

Wpływ tworzyw sztucznych z odpadów przemysłowych poddanych obróbce powierzchniowej na właściwości mechaniczne kompozytu cementowego

Effect of surface treated industrial waste plastics on the mechanical properties of cement composite

Słowa kluczowe: odpady przemysłowe z tworzyw sztucznych, właściwości mechaniczne, kompozyt cementowy, obróbka powierzchniowa

Keywords: industrial waste plastic, mechanical properties, cement composite, surface treatment

1. Wstęp

W ostatnich dziesięcioleciach tworzywa sztuczne stały się ważnym elementem w życiu ludzi. Wpływają na to cechy tych materiałów, przede wszystkim mały koszt produkcji, mała gęstość, duża trwałość oraz możliwość ponownego wykorzystania, jako zamiennik wielu surowców (1-6). Z roku na rok produkcja tworzyw sztucznych gwałtownie rośnie. Podaje się, że w 2016 roku osiągnęła 335 milionów ton (7).

Duża ilość produkowanych tworzyw sztucznych, a tym samym ich duże zużycie, doprowadziło do powstania ogromnych ilości odpadów tworzyw sztucznych. Ze względu na niebiodegradowalną strukturę chemiczną, ich rozkład może trwać setki, a nawet tysiące lat. Prowadzi to do gromadzenia się odpadów z tworzyw sztucznych i powoduje poważne problemy środowiskowe. W celu unieszkodliwienia tych odpadów spala się je, co prowadzi do emisji substancji toksycznych, lub gromadzi na hałdach, co powoduje znaczne zanieczyszczenie gleby. W związku z powyższym koniecznym jest poszukiwanie skuteczniejszych metod ich powtórnego wykorzystywania (1-6).

Podczas produkcji kompozytów cementowych stosuje się ogromną ilość zasobów naturalnych. Stąd zrodziła się idea poszukiwania metod wykorzystania odpadów tworzyw sztucznych w tej produkcji. Zastosowanie odpadów z tworzyw sztucznych w produkcji betonu mogłoby rozwiązać problem utylizacji ich dużej ilości, przy jednoczesnym uzyskaniu niektórych pożądaných właściwości, na przykład mniejszej gęstości, większej wytrzymałości na zginanie, ograniczenie skurczu oraz propagacji mikro- i makrospektań w elementach konstrukcyjnych (1-6).

1. Introduction

In the recent decades, plastics have become a dominant subject to human life due to its distinctive characteristics such as low cost, lightweight, long life and capability of being used as a substitute for many materials (1-6). The production of plastics is increasing rapidly from year to year. It is reported that in the year 2016 it reached 335 million tons (7).

This high production of plastics and therefore its high consumption has led to huge amounts of waste plastics. The plastic decomposition in nature might requires hundreds if not thousands of years due to its non-biodegradable chemical structure. This leads to the accumulation of plastic waste and causes serious environmental problems. Many practices have been applied to dispose of plastic waste such as incineration which leads to toxic emissions, or land-filling that causes significant pollution of soil. The constant search for the most efficient ways to recycle the largest amount of waste plastic is the necessity (1-6).

Since cementitious composites production industry is considered as one of the largest fields that expend natural resources, researchers have been looking for a process to dispose of waste plastics in a useful way in this industry. Incorporating plastic waste into cementitious composites will help to recycle plastics in massive volumes at the same time of gaining distinctive cementitious composites properties such as less density of construction elements, enhanced flexural characteristics and controlled shrinkage and micro and macro cracks as reported in the literature (1-6).

There are many methods used by the researchers to use plastic waste in cementitious composites. The most common applications (up-to-date) are replacement of aggregates and as reinforcing fibers.

*Autor do korespondencji author: egemen.teomete@deu.edu.tr

*Corresponding author: egemen.teomete@deu.edu.tr

Stosowanych jest wiele metod wykorzystywania odpadów z tworzyw sztucznych w kompozytach cementowych. Do tej pory najczęstsze zastosowania obejmują zastąpienie części kruszywa oraz stosowanie tych materiałów jako włókien wzmacniających beton.

Zaprawy, w których część kruszyw zastąpiono odpadami zawierającymi polietylen [PE], polipropylen [PP] i poli(tereftalan) etylenu [PET], wykazywały dobre właściwości izolacyjne, zmniejszenie przepuszczalności pary wodnej i zwiększenie odporności na udarność (9). Nastąpiło jednak zmniejszenie wytrzymałości na ścislenie (8). Safi i in. (10) podają, że odpady PET mogą być z powodzeniem stosowane jako kruszywo drobne w zaprawach samozagęszczających się, pomimo zmniejszenia wytrzymałości na ścislenie o 33% po 28 dniach dojrzewania, przy dodatku wynoszącym 50%.

W pracach, w których tworzywa sztuczne stosowano jako włókna wzmacniające, stwierdzono, że zaprawy zawierające 1,5% włókien PET o długości 50 mm mają większą wytrzymałość na zginanie w porównaniu z zaprawami kontrolnymi bez włókien (11). Kim i inni (12) podają, że udział objętościowy włókien pozwala kontrolować pękanie podczas skurczu plastycznego betonu, niezależnie od geometrii włókien. Stosunkowo mały udział objętościowy włókien – do 0,25% zmniejsza pękanie podczas skurczu plastycznego, natomiast udział większy niż 0,5% wykazuje zbliżone właściwości niezależnie od geometrii włókna. Wang i in. (13) podają, że wytrzymałość na zginanie bardzo lekkiego kompozytu cementowego rośnie liniowo wraz ze zwiększającym się udziałem włókien do 0,5% objętościowych, przy zastosowaniu kombinacji włókien PE i włókien stalowych. Peled i in. (14) wykazali, że pojedyncze włókna z polipropylenu wzmacniają w większym stopniu matrycę cementową niż pocięte folie, lub splecione wiązki wielu włókien.

Pogorszenie niektórych właściwości betonów z dodatkiem tworzyw sztucznych przypisuje się słabemu wiązaniu matrycy cementowej z powierzchnią tworzywa sztucznego. Badania przeprowadzone w celu poprawy przyczepności odpadowych tworzyw sztucznych do matrycy cementowej, pozwoliły poprawić niektóre właściwości kompozytów cementowych.

Peled i in. (14) podają, że kąpiel włókien PP w kwasie siarkowym i w roztworze dwuchromianu sodu lub w roztworze niejonowego detergentu zwiększa odporność kompozytu na pierwsze pęknięcia i poprawia zachowanie się materiału bezpośrednio po pęknięciu. Zanurzenie włókien PP w roztworze $Br_2 + H_2O$, a następnie w roztworze amoniaku, również zwiększa odporność kompozytu na pierwsze pęknięcia, ale nie wpływa na zachowania się materiału po ich powstaniu. Obróbka włókien metodą PVAC, polegającą na zanurzeniu włókien w 5% roztworze poliocetanu winylu, a następnie w roztworze $Br_2 + H_2O$ i kolejno w roztworze amoniaku określono jako mało wydajną oraz mającą szkodliwy wpływ na wytrzymałość kompozytu w strefie, w której powstały już pęknięcia. López-Buendía i in. (15) stwierdzili zmniejszenie kąta zwilżania ze 120° do 96° , gdy włókna PP poddano powierzchniowej obróbce zasadowej. Stwierdzono większą wytrzymałość na zginanie w przypadku betonu zawierającego powierzchniowo modyfikowane włókna PP.

The mortars had good insulation properties with a decrease in compressive strength when polyethylene (PE) polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) based waste was used as aggregate replacement in lightweight mortar (8). Although the incorporation of plastic aggregates has proven to be unfavorable for certain properties, such as compressive strength, other properties obtained a considerable improvement in mortar performance, such as water vapor permeability and impact resistance (9). Safi et al. (10) reported that PET waste can be used successfully as a fine aggregate in self-compacting mortars, despite the 28 – day compressive strength of self-compacting mortar containing up to 50% of plastic waste which was reduced by 33%.

In research works related to using plastics as a reinforcing fiber, it was reported that mortar samples containing 1.5% of 50 mm long recycled PET fibers show substantial increase in flexural strength compared to control mortar prisms without fibers (11). Kim et al. (12) reported that the fraction of fiber volume affected the control of plastic shrinkage cracking regardless of the fiber geometry. Relatively low fiber fractions of up to 0.25% by volume had a significant ability to control plastic shrinkage cracking, whereas fiber fractions higher than 0.5% had almost identical characteristics, regardless of fiber geometry. Flexural toughness of ultra-lightweight cement composite increased linearly with the fiber dosage up to 0.5% by volume when combinations of the PE and steel fibers were used as reinforcement by Wang et al. (13). Peled et al. (14) concluded that monofilaments of polypropylene are more effective in reinforcing a cementitious matrix than split film and bundled multifilament strands.

A large number of researchers attribute the decrease in some properties of cementitious composites incorporating plastics to the weak bonding between the cementitious matrix and plastic surface. Research was conducted to improve the adhesion of waste plastic with cementitious matrix, thus enhancing the properties of the cementitious composites.

Peled et al. (14) have reported that the immersion of monofilaments of PP fibers into a bath of sulphuric acid and sodium dichromate solution or immersion of monofilaments of PP fibers in a solution of nonionic detergent are effective in enhancing the first crack stress and the post-cracking behavior of the composites. The immersion of monofilaments of PP fibers in a $Br_2 + H_2O$ solution and then placing in an ammonia solution enhanced the first crack stress but did not improve the post-cracking behavior. PVAC treatment of monofilaments – the immersion of fibers in a 5% polyvinyl acetate solution and after in a $Br_2 + H_2O$ solution and then placed in an ammonia solution was not efficient and was detrimental to the performance in the post-cracking zone. López-Buendía et al. (15) observed a decrease in contact angle value from 120° to 96° degrees when PP fibers are submitted to the alkaline surface treatment. Flexural strength is increased for concrete containing treated PP fibers. Treated PP fibers acted as anti-cracking agents restrained the propagation of cracks once load is applied. Payrow et al. (16) investigated the influence of chemical treatment on the mechanical properties of polymer FRC using chromic acid,

Modyfikowane włókna PP przeciwdziałają pękaniu, ograniczając propagację pęknięć po zastosowaniu obciążenia. Payrow i in. (16) badali wpływ obróbki chemicznej na właściwości mechaniczne polimeru FRC stosując kwas chromowy, nadmanganian potasu i nadtlenek wodoru. Zastosowane metody obróbki powierzchniowej wpłynęły na zmniejszenie kąta zwilżania, nieznaczną poprawę wytrzymałości resztkowej na zginanie, dużą poprawę twardości oraz nieznaczne zmniejszenie wytrzymałości betonu na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania.

Nili i in. (17) wykazali, że dodatek włókien polipropylenowych poprawia mrozoodporność betonu. Meesaraganda i in. (18) badali właściwości mechaniczne beleczek wykonanych z betonu samozagęszczającego się, wzmacnianego hybrydową mieszanką włókien polipropylenowych i stalowych.

Foti (19) badał betony zawierające odpady z plastiku w kształcie płytek oraz pierścieni otrzymane z butelek z PET i stwierdził zwiększenie wytrzymałości, mierzone metodą trzypunktowego zginania. Ferreira i in. (20) pracowali nad wpływem warunków dojrzewania betonów z kruszywem PET, zastępującym kruszywo naturalne w różnych ilościach procentowych. Stwierdzono, że zwiększenie rozmiaru ziaren i proporcji tworzywa sztucznego do naturalnego zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i moduł sprężystości, przy jednoczesnym zwiększeniu odporności na ścieranie. Jak było do przewidzenia ustalono również, że stosunek kruszywa do ilości zastępowanego go tworzywa sztucznego wpływają na właściwości betonu. Borg i in. (21) badali betony z rozdrobnionymi włóknami PET o długości 30 mm i 50 mm, w różnych proporcjach w mieszance, w celu oceny wpływu na właściwości mechaniczne kompozytu. Thornycroft i in. (22), podali, że zastąpienie piasku plastikowymi odpadami w ilości 10% objętościowych nie pogarsza wytrzymałości betonu, a może oszczędzić 820 milionów ton piasku rocznie. Mohammadhosseini i in. (23) podają, że odpadowe, metalizowane tworzywa sztuczne zwiększają odporność na udar i składową plastyczność betonu. Siddique i Naik (24) podali, że rozdrobnione opony mogą być wykorzystywane do produkcji betonu, zwłaszcza gdy jako spoiwo stosowany jest cement Sorela.

Jest wiele prac, w których badano wpływ wykorzystania plastiku w asfalcie (25-32) i w glebie (33-35). Soltani-Jigheh (35) podał, że dodatek odpadów z tworzyw sztucznych poprawia wytrzymałość na ścinanie i zmniejsza ściśliwość gliny.

Celem niniejszych badań jest wyjaśnienie możliwości wykorzystania odpadów przemysłowych z polipropylenu [PP], polietylenu [PE] i poliamidu [PA] jako dodatku wzmacniającego zaprawy. Powierzchnię tworzyw sztucznych traktowano rozcieńczonym roztworem izopropanolu. Właściwości hydrofilowe mierzono na podstawie kąta zwilżania. Przy projektowaniu mieszanin uwzględniano trzy zmienne; rodzaj tworzywa sztucznego (PP, PE, PA), dodatek plastiku [0,2%, 0,5%, 0,8%, 1% i 1,5%] oraz obróbkę powierzchniową tworzyw sztucznych. Stosowano jedynie tworzywa sztuczne, które wykazywały dobre właściwości hydrofilowe i przed dodawaniem do zaprawy stosowano ich rozdrabnianie. Przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie i zginanie oraz ciągliwość.

potassium permanganate, and hydrogen peroxide. The different surface treatment techniques showed decrease in contact angle, slight improvements in flexural residual strength and significant increase of toughness, slight decrease in the 7th and 28th day compressive strength of concrete.

Nili et al. (17) stated that the addition of polypropylene fibers in concrete improved frost resistance. Meesaraganda et al. (18) worked on mechanical properties of hybrid polypropylene – steel fiber reinforced beams of self-compacting concrete.

Foti (19) tested lamellar and ring shaped waste plastics which were obtained from PET bottles, in concrete, and reported that there was an increase in toughness measured by three point bending test. Ferreira et al. (20) worked on effect of curing conditions on recycled PET aggregates replacing natural aggregates in different percent; it was reported that increase in size and ratio of plastic decreased compressive strength, split tensile strength and modulus of elasticity, while improving wear and abrasion resistance. It was also concluded that aggregate – plastic replacement ratio and curing conditions effects properties of concrete. Borg et al. (21) tested 30 mm and 50 mm shredded PET fibers in concrete with different ratios for assessing the effects on mechanical properties of concrete. Thornycroft et al. (22), reported that replacing 10% by volume of sand with waste plastic maintains the performance of the concrete while saving 820 million tons of sand every year. Mohammadhosseini et al. (23) found that waste metalized plastics increased impact resistance and ductility of concrete. Siddique and Naik (24) stated that scrap tires can be used in concrete production especially with magnesium oxychloride cement as binder.

Researchers also worked on the effects of recycled plastics on asphalt (25-32) and soil (33-35). Soltani-Jigheh (35) reported that, the waste plastics improved shear strength and reduced compressibility of clay.

This study aims to clarify more the feasibility of industrial wastes polypropylene (PP), polyethylene (PE) and polyamide (PA) application as reinforcement for mortar. Surface treatment of plastics was applied using diluted solution of isopropanol. Hydrophilic properties was measured by contact angle. Three variables were considered when designing the concrete mixtures; type of plastic (PP, PE, PA), addition ratio (0.2%, 0.5%, 0.8%, 1% and 1.5%) and surface treatment of the plastics. Only types of plastics that showed enhanced hydrophilic properties were treated and added to the mortar. Compressive and bending tests were conducted and compressive and flexural strength and toughness were analyzed.

2. Materials and methods

The materials used in this work include cement CEM II B-M (L-W) 42.5 R, silica fume, modified polycarboxylates based Sika Viscocrete Hi-Tech30 superplasticizer, fine aggregate of crushed limestone with 5 mm maximum size, specific gravity of 2.63, water absorption rate of 1.67% and moisture content of 0.55%, polypropylene (PP), polyethylene (PE) and polyamide (PA) industrial

2. Materiały i metody

Stosowano następujące materiały: cement CEM II B-M (L-W) 42,5R, pył krzemionkowy, superplastyfikator: modyfikowane polikarboksylany Sika Viscocrete Hi-Tech30, rozdrobniony kamień wapienny jako kruszywo drobne o maksymalnej wielkości ziaren 5 mm, gęstości właściwej 2,63, współczynnika absorpcji wody 1,67% i wilgotności 0,55%, odpadowe tworzywa sztuczne: polipropylen [PP], polietylen [PE] i poliamid [PA] dostarczone z zakładu przetwarzania odpadów w Izmirze - Turcja [rysunek 1]. Tworzywa sztuczne uprzednio sortowano, cięto i myto. Długość i szerokość tworzywa PP wynosiła odpowiednio od 0,5 cm do 3 cm i od 0,2 cm do 0,4 cm. Natomiast wymiary tworzywa PA miały długość od 0,5 cm do 1,5 cm i szerokość od 0,3 cm do 0,7 cm. Wymiary tworzywa PE wynosiły od 1 cm do 3 cm. Badania gęstości właściwej tworzyw PP, PE i PA przeprowadzone zgodnie z normą ASTM D792 (36) dały następujące wyniki: PP: 904 kg/m³, PE: 917 kg/m³, PA: 1132 kg/m³. Rozcieńczony roztwór izopropanolu z 50% dodatkiem wody destylowanej posłużył do obróbki powierzchniowej tych odpadowych tworzyw sztucznych.

W celu zbadania jak powierzchniowa obróbka chemiczna tworzyw sztucznych wpłynie na przyczepność matrycy zaprawy do plastiku, podjęto próbę zwiększenia hydrofilowości tworzyw przez ich modyfikację powierzchniową. Obróbka powierzchniowa polegała na zanurzeniu odpadów plastikowych w roztworze izopropanolu na 5 minut, a następnie trzymania w warunkach pokojowych przez 120 minut.

Hydrofilowość mierzono za pomocą pomiaru kąta zwilżania. Pomiar kąta zwilżania określa ilościowo zwilżalność powierzchni plastiku, czyli kąta, jaki kropla tworzy z powierzchnią [Rys. 2a]. Pomiar kąta zwilżania przeprowadzane były przed i po obróbce powierzchni odpadów tworzyw sztucznych. Wyniki przedstawiono w tablicy 1. Zmierzoną większą hydrofilowość [mniejszy kąt zwilżania] tworzyw PP i PE po obróbce chemicznej, natomiast pomiary dla tworzywa PA nie wykazały poprawy tej właściwości. Wykonano zatem trzy mieszanki zapraw zawierających niezmiennione tworzywa PP, PE, PA, oraz dwie mieszanki z tworzywami zmienionymi powierzchniowo, zmienione PP [TPP] i PE [TPE].

Zaprawy wykonano zgodnie z TS 802 (37). Założona wytrzymałość na ścislenie wynosiła 45 MPa. Stosunek woda/spoiwo wynosił 0,37, Zawartość wody wynosiła 220 kg/m³. Dodatek superplastyfikatora wynosił 1% w stosunku do masy spoiwa, a stosunek pył krzemionkowy/całkowita zawartość spoiwa 10%. Ilość użytych materiałów w kg/m³ mieszanki wzorcowej przedstawiono w tablicy 2. Przygotowano 26 mieszanin zgodnie z następującymi zmiennymi: rodzaj odpadowego tworzywa sztucznego [PP, PE, PA, TPP, TPE], stosunek objętościowy odpadów tworzyw sztucznych do matrycy zaprawy [0,2%, 0,5%, 0,8%, 1% i 1,5%]. Właściwości wykonanych zapraw porównano do zaprawy wzorcowej bez tworzywa sztucznego.

Pierwszym etapem przygotowania zapraw było zmieszanie drobno-kruszywa z cementem i pyłem krzemionkowym w naczyniu ze stali nierdzewnej. Po uzyskaniu jednorodnej mieszaniny, oddzielnie



Rys. 1. Odpadowe tworzywa sztuczne (a) PP, (b) PE and (c) PA

Fig. 1. (a) PP, (b) PE and (c) PA waste plastics

waste plastics which were supplied from a recycling factory in Izmir-Turkey (Fig. 1). Plastics have passed through sorting, cutting and washing processes. The lengths of the PP waste plastic are ranging between 0.5-3 cm and the width varies between 0.2-0.4 cm. PA waste plastic dimensions are ranging between 0.5-1.5 cm for the length and between 0.3-0.7 cm for the width. PE waste plastic dimensions are between 1 and 3 cm. Specific gravity and

Tabela 1 / Table 1

WARTOŚCI KĄTA ZWILŻANIA WYJŚCIOWEGO I POWIERZCHNIOWO ZMIENIONEGO SZTUCZNEGO TWORZYWA ODPADOWEGO

CONTACT ANGLE VALUES OF TREATED AND UNTREATED WASTE PLASTIC

Tworzywo odpadowe / Waste plastic	Kąt zwilżania, stopnie / ontact Angle, degrees
Polipropylen / Polypropylene PP	86,2
Zmieniony polipropylen Treated Polypropylene, TPP	59,2
Polietylen / Polyethylene, PE	90,1
Zmieniony polietylen Treated polyethylene, TPE	83,8
Poliamid / Polyamide, PA	79,1
Zmieniony poliamid Treated Polyamide, TPA	82,7

Tablica 2 / Table 2

UDZIAŁ SKŁADNIKÓW W MIESZANCE WZORCOWEJ, KG/M³

PROPORTION OF INGREDIENTS IN REFERENCE MIXTURE, KG/M³

Cement	Kruszywo Aggregate	Pył krzemionkowy Silica fume	Plastyfikator Plasticizer	Woda / Water
499	1339	55,5	5,6	220

zmieszano plastyfikator i wodę, a następnie dodawano po 1/3 do składników suchych, upewniając się, że po każdym dodaniu, składniki zostały dokładnie wymieszane. Powstałą zaprawę mieszano następnie w mikserze o pojemności 5 litrów przez 5 minut, aż do uzyskania jednorodnej konsystencji. Odpady z tworzywa sztucznego dodawano stopniowo do zaprawy, aby zapobiec aglomeracji. Zaprawę nakładano do form w dwóch warstwach, przy czym każdą ubijano prętem 20 razy, a następnie całość zagęszczano wibracyjnie. Stwardniałą zaprawę rozformowano po 24 godzinach. Próbkę dojrzewały w 20°C przez 28 dni.

Dla każdego rodzaju zaprawy wykonano trójpunktowe badanie wytrzymałości na zginanie na 3 prostopadłościennych próbkach o wymiarach 4 cm x 4 cm x 16 cm. Wytrzymałość na ścislenie badano na bocznych powierzchniach próbek, wykonując sześć pomiarów dla każdej zaprawy. Badania wykonano przy użyciu prasy Shimadzu Autograph AGS-300kNX [Rys. 2b] o maksymalnej sile nacisku 300 kN. Podczas badań wytrzymałościowych obciążenie i przemieszczenie rejestrowano 10 razy na sekundę przy użyciu oprogramowania Trapezium X. Następnie przeanalizowano i omówiono wytrzymałość na zginanie, ścislenie oraz energię pęknięcia.

Szybkość ugięcia przy wykonywaniu badania wytrzymałości na zginanie wynosiło 0,2 mm/min. Badanie przerywano, gdy ugięcie punktu środkowego próbki osiągało 2 mm. Długość przęsła wynosiła 140 mm. Rysunek 3 pokazuje uszkodzenie próbki zaprawy przy badaniu trójpunktowego zginania. Badania trójpunktowego zginania przeprowadzono zgodnie z ASTM C1609 (38). Wyniki badań analizowano pod kątem wytrzymałości na zginanie i energii pęknięcia przy zginaniu. Wytrzymałość na zginanie obliczono z równania [1], w oparciu o ASTM C1609:

$$f_b = (P \cdot L) / b \quad [1]$$

density were measured according to ASTM D792 (36). Densities of the used waste PP, PE and PA are 904 kg/m³, 917 kg/m³ and 1132 kg/m³ respectively. Isopropanol solution (50% isopropanol + 50% distilled water) for waste plastic treatment application was used.

In order to study the improvement of the adhesion between waste plastic and mortar matrix, it was attempt to increase the hydrophilic properties of the plastic surfaces using chemical treatment. Waste plastics were immersed into the isopropanol solution for 5 minutes and then were exposed to room conditions for 120 minutes.

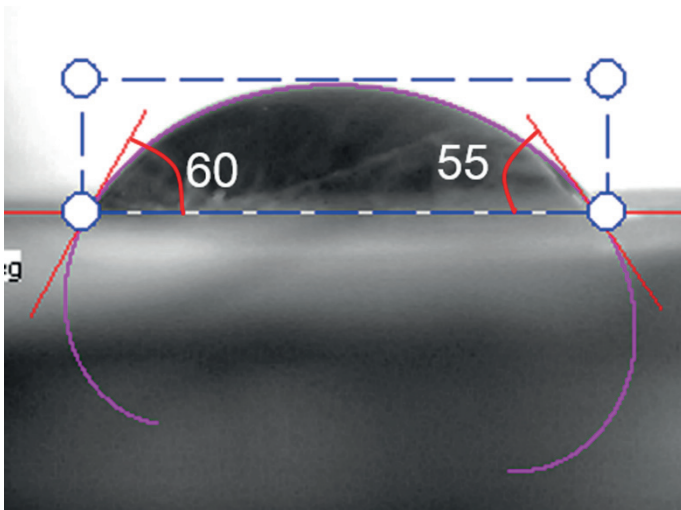
Hydrophilic properties were measured using contact angle. Contact angle measurement quantifies the wettability of a waste plastic surface by determination of the drops wetting

angle (Fig. 2a). Contact angle measurements were conducted before and after waste plastic surfaces treatment and the results are shown in Table 1. Enhanced hydrophilic properties of PP and PE was noticed after treatment but treated PA did not show the desirable improvement. So, it was decided to carry out mortar mixture designs containing PP, PE, PA, treated PP (TPP) and treated PE (TPE) waste plastics.

The mortar matrix was designed following TS 802 (37) instructions. Target compressive strength was 45 MPa. Water/binder ratio was 0.37. Water content was 220. Plasticizer/binder ratio was 1%. Silica fume/total binder ratio was 10%. Materials content by kilograms in 1 cubic meter of the reference mixture are shown in Table 2. 26 mixtures were designed according to the following parameters; the waste plastics PP, PE, PA, TPP, TPE volume ratios added to the mortar matrix was 0.2%, 0.5%, 0.8%, 1% and 1.5%. One more conventional mortar mixture was also designed as a reference.

Mortar cast procedure began by mixing fine aggregate with cement and silica fume in a stainless-steel bowl. After homogeneity was attained in the dry mixture, plasticizer and water were mixed together in a separate beaker and added at 1/3 dosages of total liquid after ensuring that they were thoroughly mixed. Then, the mixture was mixed in a 5-liter capacity mixer for 5 minutes until its consistency was attained. The waste plastic were added gradually into the mixture to prevent lumping. The mixture was cast into molds in two layers, every layer was rod 20 times. The mortar was compacted using external vibration. Specimens were removed from the molds after 24 hours from casting. The samples were cured in water at 20°C for 28 days.

For each mixture, 3 bars of 4×4×16 cm dimension were tested with third-point loading test. Compression test was applied to the



Rys. 2. a) Kąt zwilżania modyfikowanego powierzchniowo tworzywa odpadowego PP (b) Prasa wytrzymałościowa Shimadzu

Fig. 2. a) Contact angle of treated waste PP b) Shimadzu mechanical test machine



Rys. 3. Zniszczenie próbki zaprawy podczas badania wytrzymałości na zginanie

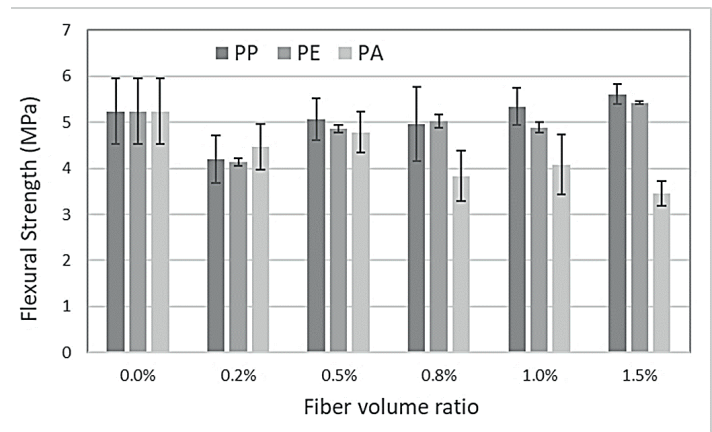
Fig. 3. Mortar sample failed by bending test

gdzie: f_b jest wytrzymałością na zginanie w MPa, P – obciążeniem w N, L jest odległością między podporami w mm, b jest średnią szerokością próbki w miejscu pęknięcia w mm, d jest średnią głębokością próbki w miejscu pęknięcia w mm. Energię pęknięcia przy zginaniu obliczono jako powierzchnię pod krzywą obciążenie-odkształcenie do uzyskania odkształcenia wynoszącego 2 mm.

W badaniach wytrzymałości na ściskanie, szybkość narastania obciążenia wynosiła 0,5 mm/min, a badanie przerywano, gdy siła nacisku była mniejsza od 50% maksymalnej uzyskanej siły. Na rysunku 4 pokazano uszkodzenie próbki zaprawy badanej na ściskanie. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z ASTM C349 (39). Wyniki badań analizowano pod względem wytrzymałości na ściskanie i energii pęknięcia przy ściskaniu. Wytrzymałość na ściskanie obliczono stosując równanie [2]:

$$\sigma = P / b^2 \quad [2]$$

gdzie: σ oznacza wytrzymałość na ściskanie w MPa, P jest maksymalnym obciążeniem w N, b jest wymiarem próbki w mm.



Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie w funkcji udziału objętościowego odpadów PP, PE i PA w zaprawie

Fig. 4. Flexural strength vs. waste PP, PE and PA volume ratio added to mortar

sides of the samples; thus, six compression tests were done for each mixture. Shimadzu Autograph AGS-300kNX mechanical testing machine (Fig. 2b) with maximum load capacity of 300 kN was used. Load and stroke were recorded 10 times per second during the mechanical tests using Trapezium X software. Then flexural and compressive strength and toughness were analyzed and discussed.

Bending test speed was 0.2 mm/min. Test adjusted to stop when specimen midpoint deflection reached 2 mm. Span length was 140 mm. Fig. 3 shows a mortar sample failed by bending test. Bending tests were performed according to ASTM C1609 (38). Results of bending tests were analyzed in terms of flexural strength and flexural toughness. Flexural strength was calculated from Eq. [1]. (ASTM C1609);

$$f_b = (P \cdot L) / (b \cdot d^2) \quad [1]$$

where; f_b is the flexural strength in MPa, P is the load in N, L is the span length in mm, b is the average width of the specimen at the

Wytrzymałość na ściskanie została obliczona jako powierzchnia pod krzywą obciążenie-przesunięcie, aż do momentu spadku siły do 50% jego maksymalnej wartości.

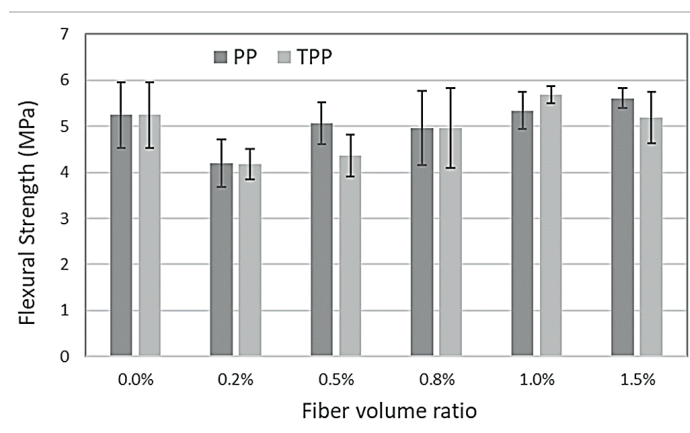
3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wytrzymałość na zginanie

Wytrzymałość na zginanie w funkcji stosunku objętościowego odpadowych tworzyw PP, PE i PA w zaprawach przedstawiono na rysunku 4. Biorąc pod uwagę słupki błędów, wytrzymałość na zginanie zapraw z PP i PE nie zmieniła się wraz ze zwiększeniem udziału objętościowego odpadów z tworzyw. Wyjątek stanowią zaprawy z dodatkiem 0,2% objętościowych PP i PE, przy którym nastąpił spadek wytrzymałości. Wytrzymałość na zginanie zaprawy z tworzywem PA zmniejsza się wraz ze zwiększeniem udziału objętościowego tego tworzywa w zaprawie.

Największą wytrzymałość na zginanie miały zaprawy z dodatkiem 1,5% PP i PE. W porównaniu do zaprawy wzorcowej wzrosła ona odpowiednio o 8% i 4%. Powierzchniowa obróbka odpadów izopropanolem nie doprowadziła do dużej zmiany wytrzymałości na zginanie zapraw z tworzywami PP i PE, co pokazano na rysunkach 5 i 6.

Zależność energii pęknięcia przy zginaniu w funkcji dodatku odpadowych tworzyw PP, PE i PA w zaprawach przedstawiono na rysunku 7. Zmierzone znaczne zwiększenie energii pęknięcia wraz ze zwiększaniem dodatku tworzywa sztucznego dla wszystkich zapraw. Zaprawa zawierająca tworzywo PP wykazuje największe zwiększenie energii pęknięcia w porównaniu z zaprawami zawierającymi tworzywa PE i PA. Dodawanie tworzyw PP, PE i PA w ilości 1,5 % objętościowych prowadzi do zwiększenia energii pęknięcia przy zginaniu odpowiednio o około 1840%, 570% i 360% w odniesieniu do zaprawy wzorcowej. Odpady z tworzyw sztucznych mostkują powstałe pęknięcia zwiększając energię potrzebną do propagacji pęknięć, zwiększając w ten sposób wytrzymałość na zginanie zapraw.



Rys. 5. Wytrzymałość na zginanie w funkcji udziału objętościowego odpadów PP i TPP w zaprawie

Fig. 5. Flexural strength vs. waste PP and TPP volume ratio added to mortar

fracture in mm, and (d) is the average depth of the specimen at the fracture in mm. Flexural toughness is calculated as the area under the load-displacement curve until 2 mm stroke.

In compressive strength tests, loading rate was 0.5 mm/min and tests were set to be stopped when the force falls to 50% of the obtained maximum force. Compression tests were performed according to the instructions of ASTM C349 (39). Results of the compression tests were analyzed in terms of compressive strength and compressive toughness. Compressive strength was calculated from the Eq. [2].

$$\sigma = P / b^2 \quad [2]$$

where; σ is the compressive strength in MPa, P is the maximum load in N and b is the dimension of the cube specimen in mm. Compressive toughness was calculated as the area under the load-stroke curve until load drops to 50% of its maximum value.

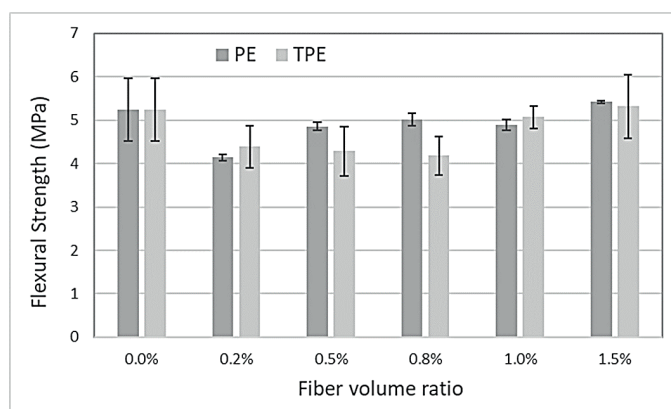
3. Results and discussion

3.1. Bending Test Results

Flexural strength vs. waste plastic volume ratio for PP, PE and PA reinforced mortars are presented in Fig. 4. The flexural strength did not change with waste plastics PP and PE for all volume ratio of reinforced with these plastics mortars bars except for the 0.2% volume ratio at which a decrease of this strength has occurred. Flexural strength of mortar bars reinforced with PA was decreasing as volume ratio of this waste plastic was increasing.

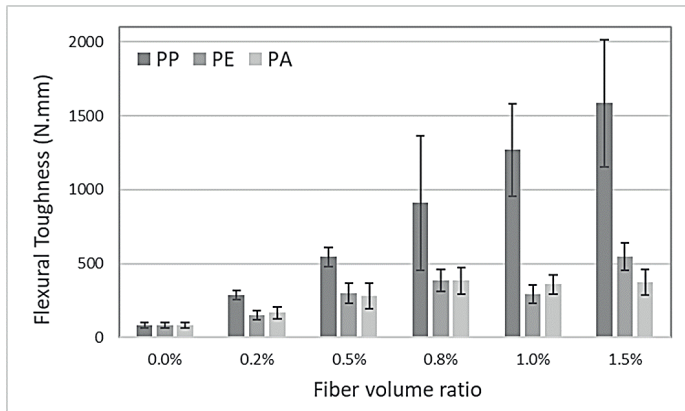
The maximum flexural strength of PP and PE waste plastic reinforced mortars at 1.5% volume ratio by an increase of 8% and 4%, respectively was achieved, in comparison to the plain mortar. Isopropanol treatment did not shown the significant change in the flexural strength of PP and PE reinforced mortars as can be seen in Figs. 5 and 6.

Flexural toughness vs. waste plastic volume ratio relationship of PP, PE and PA reinforced mortars is presented in Fig. 7. A significant increase in flexural toughness with volume ratio of waste plastics



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie w funkcji udziału objętościowego odpadów PE i TPE w zaprawie

Fig. 6. Flexural strength vs. waste PE and TPE volume ratio added to mortar



Rys. 7. Energia pęknięcia w funkcji stosunku objętościowego odpadów PP, PE i PA w zaprawie

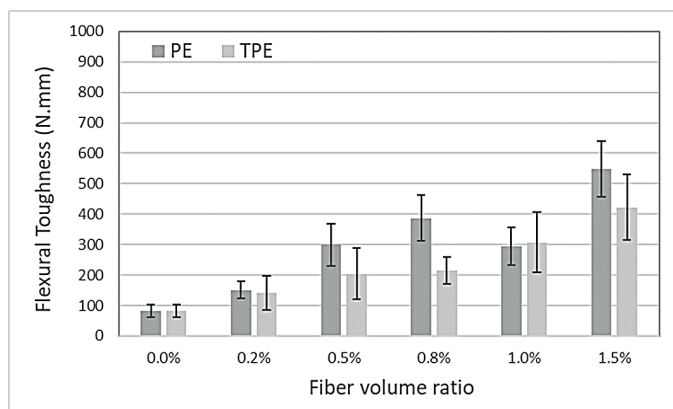
Fig. 7. Flexural toughness vs. waste PP, PE and PA volume ratio added to mortar

Obróbka powierzchniowa tworzyw sztucznych za pomocą izopropanolu powoduje zmniejszenie energii pęknięcia przy zginaniu dla zapraw z tworzywami PP i PE (rysunki 8 i 9).

Zależność obciążenie - odkształcenie dla wszystkich próbek zapraw z 1,5 % dodatkiem objętościowym tworzywa sztucznego pokazano na rysunku 10. W porównaniu do innych zapraw po wystąpieniu piku, plastyczność i absorpcja energii jest większa w zaprawach zawierających tworzywa PP i TPP. Zwiększenie to można wytłumaczyć dużym współczynnikiem kształtu odpadowego polipropylenu. Wszystkie zaprawy z dodatkiem tworzyw mają większą plastyczność w porównaniu z wzorcem co widać na rysunku 10.

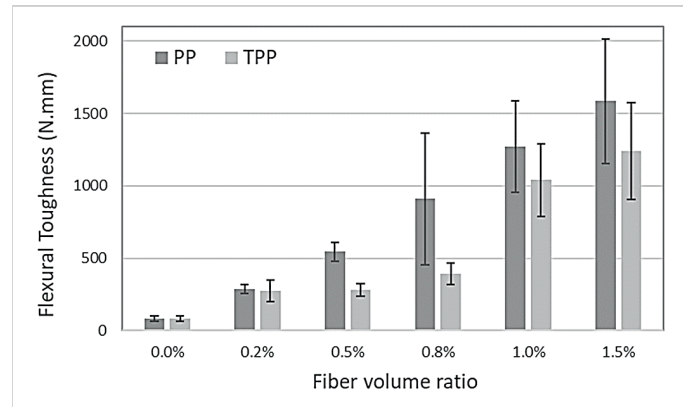
3.2. Wytrzymałość na ściskanie

Rysunek 11 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w funkcji stosunku objętościowego odpadów tworzyw sztucznych PP, PE i PA w zaprawach. Niezależnie od rodzaju zastosowanego tworzywa sztucznego, wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się wraz ze zwiększaniem dodatku tworzyw sztucznych. Większe zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie zmierzono dla zaprawy z tworzywem PE. Jest to prawdopodobnie spowodowane większą powierzchnią właściwą odpadów PE. Obróbka powierzchniowa



Rys. 9. Energia pęknięcia w funkcji stosunku objętościowego odpadów PE i TPE w zaprawie

Fig. 9. Flexural toughness vs. waste PE and TPE volume ratio added to mortar.



Rys. 8. Energia pęknięcia w funkcji stosunku objętościowego odpadów PP i TPE w zaprawie

Fig. 8. Flexural toughness vs. waste PP and TPP volume ratio added to mortar

addition for all mortars was obtained. Mortar with PP addition had the maximum increment in comparison to PE and PA reinforced mortars. The addition of a 1.5% volume ratio of PP, PE and PA led to an increase of flexural toughness by 1840%, 570% and 357%, respectively, with respect to the reference mortar. The waste plastics are bridging the cracks and increase the flexural energy needed to open them, thus increase the flexural toughness.

It can be seen from Figs. 8 and 9 that the isopropanol treatment of waste plastic surfaces caused a reduction in the flexural toughness of the mortars reinforced with PP and PE plastics.

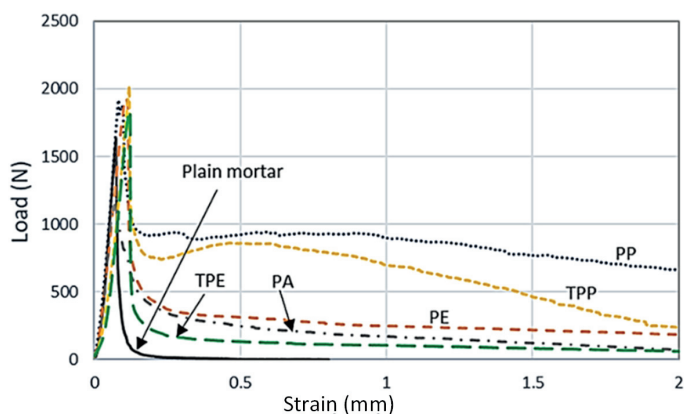
The relationship between load and strain for all used waste plastic reinforced mortar specimens at 1.5% addition ratio are shown in Fig. 10. It can be stated that the post-peak ductility and energy absorption is higher in PP and TPP reinforced mortars than in the case of the other plastics reinforced mortars. This increase can be explained by the high aspect ratio of waste polypropylene. All the waste plastics reinforced mortars had the higher ductility in comparison to the reference mixture, as seen in Fig. 10.

3.2. Compressive test results

Fig. 11 presents the compressive strength vs. waste plastics volume ratio of PP, PE and PA reinforced mortars. The compressive strength decreased with waste plastic volume ratio rise for all waste plastic types. Sharper drop in the compressive strength of the waste PE reinforced mortar with volume ratio increase is noticed, possibly due to the greater surface area of this plastic. Surface treatment led to an improvement in the compressive strength of PP and PE reinforced mortars as seen in Figs. 12 and 13.

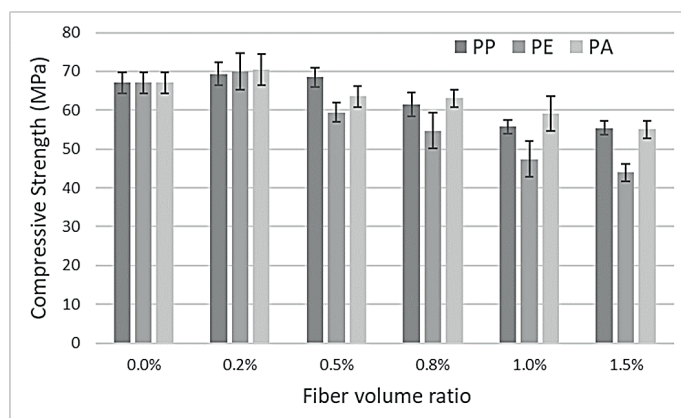
Compressive toughness vs. volume ratio relationship for plastics PP, PE and PA reinforced mortars have the similar pattern of compressive strength as shown in Fig. 14. Surface treatment led to an improvement in the compressive strength of PP and PE reinforced mortars as seen in Figs. 15 and 16.

This reduction in the compressive strength and compressive toughness by increasing PP, PE and PA volume ratio can be attributed to the behavior of waste plastic as weak zones in mortar matrix.



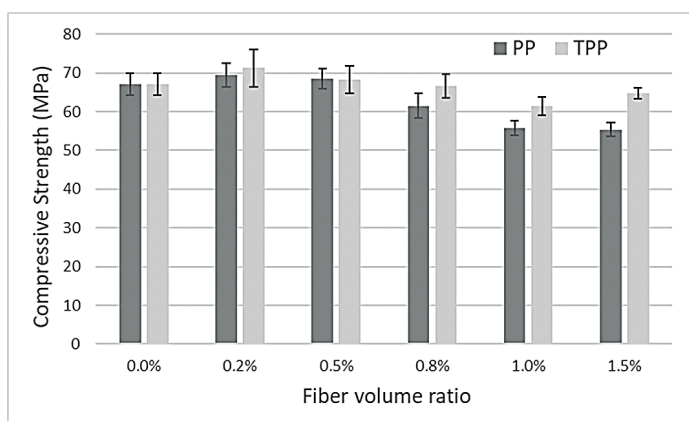
Rys. 10. Krzywe naprężenie-odkształcenie przy 1,5% stosunku objętościowym odpadowego tworzywa sztucznego w badaniach wytrzymałości na zginanie

Fig. 10. Load vs. strain at 1.5% waste plastic volume ratio in bending tests



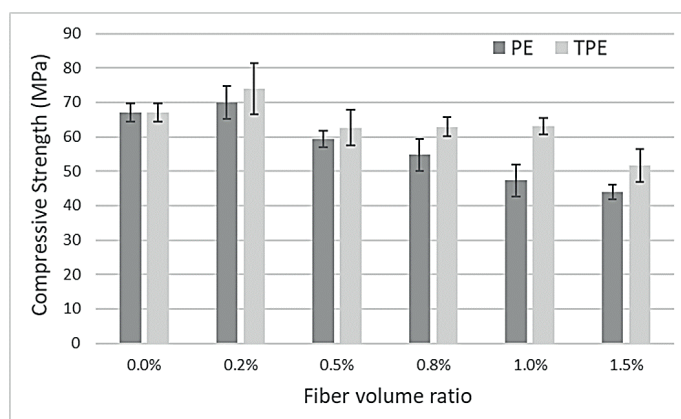
Rys. 11. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji stosunku objętościowego odpadów PP, PE i PA w zaprawie

Fig. 11. Compressive strength vs. PP, PE and PA volume ratio added to mortars



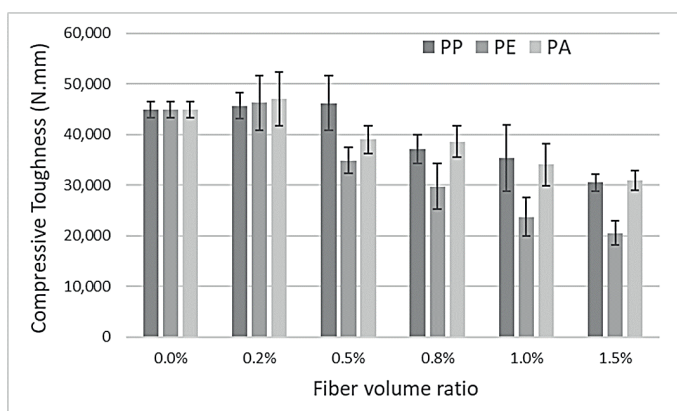
Rys. 12. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji stosunku objętościowego odpadów PP i TPP w zaprawie

Fig. 12. Compressive strength vs. PP and TPP volume ratio added to mortars



Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji stosunku objętościowego odpadów PE i TPE w zaprawie

Fig. 13. Compressive strength vs. PE and TPE volume ratio added to mortars

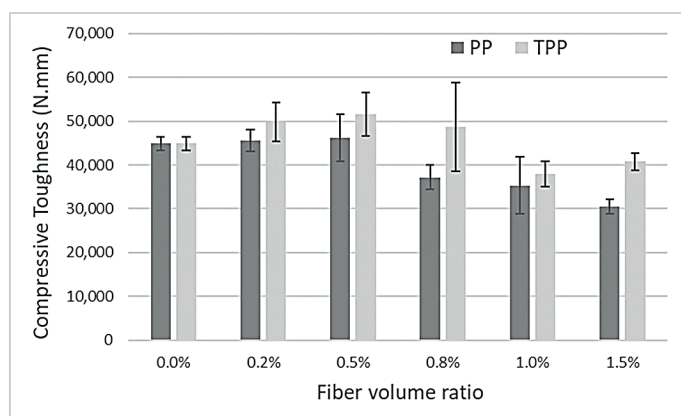


Rys. 14. Energia pęknięcia przy ściskaniu w funkcji dodatku odpadów PP, PE i PA w zaprawie

Fig. 14. Compressive toughness vs. PP, PE and PA volume ratio added to mortars

proceeds to an increase in the compressive strength of mortars with PP and PE, as presented in Figures 12 and 13.

The relationship between fracture energy and the addition of waste plastic volume ratio for PP, PE and PA in mortars (Fig. 14) shows a similar trend



Rys. 15. Energia pęknięcia przy ściskaniu w funkcji dodatku odpadów PP i TPP w zaprawie

Fig. 15. Compressive toughness vs. PP and TPP volume ratio added to mortars

The relationship between load and strain obtained from compression test for all waste plastics reinforced mortar specimens at 1.5% addition ratio are shown in Fig. 17. It can be stated that the

zależności zmierzonej dla wytrzymałości na ściskanie (rys. 11). Obróbka powierzchniowa prowadzi do poprawy energii pęknięcia przy ściskaniu zapraw wzmocnionych PP i PE, jak przedstawiono na rysunkach 15 i 16.

Powyżej opisane zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie i energii pęknięcia przy zwiększającym się udziale objętościowym tworzyw PP, PE i PA można przypisać zwiększającej się ilości słabych stref w osnowie zaprawy, którymi są plastikowe elementy.

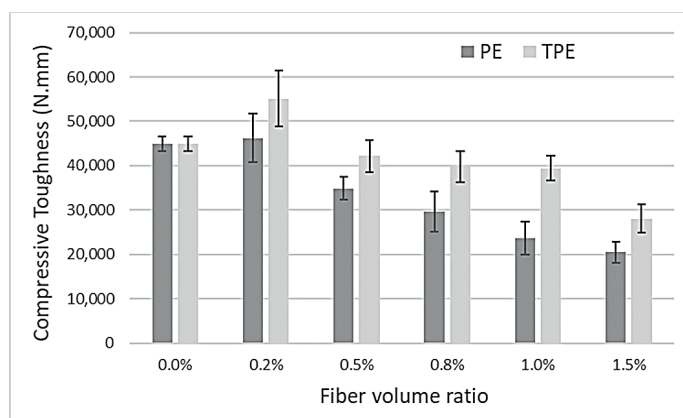
Zależność między obciążeniem a odkształceniem uzyskanym w wyniku badania wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich próbek zapraw z 1,5% dodatkiem objętościowym tworzywa sztucznego pokazano na rysunku 17. Po wystąpieniu pików, plastyczność i absorpcja energii w zaprawach z tworzywem PP i TPP wzrosły.

4. Wnioski

W przedstawionych badaniach wykorzystano odpady z tworzyw sztucznych, po wcześniejszym rozdrobieniu i myciu w zakładzie przetwarzania odpadów. Badanymi tworzywami sztucznymi były PP, PE i PA. Przeprowadzono pomiar kąta zwilżania dla tworzyw wyjściowych oraz poddanych działaniu roztworu izopropanolu. Hydrofilowość tworzyw PP i PE zwiększyła się dzięki obróbce chemicznej.

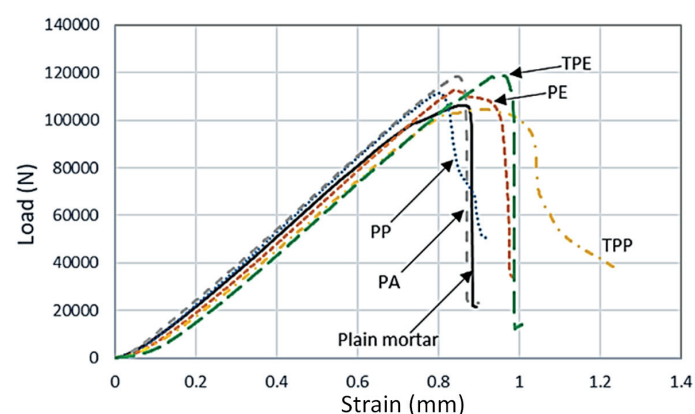
Zaprojektowano pięć rodzajów zapraw zawierających tworzywa PP, TPP, PE, TPE i PA przy różnych udziałach objętościowych: 0,2%, 0,5%, 0,8%, 1% i 1,5%. Z badań wyciągnięto następujące wnioski:

- Wytrzymałość na zginanie zapraw z tworzywem PP i PE zwiększyła się, przy 1,5% dodatku objętościowym tworzywa sztucznego. Chemiczna obróbka powierzchniowa tworzyw sztucznych nie wykazała znacznego wpływu na wytrzymałość na zginanie.
- Energia pęknięcia przy zginaniu zapraw z tworzywami PP, PE i PA zwiększyła się znacznie wraz ze zwiększeniem dodatku tworzywa odpadowego. Zmierzono 20-krotne zwiększenie energii pęknięcia przy zginaniu zaprawy z tworzywem PP [1,5% objętościowych] w stosunku do mieszaniny wzorcowej oraz odpowiednio około 6 i 4-krotne zwiększenie w przypadku zapraw z PE i PA [1,5% objętościowych].
- Odpady z tworzyw sztucznych mostkują powstałe pęknięcia i zwiększają wytrzymałość zapraw. Chemiczna obróbka powierzchniowa tworzyw sztucznych nie wykazała pozytywnego wpływu na energię pęknięcia zapraw.
- Wytrzymałość na ściskanie i energia pęknięcia przy ściskaniu zmniejszają się wraz ze zwiększaniem dodatku odpadów z tworzyw sztucznych. Obróbka powierzchniowa tworzyw PP i PE, zwiększyła wytrzymałość na ściskanie i energię pęknięcia wykonanych z ich dodatkiem zapraw w porównaniu do zapraw z tworzywami niemodyfikowanymi, ze względu na zwiększoną hydrofilowość.
- Odpady z tworzyw sztucznych są słabymi ogniwami w osnowie zaprawy i zmniejszają wytrzymałość na ściskanie. Zmniejsze-



Rys. 16. Energia pęknięcia przy ściskaniu w funkcji dodatku odpadów PE i TPE w zaprawie

Fig. 16. Compressive toughness vs. PE and TPE volume ratio added to mortars



Rys. 17. Krzywe obciążenie-odkształcenie przy 1,5% zawartości odpadowego tworzywa sztucznego w badaniach wytrzymałości na ściskanie

Fig. 17. Load vs. strain at 1.5% waste plastic volume ratio in compressive strength tests

post-peak ductility and energy absorption increased in TPP and TPE reinforced mortar specimens.

4. Conclusions

In this study, different waste plastic types were supplied from recycling factory after exposing to shredding, and washing processes. These plastics were polyethylene (PE) polypropylene (PP) and polyamide PA. Contact angle measurement was applied to untreated and isopropanol treated waste plastics. The hydrophilic properties of PP and PE was increased by isopropanol treatment.

Five mortars were designed with PP, TPP, PE, TPE, and PA using different volume ratios addition: 0.2%, 0.5%, 0.8%, 1% and 1.5%. The following conclusions can be drawn from the results of this study:

- Flexural strength of plastics PP and PE reinforced mortars increased when 1.5% by volume ratio of these plastics were added. Waste plastics surface treatment did not show considerable effect on the flexural strength.

nie wytrzymałości na ściskanie może zostać przewidziane przy projektowaniu betonu i zaprawy, i odpowiednia modyfikacja receptury może zapewnić odpowiednią wytrzymałość i energię pęknięcia. Zwiększenie energii pęknięcia pozwala na uzyskanie kompozytu cementowego o większej ciągliwości.

Wykorzystanie przemysłowych odpadów z tworzyw sztucznych w kompozytach cementowych stanowi o nowatorstwie przedstawionych badań. Plastikowe odpady sztuczne mogą być zastosowane jako wzmocnienie zapraw i betonów o zwiększonej ciągliwości i energii pęknięcia, co poprawia odporność sejsmiczną konstrukcji. Przede wszystkim jednak ponowne wykorzystanie odpadów przemysłowych jako materiałów konstrukcyjnych zapobiega dalszemu zanieczyszczeniu środowiska i pozwala prowadzić zrównoważoną gospodarkę.

Podziękowania

Chcielibyśmy podziękować firmie Narsan Plastic Co. za dostarczenie odpadowych tworzyw sztucznych. Dziękujemy Batıçım Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş. i Sika Construction Chemicals Co. za wsparcie materiałowe badań. W imieniu wszystkich autorów, autor korespondencyjny oświadcza, że nie ma konfliktu interesów.

Literatura / References

1. R. Siddique, J. Khatib, I. Kaur, Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste Management* 28 (2008) 1835–1852.
2. N. Saikia, J. de Brito, Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review, *Construction and Building Materials* 34 (2012) 385–401.
3. L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Management* 51 (2016) 19–42.
4. S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: A review, *Construction and Building Materials* 93 (2015) 180–188.
5. R. Sharma, P. P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete e a review, *Journal of Cleaner Production* 112 (1) (2015) 1-10.
6. S. Mukhopadhyay, S. Khatana, A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete, *Journal of Industrial Textiles* 45(2) (2015) 239–264.
7. Plastics Europe, *Plastics-the Facts 2017. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. Access 10/5/2018. https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf
8. L. Verdolotti, F. Iucolano, I. Capasso, M. Lavorgna, S. Iannace, B. Liguorib, Recycling and Recovery of PE-PP-PET-based Fiber Polymeric Wastes as Aggregate Replacement in Lightweight Mortar: Evaluation of Environmental Friendly Application, *Environmental Progress & Sustainable Energy* 33(4) (2014) 1445–1451.

- Flexural toughness of plastics PP, PE and PA reinforced mortars increased significantly with the increase of these plastics volume ratio. There was about 20 times increase in flexural toughness for PP – 1.5% by volume with respect to reference mixture while there were about 6, and 4 times increases for PE and PA respectively each of 1.5% by volume reinforced mortars with respect to reference mixture.
- The waste plastics were bridging the cracks and increased the toughness. Waste plastics surface treatment did not exhibit positive effect on flexural toughness.
- Compressive strength and compressive toughness decreased with the increase of waste plastics volume addition. Waste plastics surface treatment increased the compressive strength and toughness of mortars in comparison to untreated waste PP and PE reinforced mortars, due to the increase of hydrophilic properties.
- Waste plastics acted as weak zones in mortar matrix and reduced the compressive strength. However, the decrease in compressive strength can be foreseen in design of concrete and mortar and can be discarded by design for the favor of increase in flexural toughness and ductility. The increase in flexural toughness yields a more ductile cement composite.

The use of industrial waste plastics in cement composites is the novelty of the work. The industrial waste plastics can be used as reinforcement for mortar and concrete with improved ductility and toughness which enhance the seismic performance of a structure. Above all, regaining industrial waste plastics as a construction material inhibits environmental pollution and sustains development and economy.

Acknowledgement

We would like to thank to Narsan Plastic Co. for supplying the waste plastics. The authors would like to express their gratitude to Batıçım Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş. and Sika Construction Chemicals Co. for supporting this research with materials. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

9. A. M. da Silva, J. de Brito, R. Veiga, Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars, *Construction and Building Materials* 71 (2014) 226–236.
10. B. Safi, M. Saidi, D. Aboutaleb, M. Maallem, The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials* 43 (2013) 436–442.
11. B.S. Al-Tulaian, M.J. Al-Shannag, A.R. Al-Hozaimy, Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar, *Construction and Building Materials* 127 (2016) 102–110.
12. J.-H. J. Kim, C.-G. Park, S.-W. Lee, S.-W. Lee, J.P. Won, Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites, *Composites: Part B* 39 (2008) 442–450.
13. J.-Y. Wang, K.-S. Chia, J.-Y. R. Liew, M.-H. Zhang, Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content, *Cement & Concrete Composites* 43 (2013) 39–47.
14. A. Peled, H. Guttman, A. Bentur, Treatments of Polypropylene Fibres to Optimize their Reinforcing Efficiency in Cement Composites, *Cement & Concrete Composites* 14 (1992) 277–285.
15. A. M. López-Buendía, M. D. Romero-Sánchez, V. Climent, C. Guillem, Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete, *Cement and Concrete Research* 54 (2013) 29–35.
16. P. Payrow, M. R. Nokken, D. Banu, D. Feldman, Effect of surface treatment on the post-peak residual strength and toughness of polypropylene/polyethylene-blended fiber-reinforced concrete, *Journal of Composite Materials* 45 (20) (2011) 2047–2054.
17. M. Nili, A. Azarioon, A. Danesh, A. Deihimi, Experimental study and modeling of fiber volume effects on frost resistance of fiber reinforced concrete, *Int J Civ Eng* 16 (2018) 263–272 <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0122-2>
18. L. V. P. Meesaraganda, P. Saha, A. I. Laskar, Behaviour of Self-Compacting Reinforced Concrete Beams Strengthened with Hybrid Fiber Under Static and Cyclic Loading, *Int J Civ Eng* 16 (2018) 169–178 <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0114-2>
19. D. Foti, Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers, *Construction And Building Materials*, 25 (4) (2011) 1906-1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
20. L. Ferreira, J. Brito, N. Saikia, Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate, 36 (2012) 196-204 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.098>
21. R. B. Borg, O. Baldacchino, L. Ferrara, Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mat.*, 108 (2016) 29-47 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>
22. J. Thorneycroft, J. Orr, P. Savoikar, R.J. Ball, Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand, *Construction And Building Materials*, 161 (2018) 63-69 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>
23. H. Mohammadhosseini, M.M. Tahir, A.R.M Sam, The feasibility of improving impact resistance and strength properties of sustainable concrete composites by adding waste metalized plastic fibres, *Construction And Building Materials*, 169 (2018) 223-236 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.210>
24. R. Siddique, T. R. Naik, Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview, *Waste Management*, 24 (6) (2004) 563-569.
25. T. B. Moghaddam, M.R. Karim, T. Syammaun, Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles, *Construction And Building Materials* 34 (2012) 236-242 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>
26. E. Ahmadiania, M. Zargar, M.R. Karim, A. Mahrez, A. Ebrahim, Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction And Building Materials* 36 (2012) 984-989 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>
27. W. Cao, S. Liu, Z. Feng, Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates, *Construction And Building Materials* 41 (2013) 474-479.
28. T.B. Moghaddam, M. Soltani, M.R. Karim, Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads, *Construction And Building Materials* 65 (2014) 487-494 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006>
29. A. Modarres, H. Hamed, Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET), *Construction And Building Materials* 68 (2014) 259-267 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.054>
30. M. R. M. Hasan, B. Colbert, Z. You, A. Jamshidi, P.A. Heiden, M. O. Hamzah, A simple treatment of electronic-waste plastics to produce asphalt binder additives with improved properties, *Construction And Building Materials*, 110 (2016) 79-88 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.017>
31. M. Arabani, M. Pedram, Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles, *Construction And Building Materials*, 116 (2016) 378-383 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.105>
32. Z. Dehghan, A. Modarres, Evaluating the fatigue properties of hot mix asphalt reinforced by recycled PET fibers using 4-point bending test, *Construction And Building Materials*, 139 (2017) 384-393 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.082>
33. A. Ahmed, K. Ugai, T. Kamei, Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement, *Construction And Building Materials*, 25 (1) (2011) 208-217 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
34. C.K. Subramaniaprasad, B.M. Abraham, E.K.K. Nambiar, Sorption characteristics of stabilised soil blocks embedded with waste plastic fibres, *Construction And Building Materials*, 63 (2014) 25-32 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.042>.
35. H. Soltani-Jigheh, Compressibility and Shearing Behavior of Clayey Soil Reinforced by Plastic Waste, *International Journal Of Civil Engineering*, 14 (7B) (2016) Pages: 479-489.
36. ASTM D792-13, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
37. TURKISH STANDARD (TS) 802, Design of concrete mixes. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
38. ASTM C1609 / C1609M-10, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
39. ASTM C349-14, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.