

MSc Eng. Elżbieta Kuźmińska^{1*)}

ORCID: 0000-0002-9507-9756

PhD Eng. Mateusz Zakrzewski¹⁾

ORCID: 0000-0002-0419-5058

Assoc. Prof. PhD DSc Eng. Jacek Domski, prof. PK¹⁾

ORCID: 0000-0002-5112-1035

Analysis of selected properties of cement composites based on polystyrene waste

Analiza wybranych właściwości kompozytów cementowych zawierających odpady styropianowe

DOI: 10.15199/33.2025.07.07

Abstract. The aim of this study was to evaluate the influence of the type of polystyrene regranulate and the composition of the cement mixture on the mechanical properties of lightweight cementitious composites. Three types of regranulates were considered: a mixture of EPS/XPS (material A) and two variants of XPS (materials B and C), applied in three formulations (I–III), differing in their binder and waste sand content. Due to the limited number of global studies addressing the use of XPS regranulates in concrete mixtures, particular attention was given to their behavior within the cementitious matrix. The tests were conducted on cubic samples with a side length of 150 mm and cylindrical specimens with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm, in accordance with PN-EN 12390-3. The best mechanical performance was achieved by composites containing XPS and sand. Mixtures incorporating material A exhibited lower strength and higher deformability. The results highlight the significant potential of XPS regranulate as a component of lightweight cementitious composites

Keywords: XPS composite; XPS regranulate; mechanical properties.

Streszczenie. Celem pracy prezentowanej w artykule była ocena wpływu rodzaju regranulatu polistyrenowego oraz składu mieszanki cementowej na właściwości mechaniczne lekkich kompozytów cementowych. Uwzględniono trzy typy regranulatów: mieszaninę EPS/XPS (materiał A) oraz dwa warianty XPS (materiały B i C), stosowane w trzech recepturach (I–III), różniących się zawartością spoiwa i piasku odpadowego. Ze względu na ograniczoną liczbę badań w literaturze światowej dotyczących zastosowania regranulatów XPS w mieszankach betonowych, szczególną uwagę poświęcono jego zachowaniu w kompozycie cementowym. Badania przeprowadzono na próbkach sześciennych o długości boku 150 mm oraz walcach o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, zgodnie z PN-EN 12390-3. Najlepsze parametry wytrzymałościowe osiągnęły kompozyty z XPS i dodatkiem piasku. Mieszanki z materiałem A wykazały niższą wytrzymałość i większą odkształcalność. Wyniki wskazują na istotny potencjał regranulatu XPS jako składnika lekkich kompozytów cementowych.

Słowa kluczowe: kompozyt XPS; regranulat XPS; właściwości mechaniczne.

In recent years, there has been a growing interest in the use of polystyrene waste as components of cement composites, particularly for the production of lightweight concrete. To date, research has focused almost exclusively on expanded polystyrene (EPS) as a lightweight aggregate for concrete, demonstrating its positive impact on reducing bulk density, improving thermal insulation, and lowering the self-weight of structural elements [1 ÷ 5].

Analyses of mechanical parameters indicate that increasing the share of EPS in concrete leads to a significant decrease in compressive strength and elastic modulus [3, 6 ÷ 10]. At the same time, increased deformability and resistance to dynamic loads have been observed, which may be beneficial in non-structural construction applications [11 ÷ 13]. Studies have also been conducted on the effects of EPS granule grading, spatial distribution, and surface properties on the microstructure of the cement matrix and the interfacial transition zone (ITZ) [2, 14 ÷ 19].

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie wykorzystaniem odpadów polistyrenowych jako składników kompozytów cementowych, szczególnie do wytwarzania lekkich betonów. Dotychczasowe badania skupiały się niemal wyłącznie na polistyrenie ekspandowanym (EPS) jako lekkim kruszywie do betonu, wykazując jego pozytywny wpływ na redukcję gęstości objętościowej, poprawę izolacyjności cieplnej oraz zmniejszenie ciężaru własnego elementów konstrukcyjnych [1 ÷ 5].

Analizy parametrów mechanicznych wskazują, że zwiększenie udziału EPS w betonie powoduje istotny spadek wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości [3, 6 ÷ 10]. Jednocześnie zauważono wzrost podatności na odkształcenia i odporności na działania dynamiczne, co może być korzystne w niekonstrukcyjnych zastosowaniach budowlanych [11 ÷ 13]. Przeprowadzono także badania nad wpływem uziarnienia, rozkładu przestrzennego i właściwości powierzchniowych granulek EPS na mikrostrukturę matrycy cementowej oraz strefy przejściowej (ITZ) [2, 14 ÷ 19].

¹⁾ Koszalin University of Technology

^{*)} Correspondence address: elzbieta.kuzminska@tu.koszalin.pl

Many studies have also highlighted the negative impact of EPS on the rheological properties and durability of the mixture, including increased susceptibility to shrinkage and microcracking [2, 17, 19 ÷ 22]. Shrinkage in composites with EPS can be several times higher than in conventional concretes, which poses a challenge in the context of long-term deformability. Additional difficulties include the segregation of EPS particles in the mix and the weakening of the aggregate – matrix contact zone [14, 17, 23 ÷ 26].

Previous works cover a broad range of analyses concerning the mechanical, thermal, microstructural, and durability-related properties of EPS concretes [2, 5, 14, 15, 18, 23, 24]. Mathematical models have also been developed to describe the behavior of EPS-based concrete under uniaxial compression and the relationships between strength, density, and aggregate content [1, 8 ÷ 10, 16].

Despite the large number of publications concerning EPS, there is a lack of systematic research in the scientific literature on the use of extruded polystyrene (XPS) in similar applications. Although XPS has a comparable chemical composition, it differs significantly from EPS in pore structure (closed), higher bulk density, lower water absorption, and other physical properties. These differences may lead to distinct mechanical and structural effects, but they have not yet been sufficiently investigated in the context of cement composites.

Materials

Polystyrene regranulates. The study used three types of industrial polystyrene regranulates, which differed in both composition and physical properties. Material A was a mixture of EPS and XPS regranulate, while materials B and C were variants of XPS regranulate, with material C additionally having a modified grain geometry [25, 27].

The source materials included post-production waste and residues from construction sites, mainly originating from demolition works and cutting of polystyrene boards. The processing involved sorting, mechanical grinding, removal of impurities, and neutralization of electrostatic charges. The resulting regranulates had a grain size of 2–5 mm, with differences in particle structure visible in Photograph 1.

W wielu opracowaniach podkreślano negatywny wpływ EPS na właściwości reologiczne i trwałość mieszanki, w tym większą podatność na skurcz oraz mikropeknięcie [2, 17, 19 ÷ 22]. Skurcz w kompozytach z EPS może być nawet kilkakrotnie większy niż w betonach konwencjonalnych, co stanowi wyzwanie w kontekście odkształcalności długoterminowej. Dodatkowe trudności stwarza sedymentacja cząstek EPS w mieszaninie oraz osłabienie strefy kontaktu kruszywo – matryca [14, 17, 23 ÷ 26].

Dotychczasowe prace obejmują szeroki zakres analiz dotyczących właściwości mechanicznych, cieplnych, mikrostrukturalnych i trwałości betonów z EPS [2, 5, 14, 15, 18, 23, 24]. Opracowano również modele matematyczne opisujące zachowanie betonu z EPS w warunkach jednoosiowego ściskania oraz zależności wytrzymałości od gęstości i zawartości kruszywa [1, 8 ÷ 10, 16].

Pomimo dużej liczby publikacji dotyczących EPS, w literaturze naukowej brakuje systematycznych badań nad zastosowaniem polistyrenu ekstrudowanego (XPS) w analogicznym zastosowaniu. XPS, mimo zbliżonego składu chemicznego, różni się istotnie od EPS strukturą porów (zamkniętych), większą gęstością objętościową, mniejszą nasiąkliwością i innymi właściwościami fizycznymi. Te różnice mogą prowadzić do odmiennych efektów mechanicznych i strukturalnych, ale dotychczas nie były one wystarczająco przebadane w kontekście kompozytów cementowych.

Materiały

Regranulaty polistyrenowe. W badaniach zastosowano trzy rodzaje przemysłowych regranulatów polistyrenowych, które różniły się zarówno składem, jak i właściwościami fizycznymi. Materiał A stanowił mieszaninę regranulatu EPS i XPS, natomiast materiały B oraz C to odmiany regranulatu XPS, przy czym materiał C miał dodatkowo zmodyfikowaną strukturę geometryczną ziaren [25, 27].

Źródłem surowców były odpady poprodukcyjne oraz pozostałości z placów budów, głównie pochodzące z rozbiórki obiektów i cięcia płyt styropianowych. Proces przetwórczy obejmował etapy segregacji, mechanicznego rozdrabniania, usuwania zanieczyszczeń oraz neutralizacji ładunków elektrostatycznych. Uzyskane regranulaty charakteryzowały się uziarnieniem 2 – 5 mm, przy czym różnice w strukturze cząstek widoczne są na fotografii 1. Materiał A zawierał ziarna nieregul-



Photo 1. Structure of polystyrene regranulate particles: a) material A; b) material B; material C
Fot. 1. Struktura cząstek regranulatu styropianowego: a) materiału A; b) materiału B; materiału C

Material A contained irregular grains with sharp edges and varying sizes. In the case of material B, the grains were more uniform, with a compact, less porous structure. Material C was the most homogeneous, with slightly flattened particles of relatively regular shape and compact, low-porosity surfaces.

Basic physical properties of the analyzed regranulates were determined, i.e., bulk density and thermal conductivity. Material A had the lowest bulk density, amounting to 18 kg/m^3 . Material B reached 28 kg/m^3 , and material C – 26 kg/m^3 . These differences resulted primarily from the share of the closed-cell XPS structure and the degree of fragmentation of the material [18, 25, 28]. The thermal conductivity coefficient λ of all tested regranulates was approximately $0.038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, indicating their good thermal insulation properties and confirming their suitability for improving the insulating performance of cement composites [4, 16, 18, 28, 29].

Hydroclassified sand. The study used waste sand with a grain size of $0.125 - 2.0 \text{ mm}$, which is a by-product of the hydroclassification process, in which fine fractions are separated during the washing of coarse aggregates. The use of this material aimed to supplement the shortage of fine fractions in the polystyrene regranulate. The addition of sand (Figure 1b) improved the grain size distribution of the mix, increased its compaction, and positively affected bonding with the cement paste [3, 8, 9, 16, 36]. In the conditions of the Pomeranian region, characterized by limited access to coarse aggregate deposits and the simultaneous accumulation of large amounts of waste sand in gravel pit stockpiles, it becomes reasonable to seek possibilities for their reuse. The application of such material in building composites is a justified solution from both an economic and environmental perspective. The use of secondary aggregate allows for the reduction of primary raw material exploitation and supports local waste material management systems, thus contributing to the implementation of sustainable construction principles [13, 27, 32, 37 ÷ 39].

Grain size curves. To evaluate the granulometric structure, a sieve analysis was performed, and the results were compared with the boundary curves recommended in the PN-B-06265:2022-08 standard (Figure 1a). All three tested materials showed significant deviations from the recommendations, especially concerning fine fractions (below 2 mm). A clear deficit of such grains was observed, which disrupted the continuity of the granular skeleton and could negatively affect the spatial structure of the mix and the mechanical properties of the hardened composite [6, 18, 23, 30, 31].

larne, o ostrych krawędziach i zróżnicowanej wielkości. W przypadku materiału B uzyskano cząstki bardziej jednorodne, o zwartej, mniej porowatej budowie. Największą jednorodnością charakteryzował się materiał C, którego ziarna przyjmowały formę lekko spłaszczonych cząstek o stosunkowo regularnym kształcie i zwartej, mało porowatej powierzchni.

Określono podstawowe właściwości fizyczne analizowanych regranulatów, tj. gęstość nasypową oraz współczynnik przewodzenia ciepła. Materiał A cechował się najmniejszą gęstością nasypową, wynoszącą 18 kg/m^3 . Materiał B osiągał wartość 28 kg/m^3 , natomiast materiał C – 26 kg/m^3 . Zróżnicowanie to wynikało przede wszystkim z udziału zamkniętokomórkowej struktury XPS oraz stopnia rozdrobnienia tworzywa [18, 25, 28]. Współczynnik przewodzenia ciepła λ wszystkich badanych regranulatów wynosił ok. $0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, co wskazuje na ich dobre właściwości termoizolacyjne i potwierdza ich przydatność do poprawy izolacyjności kompozytów cementowych [4, 16, 18, 28, 29].

Piasek hydroklasyfikowany. W badaniach wykorzystano piasek odpadowy o uziarnieniu $0,125 - 2,0 \text{ mm}$, który stanowi produkt uboczny z procesu hydroklasyfikacji, w którym oddziela się drobne frakcje podczas płukania kruszyw grubych. Zastosowanie tego materiału miało na celu uzupełnienie deficytu frakcji drobnych w regranulacie polistyrenowym. Dodatek piasku (rysunek 1b) poprawiał strukturę uziarnienia mieszanki, zwiększał jej zagęszczenie oraz korzystnie wpływał na zespolenie z zaczynem cementowym [3, 8, 9, 16, 36]. W warunkach regionu Pomorza, charakteryzującego się ograniczoną dostępnością złóż kruszyw grubych oraz jednoczesnym nagromadzeniem znacznych ilości piasków odpadowych w hałdach przyżwirowych, zasadne staje się poszukiwanie możliwości ich ponownego wykorzystania.

Aplikacja tego typu materiału w kompozytach budowlanych stanowi uzasadnione rozwiązanie zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i środowiskowej. Wykorzystanie kruszywa wtórnego umożliwia ograniczenie eksploatacji surowców pierwotnych oraz wspiera lokalne systemy gospodarki materiałami odpadowymi, przyczyniając się tym samym do realizacji założeń zrównoważonego budownictwa [13, 27, 32, 37 ÷ 39].

Krzywe uziarnienia. W celu oceny struktury granulometrycznej przeprowadzono analizę przesiewową, której wyniki zestawiono z krzywymi granicznymi zalecanymi w PN-B-06265:2022-08 (rysunek 1a). Wszystkie trzy badane materiały wykazywały istotne odstępstwa od zaleceń, szczególnie dotyczące frakcji drobnych (poniżej 2 mm). Widoczny był wyraźny deficyt ziaren tej wielkości, który skutkował zakłóceniem ciągłości szkieletu ziarnistego i mógł negatywnie wpływać na strukturę przestrzenną mieszanki oraz właściwości mechaniczne utwardzonego kompozytu cementowego [6, 18, 23, 30, 31].

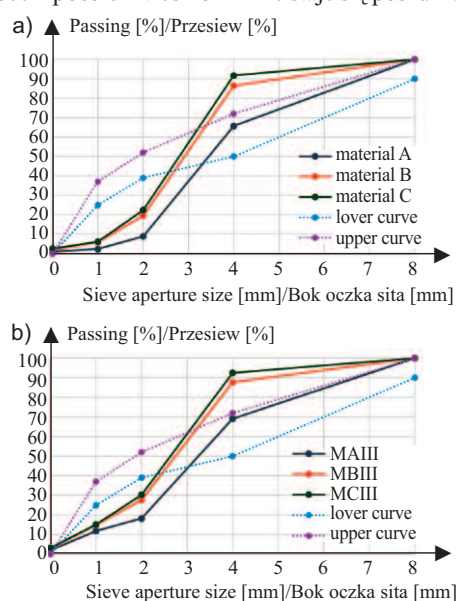


Fig. 1. Particle size distribution curve of the materials in reference to the boundary curves according to PN-B-06265:2022-08: a) materials A, B and C; b) materials A, B, and C with sand
Rys. 1. Krzywa uziarnienia materiałów w odniesieniu do krzywych granicznych zgodnych z normą PN-B-06265: 2022-08: a) materiałów A, B i C; b) materiałów A, B oraz C wraz z piaskiem

The introduction of a fine-grained component, such as hydroclassified sand (Figure 1b), compensates for the lack of the smallest fractions and improves the degree of filling between particles. At the same time, it should be noted that the morphology of the regranulate particles, their shape, and surface structure significantly influence the quality of the bond with the cement paste [17, 23, 25, 32 ÷ 34].

Binder. The study used a ready-made component consisting of Portland cement with additives and admixtures, under the trade name Lafarge iX CPP20. It is classified as a hydraulic binder for semi-dry cement screeds, in accordance with the requirements of PN-EN 13813. The plasticizing and retarding additives contained in the binder improve workability, ensuring adequate processing time and good rheological properties. According to [35], this material can be processed mechanically using machines for supplying semi-dry cement mixes (so-called "mixokrets"), which makes it suitable for laying screeds over large working areas.

Mix Composition

As part of the study, three cement mix formulations were designed, labeled as Mix I, Mix II, and Mix III. Each of them was prepared with the use of one of three types of polystyrene regranulate (material A, B, and C), resulting in a total of nine combinations (Table 1). The differences between the formulations concerned the content of iX CPP20 binder, the presence of sand addition, and the amount of waste materials (XPS/EPS) [6, 16, 25]. The composition of individual mixes per 1 m³ of mixture is presented in Table 1.

In Mix I, the iX CPP20 binder was used in the amount of 300 kg/m³, whereas Mix II was characterized by a reduced binder content of iX CPP20 (240 kg/m³). In Mix III, the iX CPP20 binder was applied in the same amount as in Mix II, but the composition was supplemented with waste sand in the amount of 193.5 kg/m³. The components were selected to obtain varied physical and mechanical properties while maintaining similar consistency and preparation conditions [5, 7, 25].

Each component combination was prepared under laboratory conditions. The materials for mixing were weighed using precision laboratory scales, and the mixing process was carried out mechanically using a BP-135 mixer. The proportions were determined experimentally based on preliminary tests, considering the consistency of the mixture, uniform distribution of

Wprowadzenie komponentu drobnopiękistego, jakim jest piasek hydroklastyfikowany (rysunek 1b), uzupełnia niedobór najmniejszych frakcji oraz poprawia stopień wypełnienia przestrzeni międzyziarnowych. Jednocześnie należy zauważyć, że morfologia cząstek regranulatu, ich kształt oraz struktura powierzchniowa mają istotny wpływ na jakość połączenia z zaczynem cementowym [17, 23, 25, 32 ÷ 34].

Spoivo. W badaniach zastosowano gotowy komponent składający się z cementu portlandzkiego wraz z dodatkami i domieszkami, pod nazwą Lafarge iX CPP20. Jest on klasyfikowany jako spoiwo hydrauliczne do półsuchych jastrychów cementowych, zgodne z wymaganiami normy PN-EN 13813. Zawarte w spoiwie dodatki uplastyczniające i opóźniające wiązanie wpływają na poprawę właściwości roboczych, zapewniając odpowiedni czas obróbki i dobre właściwości reologiczne. Zgodnie z [35], materiał ten może być przetwarzany mechanicznie za pomocą agregatów do podawania półsuchych mieszanek cementowych (miksokretów). Dzięki temu jest odpowiedni do realizacji podkładów na dużych powierzchniach roboczych.

Skład mieszanki

W ramach badań zaprojektowano trzy receptury mieszanek cementowych, oznaczone jako Mieszanka I, Mieszanka II oraz Mieszanka III. Każda z nich została przygotowana z udziałem jednego z trzech regranulatów polistyrenowych (materiał A, B i C), co dało łącznie dziewięć kombinacji (tabela 1). Różnice pomiędzy recepturami dotyczyły udziału spoiwa iX CPP20, obecności dodatku piasku oraz ilości materiałów odpadowych (XPS/EPS) [6, 16, 25]. Skład poszczególnych mieszanek w przeliczeniu na 1 m³ mieszanki, przedstawiono w tabeli 1.

W Mieszance I zastosowano spoiwo iX CPP20 w ilości 300 kg/m³, natomiast Mieszanka II charakteryzowała się obniżonym udziałem spoiwa iX CPP20 (240 kg/m³). W Mieszance III zastosowano spoiwo iX CPP20 w takiej samej ilości, jak w Mieszance II, ale skład uzupełniono o piasek odpadowy w ilości 193,5 kg/m³. Składniki zostały dobrane tak, aby uzyskać zróżnicowane właściwości fizyczno-mechaniczne z zachowaniem podobnej konsystencji i warunków przygotowania [5, 7, 25].

Każda kombinacja składników została przygotowana w warunkach laboratoryjnych. Materiały do zarobów odważono z użyciem precyzyjnych wag laboratoryjnych, a mieszanie prowadzono mechanicznie w mieszarce typu BP-135. Proporcje zostały ustalone eksperymentalnie na podstawie badań wstępnych, uwzględniających konsystencję mieszanki, jednorodność rozprowadzenia

Table 1. Composition of cement mixes per 1 m³
Tabela 1. Skład mieszanek cementowych na 1 m³

MIX type/ Nazwa	Component/ Składnik	Quantity per 1 m ³ [kg]/Ilość składników na 1 m ³ [kg]	Sample designation/ Oznaczenie próbek
Mix I/ Mieszanka I	Lafarge iX CPP20 binder/spoiwo	300,00	
	Lafarge iX CPP20		
	water/woda	97,00	MAI
	material A	22,30	MBI
Mix II/ Mieszanka II	material B	34,69	
	material C	32,21	MCI
	Lafarge iX CPP20 binder/spoiwo	300,00	
	Lafarge iX CPP20		
Mix II/ Mieszanka II	water/woda	90,00	MAII
	material A	22,50	MBII
	material B	35,00	
	material C	32,50	MCII
Mix III/ Mieszanka III	Lafarge iX CPP20 binder/spoiwo	300,00	
	Lafarge iX CPP20		
	water/woda	90,00	
	hydroclassified sand/piasek hydro klasyfikowany	193,50	
Mix III/ Mieszanka III	material A	19,20	MAIII
	material B	29,87	MBIII
	material C	27,73	MCIII

lightweight aggregate, and minimization of material segregation [14, 17, 31, 40]. The test samples were cured under uniform laboratory conditions (20°C and 50% RH) for a period of 28 days.

Experimental results

Sample Density. Density measurements were carried out on cubic samples after 28 days of curing under laboratory conditions (20°C, RH 50%) in a state of natural moisture. The results showed a significant influence of both the type of regranulate used and the mix composition on the density of the composites. The data were verified using the Dixon test. No measurements were rejected. The lowest density was recorded in samples from group II – ranging from 287 kg/m³ (MA II) to 402 kg/m³ (MCII), which is associated with the reduced binder content and the absence of sand. In contrast, the highest densities were obtained in group III samples containing sand: 507 kg/m³ (MA III), 617 kg/m³ (MBIII), and 707 kg/m³ (MCIII). The highest density was achieved by mix MCIII, containing XPS regranulate and hydroclassified sand, indicating a beneficial effect of the mineral addition on the improvement of uniformity and compaction of the composite structure. Table 2 presents the density test results for individual samples.

Table 2. Summary of densities of cubic samples

Tabela 2. Zestawienie gęstości próbek sześciennych

Sample group/ Grupa próbek	Density [kg/m ³]/Gęstość [kg/m ³]			Standard deviation σ [kg/m ³]/ Odchylenie standardowe σ [kg/m ³]			Coefficient of variation v [%]/ Wskaźnik zmienności v [%]		
	material A/ material A	material B/ material B	material C/ material C	material A/ material A	material B/ material B	material C/ material C	material A/ material A	material B/ material B	material C/ material C
I	363	386	498	20,9	13,2	3,6	5,7	3,4	0,7
II	287	342	404	9,1	23,6	25,7	3,2	6,9	6,0
III	507	617	707	16,6	10,6	19,2	3,3	1,7	2,7

Thermal Conductivity. Selected cement composites with the addition of polystyrene regranulate were subjected to thermal conductivity (λ) testing. The measurement was carried out using a HFM 436 apparatus (Photo 2). Tests were conducted on four variants, with six samples for each mix: MAI, MA III, MCI, and MCIII, using samples of dimensions 30 × 30 × 5 cm. The aim of the tests was to determine the influence of composite composition (including the type of regranulate and sand) on the material's ability to conduct heat. Samples with a high content of iX CPP20 binder (MAI, MCI) were compared with those containing an additional sand component (MA III, MCIII). The lowest thermal conductivity value, 0.342 W/(m·K), was obtained for sample MA III. This sample contained a mixture of EPS and XPS regranulates, a reduced amount of iX CPP20 binder, and an addition of sand, which resulted in a clearly decreased thermal conductivity. A slightly higher value was recorded for sample MCIII (0.382 W/(m·K)). In both

kruszywa lekkiego oraz minimalizację segregacji materiału [14, 17, 31, 40]. Próbkę do badań dojrzewały w jednakowych warunkach laboratoryjnych (20°C i 50% RH) przez okres 28 dni.

Wyniki badań

Gęstość próbek. Pomiar gęstości przeprowadzono na próbkach sześciennych po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych (20°C, RH 50%) w stanie wilgotności naturalnej. Wyniki wykazały istotny wpływ zarówno rodzaju zastosowanego regranulatu, jak i składu mieszanki na gęstość kompozytów. Dane zweryfikowano testem Dixona. Nie odrzucono żadnego pomiaru. Najmniejszą gęstość odnotowano w próbkach z grupy II – od 287 kg/m³ (MAII) do 402 kg/m³ (MCII), co wiąże się ze zmniejszoną zawartością spoiwa i brakiem dodatku piasku, natomiast największą uzyskano w przypadku próbek grupy III, zawierających piasek: 507 kg/m³ (MAIII), 617 kg/m³ (MBIII) i 707 kg/m³ (MCIII). Największą gęstość osiągnęła mieszanka MCIII, zawierająca regranulat XPS i piasek hydroklasyfikowany, co wskazuje na korzystny wpływ dodatku mineralnego na poprawę jednorodności i zagęszczenia struktury kompozytu. W tabeli 2 zamieszczono wyniki badania gęstości poszczególnych próbek.

Współczynnik przewodzenia ciepła. Wybrane kompozyty cementowe z dodatkiem regranulatu polistyrenowego poddano badaniom współczynnika przewodzenia ciepła λ . Pomiar przeprowadzono przy użyciu aparatu HFM 436 (fotografia 2). Badania wykonano na czterech wariantach, po sześć prób z każdej mieszanki: MAI, MAIII, MCI oraz MCIII, wykorzystując próbki o wymiarach 30 × 30 × 5 cm. Celem testów było określenie wpływu składu kompozytu (w tym rodzaju regranulatu i piasku) na zdolność materiału do przewodzenia ciepła. Porównano próbki z dużą zawartością spoiwa iX CPP20 (MAI, MCI) z tymi, które zawierały dodatek piasku (MAIII, MCIII). Najmniejszą wartość współczynnika przewodzenia ciepła wynoszącą 0,342 W/(m·K), uzyskano w przypadku próbki MAIII. Próbkę ta zawierała mieszaninę regranulatów EPS i XPS oraz zmniejszoną zawartość spoiwa iX CPP20 z dodatkiem piasku, co skutkowało wyraźnie zmniejszoną przewodnością cieplną. Niewiele większą wartość odnotowano w przypadku próbek



Photo 2. Thermal conductivity test using the NETZSCH HFM 436 apparatus

Fot. 2. Badanie współczynnika przewodzenia ciepła na aparacie NETZSCH HFM 436

cases, the addition of sand and reduced cement content limited the heat conduction efficiency of the composite. Higher λ values were found in samples MAI and MCI, amounting to 0.522 W/(m·K) and 0.528 W/(m·K), respectively, which can be attributed to the increased amount of iX CPP20 binder (by 25%). Differences between the samples containing EPS/XPS regranulate and pure XPS were minor. This suggests that the dominant factor increasing thermal conductivity was primarily the higher binder content.

Compressive Strength of Cubic Samples. The compressive strength tests of the composites were carried out in accordance with the PN-EN 12390-3 standard on cubic samples with dimensions of 150 × 150 × 150 mm, after 28 days of curing. Three types of polystyrene materials were tested: A – a mixture of EPS/XPS, B – high-density XPS, and C – XPS. For each material type, three mix variants were prepared, designated as I, II, and III, with variant III containing an additional sand component. Each set included six samples. The obtained strength values were verified using the Dixon test, which required the rejection of two results in the case of composite MA II.

The analysis of the data presented in Figure 2 showed that the addition of sand significantly improved the mechanical properties of the tested composites. The highest values were obtained for all type III mixes. The maximum stress value in the MCIII composite (XPS) was 1.49 MPa, with a standard deviation of 0.14 MPa. For the MBIII composite (high-density XPS), these values were 1.07 MPa and 0.40 MPa, respectively, and for the MA III composite (EPS/XPS), which was characterized by the greatest heterogeneity, clearly lower results were recorded: 0.49 MPa and 0.06 MPa.

Composite variants without sand (I and II) showed significantly lower compressive strength, regardless of the type of regranulate used. This was particularly evident in sample MA II (EPS/XPS with reduced iX CPP20 binder content), where the compressive stress reached only 0.22 MPa. Table 3 presents the values of standard deviation (σ) and coefficient of variation (v) for the average compressive stress results obtained in the cubic samples of the three materials: A, B, and C, in three mix variants: MI, MII, and MIII.

When comparing composites with added sand to their counterparts without this component, an increase in compressive strength was observed – especially for material C (XPS), where the increase in ultimate stress in composite MCIII was approximately 91.2% compared to MCII. The strengthening effect of the fine-grained fraction, represented by sand, is also confirmed in the literature on lightweight concretes [1, 8, 16, 18, 41].

MCIII (0,382 W/(m·K)). W obu przypadkach dodatek piasku oraz redukcja udziału cementu ograniczyły efektywność przewodzenia ciepła przez kompozyt. Większe wartości λ stwierdzono w próbkach MAI i MCI, odpowiednio 0,522 W/(m·K) i 0,528 W/(m·K), co można przypisać zwiększonemu udziałowi spoiwa iX CPP20 (o 25%). Różnice pomiędzy próbkami z regranulatem EPS/XPS i samym XPS były niewielkie. Sugeruje to, że dominującym czynnikiem zwiększającym przewodność cieplną była przede wszystkim większa ilość spoiwa.

Wytrzymałość na ściskanie próbek sześciennych. Badania wytrzymałości na ściskanie kompozytów przeprowadzono wg normy PN-EN 12390-3 na próbkach sześciennych o wymiarach 150×150×150 mm, po 28 dniach dojrzewania. Testom poddano trzy rodzaje materiałów polistyrenowych: A – mieszanina EPS/XPS, B – XPS o dużej gęstości oraz C – XPS. W przypadku każdego rodzaju materiału przygotowano trzy warianty mieszanek, oznaczone jako I, II i III, przy czym wariant III zawierał dodatek piasku. Każdy zestaw obejmował sześć próbek. Uzyskane wartości wytrzymałości zweryfikowano testem Dixona, po którym konieczne było odrzucenie dwóch wyników w przypadku kompozytu MAII.

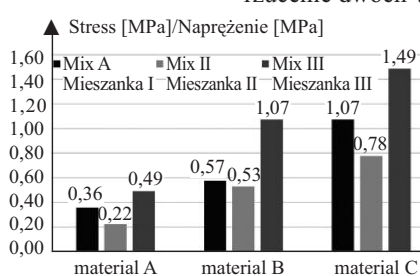


Fig. 2. Compressive strength
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie

Analiza danych przedstawionych na rysunku 2 wykazała, że dodatek piasku znacznie poprawia właściwości mechaniczne badanych kompozytów. Największe wartości uzyskano w przypadku wszystkich mieszanek typu III. Maksymalna wartość napężenia w kompozycie MCIII (XPS) wyniosła 1,49 MPa, przy odchyleniu standardowym 0,14 MPa. W przypadku kompozytu MBIII (XPS o większej gęstości) wartości te wyniosły odpowiednio 1,07 i 0,40

MPa, a w przypadku kompozytu MAIII (EPS/XPS), który charakteryzował się największą niejednorodnością, zanotowano wyraźnie gorsze wyniki: 0,49 i 0,06 MPa.

Warianty kompozytów bez dodatku piasku (I i II) wykazywały znacznie mniejszą wytrzymałość, niezależnie od rodzaju zastosowanego regranulatu. Dotyczy to szczególnie próbki MAII (EPS/XPS przy zmniejszonej ilości spoiwa iX CPP20), gdzie napężenia wynosiły 0,22 MPa. W tabeli 3 zestawiono wartości odchylenia standardowego (σ) oraz wskaźnika zmienności (v) w przypadku średnich wartości naprężeń uzyskanych w próbach sześciennych trzech materiałów: A, B i C, w trzech wariantach pomiarowych MI, MII oraz MIII.

Porównując kompozyty z dodatkiem piasku do ich odpowiedników bez tego składnika, odnotowano zwiększenie wytrzymałości na ściskanie – szczególnie materiału C (XPS), gdzie przyrost napężenia granicznego kompozytu MCIII wyniósł ok. 91,2% w porównaniu z MCII. Efekt wzmacniający frakcji drobnziarnistej, jaką stanowi piasek, znajduje potwierdzenie również w literaturze dotyczącej betonów lekkich [1, 8, 16, 18, 41].

Table 3. Standard deviation and coefficient of variation values of cubic composites
Tabela 3. Wartości odchylenia standardowego i względnego kompozytów kostkowych

Blend/ Mieszanka	Standard deviation σ [kg/m ³]/ Odchylenie standardowe σ [kg/m ³]			Coefficient of variation v [%]/ Wskaźnik zmienności v [%]		
	material A/ material A	material B/ material B	material C/ material C	material A/ material A	material B/ material B	material C/ material C
MI	0,06	0,04	0,03	15,2	6,3	3,1
II	0,02	0,06	0,11	8,7	10,8	13,7
III	0,06	0,03	0,14	11,9	3,1	9,3

Deformability of Cylindrical Samples. Deformability tests were carried out on cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm. The experiment included four composites: MAI and MA III (i.e., EPS/XPS, respectively without and with sand) and MCI and MCIII (pure XPS, respectively without and with sand). The tests determined the stress – strain relationship for each composite, and based on these relationships, the stress values at 10% strain and the modulus of elasticity were calculated. For each composite, six samples were tested. Verification of the results using the Dixon test did not eliminate any measurement.

The test results clearly showed a positive effect of sand addition on the deformability of cylindrical samples. The highest stress values at 10% strain were achieved in sample MCIII (XPS with sand), where the force reached 21.87 kN and the corresponding stress was 1.24 MPa with a standard deviation of 0.17 MPa. Slightly lower values were recorded for composite MA III (EPS/XPS with sand): 14.89 kN and 0.84 MPa with a standard deviation of 0.06 MPa. Composite MCI without sand, but with 25% more iX CPP20 binder, showed about 32% lower results compared to the same material in the sand-containing variant (MCIII). Additionally, its result was similar to that of MAIII, which had 25% more iX CPP20 binder. Composite MCI (XPS without sand) reached a force value of 14.83 kN, with stress of 0.84 MPa and a standard deviation of 0.10 MPa, suggesting that XPS alone provides slightly better bonding with the cement matrix, even without sand, compared to the EPS/XPS mixture. The lowest force and stress values were recorded for sample MAI – 9.04 kN and 0.51 MPa with the lowest standard deviation – 0.03 MPa. Samples with sand addition showed higher standard deviation values. The coefficient of variation of the measurements was good for composites MCI (11.5%) and MCIII (13.7%), and very good for composites MAI (6.4%) and MA III (6.5%), indicating high repeatability of the results and good uniformity of the tested materials.

Figure 3 presents the relationship between stress and strain for selected cylindrical samples with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm. Composite MCIII is characterized by the highest stress value, reaching maximum values of 1.49 MPa, but in the case of strains greater than 8%, it shows a downward trend, which may indicate the onset of structural degradation. Composite MCI, despite a lower peak strength, shows a continuous increase in stress up to 10% strain. A similar behavior is observed in composite MA III, in which the presence of sand increases stiffness. Composite MAI reaches the lowest stress

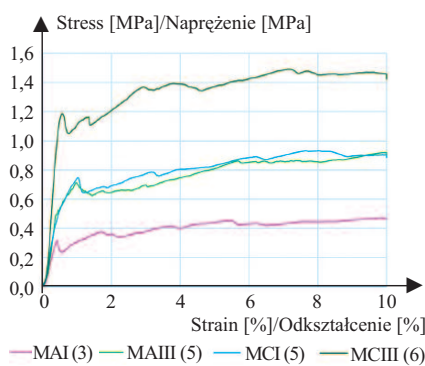


Fig. 3. Relationship between stress and strain in selected samples of polystyrene cement composite – cylindrical specimens with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm

Rys. 3. Zależność pomiędzy napężeniem i odkształceniem wybranych próbek polistyrenowego kompozytu cementowego – próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm

Odkształcalność próbek walcowych. Badania odkształcalności przeprowadzono na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. W eksperymencie uwzględniono cztery kompozyty: MAI i MAIII (tj. EPS/XPS odpowiednio bez i z piaskiem) oraz MCI i MCIII (czysty XPS odpowiednio bez i z piaskiem). W badaniach określono zależność pomiędzy napężeniem a odkształceniem w przypadku każdego kompozytu, a następnie na podstawie tych zależności oznaczono wartości naprężeń przy 10% odkształceniu oraz modułów sprężystości. W przypadku każdego kompozytu wykonano po sześć próbek. Weryfikacja wyników testem Dixona nie wykluczyła żadnego pomiaru.

Wyniki testów jednoznacznie wykazały pozytywny wpływ dodatku piasku na odkształcalność próbek walcowych. Największe wartości wytrzymałości przy 10% odkształceniu osiągnięto w przypadku próbki MCIII (XPS z piaskiem), gdzie siła wyniosła 21,87 kN, a odpowiadające jej napężenie – 1,24 MPa przy odchyleniu standardowym 0,17 MPa. Nieco gorsze wartości odnotowano w przypadku kompozytu MAIII (EPS/XPS z piaskiem): 14,89 kN i 0,84 MPa przy odchyleniu 0,06 MPa. Kompozyt MCI bez piasku, ale z większą o 25% zawartością spoiwa iX CPP20, uzyskał o ok. 32% gorsze wyniki w porównaniu z analogicznym materiałem w wariancie z piaskiem (MCIII). Ponadto wynik był zbliżony z uzyskanym napężeniem w przypadku kompozytu MAIII z większą o 25% zawartością spoiwa iX CPP20. Kompozyt MCI (XPS bez piasku) osiągnął siłę o wartości 14,83 kN, przy napężeniu 0,84 MPa i odchyleniu standardowym 0,10 MPa, co sugeruje, że sam XPS zapewnia nieco lepsze zespolenie z matrycą cementową, nawet bez dodatku piasku, w porównaniu z mieszaniną EPS/XPS. Najmniejsze wartości siły i naprężenia odnotowano w przypadku próbki MAI – 9,04 kN i 0,51 MPa z najniższym odchyleniem standardowym – 0,03 MPa. Próbkę z dodatkiem piasku charakteryzowały się większą wartością odchylenia standardowego. Współczynnik zmienności pomiarów osiągnął poziom dobry w przypadku kompozytów MCI (11,5%) oraz MCIII (13,7%), a bardzo dobry kompozytów MAI (6,4%) oraz MAIII (6,5%), co świadczy o dużej powtarzalności uzyskanych wyników i dobrej jednorodności badanych materiałów.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność pomiędzy napężeniem i odkształceniem w wybranych próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. Kompozyt MCIII charakteryzuje się największą wartością naprężeń, osiągając maksymalne wartości na poziomie 1,49 MPa, ale w przypadku odkształceń większych od 8% wykazuje tendencję spadkową, co może wskazywać na rozpoczęcie degradacji strukturalnej. Kompozyt MCI, pomimo mniejszej wytrzymałości szczytowej, wykazuje ciągły wzrost naprężenia aż do 10% odkształcenia. Analogiczne zachowanie obserwuje się w przypadku kompozytu MAIII, w którym obecność piasku wpływa na zwiększenie sztywności. Kompozyt MAI osiąga najmniejsze napężenie w całym zakresie, ale wykazuje liniowy, stabilny przebieg bez załamań aż

in the entire range but exhibits a linear, stable course without fractures up to 10% strain. The addition of sand significantly increases the maximum stress values of composites MCIII and MA III but may reduce their resistance to deformation. Composites without mineral additives (MCI, MAI) are characterized by lower strength than those with additives, but better ductility and structural durability under deformation.

To assess the deformability of cement composites containing polystyrene regranulate, the modulus of elasticity was determined based on the stress – strain function (Figure 3). Due to the specifics of the tested composites, which used lightweight, deformable polystyrene aggregate, the material showed significantly lower maximum stress than conventional concretes. Therefore, to avoid errors resulting from exceeding the elastic range or surface damage of the samples, an individual stress range was adopted for each composite, covering the elastic work of all analyzed samples. This range allows for comparison of Young's modulus (E) between variants differing in aggregate type (EPS/XPS vs. XPS) and the presence of waste sand.

For each of the four material variants – MAI, MA III, MCI, and MCIII – six measurements of the secant modulus of elasticity were taken, and then the average value, standard deviation, and coefficient of variation were calculated as a measure of result dispersion (Table 4) for the selected mixes. The results were checked using the Dixon test, which did not reject any measurements.

Tabela 4. Zestawienie modułów Younga poszczególnych kompozytów
Table 4. Summary of Young's moduli of individual composites

Composite/ Kompozyt	Stress range for testing [MPa]/ Zakres naprężeń do badania [MPa]	Average E [MPa]/ Średnia E [MPa]	Standard deviation σ [MPa]/ Odchylenie standardowe σ [MPa]	Coefficient of variation v [%] /Wskaźnik zmienności v [%]
MAI	0,05 – 0,20	116,13	34,36	29,6
MAIII	0,10 – 0,30	186,02	52,68	28,3
MCI	0,10 – 0,30	148,15	26,00	17,5
MCIII	0,20 – 0,60	350,64	65,25	18,6

The conducted tests showed a significant effect of aggregate type and sand addition on the modulus of elasticity of the analyzed cement composites. The lowest stiffness was obtained in material MAI, made from an EPS/XPS mixture, without sand addition. The average modulus of elasticity was 116.13 MPa. Variant MA III, containing the same type of aggregate but with sand and 25% less iX CPP20 binder, achieved a clearly higher modulus of elasticity – 186.02 MPa, which represents an increase of about 60%.

The use of only extruded polystyrene (XPS) in mixes MCI and MCIII resulted in a further increase in material stiffness. In the case of MCI (without sand and 25% less iX CPP20 binder compared to MCIII), the average modulus of elasticity was 148.15 MPa, while for MCIII, which included sand, the highest value was recorded – 350.64 MPa. This represents more than a twofold increase in stiffness compared to variant MCI. Additionally, composites based solely on XPS (MCI and MCIII) had a lower coefficient of variation (17.5 – 18.6), indicating greater uniformity of these mixes compared to composites containing the EPS/XPS mixture (MAI and MA III), whose coefficient was higher (28.3 – 29.6).

do 10% odkształcenia. Dodatek piasku istotnie zwiększa wartość naprężeń maksymalnych kompozytów MCIII i MAIII, ale może obniżyć ich odporność na odkształcenia. Kompozyty bez dodatków mineralnych (MCI, MAI) charakteryzują się mniejszą wytrzymałością niż z dodatkami, ale lepszą ciągliwością i trwałością strukturalną badanych odkształceń.

W celu oceny odkształcalności kompozytów cementowych, zawierających regranulat polistyrenowy, określono moduł sprężystości na podstawie funkcji naprężenie-odkształcenie (rysunek 3). Ze względu na specyfikę badanych kompozytów, w których zastosowano lekkie, podatne kruszywo polistyrenowe, materiał wykazywał znacznie mniejsze maksymalne naprężenia niż betony konwencjonalne. W związku z tym, aby uniknąć błędów wynikających z przekroczenia zakresu sprężystego lub uszkodzeń powierzchni próbki, przyjęto indywidualnie, dla każdego składu kompozytu, zakres naprężeń, w którym mieści się sprężysta praca wszystkich analizowanych próbek. Taki zakres umożliwia porównanie modułu Younga (E) między wariantami różniącymi się typem kruszywa (EPS/XPS vs XPS) oraz obecnością dodatku piasku odpadowego.

W przypadku każdego z czterech wariantów materiałowych – MAI, MAIII, MCI i MCIII – wykonano po sześć prób oznaczenia siecznego modułu sprężystości, a następnie wyznaczono jego średnią wartość, odchylenie standardowe oraz wskaźnik zmienności jako miarę rozrzutu wyników (tabela 4) wybranych mieszanek. Wyniki sprawdzono testem Dixona, w wyniku którego nie odrzucono żadnego pomiaru.

Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ rodzaju kruszywa oraz dodatku piasku na moduł sprężystości analizowanych kompozytów cementowych. Najmniejszą sztywność uzyskano w przypadku materiału MAI, wykonanego z mieszanki EPS/XPS, bez dodatku piasku. Średnia wartość modułu sprężystości wyniosła 116,13 MPa. Wariant MAIII, zawierający ten sam rodzaj kruszywa, lecz z dodatkiem piasku, ale z mniejszą o 25% zawartością spoiwa iX CPP20, osiągnął wyraźnie większy moduł sprężystości, a mianowicie 186,02 MPa, co stanowi wzrost o ok. 60%.

Zastosowanie wyłącznie polistyrenu ekstrudowanego (XPS) w mieszankach MCI i MCIII przełożyło się na dalsze zwiększenie sztywności materiału. W przypadku MCI (bez piasku i niższą o 25% zawartością spoiwa iX CPP20 w stosunku do MCIII) uzyskano średni moduł sprężystości 148,15 MPa, natomiast w przypadku MCIII, zawierającego piasek, odnotowano największą wartość – 350,64 MPa. Oznacza to ponaddwukrotny wzrost sztywności w porównaniu z wariantem MCI. Ponadto, kompozyty na samym XPS (MCI i MCIII) charakteryzowały się niższym wskaźnikiem zmienności (17,5–18,6), co świadczy o większej jednorodności tych mieszanek w porównaniu z kompozytami zawierającymi mieszankę EPS/XPS (MAI i MAIII), których wskaźnik był większy (28,3 – 29,6).

The obtained results are consistent with literature data concerning the influence of EPS on the deformability of cement composites, where reduced stiffness and increased susceptibility to local plasticization are indicated. The effect of fine-grained additives such as sand may mitigate this effect, leading to increased structural cohesion and higher load capacity of the sample [5, 14, 17, 32, 36].

Conclusions

Based on the conducted tests of cement mixtures containing industrial polystyrene regranulates (EPS/XPS and XPS), the following conclusions were formulated:

- 1) XPS regranulate (material C) enables the production of composites with the best strength parameters among all the materials used;
- 2) the lowest density was obtained in MAII samples (287.23 kg/m^3), and the highest in MCIII (706.99 kg/m^3); the increase in density was associated with the addition of waste sand and the use of XPS regranulate, which resulted in higher values than the EPS/XPS mixture;
- 3) an increased content of iX CPP20 binder led to higher thermal conductivity of the composites, while its reduction combined with the addition of sand clearly reduced the λ values. EPS/XPS and XPS regranulates exhibited similar thermal conductivity, which confirms the dominant influence of the matrix composition on the thermal properties of the material;
- 4) the addition of sand improves the spatial structure of the composite by filling the voids between regranulate grains and creating a stable granular skeleton. Its use (variant III) in all cases resulted in a noticeable improvement in the mechanical properties of the composite. For material C, the stress increase at 10% strain, compared to MCII composite without sand (tested on cubic samples), amounted to approx. 91%;
- 5) composites with EPS/XPS addition (material A) were characterized by the weakest mechanical properties; the presence of EPS, with low strength and high deformability, reduced the overall performance of the material;
- 6) composite MA III (EPS/XPS with sand) achieved similar strength to composite MCI (XPS without sand, but with 25% more iX CPP20 binder), which means that the addition of sand can partially compensate for the lower performance of EPS regranulate, raising the strength of the material to a level comparable to that obtained with stronger XPS regranulate (though at the cost of higher density);
- 7) the use of extruded polystyrene (XPS) regranulate allows for the production of composites with greater stiffness and better result repeatability compared to mixtures containing expanded polystyrene (EPS).

Received: 04.03.2025.
Revised: 10.04.2025.
Published: 23.07.2025

Uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi wpływu EPS na odkształcalność kompozytów cementowych, gdzie wskazuje się na obniżoną sztywność i zwiększoną podatność na lokalne uplastycznienie. Wpływ dodatków drobnopiękistych, takich jak piasek, może łagodzić ten efekt, prowadząc do zwiększenia spójności strukturalnej i dużej nośności próbki [5, 14, 17, 32, 36].

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań właściwości mieszanek cementowych, zawierających przemysłowe regranulaty polistyrenowe (EPS/XPS, oraz XPS), sformułowano następujące wnioski:

- 1) regranulat XPS (materiał C) pozwala na uzyskanie kompozytu o najlepszych parametrach wytrzymałości spośród wszystkich zastosowanych materiałów;
- 2) najmniejszą gęstość uzyskano w przypadku próbek MAII ($287,23 \text{ kg/m}^3$), a największą dla MCIII ($706,99 \text{ kg/m}^3$); wzrost gęstości był związany z dodatkiem piasku odpadowego oraz zastosowaniem regranulatu XPS, który dawał większe wartości niż mieszanka EPS/XPS;
- 3) zwiększona zawartość spoiwa iX CPP20 prowadziła do większej przewodności cieplnej kompozytów, natomiast jej redukcja w połączeniu z dodatkiem piasku skutkowała wyraźnym obniżeniem wartości λ . Regranulaty EPS/XPS i XPS wykazały zbliżoną przewodność cieplną, co potwierdza dominujący wpływ składu matrycy na właściwości cieplne materiału;
- 4) dodatek piasku poprawia strukturę przestrzenną kompozytu, wypełniając puste przestrzenie pomiędzy ziarnami regranulatu i tworząc stabilny szkielet ziarnisty. Jego zastosowanie (wariant III) we wszystkich przypadkach skutkowało wyraźną poprawą właściwości mechanicznych kompozytu. W przypadku materiału C przyrost naprężeń przy 10% odkształceniu, względem kompozytu MCII bez piasku, uzyskany na próbkach sześciennych, wyniósł ok. 91%;
- 5) kompozyty z dodatkiem EPS/XPS (materiał A) cechowały się najsłabszymi właściwościami mechanicznymi; obecność EPS, o małej wytrzymałości i dużej odkształcalności, obniżała właściwości materiału;
- 6) kompozyt MAIII (EPS/XPS z piaskiem) osiągnął zbliżoną wytrzymałość jak kompozyt MCI (XPS bez piasku, ale z większą o 25% zawartością spoiwa iX CPP20), co oznacza, że dodatek piasku może w pewnym stopniu zrekompenzować słabsze właściwości regranulatu EPS, podnosząc wytrzymałość materiału do poziomu zbliżonego jak przy zastosowaniu mocniejszego regranulatu XPS (choć kosztem większej gęstości);
- 7) zastosowanie regranulatu z ekstrudowanego polistyrenu (XPS) pozwala uzyskać kompozyty o większej sztywności oraz lepszej powtarzalności wyników w porównaniu z mieszankami zawierającymi ekspandowany polistyren (EPS).

Artykuł wpłynął do redakcji: 04.03.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.04.2025 r.
Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Cui C, Huang Q, Li D, Quan C, Li H. Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete. *Constr Build Mater*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.159.
- [2] Prasittisopin L, Termkhajornkit P, Kim YH. Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. Elsevier Ltd. 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2022.132919.
- [3] Xu Y, Jiang L, Xu J, Li Y. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Constr Build Mater*. 2012. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2011.08.030.
- [4] Xu Y, Jiang L, Liu J, Zhang Y, Xu J, He G. Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2016. DOI: 10.1299/jtst. 2016jtst0023.
- [5] Vakhshouri B, Nejadi S. Review on the mixture design and mechanical properties of the lightweight concrete containing expanded polystyrene beads. Taylor and Francis Ltd. 2018. DOI: 10.1080/13287982.2017.1353330.
- [6] Rucińska T, Kiemożycki W. Odkształcalność ściskanego osiowo betonu z kruszywem styropianowym. 2014.
- [7] Nikbin IM, Golshekan M. The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2018. DOI: 10.1016/j. taf-mec. 2018.02.002.
- [8] Liu H et al. Experimental Scrutiny of Uniaxial Compressive Stress – Strain Relationship for Expanded Polystyrene Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology – Transactions of Civil Engineering*. DOI: 10.1007/s40996-023-01112-y.
- [9] Miled K, Le Roy R, Sab K, Boulay C. Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: Size effects and failure mode. *Mechanics of Materials*. 2004. DOI: 10.1016/j.mechmat.2003.08.004.
- [10] Babavalian A, Ranjbaran AH, Shahbeyk S. Uniaxial and triaxial failure strength of fiber reinforced EPS concrete. *Constr Build Mater*. 2020. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2020.118617.
- [11] Han J, Fan H. Dynamic properties of low-density expandable polystyrene concrete materials. *Defence Technology*. DOI: 10.1016/j. dt.2024.07.006.
- [12] Liu Y et al., Dynamic response of expanded polystyrene concrete during low-speed impact. *Constr Build Mater*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2016.06.059.
- [13] Mohammed HJ, Aayel OK. Flexural behavior of reinforced concrete beams containing recycled expandable polystyrene particles. *Journal of Building Engineering*. 2020. DOI: 10.1016/j.job.2020.101805.
- [14] Petrella A, Di Mundo R, Notarnicola M. Recycled expanded polystyrene as lightweight aggregate for environmentally sustainable cement conglomerates. *Materials*. 2020. DOI: 10.3390/ma13040988.
- [15] Wwjmrd. Optimizing The Flexural and Split Tensile Strength Properties of Polystyrene Concrete Using the Osadebe's Model: A Mathematical Approach to Sustainable Environmental and Housing Development. *International Journal Peer Reviewed Journal Refereed Journal Indexed Journal Impact Factor SJIF*, vol. 7, no. 12, pp. 2020–2021, 2021. DOI: 10.17605/OSF.IO/UQ25Y.
- [16] Liu N, Chen B. Experimental study of the influence of EPS particle size on the mechanical properties of EPS lightweight concrete. *Constr Build Mater*. 2014. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2014.06.062.
- [17] Major M, Halbiniak J. Effect of adhesion between eps granules and cement matrix on the characteristics of lightweight concretes, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing. 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/603/3/032054.
- [18] Maaroufi M, Abahri K, Hachem CEI, Belarbi R. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. *Constr Build Mater*. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142.
- [19] Kaya A, Kar F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Constr Build Mater*. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2015.12.177.
- [20] Li Y, Liu N, Chen B. Properties of lightweight concrete composed of magnesia phosphate cement and expanded polystyrene aggregates. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2015. DOI: 10.1617/s11527-013-0182-6.
- [21] Tang WC, Lo Y, Nadeem A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cem Concr Compos*. 2008. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002.
- [22] Maghfouri M et al. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. DOI: 10.1016/j. cscm.2022.e00919.
- [23] Adhikary S, Kand D. K. Ashish. Turning waste expanded polystyrene into lightweight aggregate: Towards sustainable construction industry. *Science of the Total Environment*. 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2022.155852.
- [24] Chung SY, Abd Elrahman M, Stephan D. Effects of expanded polystyrene (EPS) sizes and arrangements on the properties of lightweight concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 2018. DOI: 10.1617/s11527-018-1182-3.
- [25] Khatib JM, Herki BA, Elkordi A. Characteristics of concrete containing EPS, in *Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete*, Elsevier. 2018. DOI: 10.1016/B978-0-08-102676-2.00007-4.
- [26] Jannaty MH, Atrushi D. Assessment of Curing Exposures Effect on the Long-term Engineering Properties of Novel Lightweight Aggregate Concrete. *Aro-the Scientific Journal of Koya University*. 2020. DOI: 10.14500/aro.10739.
- [27] Gomes R, Silvestre JD, de Brito J. Environmental life cycle assessment of the manufacture of EPS granulates, lightweight concrete with EPS and high-density EPS boards. *Journal of Building Engineering*. 2020. DOI: 10.1016/j.job. 2019.101031.
- [28] Argalis PP, Bumanis G, Bajare D. Gypsum Composites with Modified Waste Expanded Polystyrene. *Journal of Composites Science*. 2023. DOI: 10.3390/jcs7050203.
- [29] Brooks AL, Zhou H, Hanna D. Comparative study of the mechanical and thermal properties of lightweight cementitious composites. *Constr Build Mater*. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.102.
- [30] Kan A, Demirboğa R. A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates. *J Mater Process Technol*. 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.07.017.
- [31] Bedeković G, Grčić I, Anić Vučinić A, Premur V. Recovery of waste expanded polystyrene in lightweight concrete production. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2019. DOI: 10.17794/rgn.2019.3.8.
- [32] Kan A, Demirboğa R. A novel material for lightweight concrete production. *Cem Concr Compos*. 2009. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002.
- [33] Chen B, Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cem Concr Res*. 2004. DOI: 10.1016/j.cemconres. 2003.12.014.
- [34] Li C, Miao L, You Q, Hu S, Fang H. Effects of viscosity modifying admixture (VMA) on workability and compressive strength of structural EPS concrete. *Constr Build Mater*. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.176.
- [35] Techniczne właściwości klasy poziomy. iX CPP20 KARTA TECHNICZNA. [Online]. Available: www.holcim.pl/kontakt/.
- [36] He D, Zheng W, Chen Z, Qi Y, Zhang D, Li H. Influence of Paste Strength on the Strength of Expanded Polystyrene (EPS) Concrete with Different Densities. *Polymers (Basel)*. 2022. DOI: 10.3390/polym14132529.
- [37] González-Betancur D, Hoyos-Montilla AA, Tobón JJ. Sustainable Hybrid Lightweight Aggregate Concrete Using Recycled Expanded Polystyrene. *Materials*. 2024. DOI: 10.3390/ma17102368.
- [38] Mohammed Umar U, Muthusamy K. Potential of Waste Material as Coarse Aggregates for Lightweight Concrete Production: A Sustainable Approach. *Construction*. 2023. DOI: 10.15282/construction.v3i1.9217.
- [39] Habibilah B, Widodo S. Experimental test on styrofoam waste addition as a partial substitute for fine aggregate to specific gravity, compressive strength, and modulus of concrete elasticity. *Journal of Engineering and Applied Technology*. 2022. DOI: 10.21831/jeatech.v3i1.42550.
- [40] Rathika S, Brindha Devi V, Premkumar R, Ranjith P, Dhilip Kumar. R. Experimental investigation on lightweight concrete by adding polystyrene beads. *Mater Today Proc*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.444.
- [41] Miled K, Sab K, Le Roy R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling. *Mechanics of Materials*. 2007. DOI: 10.1016/j.mechmat.2006.05.008.