruszywa po zagęszczeniu [g/cm ³]	void content of aggregate after compaction [%]/ jamistość kruszywa po zagęszczeniu [%]
M1	M1_1_1	0 – 2	1,951	26,395
	M1_1_2	2 – 4		
	M1_1_3	4 – 6		
	M1_2_1	0 – 2	1,952	26,325
	M1_2_2	2 – 4		
	M1_2_3	4 – 6		
	M1_3_1	0 – 2	1,843	30,461
	M1_3_2	2 – 4		
	M1_3_3	4 – 6		
M2	M2_1_1	0 – 2	1,757	33,712
	M2_1_2	2 – 4		
	M2_1_3	4 – 6		
	M2_2_1	0 – 2	1,869	29,488
	M2_2_2	2 – 4		
	M2_2_3	4 – 6		
	M2_3_1	0 – 2	1,932	27,083
	M2_3_2	2 – 4		
	M2_3_3	4 – 6		
M3	M3_1_1	0 – 2	1,776	32,965
	M3_1_2	2 – 4		
	M3_1_3	4 – 6		
	M3_2_1	0 – 2	1,877	29,165
	M3_2_2	2 – 4		
	M3_2_3	4 – 6		
	M3_3_1	0 – 2	1,987	25,035
	M3_3_2	2 – 4		
	M3_3_3	4 – 6		

analyzing the influence of granulometric composition on the mechanical properties of the tested samples.

Preparation of Samples. The mixtures were prepared with a fixed weight ratio of resin to aggregate, ensuring good workability and a compact structure. The components were mechanically mixed for 2-3 minutes and then poured into molds made of synthetic material. Due to the specific requirements of the process, the molds for casting the samples were fabricated using 3D printing technology, which allowed for high dimensional accuracy and geometric repeatability [22, 23]. Degassing occurred naturally. After curing for 24 hours at room temperature, the samples were removed from the molds and subjected to testing.

Methods of Mechanical Testing. The mechanical tests included a compressive strength test conducted on cubic samples with dimensions of $5 \times 5 \times 5$ cm, in accordance with the requirements of the PN-EN 14617-15 standard

[24], and a flexural strength test performed in a three-point bending configuration on beam samples measuring $5 \times 5 \times 20$ cm, in compliance with PN-EN 14617-2 [25]. For the flexural test, the samples were placed on two supports spaced 19 cm apart, with each support positioned 0.5 cm from the beam's lateral edges, ensuring symmetrical support. The load was applied vertically at the midpoint of the span, following the principles of the three-point bending system, until the sample failed. All tests were carried out under laboratory conditions at a temperature of $20 \pm 5^\circ\text{C}$ and a relative air humidity of $50 \pm 10\%$.

The compressive strength tests were carried out at a loading rate of 1 ± 0.5 MPa/s using a testing machine with a load capacity of 100 kN.

The flexural strength tests were performed in a three-point bending configuration using a testing machine with a load capacity of 50 kN. The load on each sample was increased continuously at a constant rate of 0.25 ± 0.05 MPa/s.

Test Results

The results of the mechanical tests of the resin-based conglomerate samples show a clear relationship between the aggregate structure-particularly its void content-and the material's compressive and flexural strength. Samples made from aggregate mixtures with the lowest void content, and thus the highest bulk density in the compacted state, achieved the highest values of mechanical parameters.

Table 2. Composition of conglomerate mixtures (g/cm^3)
Tabela 2. Skład mieszanek konglomeratu (g/cm^3)

Concrete series/ Seria betonu			Fraction [mm]/Frakcja [mm]		
			(K1) 0 – 2	(K2) 2 – 4	(K3) 4 – 6
B1	B1_1	[%]	60	10	30
		[g]	1,092	0,182	0,546
	B1_2	[%]	60	20	20
		[g]	1,092	0,364	0,364
	B1_3	[%]	60	30	10
		[g]	1,092	0,546	0,182
B2	B2_1	[%]	10	60	30
		[g]	0,182	1,092	0,546
	B2_2	[%]	20	60	20
		[g]	0,364	1,092	0,364
	B2_3	[%]	30	60	10
		[g]	0,546	1,092	0,182
B3	B3_1	[%]	10	30	60
		[g]	0,182	0,546	1,092
	B3_2	[%]	20	20	60
		[g]	0,364	0,364	1,092
	B3_3	[%]	30	10	60
		[g]	0,546	0,182	1,092

stanowi podstawę do analizy wpływu granulacji na właściwości mechaniczne badanych próbek.

Przygotowanie próbek. Mieszanki miały ustalony stosunek wagowy żywicy i kruszywa, zapewniający dobrą urabialność i zwartą strukturę. Komponenty mieszano mechanicznie przez 2 – 3 min, a następnie wlewano do form z tworzywa sztucznego. Ze względu na specyfikę wykonania, formy do odlewania próbek zostały przygotowane w technologii druku 3D, co umożliwiło uzyskanie dużej dokładności wymiarowej i powtarzalności geometrycznej [22, 23]. Odpowietrzanie zachodziło samoczynnie. Po utwardzeniu (24 h w temperaturze pokojowej) próbki zostały wyjęte z form i poddane badaniom.

Metody badań mechanicznych. Badania mechaniczne obejmowały próbę ściskania, przeprowadzoną na próbkach sześciennych o wymiarach $5 \times 5 \times 5$ cm, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 14617-15 [24], oraz próbę

zginania, wykonaną w układzie trójpunktowym na próbkach belkowych o wymiarach $5 \times 5 \times 20$ cm, zgodnie z normą PN-EN 14617-2 [25]. W przypadku próby zginania próbki umieszczano na dwóch podporach rozmieszczonych w odległości 19 cm, przy czym każda z podpór znajdowała się w odległości 0,5 cm od bocznych krawędzi belki, co zapewniało symetryczne podparcie. Obciążenie przykładano pionowo w środku rozpiętości, zgodnie z zasadami układu trójpunktowego, aż do momentu zniszczenia próbki. Wszystkie badania prowadzono w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze $20 \pm 5^\circ\text{C}$ oraz przy wilgotności względnej powietrza $50 \pm 10\%$.

Badania ściskania wykonano przy prędkości obciążania $1 \pm 0,5$ MPa/s na maszynie o nośności 100 kN.

Testy zginania przeprowadzono w układzie trójpunktowym z wykorzystaniem maszyny o nośności 50 kN. Obciążenie próbki zwiększano w sposób ciągły, ze stałą prędkością $0,25 \pm 0,05$ MPa/s.

Wyniki badań

Wyniki badań mechanicznych próbek konglomeratu żywicznego wykazują zależność pomiędzy strukturą kruszywa, przede wszystkim jego jamistością, a wytrzymałością materiału na ściskanie i zginanie. Probki wykonane z mieszanek kruszywa o najmniejszej jamistości, a więc o największej gęstości nasypowej w stanie zagęszczonym, osiągały największe wartości parametrów mechanicznych.

For proper interpretation of the data, the sample labeling system should be explained. Designations in the format Bx_By_z (e.g., B1_B1_1, B1_B1_2, B1_B1_3) refer to three samples from a given series. The first component (e.g., B1) indicates the number of the conglomerate series used to prepare the sample. The second component (e.g., B1_1, B1_2, B1_3) corresponds to the specific variant of the aggregate mixture. The third component, represented by the digits 1, 2, or 3, identifies successive test repetitions within the same material configuration.

Compressive Strength. The best results (Figure 1, Table 3) were obtained for resin-based conglomerate samples prepared using mixture M3_3, which exhibited the lowest void content (25.035%) and the highest bulk density (1.987 g/cm³). Samples from series B3_B3 achieved an average compressive strength of 64.3 MPa, with a maximum value of 65.2 MPa and a very low standard deviation (0.9 MPa), indicating a homogeneous structure and a high degree of composite consolidation. Good results were also observed in other samples from series B3, clearly demonstrating the beneficial effect of low void content on the material's load-bearing capacity under compression. Samples made with aggregates of higher void content, such as M2_1 (33.712%) and M1_3 (30.461%), showed significantly lower compressive strength. For instance, sample B2_B1 reached an average value of 52.5 MPa, i.e., more than 11 MPa lower compared to B3_B3, despite identical curing conditions and resin content (Table 3).

Figure 1 compares the average compressive strength values of the individual series of resin-based conglomerate samples. A clear increasing trend can be observed in the case of samples containing aggregate with low void content, indicating the significant role of aggregate compaction in shaping the material's resistance to compressive loads.

Photo 1 shows the resin-based conglomerate samples after the compressive strength test. Distinct differences in the failure behavior of the material can be observed depending on the applied aggregate mixture series and its void content. Samples from series B1 and B2 (e.g., B1_B1, B2_B1, B1_B2) exhibit irregular, often branched cracks, as well as local delamination and fragment separation. Such damage indicates the presence of internal voids and low structural cohesion of the material. A different failure pattern was observed in samples from series B3, particularly B3_B3, which were characterized by a uniform and predictable cracking mode. The fracture lines in these samples were more regular and aligned with the direction of the compressive force, indicating good consolidation and high structural homogeneity of the material. It is worth noting that some samples did not show cle-

W celu prawidłowej interpretacji danych należy wyjaśnić sposób oznaczania próbek. Zapisy w formacie Bx_By_z (np. B1_B1_1, B1_B1_2, B1_B1_3) oznaczają trzy próbki z danej serii. Pierwszy człon, taki jak B1, wskazuje numer serii konglomeratu użytego do sporządzenia próbki. Drugi człon, np. B1_1, B1_2, B1_3, odnosi się do konkretnego wariantu mieszanki kruszywa, natomiast trzeci człon, oznaczony cyframi 1, 2 lub 3, wskazuje kolejne powtórzenia badawcze w ramach tej samej konfiguracji materiałowej.

Wytrzymałość na ściskanie. Najlepsze rezultaty (rysunek 1, tabela 3) uzyskano w przypadku próbek konglomeratu wykonanych na bazie mieszanki M3_3, która charakteryzowała się najmniejszą jamistością (25,035%) oraz największą gęstością nasypową (1,987 g/cm³). Próbki z serii B3_B3 osiągnęły średnią wytrzymałość 64,3 MPa, przy maksymalnej wartości 65,2 MPa i bardzo małym odchyleniu standardowym (0,9 MPa), co świadczy o jednorodnej strukturze i wysokim stopniu konsolidacji kompozytu. Dobre wyniki zaobserwowano również w innych próbkach serii B3, co jednoznacznie wskazuje na korzystny wpływ małej jamistości na nośność materiału w warunkach ściskania. Próbki wykonane na kruszywach o większej jamistości, takie jak M2_1 (jamistość 33,712%) oraz M1_3 (30,461%), wykazywały znacznie mniejszą wytrzymałość na ściskanie, np. próbka B2_B1 uzyskała średni wynik 52,5 MPa, tj. o ponad 11 MPa mniejszy w porównaniu z próbką B3_B3, mimo zachowania tych samych warunków utwardzania i zawartości żywicy (tabela 3).

Na rysunku 1 porównano średnie wartości wytrzymałości na ściskanie poszczególnych serii próbek konglomeratu żywicznego. Widoczny jest trend wzrostowy w przypadku próbek zawierających kruszywo o małej jamistości, co wskazuje na istotną rolę zagęszczenia jego struktury w kształtowaniu odporności materiału na obciążenia ściskające.

Fotografia 1 przedstawia próbki konglomeratu po przeprowadzeniu próby ściskania. Widoczne są wyraźne różnice w charakterze zniszczenia materiału w zależności od zastosowanej serii mieszanki kruszywa i jej jamistości. Próbki z serii B1 i B2 (np. B1_B1, B2_B1, B1_B2) mają nieregularne, często rozgałęzione pęknięcia, a miejscami również rozwarstwienia i odspojenia fragmentów. Takie uszkodzenia świadczą o obecności pustek wewnętrznych i małej spójności strukturalnej materiału. Odmienne charakter zniszczenia obserwuje się w próbkach z serii B3, szczególnie w przypadku B3_B3, które charakteryzują się jednolitym, przewidywalnym sposobem pęknięcia. Linie zniszczenia są w tych próbkach bardziej regularne i zgodne z kierunkiem działania siły ściskającej, co

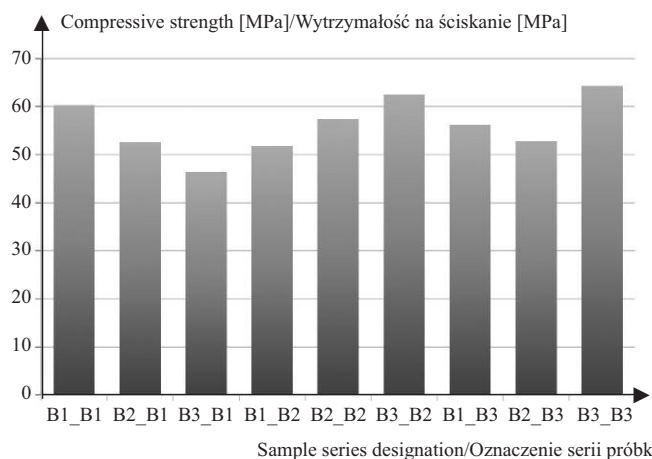


Fig. 1. Average compressive strength of resin conglomerate samples for different mixture compositions

Rys. 1. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek konglomeratu żywicznego w przypadku różnego składu mieszanek

ar signs of surface damage. This resulted from the fact that during strength testing, the testing machine automatically terminated the process once it detected a decrease in load-bearing capacity corresponding to the onset of internal failure. In such cases, damage may not be visible on the sample surface but can occur within its interior, which should be considered when analyzing results and interpreting the failure mechanism.

Flexural Strength. A similar trend was observed in the flexural strength test results (Table 4). The best performance was again recorded for samples from series B3_B3, which achieved an average flexural strength of 26.3 MPa and a maximum value of 27.9 MPa. In this case, a very small variation in measurements was also noted, confirming the high structural uniformity of the composite and the efficient transfer of stresses within its layers. Displacement values corresponding to the maximum loads were also recorded, providing an additional criterion for evaluating sample behavior during bending. The largest displacements were observed in samples with lower internal cohesion, which may indicate reduced material stiffness. Con-

Table 3. Compressive strength results

Tabela 3. Wyniki wytrzymałości na ściskanie

Sample designation/ Oznaczenie próbek	Compressive strength [MPa]/ Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Average value [MPa]/ Wartość średnia [MPa]	Standard deviation [MPa]/ Odchylenie standardowe [MPa]
B1_B1_1	62,6	60,3	2,3
B1_B1_2	60,1		
B1_B1_3	58,1		
B2_B1_1	49,7	52,5	2,8
B2_B1_2	52,5		
B2_B1_3	55,3		
B3_B1_1	51,1	46,4	5,1
B3_B1_2	47,3		
B3_B1_3	40,9		
B1_B2_1	50,6	51,7	3,2
B1_B2_2	49,2		
B1_B2_3	55,2		
B2_B2_1	41,3	57,5	14,5
B2_B2_2	61,8		
B2_B2_3	69,4		
B3_B2_1	62,7	62,5	1,4
B3_B2_2	63,8		
B3_B2_3	61,1		
B1_B3_1	63,0	56,2	6,1
B1_B3_2	51,3		
B1_B3_3	54,2		
B2_B3_1	57,7	52,8	5,8
B2_B3_2	46,5		
B2_B3_3	54,2		
B3_B3_1	63,34	64,3	0,9
B3_B3_2	64,2		
B3_B3_3	65,2		

wskazuje na dobrą konsolidację i dużą jednorodność struktury materiału. Należy podkreślić, że niektóre próbki nie wykazują wyraźnych śladów zniszczenia powierzchniowego. Wynika to z faktu, iż podczas badania wytrzymałości maszyna przerywała test w momencie wykrycia zmniejszenia nośności odpowiadającego początkowi procesu niszczenia wewnętrznego materiału. W takich przypadkach uszkodzenia nie są łatwo widoczne na powierzchni próbki, lecz mogą występować w jej wnętrzu, co należy uwzględnić przy analizie wyników i interpretacji mechanizmu zniszczenia.

Wytrzymałość na zginanie. Analogiczną tendencję zaobserwowano w wynikach badania zginania (tabela 4). Najlepsze rezultaty osiągnęły ponownie próbki z serii B3_B3, uzyskując średnią wartość wytrzymałości 26,3 MPa i maksymalną wartość równą 27,9 MPa. W tym przypadku odnotowano również niewielki rozrzut pomiarów, co potwierdza dużą jednorodność strukturalną kompozytu i efektywne przenoszenie naprężeń w jego warstwach. Zarejestrowano również wartości przemieszczeń odpowiadające maksymalnym obciążeniom, które stanowią dodatkowe kryterium oceny zachowania się próbek podczas zginania. Największe przemieszczenia odnotowano w próbkach o małej spójności wewnętrznej, co może świadczyć o mniejszej sztywności materiału. Z kolei próbki wykonane na bazie mieszanek o dużej jamistości wykazały zauważalny spadek wytrzymałości na zginanie, np. próbka B1_B1, przygotowana

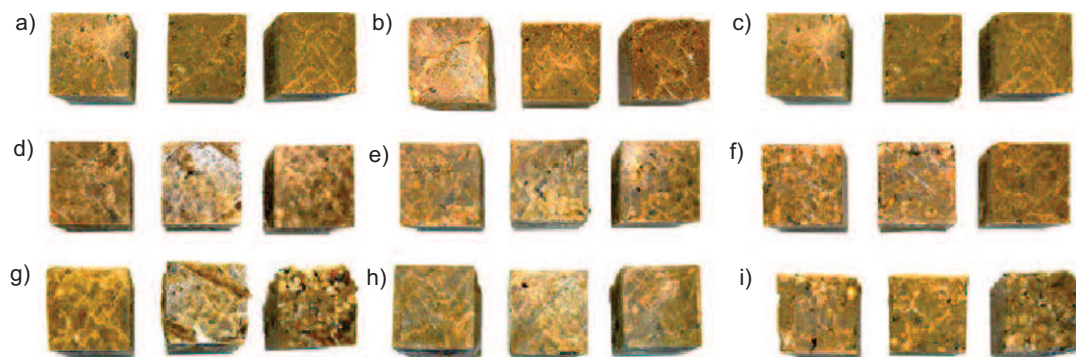


Photo 1. Samples of resin-based conglomerate after the compression test: a) B1_B1; b) B2_B1; c) B3_B1; d) B1_B2; e) B2_B2; f) B3_B2; g) B1_B3; h) B2_B3; i) B3_B3

Fot. 1. Próbki konglomeratu na podstawie żywicznej po próbie ściskania: a) B1_B1; b) B2_B1; c) B3_B1; d) B1_B2; e) B2_B2; f) B3_B2; g) B1_B3; h) B2_B3; i) B3_B3

versely, samples made from mixtures with higher void content exhibited a noticeable decrease in flexural strength—for example, sample B1_B1, prepared from aggregate with a void content of 26.395%, achieved an average result of 20.2 MPa, while sample B2_B1 (void content 33.712%) reached 20.6 MPa.

Figure 2 presents the average flexural strength values of all resin-based conglomerate series. The lowest strength was recorded for series B3_B1, while the highest for B3_B3, indicating that mixtures from series B3 exhibited the best mechanical performance in bending tests. Series B3, based on aggregates with the lowest void content, consistently demonstrated superior properties compared to series B1 and B2, emphasizing the importance of proper aggregate grading in shaping the material's resistance to bending loads. These results confirm that not only the quality of the matrix but, above all, the appropriate composition of the aggregate mixture significantly affects flexural strength—particularly in the context of the material's performance under tensile and compressive stresses.

Photographs showing the samples after the flexural test (Photo 2) illustrate the differences in the nature of damage between the various mixture series. Samples from series B1 and B2 failed in a more irregular manner—the cracks were dispersed, with visible lateral damage and material detachment. In contrast, samples from series B3, particularly B3_B3 (i), exhibited a clean, linear fracture along the axis of the applied load. This indicates high internal cohesion of the material and predictable composite behavior under bending loads.

Table 4. Bending strength results

Tabela 4. Wyniki wytrzymałości na zginanie

Sample designation / Oznaczenie próbek	Flexural strength [MPa] / Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Displacement [mm] / Przemieszczenie [mm]	Average value [MPa] / Wartość średnia [MPa]	Standard deviation [MPa] / Odchylenie standardowe [MPa]
B1_B1_1	21,8	3,3	20,2	2,0
B1_B1_2	20,7	2,9		
B1_B1_3	17,9	2,7		
B2_B1_1	18,9	1,4	20,6	1,7
B2_B1_2	20,6	1,8		
B2_B1_3	22,3	1,7		
B3_B1_1	17,6	1,3	17,6	1,0
B3_B1_2	18,6	1,3		
B3_B1_3	16,5	1,5		
B1_B2_1	21,9	1,9	21,1	1,0
B1_B2_2	21,5	2,9		
B1_B2_3	19,9	1,9		
B2_B2_1	20,9	1,7	21,6	0,8
B2_B2_2	22,5	2,1		
B2_B2_3	21,3	2,1		
B3_B2_1	24,3	1,9	25,0	0,6
B3_B2_2	25,5	2,4		
B3_B2_3	25,3	2,0		
B1_B3_1	25,7	1,7	20,4	4,6
B1_B3_2	17,9	1,9		
B1_B3_3	17,4	1,8		
B2_B3_1	24,1	2,2	21,9	1,9
B2_B3_2	20,4	1,6		
B2_B3_3	21,2	1,4		
B3_B3_1	25,7	1,7	26,3	1,4
B3_B3_2	27,9	1,5		
B3_B3_3	25,3	1,9		

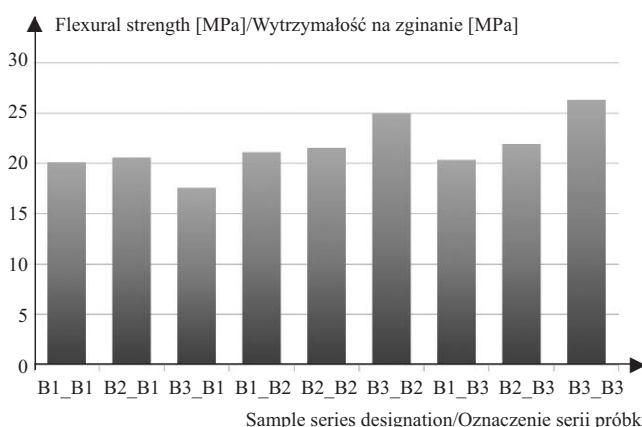


Fig. 2. Average bending strength of resin conglomerate samples for different mixture compositions

Rys. 2. Średnia wytrzymałość na zginanie próbek konglomeratu żywicznego w przypadku różnego składu mieszanek

z kruszywa o jamistości 26,395%, osiągnęła średni wynik 20,2 MPa, natomiast próbka B2_B1 (jamistość 33,712%) uzyskała wartość 20,6 MPa.

Rysunek 2 przedstawia średnie wartości wytrzymałości na zginanie wszystkich serii próbek konglomeratu. Najmniejszą wytrzymałość osiągnęła seria B3_B1, natomiast największą seria B3_B3, co oznacza, że mieszanki z serii B3 charakteryzowały się największymi parametrami mechanicznymi w badaniach zginania. Seria B3, na bazie kruszywa o najmniejszej jamistości, konsekwentnie wykazywała lepsze właściwości niż serie B1 i B2, co podkreśla znaczenie właściwego doboru struktury ziarnowej w kształtowaniu odporności materiału na obciążenia zginające. Wyniki te potwierdzają, że nie tylko jakość osnowy, ale przede wszystkim właściwe skomponowanie mieszanki kruszywa wpływa na odporność na zginanie, szczególnie w kontekście pracy materiału w warunkach naprężeń rozciągających i ściskających.

Fotografie przedstawiające próbki po próbie zginania (fotografia 2) pokazują różnice w charakterze uszkodzeń pomiędzy poszczególnymi seriami mieszanek. Próbkę z serii B1 i B2 uległy uszkodzeniu w sposób bardziej przypadkowy – pęknięcia są rozproszone, z widocznymi uszkodzeniami bocznymi i oderwaniami materiału. W odróżnieniu od nich, próbki z serii B3, a szczególnie B3_B3 (i), charakteryzują się czystym, liniowym pęknięciem wzdłuż osi działania siły, co świadczy o dużej spójności wewnętrznej materiału i przewidywalnym zachowaniu kompozytu w warunkach obciążenia zginającego.

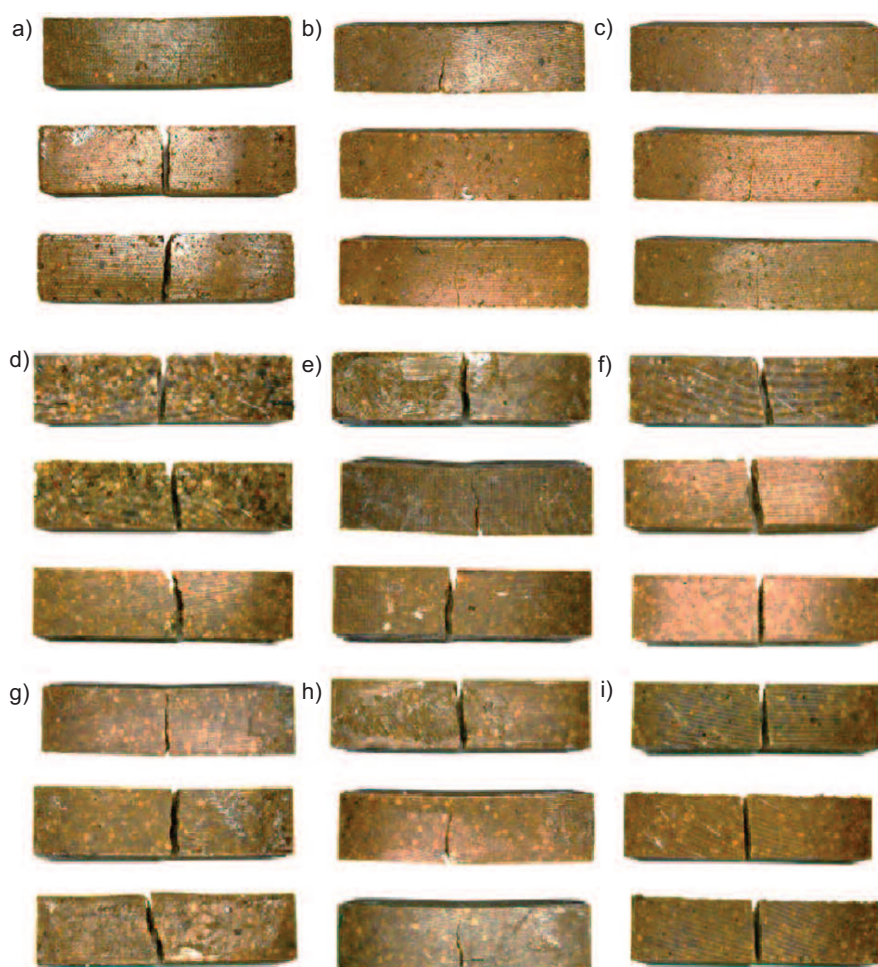


Photo 2. Samples of resin-based conglomerate after the bending test
Fot. 2. Próbkki konglomeratu na osnowie żywicznej po próbie zginania

Summary

The conducted research demonstrated that the proper selection of aggregate grading in resin-based composites has a significant impact on their mechanical properties. The key factor is the void content of the mixture, which directly affects the material's compressive and flexural strength. Resin conglomerate samples made from mixtures with the lowest void content (approximately 25%) achieved the highest strength parameters, clearly confirming that increased compaction and structural consolidation lead to improved mechanical performance of the composite.

The optimized granulometric systems, based on a three-component composition of fractions 0 – 2 mm, 2 – 4 mm, and 4 – 6 mm, contributed to the reduction of internal voids. This enabled effective wetting of the grain surfaces by the resin, resulting in the formation of a dense and homogeneous material structure. As a result, compressive strength exceeding 64 MPa and flexural strength above 26 MPa were achieved, accompanied by a low coefficient of variation in the results. This confirms that precise control of grain composition and the reduction of void content are fundamental factors determining the high quality of mineral-resin composites.

Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach wykazano, że odpowiedni dobór uziarnienia kruszywa w kompozycji na osnowie żywicznej wywiera istotny wpływ na jego właściwości mechaniczne. Kluczową rolę odgrywa jamistość mieszanki, która bezpośrednio przekłada się na wytrzymałość materiału na ściskanie i zginanie. Próbkki konglomeratu wykonane z mieszanek o najmniejszej jamistości (ok. 25%) osiągnęły największe parametry wytrzymałościowe, co jednoznacznie potwierdza, że zwiększony stopień zagęszczenia i konsolidacji struktury skutkuje poprawą właściwości mechanicznych kompozytu.

Zoptymalizowane układy granulometryczne, bazujące na trzyskładnikowej kompozycji frakcji 0 – 2 mm, 2 – 4 mm oraz 4 – 6 mm, przyczyniły się do redukcji pustek wewnętrznych. Umożliwiło to skuteczne zwilżenie powierzchni ziaren przez żywicę, prowadząc do powstania zwartej i jednorodnej struktury materiału. W efekcie uzyskano wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 64 MPa oraz na zginanie większą od 26 MPa, przy jednocześnie małym współczynniku zmienności wyników. Potwierdza to, że precyzyjna kontrola składu ziarnowego oraz ograniczenie jamistości stanowią podstawow-

The use of this type of material in construction can be particularly advantageous in areas requiring high durability, chemical resistance, and aesthetic surface finishing. Resin conglomerates with an optimized aggregate composition can be applied as prefabricated structural elements for reinforcements and rigid casings (e.g., supports, beams, corners), as fillings for expansion and construction joints in industrial floors, as well as structural components operating in chemically aggressive environments. Moreover, these materials represent one of the potential directions for utilizing optimized resin conglomerates as reinforcement for thin-walled cold-formed profiles, which is the subject of our ongoing research analyses.

The optimized resin conglomerate thus constitutes an effective substitute for traditional concrete mixtures in applications where resistance to environmental factors, ease of prefabrication, and precise shaping of element geometry are of key importance.

Received: 14.07.2025

Revised: 01.09.2025

Published: 21.11.2025

we czynniki warunkujące bardzo dobrą jakość kompozytów mineralno-żywicznych.

Zastosowanie tego typu materiałów w budownictwie może być szczególnie korzystne w obszarach wymagających dużej trwałości, odporności chemicznej oraz estetyki wykończenia. Konglomeraty żywiczne, o zoptymalizowanym składzie kruszywa mogą być stosowane jako prefabrykowane elementy konstrukcyjne wzmocnień i obudów stalowych (np. podpory, belki, narożniki), jako wypełnienia szczelin dylatacyjnych i konstrukcyjnych w posadzkach przemysłowych, a także jako elementy konstrukcyjne pracujące w środowisku agresywnym chemicznie. Ponadto materiały te są jednym z potencjalnych kierunków wykorzystania zoptymalizowanego konglomeratu żywicznego jako wzmacnianie cienkościennych profili zimmogiętych, co stanowi przedmiot prowadzonych przez nas bieżących analiz.

Zoptymalizowany konglomerat żywiczny stanowi zatem efektywny zamiennik klasycznych mieszanek betonowych w aplikacjach, gdzie istotne są odporność na działanie czynników środowiskowych, łatwość prefabrykacji oraz precyzyjne kształtowanie geometrii elementów.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 01.09.2025 r.

Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Uddin N. (red.). Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering, Woodhead Publishing, 2013.
- [2] Gibson RF. Principles of Composite Material Mechanics. 2016; 4. wydanie, CRC Press.
- [3] Callister WD, Rethwisch DG. Materials Science and Engineering: An Introduction, 9. wydanie, Wiley, 2014.
- [4] Chawla KK. Composite Materials: Science and Engineering. 2012; 3. wydanie, Springer.
- [5] Blagojević J, Stojanović B, Radojević Z, et al. A Review to Cast Polymer Composite Materials for Interior Environments, Applied Engineering Letters. 2020; Vol. 5, No. 1.
- [6] Sałasińska K, Ryszkowska J. (2015). Właściwości kompozytów polimerowo-drzewnych wykonanych z odpadów pozyskanych z przemysłu meblarskiego oraz budowlanego. Kompozyty (Composites), 15 (2), 2009.
- [7] González C, Vilatela JJ, Molina-Aldareguia JM, Lopes CS, LLorca J. Structural composites for multifunctional applications: current challenges and future trends. Progress in Materials Science, Elsevier, 2017.
- [8] Li X, Zhang J, Zhang L, Ruiz de Luzuriaga A, Rekondo A, Wang D.-Y. Recyclable flame-retardant epoxy composites based on disulfide bonds: Flammability and recyclability. Composites Communications, Elsevier, 2021.
- [9] PSA Laboratory Furniture, Epoxy Resin Countertops, <https://www.psa-laboratory-furniture.com/epoxy-resin-countertops>, dostęp: 16.05.2025.
- [10] Stonhard, Epoxy Flooring Systems, <https://www.stonhard.com/products/epoxy-flooring/>, dostęp: 16.05.2025.
- [11] Concord Terrazzo Company, TERRAZZO Brand Epoxy Resin, <https://terrazzo.com/epoxy-resin/>, dostęp: 16.05.2025.
- [12] Abdulbaqi AS, Alsultan QH, Panesai IY, et al. Innovative Composite Materials for Improving Structural Integrity and Longevity in Civil Engineering Applications, KHWARIZMIA. 2023.
- [13] Yin J, Zhang J, Wang T, Wang W. Influence of Aggregate Moisture Content on the Mechanical Properties of Resin Mineral Composite, Polymer Composites, Wiley, 2016.
- [14] Abdellah MY, Abdelhaleem A, Alnaser IA, Abdel-Jaber GT, Abdal-hay A. Flexural, Compression and Fracture Properties of Epoxy Granite as a Cost-Effective Structural Material: New Machine Element Foundation, AIMS Materials Science, AIMS Press, 2021.
- [15] Logoń D, Schabowicz K, Wróblewski K. Assessment of the Mechanical Properties of ESD Pseudoplastic Resins for Joints in Working Elements of Concrete Structures. Materials, MDPI. 2020; 13 (11).
- [16] Zheng S, Lucas PA. Understanding Chemical Resistance in Epoxy Systems, Coatings World, 2020.
- [17] [www.https://www.techniart.pl/](https://www.techniart.pl/), dostęp: 16.05.2025.
- [18] Gorzelak G, Halbiniak J, Langier B. Przewodnik do technologii betonów i zapraw, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa, 2005.
- [19] Jamróży Z. Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2010.
- [20] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw – Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego – Metoda przesiewania, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2012.
- [21] PN-EN 1097-3:2000 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2000.
- [22] Major M, Kalinowski J, Kosiń M. Wytrzymałość na rozciąganie elementów drukowanych z materiałów ABS, PA6+CF15, PA12+CF15. Materiały Budowlane. 2022; 10: 82 ÷ 85.
- [23] Major M, Kalinowski J, Kosiń M. Właściwości mechaniczne ceowych profili zimmogiętych wzmocnionych przestrzennymi wkładkami wykonanymi w technologii druku 3D, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. 2025.
- [24] PN-EN 14617-15:2005, Konglomeraty kamienne – Metody badań – Część 15: Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2005.
- [25] PN-EN 14617-2:2016-07E, Konglomeraty kamienne – Metody badań – Część 2: Oznaczanie wytrzymałości na zginanie.