

Wykorzystanie odpadu szkła samochodowego do produkcji epoksydowego polimerobetonu

The application of automotive glass waste in the production of epoxy polymer concrete

Jakub Smoleń^{1*}, Berk Değirmenci², Berke Doğuş Tekeli², Bartłomiej Nowacki¹

¹Faculty of Materials Science, Silesian University of Technology, Krasińskiego 8 street, Katowice, 40-019, Poland

²Engineering Faculty & Materials Science and Engineering, Gebze Technical University, Kocaeli/TURKEY

*Corresponding author: J. Smoleń, e-mail: jakub.smolen@polsl.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania obejmujące przygotowanie kruszywa ze stłuczki przednich szyb samochodowych. Dodanie tego kruszywa – zmieszanego w różnych proporcjach z drobnym piaskiem kwarcowym, jako fazy wzmacniającej polimerobeton, na osnowie żywicy epoksydowej. Zbadano otrzymane kompozyty stosując próbę zginania i ściskania oraz odporność na uderzenia, metodą Charpy'ego. Oznaczono porowatość, nasiąkliwość i gęstość pozorną tych materiałów. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie mielonych szyb samochodowych w polimerobetonie jest dobrą metodą wykorzystania tych odpadów. Największą wytrzymałość na ściskanie uzyskały kompozyty zawierające 20% objętościowych mielonych szyb samochodowych, która wyniosła 101 MPa. Jest to wytrzymałość blisko 7 razy większa od tradycyjnego betonu, który osiąga około 15 MPa. Największą wytrzymałość na zginanie miał kompozyt zawierający 35% obj. szkła. Próbkę polimerobetonu nie wykazały dużej odporności na uderzenie: 5,85 - 10,13 kJ/m². Odporność na uderzenie wzrastała wraz ze wzrostem zawartości szkła. Największą wytrzymałość uzyskał kompozyt zawierający 50% obj. szkła. Z próbek polimerobetonów najlepsze właściwości wykazała mieszanina o składzie 35% piasku, 35% mielonego szkła i 30% żywicy epoksydowej. Otwarta porowatość tradycyjnego betonu wynosi 15,91%, a polimerobetonu była mniejsza od 0,38%. Duża różnica w porowatości otwartej i w absorpcji wody, uzyskana dla tradycyjnego betonu i polimerobetonu, pozwalała przypuszczać, że ten ostatni będzie miał lepszą mrozoodporność. Wyniki badań wyraźnie wykazują znacznie lepsze właściwości mechaniczne polimerobetonu od betonu tradycyjnego.

Słowa kluczowe: polimerobeton, odpady, recykling, kompozyty epoksydowe, odpady szyb samochodowych

Summary

In this paper, the production of aggregate from car windshield cullet and the use of this aggregate, in various compositions with fine quartz sand, as the reinforcing phase of the epoxy matrix polymer concrete were used and the obtained samples were tested. The bending and compressive strength, Charpy's impact resistance tests were performed on the obtained composites. The porosity, water absorption, and density were also determined. The tests performed have shown that the application of car windshield cullet in polymer concrete, seems to be a good way to recycle this waste. The highest compressive strength, equal to 101 MPa, was obtained by composites containing 20 vol% of milled glass. It is nearly 7 times higher than the value of traditional concrete tested simultaneously, which has about 15 MPa. The highest flexural strength was noted for the composite containing 35 vol% of the glass. Polymer concrete samples did not show high impact resistance, which was in the range of 5.85 - 10.13 kJ/m². However, it increases with increasing glass content and the highest value was obtained for the composite containing 50% of the glass volume. Among the polymer concrete samples, the best properties were obtained for the mixture of 35% sand, 35% ground glass and 30% epoxy resin. Open porosity of traditional concrete is 15.9%, and for polymer concrete it was lower than 0.38%. The large difference in open porosity and water absorption for traditional concrete and polymer concrete, allow us to conclude that the latter will have higher frost resistance. The test results clearly show the significantly better mechanical properties of polymer concrete than of traditional concrete.

Keywords: polymer concretes, wastes, recycling, epoxy based composites, car windshield waste

1. Wprowadzenie

Cement portlandzki stosowano jako materiał budowlany od dawna do chwili obecnej, ze względu na jego niski koszt, w porównaniu z innymi materiałami budowlanymi, łatwą dostępność surowców i proste wykonawstwo (1). Chociaż beton z cementu ma wiele zalet, rozpoczęto badania nad nowymi materiałami budowlanymi, które można stosować zamiast tego tworzywa, z powodu pewnych problemów z tym materiałem. Do tych problemów można zaliczyć między innymi dużą przepuszczalność wody, małą odporność na uderzenia, niewystarczającą odporność na zginanie, mały moduł sprężystości, niewystarczającą izolację termiczną i niewysoką odporność na korozję chemiczną (2). Ze względu na niewystarczające właściwości cementu portlandzkiego w 1960 roku rozpoczęto prace badawcze nad poprawą właściwości betonu, z wykorzystaniem polimerów (3,4). Betonowe materiały budowlane o zwiększonej wytrzymałości zostały opracowane z dodatkiem polimeru, działającego częściowo jako spoiwo lub jako faza sprężysta, zapewniająca lepszą odporność betonu na uderzenia. Stwierdzono, że niewystarczające właściwości konwencjonalnego betonu można poprawić po modyfikacji polimerami, co wykazano w licznych badaniach (5-11). Najbardziej zaawansowane rodzaje betonów, modyfikowanych polimerami, miały spoiwo w całości złożone z polimeru, dlatego nazwano je betonami polimerowymi (12).

Beton polimerowy [BP] to rodzaj betonu, w którym jako spoiwo stosuje się polimery, zamiast cementów portlandzkich (12-14). Formalnie jest to rodzaj kompozytu z osnową polimerową [KOP], który wykazuje lepszą elastyczność i pewną plastyczność, będąc trudniejszy do zniszczenia, w porównaniu z tradycyjnymi betonami (15, 16). BP jest polimerową matrycą kompozytową [PMK] wzmocnioną cząsteczkami, która ma wiele odmian obejmujących materiały od powszechnie stosowanych tworzyw ciernych, po zaawansowane technologicznie materiały funkcjonalne (17, 18).

Polimerobeton są często stosowane w naprawach budynków i infrastruktury drogowej (19, 20), w dekoracyjnych panelach budowlanych, w rurach, łukach dachowych, kanałach odwadniających, a także do produkcji cegieł odpornych na korozję (21). Jako wypełniacze można stosować materiały znane w tradycyjnym betonie: piasek kwarcowy, żwir i inne kruszywa (22, 23).

Bardzo ważne jest otrzymanie odpowiedniego stosu ziaren, złożonego z różnych cząstek, w celu jego dobrego wypełnienia. Cząstki o małej średnicy powinny wypełniać przestrzenie pomiędzy większymi ziarnami, nawet o dużych wymiarach (13, 14, 24). Zwykle żywica polimerowa jest spoiwem. Najczęściej stosowanymi żywicami polimerowymi są żywice epoksydowe, poliestrowe, winyloestrowe i metakrylanowe (25, 26). Dobre wiązanie żywicy z kruszywem, gwarantują właściwości żywicy, zwłaszcza epoksydowych i poliestrowych, do tworzenia silnych wiązań adhezyjnych, z różnymi powierzchniami występującymi w mikrostrukturze zaczynu (27, 28). Dzięki tej właściwości, polimerobeton mają większą wodoszczelność od tradycyjnych betonów, podobnie jak inne kompozyty z osnową polimerową [KOP] (29). Mają również bardzo dobrą odporność chemiczną, bardzo dobre właściwości

1. Introduction

Portland cement concrete has been used as building material from the past to the present, due to its low cost, compared to other building materials, easy supply of raw materials, and very good shaping (1). Although it has many advantages, research has begun on new building materials that can be used instead of cement concrete, due to some problems with this material. Some of these problems can be listed as high water permeability, low impact resistance, insufficient bending properties, low modulus of elasticity, insufficient insulation and low chemical and corrosion resistance (2). Due to the insufficient properties of Portland cement, researches started in the 1960s of the works to improve the properties of concrete, with the use of polymers (3, 4). In general, concrete building materials with the increased strength demand were developed with the addition of polymers, which act as a part of the binder or as elastic phase, providing the better impact resistance of the concrete. It was seen that the insufficient properties of the conventional concrete could be eliminated, after modification with polymers – it was proved in numerous studies (5-11). The most advanced kinds of polymer-modified concretes had only the polymer as a whole binder and they were called simply polymer concretes (12).

Polymer concrete [PC] is the concrete that uses polymers as a binder, instead of Portland cements (12-14). Formally, it is the kind of polymer matrix composite [PMC], which presents a more advantageous failure mode - better elasticity and some plasticity, compared to traditional concretes (15,16). PC falls into the category of particle-reinforced PMCs, which is wide and covers materials ranging from commonly used frictional materials, to high-tech functional ones (17, 18). PCs are often used in building repairs and road work (19, 20), decorative construction panels, pipes, roof arches, drainage channels, and the production of corrosion resistant bricks (21). Materials such as quartz sand, gravel, and other mineral aggregates can be used as fillers (22, 23). Very important is proper composing the stack of various particles, in order to approve maximum filling. The low-diameter particles should fill the spaces between coarse big-diameter ones, optimally (13, 14, 24).

Polymer resins usually act as the binder. The most commonly used polymer resins are epoxy, polyester, and vinyl ester, as well as methyl-methacrylate monomer (25, 26). The good connection at the resin-aggregate interface is guaranteed due to the ability of the resins, especially the epoxy and polyester ones, to form strong adhesive bonds with the various surfaces (27, 28). Due to this property, the PCs are more water-tight than traditional concretes, similarly to the other PMCs (29). They also represent very good chemical resistance and mechanical impact properties and a faster curing time, if compared to traditional concrete (30-32).

The car windshield protects passengers and drivers from external factors and also provides visibility in transportation vehicles. Currently, windshields are made of two curved glass sheets laminated with a layer [foil] of polyvinyl butyral [PVB] (33). The most important feature of PVB foil is preventing instant fragmentation of the glass layers, by keeping them together at the moment of impact.

mechaniczne, są odporne na udar i wykazują szybsze twardnienie, w porównaniu z tradycyjnym betonem (30-32).

Szyba samochodowa chroni pasażerów i kierowców przed czynnikami zewnętrznymi, a także zapewnia widoczność w pojazdach transportowych. Obecnie przednie szyby wykonane są z dwóch zakrzywionych tafli szkła, laminowanych folią z poliwinylbutyralu [PWB] (33). Najważniejszą cechą folii z PWB jest zapobieganie natychmiastowemu rozdrobieniu warstw szkła, utrzymując je razem, w momencie uderzenia. Dodatkowo folia jest przezroczysta i nie wpływa na widoczność (34, 35). Pewnym problemem jest recykling zużytych szyb samochodowych. Ten dwumateriałowy odpad nie nadaje się do procesu topienia szkła. Ponadto w stłuczce często znajdują się śladowe ilości metali, które mogą uszkodzić sprzęt do recyklingu. Najlepiej, aby odpady z szyby przedniej były sortowane z wprowadzeniem etapu oddzielania metali, przy wykorzystaniu elektromagnesów. Jedną z metod wykorzystania szyb samochodowych może być ich zmielenie, jako kruszywa w technologii polimerobetonów. Tą metodą można zmniejszyć koszty produkcji polimerobetonów, a odpad można wykorzystać do produkcji nowego materiału (36). Dodatkowo zastosowanie szyb samochodowych jako kruszywa w PWB może przyczynić się do poprawy ich właściwości mechanicznych. Drobno zmielone szkło powinno dobrze wypełniać luki pomiędzy gruboziarnistym piaskiem (37, 38).

Niniejszy artykuł przedstawia szczegółowy opis wieloetapowego procesu przygotowania i zastosowania zniszczonych szyb samochodowych, w technologii polimerobetonu. Szyby samochodowe, zawierające pozostałości folii PWB są odpadem trudnym do ponownego wykorzystania, ze względu na silne przyleganie folii do powierzchni szkła. Aby efektywnie zagospodarować odpady szyb samochodowych, konieczne jest opracowanie taniej metody recyklingu, która pozwoli na wyprodukowanie nowego materiału, wykorzystującego właściwości szkła samochodowego. Podjęto próbę otrzymywania polimerobetonu z żywic epoksydowych, wykorzystując zmielone szyby samochodowe oraz piasek kwarcowy, w różnych proporcjach objętościowych. Zastosowanie żywicy epoksydowej zamiast tradycyjnych spoiw, ma specjalne właściwości, do których należą: duża przyczepność, mała nasiąkliwość i dobra odporność chemiczna (26, 39). Przygotowano i zbadano pięć serii próbek stosując trójpunktowe zginanie, próbę udarności Charpy'ego oraz wytrzymałość na ściskanie, a także oznaczono porowatość, nasiąkliwość i gęstość pozorną. Wyniki pomiarów porównano pomiędzy próbkami oraz z właściwościami tradycyjnych betonów. Opisano stopień wzmocnienia polimerobetonów, zmieloną samochodową szybą przednią.

2. Doświadczenia

Żywica epoksydowa Ampreg™ 36, stwardniała Ampreg™ 3X Fast (GURIT, Szwajcaria) została zastosowana jako spoiwo w polimerobetonie. Stosunek masowy żywicy i dodatku twardniejącego wynosił 100:29. Polimerobeton otrzymano zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1, w którym 70% wypełniaczy proszkowych –

In addition, the foil is transparent and does not affect visibility (34, 35). Recycling used car windshields can be a problem. This two-material waste is unsuitable for the glass melting process. Additionally, some metal traces are often present in the cullet, which can damage recycling equipment. Preferably, the windshield waste should be sorted with a metal separation step with an electromagnet. One of reasonable ways of utilizing windshields may be using them, in a crushed form as the aggregate filler in PCs technology. Thus, the cost of PCs production may be reduced and a waste material may be utilized, for production of a new material (36). In addition, the use of vehicle windshields as aggregate in PCs may results in mechanical improvement of them – the finely milled glass should effectively fill the vacancies between the coarse sand particles (37, 38).

This paper contains a detailed description of a multi-stage process of preparation and application of used automotive windshields, in polymer concrete technology. Car windshields containing the residue of PVB foil, which due to their strong adhesion to the glass surface, is a waste difficult to reuse. In order to effectively manage automotive glass waste, it is necessary to try a cheap recycling method that will allow for the production of a new material, using the potential of the glass properties. An attempt was made to produce epoxy-based polymer concrete with the use of ground car windshields and quartz sand, in various volume ratios. The use of epoxy resin, instead of traditional binders provides features such as strong adhesion, low water absorption and high chemical resistance (26, 39).

Five series of specimens were prepared and tested in the three-point bending test, the Charpy impact test, the compression strength and the measurement of porosity, water absorption as well as the density. The test results of the samples were compared with each other and with the properties of traditional concretes. The effectiveness of strengthening the polymer concretes with the ground windshield glass, was described.

2. Experiments

Ampreg™ 36 epoxy resin cured with Ampreg™ 3X fast hardener, produced by GURIT, Switzerland, has been selected as the binder in polymer concrete. The mass ratio of resin and hardener was 100:29. Polymer concrete was produced according to the scheme shown in Fig. 1, where 70% of the powder fillers – milled glass waste and/or sand, in varying proportions, were mixed with 30% of epoxy resin, by volume. The compositions of the PC samples are presented in Table 1.

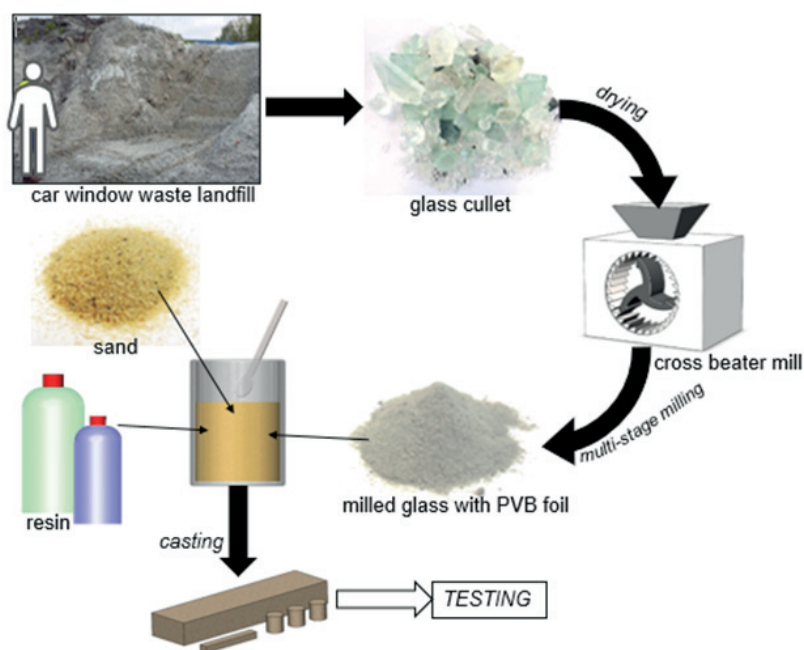
Windshield glass cullet comes from the company, that recycles cars in southern Poland [Kapadora, Żory, Poland]. After the cars were disassembled, the windows were shredded in a hammer mill to reduce the volume of materials in the landfill. The glass cullet contains the remains of the PVB foil, which forms strong adhesive bonds with the glass surface. Before grinding, the glass waste cullet was dried in a laboratory dryer at 60°C for 24 hours. Next,

zmielonych odpadów szklanych i / lub piasku, w różnych proporcjach, zmieszano z 30% objętości żywicy epoksydowej. Skład próbek PB przedstawiono w tabelicy 1.

Słuczka szyb samochodowych pochodzi z firmy, zajmującej się recyklingiem samochodów w południowej Polsce – Kapadora, Żory, Polska. Po demontażu samochodów, rozdrabniano szyby w młynie młotkowym, w celu zmniejszenia ilości materiałów na składowisku. Słuczka szklana zawiera resztki folii PWB, która tworzy silne wiązania adhezyjne, z powierzchnią szkła. Słuczki szklane przed mieleniem suszono w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze 60°C przez 24 godziny. Następnie odpad mielono kilkakrotnie w młynie bijakowym Retsch SK300, stosując rozdzielające sита trapezowe 2,0 - 1,0 - 0,5 mm. Wzrost temperatury podczas mielenia czasami powodował stopienie folii PWB i sklejanie się sit. W celu uniknięcia niepożądanego sklejanie sit prowadzono pomiar temperatury w młynie. Gdy temperatura proszku przekraczała około 80°C, proces zatrzymywano. W momencie, gdy temperatura wewnątrz młyna opadała, proces mielenia wznowiano.

Drobny kwarcowy piasek budowlany firmy KREISEL POLSKA suszono w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze 60°C, przez 24 godziny. Następnie stosowano go do otrzymywania próbek, bez dodatkowej obróbki. Przygotowane wypełniacze proszkowe – szkło mielone i piasek kwarcowy, badano pod skaningowym mikroskopem elektronowym Hitachi 3400N, Tokio, Japonia, w celu opisanie morfologii ziaren. Rozkład wielkości cząstek [RWC] mielonego szkła samochodowego oznaczano zgodnie z modelem rozpraszania Mie, stosując analizator Malvern Mastersizer 3000, firmy Malvern Panalytical, Wielka Brytania, o współczynniku załamania światła $n = 1,522$, z półautomatycznym przyłączem Hydro EV.

Proszki mieszano z żywicą w stosunku objętościowym 70:30, w pojemniku. Jednorodną mieszaninę umieszczano w formach, aż do stwardnienia żywicy. Próbki po wyjęciu z form dodatkowo twardniały w temperaturze 60°C, przez 24 godziny. Próbki o wymiarach 200x50x25 mm, gdzie 25 mm oznacza wysokość, poddawano próbie trójpunktowego zginania, zgodnie z normą PN-EN ISO 14125. Próbki o wymiarach 70x10x7 mm, o wysokości 7 mm, były przeznaczone do określenia udatności metodą Charpy'ego, zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1:2010. Próbki cylindryczne o średnicy 18 mm i wysokości 18 mm przeznaczone były do próby Archimedesesa, w której oznaczano porowatość otwartą, nasiąkliwość i gęstość pozorną oraz do próby ściskania, zgodnie z normą PN-EN ISO 604:2006. Serie konwencjonalnych próbek betonowych zostały włączone do próby Archimedesesa i wytrzymałości na ściskanie, w celu porównania wyników.



Rys. 1. Wieloetapowy proces wytwarzania polimerobetonu, zawierającego mielone szyby samochodowe

Fig. 1. A multi-stage process of the production of polymer-concrete containing ground car windshield glass

it was multistage milled in a Retsch SK300 cross-beater mill with the use of 2.0 - 1.0 - 0.5 mm trapezoidal sieves. Temperature rise during milling sometimes led to the melting of the PVB film and sticking of the separation screens. Thus, the process was controlled with temperature measurement, and when the powder temperature exceeded about 80°C, the process was stopped. When the temperature inside the mill decreased, the milling process was continued. The fine building quartz sand by KREISEL POLSKA [Poland] was dried in a laboratory dryer at 60°C for 24 hours. Then it was applied to the produced PCs, without any additional treatment. The prepared powder fillers of the ground glass and the quartz sand were controlled with the use of the Hitachi 3400N scanning electron microscope [Tokyo, Japan] in the ESED technique, to describe the grain morphology. The particle size distribution

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD PRÓBEK POLIMEROBETONU, ZAWIERAJĄCYCH MIELONE SZYBY SAMOCHODOWE

COMPOSITION OF POLYMER CONCRETE SAMPLES CONTAINING GROUND CAR WINDSHIELD GLASS

	Glass waste, vol.% Odpady szklane, % objętościowy	Sand, volume in % Piasek, % objętościowy	Epoxy resin, vol.% Żywica epoksydowa, % objętościowy
G70/S0	70	0	30
G50/S20	50	20	30
G35/S35	35	35	30
G20/S50	20	50	30
G0/S70	0	70	30

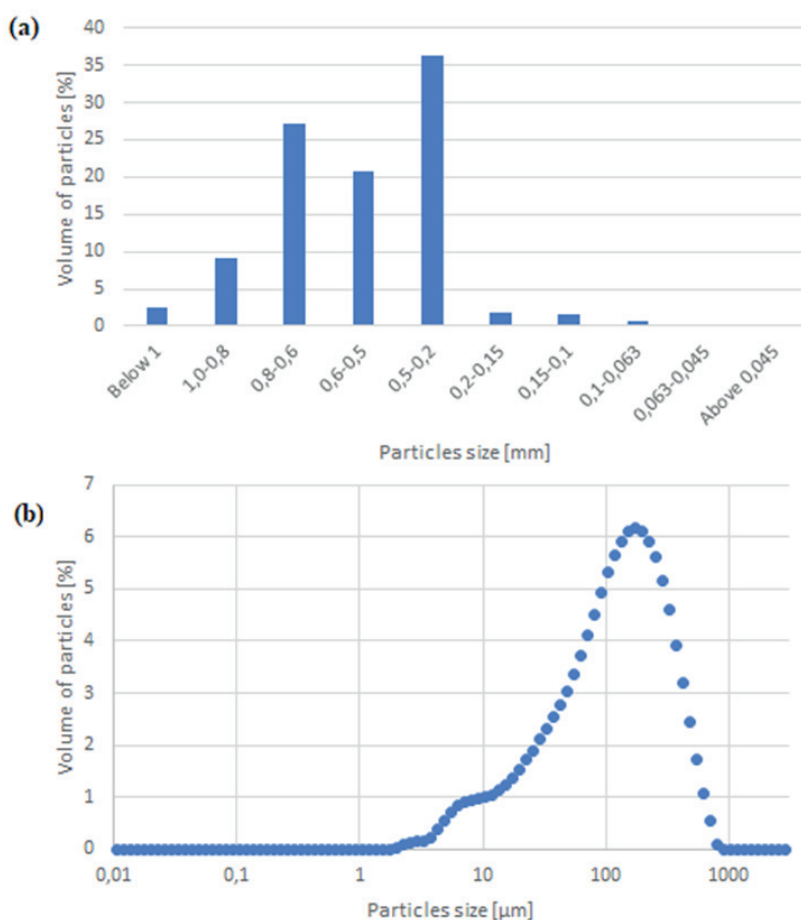
* Pozostawiono angielskie nazwy w celu zachowania jedności z angielskim tekstem. W opisach tekstowych zmieniano G – glass na S – szkło i S – sand na P – piasek

Rozstaw podpór w próbie trójpunktowego zginania wynosił 190 mm, a prędkość odkształcania wynosiła 10 mm / min. Próbę udarności przeprowadzono młotkiem Charpy'ego, w temperaturze pokojowej, z rozstawem podpór 39 mm. W obu badaniach siła została przyłożona do górnej powierzchni próbek.

3. Wyniki

3.1. Analiza wypełniaczy

Rys. 2 przedstawia analizę sitową i rozkład wielkości cząstek [RWC], a rysunek 3 obrazuje SEM mielonego szkła i ziaren piasku kwarcowego. Ziarna szkła mają wyraźne ostre krawędzie, powstałe w wyniku pęknięcia. Średnia wielkość ziaren $D_{[3,4]}$ mielonego szkła wynosiła 162 μm . Widoczna jest dominująca frakcja o wielkości około (D_{50}) 123 μm i drobniejsza frakcja, wynosząca około 18 μm . Na powierzchni ziaren szkła widoczne są pozostałości folii PWB, która silnie przylega do powierzchni. Pozostała folia PWB oznaczona jest na rys. 3a białą strzałką. Folia przyklejona do powierzchni szkła zwiększa powierzchnię cząstek, co poprawia globalną przyczepność żywicy epoksydowej do wypełniacza. Ziarna piasku (rys. 3b) są znacznie bardziej zaokrąglone. Dominują dwie główne frakcje: 0,6-0,8 i 0,2-0,5 mm. Piasek wyróżnia się niewielką zawartością, rzędu 15%, ziaren większych / mniejszych



Rys. 2. (a) Analiza sitowa piasku (b) rozkład wielkości cząstek w mielonym szkle (analyzer Malvern Mastersizer 3000)

Fig. 2. (a) Sieve analysis of sand (b) particle size distribution in milled glass – Malvern Mastersizer 3000 analyzer

[PSD] of car ground glass was determined, according to the Mie scattering model using a Malvern Mastersizer 3000 analyzer by Malvern Panalytical, UK, with a refractive index of $n = 1.522$, with the Hydro EV semi-automatic attachment.

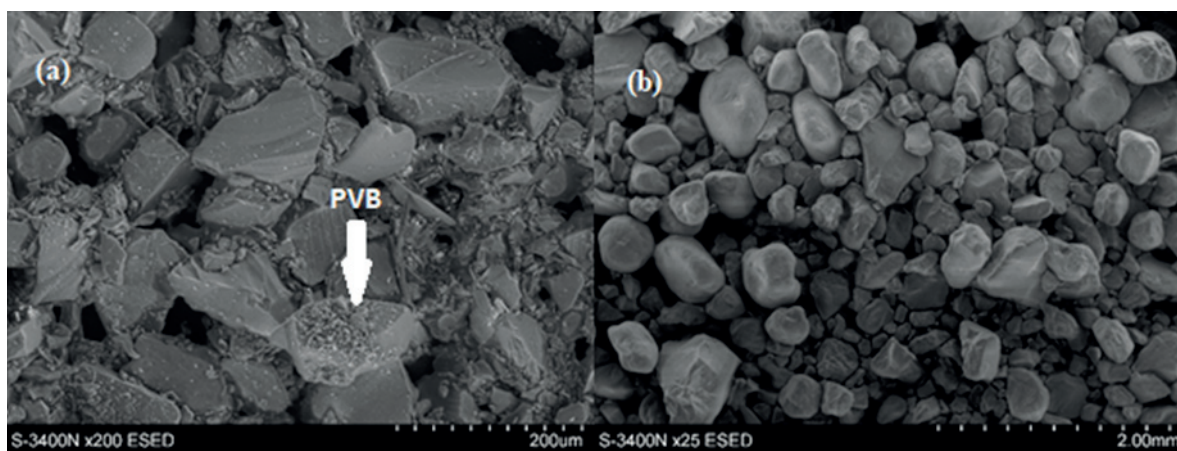
The powders were mixed with the resin at a volume ratio of 70:30, in the container. The homogeneous mixture was placed in the molds, until the resin is cured. After removing from the molds, the samples were post-cured at the temperature of 60°C, for 24 hours. Specimens with dimensions of 200x50x25 mm (a x b x h, where a, b - base dimensions, h - height) were made for the three-point bending test in accordance to the PN-EN ISO 14125 standard. Samples with dimensions of 70x10x7 mm (a x b x h) were intended to determine the Charpy's impact resistance, in accordance with the PN-EN ISO 179-1: 2010 standard. Cylindrical samples with a diameter of 18 mm and a height of 18 mm were used for the Archimedes test, where open porosity, water absorption and apparent density were determined and for the compression test in accordance with PN-EN ISO 604: 2006. A series of conventional concrete samples were included in the Archimedes and compression tests, to compare the results.

The spacing of the supports in the three-point bending test was 190 mm and the deformation speed was 10 mm / min. The impact test was carried out with a Charpy's hammer at a room temperature, with a support spacing of 39 mm. In both tests, the force was applied to the upper surface of the specimen.

3. Results

3.1. Analysis of the fillers

Fig. 2 shows the sieve analysis and particle size distribution, and Fig. 3 presents SEM images of the ground glass and the quartz sand grains. Glass grains have clearly sharp crack edges. The volume moment mean $D_{(3,4)}$ for the ground glass was 162 μm . A dominant fraction of about (D_{50}) 123 μm and a smaller fraction of approximately 18 μm , is visible. There are visible residues of the PVB foil on the surface of the glass grains, which are bonded by adhesion. The remaining PVB foil is marked in Fig. 3a by a white arrow. The foil bonded to the glass surface increases the surface of the particles, which improves the global adhesion of the epoxy resin, to the filler. The grains of sand [Fig. 3b] are much more rounded. Two main fractions dominate: 0.6-0.8 and 0.2-0.5 mm. Sand is characterized by a low content, on the order of 15%, of grains larger / smaller than 0.2-0.8 mm. The relatively wide range of grain sizes, allow the composite to be evenly filled with sand. When mixed with epoxy resin, fine glass grains fill the free spaces between the sand grains. Such behaviour – possible with the proper selection of grains, results in synergistic complementation of volume in the composite.



Rys. 3. Morfologia wypełniaczy: a) cząstki mielonego szkła, b) ziarna piasku, skaningowa mikroskopia elektronowa [Hitachi 3400N]

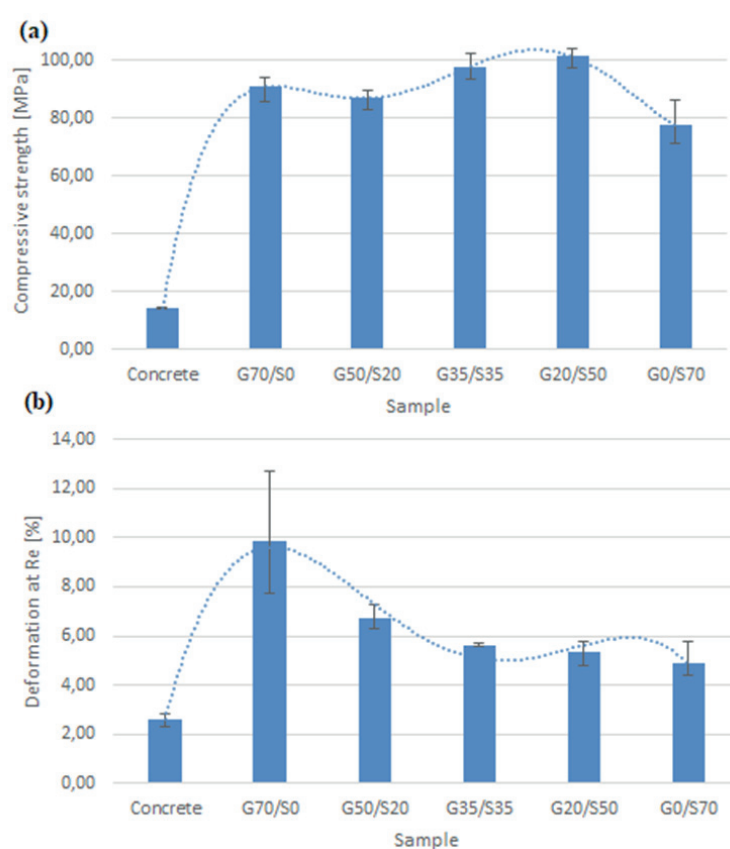
Fig. 3. Fillers morphology: (a) milled glass particles, (b) sand grains, [SEM] [Hitachi 3400N]

niż 0,2-0,8 mm. Stosunkowo duży zakres rozmiarów ziaren pozwala na równomierne wypełnienie kompozytu piaskiem. Po zmieszaniu z żywicą epoksydową, drobne cząstki szkła wypełniają wolne przestrzenie między ziarnami piasku. Takie zachowanie, możliwe przy odpowiednim doborze ziaren, zapewnia synergetyczne uzupełnienie objętości w kompozycie.

3.2. Właściwości mechaniczne

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie [rys. 4 i tab. 2] pokazują, że próbka mielonego szkła [S70/P0], próbka z mielonego szkła [S] i piasku [P] w stosunku objętościowym 1:1 (S35/P35) oraz próbka S20/P50, mają największą wytrzymałość na ściskanie (R_c). Brak zmielonych ziaren szkła znacznie osłabia próbkę. Próbka S50/P20 ma zmniejszoną wytrzymałość na zginanie i odpowiednie odkształcenie, co może wskazywać na niekorzystny stosunek objętości zmielonego szkła i piasku. Może to wynikać z niewłaściwej proporcji ziaren i nierównomiernego wypełnienia przestrzeni, między ziarnami piasku. Powoduje to niekorzystny rozkład sił w materiale oraz powstające karby wewnętrzne. Może to być spowodowane tym, że przestrzeń między ziarnami piasku nie jest wypełniona. Szkło o tej samej objętości co piasek, ma znacznie większą powierzchnię właściwą, co wzmacnia materiał w wyniku zwiększonej powierzchni kontaktu. Próbki są wielokrotnie bardziej odporne na ściskanie niż tradycyjny beton, którego wytrzymałość na ściskanie wynosi 14,35 MPa. Potwierdza to przewagę BP nad tradycyjnym betonem. Podczas badań pękanie próbek betonu było również bardziej gwałtowne. Próbki BP miały znacznie większe odkształcenie. Natomiast tradycyjny beton jest znacznie bardziej kruchy.

Wyniki trójpunktowego zginania [Tab. 3 i Rys. 5] pokazują, że próbka ze szkłem mielonym – szkło/piasek [S70/P0] oraz próbka ze szkłem mielonym i piaskiem, w stosunku objętościowym 1:1 – S35/P35, mają największą wytrzymałość na zginanie (R_g). Wzrost objętości piasku w stosunku do objętości mielonego szkła, prowadzi do spadku wytrzymałości na zginanie, co obserwuje się w próbkach S20/P50 i S0/P70. Wzrost ten powoduje zwiększenie



Rys. 4. Wyniki próby ściskania, a) wytrzymałość na ściskanie, b) odkształcenie przy maksymalnej wytrzymałości na ściskanie [Instron 4469]

Fig. 4. Compressive test results, (a) compressive strength, (b) deformation at maximum compressive strength [Instron 4469]

3.2. Mechanical analysis

The results of compressive strength tests [Fig. 4 and Table 2] show that the sample with ground glass [G70/S0], the sample with ground glass and sand in the volume ratio 1:1 [G35/S35] and the sample G20/S50 have the highest compressive strength [R_c]. The absence of ground glass significantly weakens the sample. The sample G50/S20 has reduced bending strength and corresponding deformation, which may indicate an unfavourable ratio of the volu-

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI STATYCZNEJ PRÓBY ŚCISKANIA [INSTRON 4469]

THE RESULTS OF THE STATIC COMPRESSION TEST [INSTRON 4469]

Sample / Próbką	Compressive strength Wytrzymałość na ściskanie R_c , MPa	Deformation at R_c , Odształcenie przy maksymalnej wytrzymałości na ściskanie R_c %
Concrete / Beton	14.35 (0.27)	2.58 (0.27)
G70/S0	90.84 (3.27)	9.88 (1.89)
G50/S20	86.87 (2.46)	6.74 (0.37)
G35/S35	97.85 (4.45)	5.63 (0.06)
G20/S50	101.29 (2.71)	5.36 (0.72)
G0/S70	77.53 (5.73)	4.90 (0.57)

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI STATYCZNEJ PRÓBY TRÓJPUNKTOWEGO ZGINANIA [INSTRON 4469]

THE RESULTS OF STATIC COMPRESSION TEST [INSTRON 4469]

Sample / Próbką	Flexural strength Wytrzymałość na zginanie R_g , MPa	Deformation at R_c , Odształcenie przy maksymalnej wytrzymałości na ściskanie R_g , %
G70/S0	34.35	0.0071
G50/S20	26.44	0.0044
G35/S35	35.91	0.0067
G20/S50	31.45	0.0056
G0/S70	29.26	0.0042

przestrzeni wolnych od cząstek wypełniacza, co osłabia wzmocniony kompozyt. Próbką S50/P20 ma zmniejszoną odporność na zginanie i odkształcenie przy R_g w porównaniu z innymi próbkami, ze wzmocnieniem z mielonego szkła. Wskazuje to na niekorzystny stosunek objętości mielonego szkła do piasku. W próbce S35/P35 obserwuje się efekt korzystnego wzrostu R_g materiału, w wyniku korzystnego stosunku wielkości proszków. Ta próbka może mieć efekt wzmocnienia ze względu na drobny proszek szklany, wypełniający puste przestrzenie między większymi ziarnami piasku, powodujący zagęszczenie materiału i zakrycie mikropęknięć, co pokrywa się z wynikami uzyskanymi w próbie ściskania. Mielone szkło, w tej samej objętości co piasek, ma znacznie większą powierzchnię właściwą, która wzmacnia materiał dzięki zwiększonej powierzchni styku. Odształcenie w R_g nie wydaje się mieć wpływu na dodanie zmielonej szyby samochodowej. Wartości są w rzeczywistości porównywalne i nie wykazują żadnej szczególnej tendencji. Porównując otrzymane wyniki dla polimerobetonu z danymi literaturowymi (27) prób zginania betonów konwencjonalnych – dla których wytrzymałość na zginanie wynosi 1,1-7,2 MPa, można stwierdzić, że wytrzymałość na zginanie wzrosła kilkukrotnie. Próbką S35/P35 o wytrzymałości na ściskanie 35,91 MPa, ma aż 5.-krotnie większą wytrzymałość od najwyższej wartości w betonach konwencjonalnych z danych z literatury, co potwierdza skuteczność produkowanego polimerobetonu, zawierającego mielone szyby samochodowe i piasek.

me of ground glass and sand. This may be due to the wrong proportion of grains and uneven filling of the space, between the grains of sand. This causes an unfavourable distribution of the forces in the material and the inner notches that occur. This may be because the space between the sand grains is not filled. Milled glass in the same volume as sand has a much larger specific surface, which strengthens the material as a result of the increased contact surface. The samples are many times more resistant to compression than traditional concrete, where the compressive strength is 14.35 MPa. This confirms the advantages of PC over conventional concrete. During the tests, the cracking of concrete samples was also more sudden. The PC samples had much greater deformation. Traditional concrete is much more brittle.

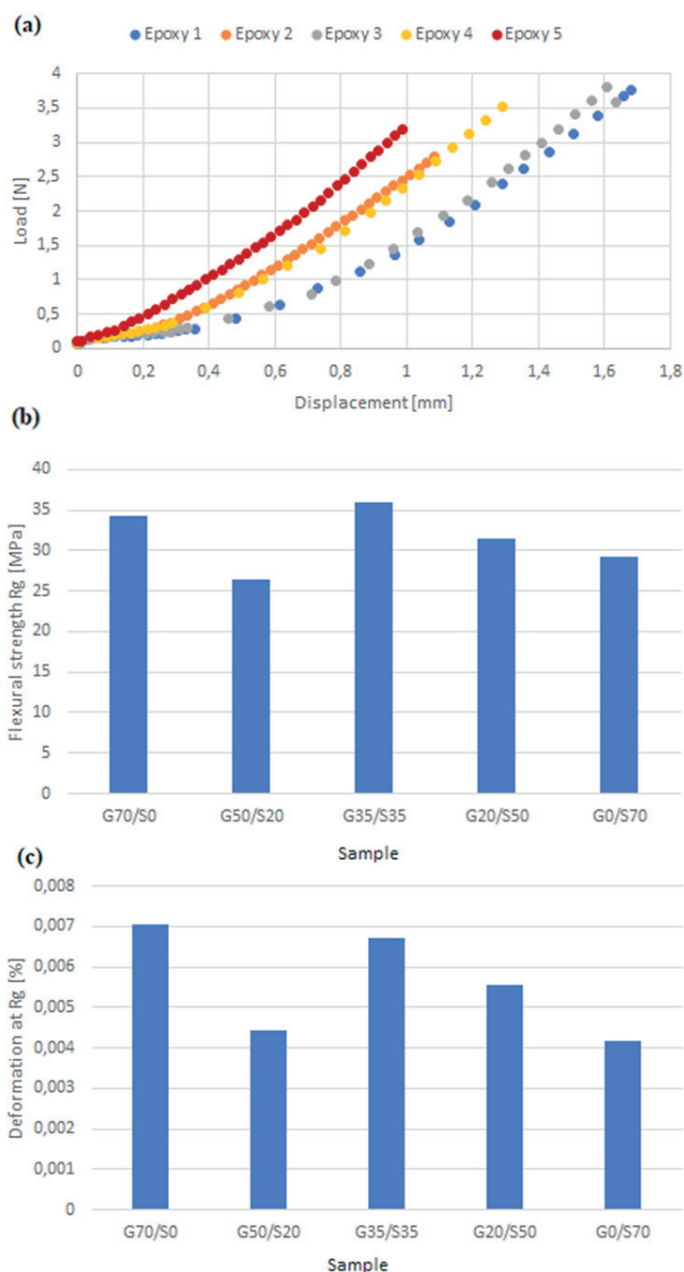
The results of the three-point bending tests [Table 3 and Fig. 5] show that the sample with milled glass [G70/S0] and the sample with milled glass and sand in the volume ratio of 1:1 [G35/S35] have the highest bending strength [R_g]. The increase in the volume of sand in relation to the volume of ground glass, caused the decrease in the bending strength, which is found in samples G20/S50 and G0/S70. This increase causes an increase in the spaces free from filler particles, which weakens the reinforced composite. The G50/S20 sample has a reduced resistance to bending and deformation at R_g , compared to other samples with ground glass reinforcement. This indicates an unfavorable ratio of the volume of ground glass to sand. In sample G35/S35, the effect of a favorable increase in the R_g of the material is found, as a result of the favorable size ratio of the powders. This sample may have a reinforcement effect, due to the fine glass powder filling the voids between the larger grains of sand, causing the material to compact and cover the micro-cuts. This coincides with the results of the compression test. Glass milled in the same volume as sand, has a much larger specific surface, which strengthens the material, thanks to the increased contact surface. The deformation in R_g did not appear to have an effect on the addition of the ground windshield. The values are in

Tablica 4 / Table 4

WYNIKI PRÓBY UDARNOŚCI METODĄ CHARPY'EGO

THE RESULTS OF CHARPY IMPACT TESTS

Sample / Probka	Impact resistance / Odporność na uderzenie, kJ/m ²
G70/S0	9.15 (1.49)
G50/S20	10.13 (0.50)
G35/S35	8.73 (0.87)
G20/S50	7.58 (0.87)
G0/S70	5.85 (0.71)



Rys. 5. Wyniki próby trójpunktowego zginania, (a) wytrzymałość na zginanie R_g , (b) odkształcenie odpowiadające wytrzymałości na zginanie R_g [Instron 4469]

Fig. 5. Tree-point bending test results, (a) flexural strength R_g , (b) deformation at R_g [Instron 4469]

Tablica 5 / Table 5

WYNIKI UZYSKANE W PRÓBIE ARCHIMEDESA

RESULTS OF ARCHIMEDES' METHOD

Sample / Próbka	Apparent density / Gęstość pozorna, g/cm^3	Open porosity / Porowatość otwarta, %	Water absorbability / Nasiąkliwość, %
Concrete / Beton	2.16	15.91	7.35
G70/S0	1.87	0.24	0.13
G50/S20	1.93	0.10	0.05
G35/S35	1.93	0.23	0.12
G20/S50	1.93	0.38	0.20
G0/S70	1.96	0.35	0.20

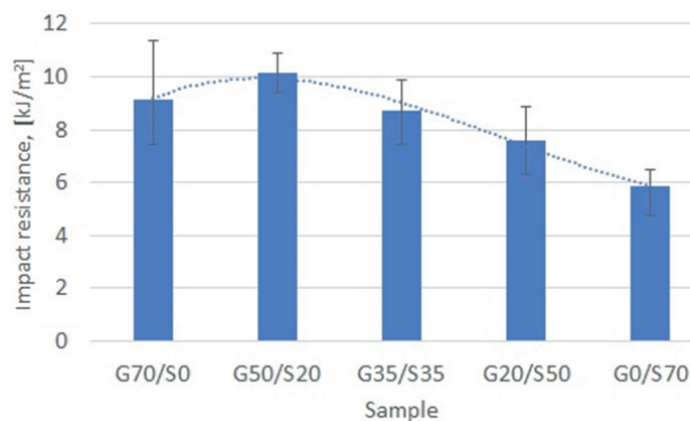


Fig. 6. The results of Charpy impact tests

Rys. 6. Wyniki próby udarności metodą Charpy'ego

fact comparable and do not show any particular trend. Comparing the obtained results for polymer concrete with the literature data (27) of the bending test of conventional concretes – for which the bending strength is 1.1-7.2 MPa, it can be stated that the bending resistance was increased several times. The G35/S35 sample, having a compressive strength of 35.91 MPa, is as much as 5 times stronger than the highest value in conventional concretes, which confirms the effectiveness of the produced polymer concrete, with the use of ground car windows and sand.

Fig. 6 and Table 4 show the results of the Charpy's impact test. The G50/S20 sample showed the highest impact resistance.

Similar results were obtained for samples G70/S0 and G35/S35. The G70/S0 showed a high statistical dispersion. This is probably due to the heterogeneity of the mass of the PC. Similarly to the results of the bending and compression tests: G35/S35, G20/S50, G0/S70 show the linear dependence of the impact toughness. As the sand content increases, the impact toughness decreases. This may be due to the synergistic effects, resulting from the different grain size of the filler in the composite and the beneficial effect of the PVB, foil on the glass surface. It allows to increase the grains surface and provide a substrate with high adhesion to the resin.

3.3. Archimedes' test results

The results of apparent density, open porosity, water absorbability – obtained by Archimedes method, are shown in Fig. 7 and in Table

Rys. 6 i tablica 4 pokazują wyniki próby udarności przeprowadzonej metodą Charpy'ego. Próbka S50/P20 wykazała największą odporność na uderzenie.

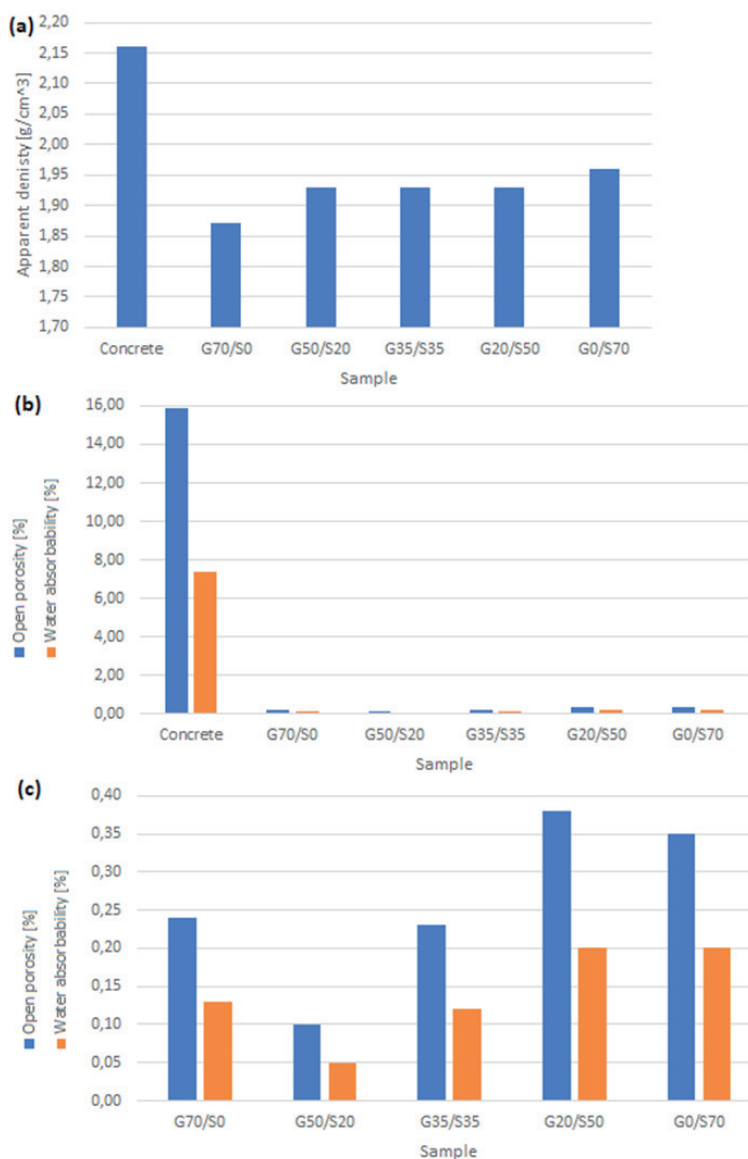
Podobne wyniki uzyskano dla próbek S70/P0 i S35/P35. Próbka S70/P0 wykazuje duże rozproszenie statystyczne. Wynika to prawdopodobnie z niejednorodności masy polimerobetonu. Podobnie jak wyniki uzyskane w próbach zginania i ściskania: S35/P35, S20/P50, S0/P70 mają liniową zależność udarności. Wraz ze wzrostem zawartości piasku zmniejsza się udarność. Może to wynikać z efektów synergicznych spowodowanych różną wielkością ziaren wypełniacza w kompozycie oraz korzystnego wpływu folii PWB na powierzchnię szkła. Pozwala to zwiększyć powierzchnię ziaren i zapewnić podłoże o wysokiej przyczepności do żywicy.

3.3. Wyniki próby Archimedes

Wyniki gęstości pozornej, porowatości otwartej, nasiąkliwości, otrzymanych metodą Archimedes, przedstawiono na rys. 7 i w tablicy 5. Gęstość BP jest o około 10-15% niższa niż w przypadku konwencjonalnego betonu, którego wartość wynosi 2,16 g/cm³ (tablica 5 i rys. 7a). Pozwala to na zastosowanie BP w lekkich, cienkościennych konstrukcjach. Zwłaszcza biorąc pod uwagę większą wytrzymałość w porównaniu do klasycznego betonu. Najmniejszą gęstość ma próbka z samym szkłem = 1,87 g/cm³. Pozostałe próbki mają podobne wartości w zakresie 1,93-1,96 g/cm³. Wzrost zawartości piasku zwiększa gęstość pozorną. BP ma nieporównywalnie mniejszą porowatość otwartą i nasiąkliwość, dlatego konieczne było pokazanie tego rys. 7c, w celu lepszego porównania wyników z dokładniejszą skalą. Wzrost porowatości otwartej determinuje wzrost nasiąkliwości próbek. Wzrost udziału piasku i spadek udziału szkła prowadzi do wzrostu porowatości otwartej i zwiększonej absorpcji wody, co potwierdza tezę, że między ziarnami piasku znajdują się puste przestrzenie. Zwiększenie udziału szkła prowadzi do wypełnienia pustych przestrzeni w materiale, co powoduje zmniejszenie porowatości otwartej i absorpcji wody. Różnica w porowatości otwartej i nasiąkliwości próbek betonu i betonu polimerowego jest znaczna (tab. 5). Dla betonu konwencjonalnego porowatość otwarta wynosi 15,91%, a dla betonu polimerowego jest mniejsza od 0,38%. Znacznie mniejsza nasiąkliwość i otwarta porowatość betonu polimerowego sprawiają, że są to materiały o znacznie lepszej mrozoodporności niż tradycyjny beton.

4. Wnioski

Próbki polimerobetonu zawierające 30% żywicy epoksydowej, wzmocnionej różnymi proporcjami objętościowymi piasku kwarcowego i mielonej słuczki szyb samochodowych, zostały poddane szeroko zakrojonym doświadczeniom. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowany wieloetapowy proces recyklingu szyb samochodowych, prowadzi do uzyskania materiałów przydatnych



Rys. 7. Wyniki próby Archimedes, (a) gęstość pozorną, (b i c) porowatość otwarta i nasiąkliwość, (c) porównanie małych wartości wyników badań dla polimerobetonów

Fig. 7. The results of Archimedes attempt, (a) apparent density, (b and c) open porosity and water absorbability, on (c) approaching the low values of the test results

5. PC density is approximately 10-15% lower than in conventional concrete, the value of which is 2.16 g/cm³ – Table 5 and Fig. 7a. This allows the use of PC in lightweight, thin-walled structures. Especially considering the greater strength compared to classic concrete. The lowest density is found in a sample with glass alone 1.87 g/cm³. The remaining samples have similar values in the range of 1.93-1.96 g/cm³. The increase in the sand content increases the apparent density. The PC has an incomparably lower open porosity and water absorption, therefore it was necessary to create Fig. 7c, in order to better compare the results, with a more accurate scale. The increase in the open porosity determines the increase in the absorbability of the samples. The increase in the proportion of sand and the decrease in the proportion of glass lead to an increase in open porosity and water absorption, which confirms the thesis that there are voids between sand grains. Increasing the proportion of glass leads to filling of the voids in the material, resulting in the decrease in open porosity and water absorption. The difference

do produkcji polimerobetonu. Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Mielone szyby samochodowe w młynie bijakowym pozwoliło na uzyskanie drobnej frakcji kruszywa, o średniej wielkości ziarna wynoszącej 162 μm . Niektóre ziarna zawierają na powierzchni pozostałości folii PWB.
- Dodanie mielonego szkła nie powodowało problemów w uzyskaniu spójnej i jednorodnej masy. Ze względu na większą powierzchnię mniejszych ziaren mielonego szkła, urabialność masy jest utrudniona. Zwiększenie dodatku piasku ułatwia urabialność masy.
- Największą wytrzymałość na ściskanie uzyskano w przypadku kompozytów o zawartości 20 % obj. mielonego szkła, która wynosiła 101 MPa. Jest ona blisko 7 razy większa niż tradycyjnego betonu, badanego jednocześnie, który wykazał około 15 MPa.
- Największą wytrzymałość na zginanie osiągnął kompozyt zawierający 35% obj. szkła i 35% obj. piasku. Jednak kompozyty zawierające 20% i 70% obj. szkła oraz odpowiednio 50 i 0% obj. piasku, wykazały tylko nieznacznie mniejsze wartości.
- Próbkę polimerobetonu nie osiągnęły dużej udarności: 5,85 – 10,13 kJ/m². Udarność materiałów wzrasta wraz z zawartością szkła, a największą wartość ma kompozyt zawierający 50% obj. szkła.
- Spośród próbek polimerobetonu najlepsze właściwości uzyskano dla mieszanki złożonej z 35% piasku, 35% mielonego szkła i 30% żywicy epoksydowej.
- Otwarta porowatość tradycyjnego betonu wynosi 15,9%, a polimerobetonu mniej niż 0,38%. Duża różnica w otwartej porowatości i nasiąkliwości, uzyskana dla betonu tradycyjnego i polimerobetonu pozwala stwierdzić, że ten ostatni będzie miał lepszą mrozoodporność.

Podziękowania

Badanie zostało przeprowadzone w ramach ERASMUS+ Traineeship przez Berk Degirmenci i Berke Dogus Tekeli.

Autorzy dziękują prof. Mateuszowi Koziółowi za jego wielką pomoc w realizacji badań oraz za udzielenie cennych wskazówek.

Literatura / References

1. <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material> (2021, accessed 16 November 2021).
2. D. Kruger, Recent developments in the use of polymer concrete. *Appl Phys Lett* **95**: 233116 (2009).
3. Y. Ohama, Concrete-Polymer Composites – The Past, Present and Future. *KEM*; **466**: 1–14 (2011).
4. W.S. Wahby. Fifty Years' History of Polymers in Concrete in Review. *Polymers in Concrete*, 13-22 (2003)
5. S. Chandra, Y. Ohama, Properties of Concrete-Polymer Composites. *Polymers in Concrete*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 111-147 (1994).

in open porosity and water absorption of concrete and polymer concrete samples, is significant – tab. 5, where for conventional concrete the open porosity is 15.91% and for polymer concrete it is lower than 0.38%. The significantly lower water absorption and open porosity of polymer concrete make them materials with significantly better frost resistance, than traditional concrete.

4. Conclusions

Polymer concrete samples containing 30% of the epoxy resin, reinforced with various proportions of quartz sand and ground car windshield glass, were very precisely tested. Performed research has shown that the applied multi-stage process of recycling of the car windshields, results in obtaining materials useful for the production of polymer concrete. The obtained results of tests and inspections enable to draw following conclusions:

- Milling car windows in a cross-beater mill allowed to obtain a fine aggregate fraction with an average grain size of 162 μm . Some of the grains are bonded with residues of PVB foil.
- Adding ground glass did not cause problems in obtaining a coherent and homogeneous mass. Due to the larger surface of the smaller grains of ground glass, the workability of the mass is more difficult. By increasing the addition of sand, the workability of the mass is easier.
- The highest compressive strength was obtained by the composites containing 20 vol% of milled glass – 101 MPa. It is near 7 times higher than the value of traditional concrete, tested simultaneously, which has about 15 MPa.
- The highest flexural strength was obtained for the composite containing 35 vol% of the glass and 35 vol% of sand. However, the composites containing 20 and 70 vol% of glass and 50 and 0 vol% of the sand, respectively, showed only slightly lower values.
- Polymer concrete samples did not show high impact resistance: 5.85 - 10.13 kJ/m². However, it increases with increasing glass content – the highest value is for the composite containing 50 vol% of the glass.
- Among the polymer concrete samples, the best tested properties were obtained for the mixture of 35% of sand, 35% of ground glass and 30% of epoxy resin.
- Open porosity of traditional concrete is 15.91%, and polymer concrete has lower than 0.38%. The large difference in open porosity – and water absorption, obtained for traditional concrete and the polymer concrete, allow us to conclude that the latter will represent better frost resistance.

Acknowledgments

The study was performed within the frame of ERASMUS+ Traineeship of Berk Degirmenci and Berke Dogus Tekeli.

Authors thank professor Mateusz Koziół, for his wide help by realization of research and for valuable indications.

6. H. Li, J. Sun, J. Chen et al. Proceedings of the 2016 International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development, Shenzhen, China, 733-738 (2016).
7. K.S. Yeon, K.W. Kim, J.D. Choi, et al. Research Trends of Concrete - Polymer Composites in Korea. *Polymers in Concrete*. 1st ed. London: CRC Press, 8-17 (1997).
8. E. Kirlikovali, Polymer/concrete composites - A review. *Polym Eng Sci* **21**, 507-509 (1981). <https://doi.org/10.1002/pen.760210811>
9. G. Martínez-barrera, V. Enrique, O. Gencel et al. Polymer concretes: A description and methods for modification and improvement. *J Mater Educ* **33**, 37-52 (2011).
10. W.F. Chen, E. Dahl-Jorgensen, Polymer-impregnated concrete as a structural material. *Mag Concr Res* **26**, 16-20 (1974). <https://doi.org/10.1680/mac.1974.26.86.16>
11. A. Piskin, Polimer Beton Üretiminde Cam Tozu Kullanılabilirliğinin Araştırılması. MS Thesis, Sakarya University, Turkey, (2010).
12. M. Sautya, What is Polymer Concrete In Details And Their Types & Uses, Civil Engineering, www.civilnoteppt.com/what-is-polymer-concrete-in-details-and-their-types-and-uses/#Types_of_Polymer_Concrete (accessed 17 Nov 2021)
13. T. Hop. *Betony Polimerowe Tom I*. Wydawnictwo politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, (1992).
14. T. Hop, *Betony Polimerowe Tom II*. Wydawnictwo politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, (1992).
15. M. Koziół, Effect of thread tension on mechanical performance of stitched glass fibre-reinforced polymer laminates – experimental study, *Journal of Composite Materials* **47**, 16, 1919 – 1930 (2013). <https://doi.org/10.1177/0021998312452179>
16. M. Koziół, Evaluation of classic and 3D glass fiber reinforced polymer laminates through circular support drop weight tests, *Composites Part B* **168**, 561 – 571 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.078>
17. G. Sathyamoorthy, R. Vijay, D. Lenin Singaravelu, Brake friction composite materials: A review on classifications and influences of friction materials in braking performance with characterizations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J*, in press, First Published December 17, 2021, <https://doi.org/10.1177/13506501211064082>
18. K. Mistewicz, M. Jesionek, M. Nowak, M. Koziół, SbSeI pyroelectric nanogenerator for a low temperature waste heat recovery, *Nano Energy* **64**, 103906, (2019) <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103906>
19. ACI Committee 548. *Polymer Concrete - Structural Applications*, State of the Art Report. Report, American Concrete Institute, Detroit, (1996).
20. M.E. Doody, R. Morgan, *Polymer-Concrete Bridge-Deck Overlays*. Report, New York State Department of Transportation, (1993).
21. J. Dahlberg B. Phares, *Polymer Concrete Overlay Evaluation*. Report, Iowa State University, (2016).
22. C. Vipulanandan, E. Paul, Characterization of Polyester Polymer and Polymer Concrete. *J Mater Civ* **5**, 62-82 (1993). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:1(62))
23. M. Koziół, N. Żuczek, P. Olesik et al. Preliminary analysis of concept of producing polymer concrete surface for outdoor terraces. *Composites Theory and Practice* **20**, 102-110 (2020).
24. J. Terescenko, A. Bitins, V. Shestakov, R. Chatys, J. Maklakov, Algorithm for analyzing deviations and irregularities in the functioning of the airline's structural units and personnel in the face of uncertainty. *Aviation* **24**, 2, 51–56 (2020). <https://doi.org/10.3846/aviation.2020.12375>
25. M. Nodehi, Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: A review. *Innov Infrastruct Solut* **7**, (2021). <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3>
26. W. Ferdous, A. Manalo, S. Hong et al. Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects. *Constr Build Mater* **232**: 117229 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117229>
27. L. Czarniecki, Polymer concretes, *Cem. Wapno Beton* **15** (2), 63–85 (2010).
28. R. Bedi, R. Chandra, S.P. Singh, Reviewing some properties of polymer concrete. *Indian Concr J* **88**, 47-68 (2014).
29. V. Polyakov, R. Chatys, Acoustic conductance of a thick-walled anisotropic spherical shell submerged in liquid. *Aviation* **18**, 1, 52–55 (2014). <https://doi.org/10.3846/16487788.2014.865937>
30. R. Bedi, R. Chandra, S.P. Singh, Mechanical Properties of Polymer Concrete. *J Compos* **2013**, 948745 (2013). <https://doi.org/10.1155/2013/948745>
31. W.P. Lokuge, T. Aravinthan, Mechanical Properties of Polymer Concrete with Different Types of Resin. *Proceedings of the 22nd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, Sydney, Australia, 1147-1152 (2012). CRC Press: Balkema. <https://doi.org/10.1201/b15320-204>
32. B. Zegardło, S. Maciej, O. Paweł et al., Physico-Mechanical Properties and Microstructure of Polymer Concrete with Recycled Glass Aggregate. *Materials* **7**: 1213 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11071213>
33. L.R. Dharani, F.S. Ji, Dynamic Analysis of Normal Impact of Occupant Head on Laminated Glass. *SAE Technical Paper 980862*, (2018). <https://doi.org/10.4271/980862>
34. J. Xu, Y. Li, Crack analysis in PVB laminated windshield impacted by pedestrian head in traffic accident. *Int J Crashworthiness* **14**, 63-71 (2009). <https://doi.org/10.1080/13588260802462427>
35. M. Tupy, P. Mokrejs, D. Merinska et al. Windshield recycling focused on effective separation of PVB sheet. *J Appl Polym Sci* **131** (2014). <https://doi.org/10.1002/app.39879>
36. H. Alhazmi H, S.A.R. Shah, M.K. Anwar et al. Utilization of Polymer Concrete Composites for a Circular Economy: A Comparative Review for Assessment of Recycling and Waste Utilization. *Polymers* **13**, 2135 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13132135>
37. J. Hodul, J. Hodna, R. Dorczytka et al. Utilization of Waste Glass in Polymer Concrete. *MSF* **865**, 171-177 (2016). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.865.171>
38. M. Saribiyik, A. Piskin, A. Saribiyik, The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties. *Constr Build Mater* **47**, 840-844 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.023>
39. R. Kumar, A Review on Epoxy and Polyester Based Polymer Concrete and Exploration of Polyfurfuryl Alcohol as Polymer Concrete. *J Polym* **2016**, 1-13 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7249743>