

Zastosowanie polimerobetonów zawierających przemysłowe denne popioły fluidalne w płytach ostożowych słupów energetycznych

Application of polymer concrete containing industrial bottom ashes in footing plates for energy poles

Jerzy Korol^{1*}, Grzegorz Skotniczny^{2,3}, Mateusz Koziół³, Ewelina Chmielnicka⁴, Magdalena Kowalik¹

¹Central Mining Institute, Department of Mechanical Testing and Material Engineering, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice, Poland

²Limestone Mine "Czatkowice" (Tauron Group), ul. Czatkowice Dolne 78, 32-065 Krzeszowice, Poland

³Silesian University of Technology, Faculty of Materials Engineering, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

⁴Institute for Engineering of Polymer Materials and Dyes, Paint & Plastics Department in Gliwice, ul. Chorzowska 50 A, 44-100 Gliwice, Poland

*Corresponding author: J. Korol, e-mail: jkorol@gig.eu

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę przygotowania, formowania i badania polimerobetonów zawierających 10 – 60% dennych popiołów paleniskowych z kotła fluidalnego [CFB] elektrowni. Resztę wypełniacza stanowił standardowy piasek kwarcowy. Przeprowadzono badania statycznego zginania i zmian masy pod wpływem kwasu, zasady i soli. Zmierzono także zmiany masy po testach zamrażania i rozmrażania. Badane polimerobetonu nie wykazały żadnych problemów podczas procesów produkcyjnych. Polimerobetonu zawierające 10 - 20% mas. popiołu wykazywały wyższą wytrzymałość na zginanie niż polimerobeton zawierający 100% piasku i wynosiła ona około 35 MPa. Stosunkowo niewielkie zmiany masy [poniżej 0,5% bez ekspozycji bazowej, dla której wynosiła ona mniej niż 3%] spowodowane czynnikami środowiskowymi, w zasadzie zgodne z przewidywaniami teoretycznymi, pozwalają przypuszczać, że badane materiały spełnią wymagania wytrzymałościowe stawiane płytom ostożowym. Stwierdzono, że optymalnym materiałem do produkcji płyt jest polimerobeton zawierający 10% mas. popiołu. Ze wszystkich badanych betonów wykazał najlepszą odporność na starzenie środowiskowe. Zaprojektowany system form jest prosty i niezawodny - nadaje się do seryjnej produkcji płyt w warunkach przemysłowych. Jakość wizualna produkowanych płyt jest bardzo dobra. Generalnie, polimerobeton po raz kolejny okazał się bardzo dobrym materiałem, mającym zastosowanie w różnych elementach budownictwa.

Słowa kluczowe: polimerobeton, denny popiół fluidalny, nienasycona żywica poliestrowa, płyta ostożowa słupa energetycznego, wytrzymałość, optymalizacja

Summary

The paper presents a procedure for preparing, molding, and testing polymer concrete containing 10 – 60% bottom ash from power plant fluid circulating fluidized bed boiler (CFB) – the rest of the filler was standard sand. The tests of static bending and mass changes after exposition to acid, base and salt were conducted. Additionally, mass changes after freeze-thaw tests were registered. The tested polymer concretes showed no problems during manufacturing process. Compositions containing 10 - 20% by weight of ash showed higher flexural strength than polymer concrete containing 100% sand and it was approximately 35 MPa. Relatively small changes in mass [less than 0.5% excluding base exposition for which it was less than 3%] caused by environmental factors, in general consistent with theoretical predictions, allow us to assume that the tested materials will meet the strength requirements for the footplates. Polymer concrete containing 10% of ash was found to be the optimal material for producing the plates. It has shown the best resistance to environmental aging of all tested concretes. The designed mold system is simple and reliable - it is applicable for serial production of the plates in industrial conditions. The visual quality of the plates produced is very good. In general, polymer concrete once again turned out to be a very good material, applicable in various elements for the construction industry.

Keywords: polymer concrete, industrial bottom ash, unsaturated polyester resin, power pole footplate, strength, optimization

1. Wprowadzenie

Betony polimerowe to materiały kompozytowe składające się z osnowy polimerowej i najczęściej wypełniacza z kruszywa mineralnego (1-3). Są substytutem tradycyjnych betonów z cementu portlandzkiego. Ich wadą jest to, że są stosunkowo drogie co wynika z kosztu żywic. W niektórych zastosowaniach są jednak konkurencyjne w stosunku do betonów tradycyjnych ze względu na lepsze właściwości mechaniczne, znacznie lepszą odporność chemiczną i znacznie większą trwałość (4-10). Osnowa żywiczna, dzięki dobrej przyczepności do różnych podłoży, pozwala na zastosowanie znacznie szerszej gamy rodzajów kruszyw niż w tradycyjnych betonach (11-15).

Paleniskowy popiół denny to produkt powstały po spalaniu paliw kopalnych, głównie węgla kamiennego, zalegający na dnie palenisk w kotłach energetycznych. Oprócz popiołów paleniskowych w piecach, zwłaszcza ze złożem fluidalnym, powstaje także popiół lotny, który jest znacznie drobniejszy i bardziej powtarzalny. Występuje on w znacznie większej ilości i jest bardzo popularnym produktem ubocznym (16, 17). Badania nad wykorzystaniem popiołów paleniskowych prowadzone są od początku lat siedemdziesiątych (18, 19). Utylizacja popiołów paleniskowych polega m.in. na dodawaniu ich do mieszanek betonowych (20), dodawaniu do materiałów ceramicznych, gdzie bywają dobrym promotorem spiekania (21), czy też wykorzystywaniu ich do specjalistycznych katalizatorów chemicznych (22). Popiół denny nie jest intensywnie wykorzystywany, ze względu na słabą powtarzalność. Stosowano go jednak wstępnie od wielu lat, m.in. jako składnik kruszyw. Badania wciąż trwają (16, 23-25), ponieważ jest to materiał o ogromnym tonażu – masowa eksploatacja obiektów energetycznego spalania będzie trwała jeszcze minimum 15 lat, co będzie skutkowało milionami ton rocznie, a w kolejnych latach również miliony ton będą możliwe do pozyskiwania z hałd (26, 27).

Nienasycone żywice poliestrowe [UPR – z ang. Unsaturated Polyester Resins] to najpopularniejsze i najtańsze chemicznie utwardzane osnowy do kompozytów polimerowych [PMC – z ang. Polymer-Modified Concrete]. Zazwyczaj odczynnikami utwardzającym w UPR jest styren, a nadtlenki organiczne są katalizatorem reakcji utwardzania. Pod względem funkcjonalności UPR nie ustępują wiele żywicom epoksydowym, szczególnie w zastosowaniach o małych wymaganiach, ale są bardzo korzystne technologicznie – można łatwo kontrolować czas i intensywność procesu ich utwardzania (28). Tym samym ten rodzaj żywicy jest najpopularniejszy w technologii polimerobetonów.

Praca dotyczy wstępnych badań nad zastosowaniem polimerobetonu z dodatkiem dennego popiołu z fluidalnego spalania węgla – wykorzystano popiół z polskich elektrowni – do formowania płyt ostojowych pod słupy energetyczne. Celem jest uzyskanie zwiększonej trwałości płyt, szczególnie w warunkach stosunkowo dużej wilgotności i możliwego działania chemikaliów obecnych w gruncie, głównie soli używanej do odśnieżania dróg oraz kwaśnych substancji stosowanych w rolnictwie. Opracowanie zawiera opisy szczegółowej analizy chemicznej zastosowanych popiołów,

1. Introduction

Polymer concretes are composite materials composed of a polymer matrix and usually a mineral aggregate filler (1-3). They are substitute materials for traditional Portland cement concretes. Their disadvantage is that they are relatively expensive - cost of resins. However, they are competitive with traditional concretes in some applications, due to better mechanical properties, much better chemical resistance and much greater durability (4-10). The resin matrix, due to its good adhesion to various surfaces, allows the use of a much wider range of aggregate types than in traditional concretes (11-15).

Industrial bottom ash is a by-product from the combustion of fossil fuels, mainly hard coal, remaining in the bottoms of furnaces in power boilers. Apart from bottom ash, fly ash is also produced in fluidized bed furnaces - a much finer and more repetitive. However, fly ash occurs in much greater quantity and is a very popular recycling material (16, 17). Research on the use of bottom ash has been conducted since the early 1970s (18, 19). Utilization of bottom ash consists, inter alia, in on adding it to concrete mixtures (20), adding it to ceramic materials, where it is a good sintering promoter (21), or using it for specialized chemical catalysts (22). Bottom ash is not widely exploited in polymer concretes due to poor repeatability. However, it has been tentatively used for many years, mainly as a component of aggregates. The research is still ongoing (16, 23-25), because it is a material with a huge tonnage - the mass exploitation of combustion plants will be a minimum of 15 years, resulting in millions of tons each year, and next millions of tons of bottom ash are available from heaps (26, 27).

Unsaturated polyester resins [UPRs] are the most popular and cheapest chemically-cured matrices for polymer matrix composites [PMCs]. Typically, the hardening substrate in UPRs is styrene and the organic peroxides are the catalyst for the hardening reaction. In terms of functionality, UPRs are not much inferior to epoxy resins, especially in non-high-performance applications, but they are technologically very advantageous - you can easily control the time and intensity of their hardening process (28). Thus, this kind of resins is the most popular in polymer concrete technology.

The study concerns initial research on the use of polymer concrete based on bottom ash, waste bottom ash from Polish power plants was used, to form footing plates for energy poles. The aim is to obtain increased durability of plates, especially in conditions of relatively high humidity and the possible action of chemicals that absorb to the ground, mainly salt used for the removal of snow from roads and acidic substrates used in agriculture. The study contains descriptions of a thorough chemical analysis of the applied ashes to eliminate the possible content of highly toxic compounds, the process of preparation of components, selection of compositions and production of polymer concrete test samples. The polymer concrete was tested for its mechanical properties and physical resistance to selected chemical factors. The footing plate design and manufacturing procedure is given in the final part of the study.

w celu wyeliminowania ewentualnej zawartości związków silnie toksycznych, procesu przygotowania składników, doboru składów oraz produkcji polimerobetonów - formowanie próbek do badań. Wytworzony polimerobeton zbadano pod kątem właściwości mechanicznych i odporności na wybrane czynniki chemiczne. W końcowej części opracowania przedstawiono sposób projektowania i wykonania płyty ostojowej.

2. Materiały i metody

2.1. Materiały

Jako spoiwo zastosowano dostępną w handlu żywicę tereftalowa Runtop UP 6-300 CONCRETE firmy Milar Sp. z o.o. [Grodzisk Mazowiecki, Polska]. Zastosowano układ utwardzania na zimno składający się z inicjatora Metox 50 i przyspieszacza naftenianu kobaltu.

Jako wypełniacz, wraz z popiołem zastosowano piasek kwarcowy o uziarnieniu od 0,1 do 1,2 mm.

Popiół stosowany jako kruszywo główne to zmieszany popiół denny z pieców fluidalnych, pozyskiwany z kilku elektrowni w południowo-zachodniej Polsce. Skład chemiczny popiołu określono metodą spektroskopii rentgenowskiej z dyspersją energii [EDS], przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi 3400 N. Wyniki zestawiono w tablicy 1.

Analiza dyfrakcji rentgenowskiej popiołów [wykonana na dyfrakto-metrze JEOL JDX-7S] w połączeniu z wynikami analizy EDS wykazała, że w popiele występują następujące fazy: faza amorficzna, kwarc, korund, mullit. Jest to w pełni zgodne z literaturą dotyczącą podobnych popiołów (29-31). Rysunek 1 przedstawia obrazy SEM popiołu przy różnych powiększeniach [skaningowy mikroskop elektronowy Hitachi 3400 N].

Analizując zdjęcia próbek popiołu można stwierdzić, że ziarna charakteryzują się owalnym kształtem. Występują także pojedyncze ziarna o ostrych krawędziach, które mogą przyczynić się do pogorszenia właściwości mechanicznych polimerobetonów. Mogą też niekorzystnie wpływać na płynność mieszanek polimerobetonowych, do produkcji których zostanie użyty popiół. Na rys. 2 przedstawiono wynik analizy rozkładu wielkości cząstek popiołu wykonanej przy użyciu analizatora Panalytical Malvern Mastersizer. Z użytego popiołu pobrano dwie próbki do badania wielkości ziaren.

Popiół i piasek suszono w suszarce próżniowej do momentu, gdy ich wilgotność spadła poniżej 0,2%. Na-

2. Experimental

2.1. Materials

Commercially available terephthalic resin Runtop UP 6-300 CONCRETE from Milar Sp. z o.o. [Grodzisk Mazowiecki, Poland] was used in presented study. Cold curing system comprising of Metox 50 initiator and cobalt naphthenate catalyst was applied.

Standard sand at the particle size range of 0.1 - 1.2 mm was applied as a co-filler for the ash.

The ash applied as the main aggregate is the mixed bottom ash from fluidal furnaces, acquired from several power plants in south-western Poland. The chemical composition of the ash was determined using the energy-dispersive X-ray spectroscopy [EDS] technique with use of Hitachi 3400 N scanning electron microscope. The results are summarized in Table 1.

XRD analysis of the ash, performed with the use of JEOL JDX-7S diffractometer, combined with the results of the EDS analysis, showed that the following mineral fractions are present in the ash: amorphous phase, quartz, corundum, and mullite. This is in full agreement with the literature referring to similar ashes (29-31). Fig. 1 shows the SEM images of the ash under different magnifications [Hitachi 3400 N scanning electron microscope].

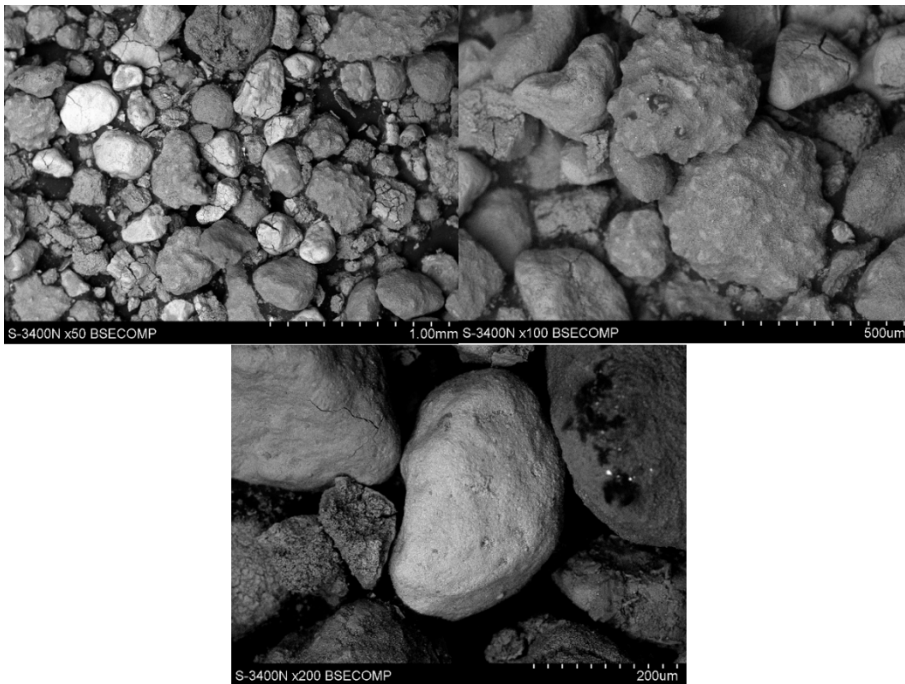
By analyzing the images of the ash samples, it can be concluded that the ash grains have an oval shape. There are also single sharp-edged grains present, which may contribute to the deterioration of the mechanical and rheological properties of the ash. This feature may adversely affect the fluidity of polymer concrete mixtures for the manufacture of which ash will be used. Fig. 2 shows the result of the ash particle size distribution analysis performed with the use of the Mastersizer analyzer by Malvern Panalytical, Great Britain. Two samples were taken from the ash used for grain size testing.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU UŻYTEGO W BADANIACH

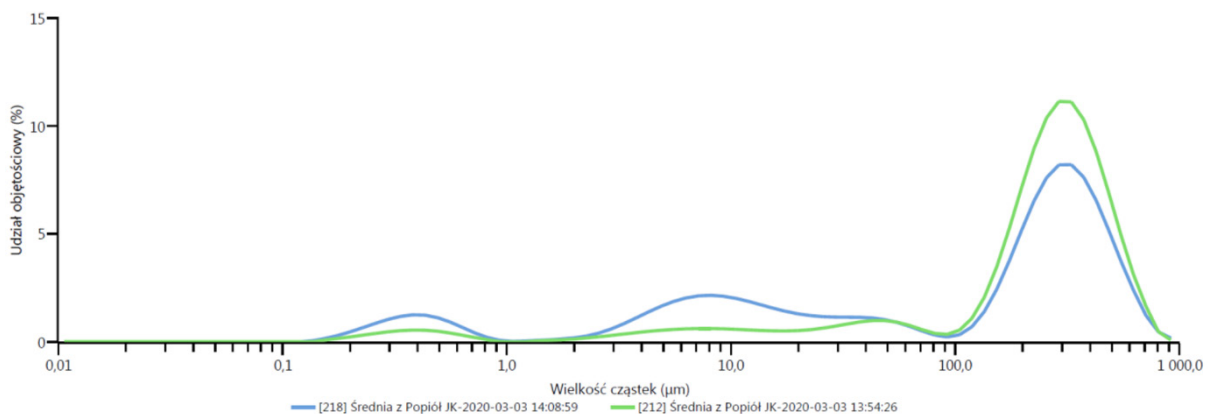
CHEMICAL COMPOSITION OF ASH USED IN THE RESEARCH

Pierwiastek Element	% mas.	Odchylenie st. St. deviation, % mas.	Procent atomowy Atomic content, % mas.	Odchylenie st. St. deviation, % mas.	Tlenek Oxide	Udział tlenku Oxide content, % mas.
O	42.3	-	61.0	± 2.5	-	-
Na	0.2	± 0.1	0.2	± 0.1	Na ₂ O	0.2
Mg	0.6	± 0.1	0.6	± 0.0	MgO	1.1
Al	8.2	± 0.1	7.0	± 0.1	Al ₂ O ₃	15.5
Si	11.9	± 0.1	9.8	± 0.1	SiO ₂	25.6
S	5.6	± 0.1	4.0	± 0.1	SO ₃	14.0
K	1.1	± 0.1	0.7	± 0.0	K ₂ O	1.4
Ca	26.1	± 0.3	15.0	± 0.2	CaO	36.5
Ti	0.8	± 0.1	0.4	± 0.0	TiO ₂	1.3
Fe	3.2	± 0.2	1.3	± 0.1	Fe ₂ O ₃	4.6
Suma	100.0		100.0			100.0



Rys. 1. Morfologia próbek popiołów, powiększenie 50x, 100x i 200x

Fig. 1. Morphology of the ash samples, magnification 50x, 100x and 200x



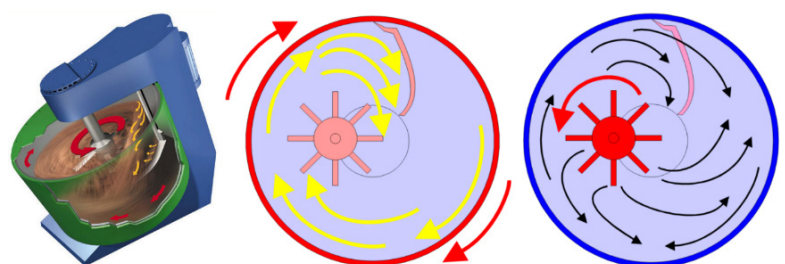
Rys. 2. Rozkład wielkości ziaren dla dwóch próbek popiołu użytego w badaniach

Fig. 2. Ash grain distribution for two samples

stępnie żywicę poliestrową z inicjatorem i katalizatorem wymieszano wstępnie ze składnikami mineralnymi. Następnie wszystkie składniki poddano intensywnemu mieszaniu za pomocą mieszalnika Eirich R02 firmy Maschinenfabrik Gustav Eirich, Niemcy. Schemat intensywnego mieszania przedstawiono na Rys. 3.

Zastosowane intensywne mieszanie jest nową metodą przygotowania masy do polimerobetonów. Nasze dotychczasowe prace wykazały, że intensywne mieszanie znacząco poprawia jednorodność wprowadzanych materiałów (32). Ponadto, umożliwia bardzo efektywne mieszanie ciał stałych z cieczami bez tworzenia agregatów - dzięki dużym siłom ścinającym działającym na materiał.

Po około dwóch minutach mieszania masę wylano do prostokątnej formy o wymiarach 40 x 40 x 160 mm. Aby



Rys. 3. Schemat procedury intensywnego mieszania: a) obraz ogólny, b) kierunek przepływu materiału podczas homogenizacji wyznaczany przez obracającą się misę, c) kierunek przepływu materiału podczas homogenizacji wyznaczany ruchem rotora

Fig. 3. Principles of the intensive mixing procedure: a) general image, b) direction of material flow during homogenization determined by the rotating bowl, c) direction of material flow during homogenization determined by the movement of the rotor

The ash and sand were dried in vacuum dryer until their moisture content was below 0.2%. Then, the polyester resin with initiator and catalyst was initially mixed with the mineral components. Next, all components were treated by intensive mixing with the use of Mixer Eirich R02 manufactured by Maschinenfabrik Gustav Eirich, Germany. The principles of the intensive mixing procedure are shown in Fig. 3.

The applied intensive mixing is a new method for the preparation of the mass for polymer concrete. Our previous works showed that the intensive mixing significantly enhances the homogeneity of the introduced materials (32). Moreover, it enables very effective mixing of solids with liquids without formation of solids' aggregates due to the high shear forces acting on the material.

After about two minutes of mixing the mass was poured into rectangular mold with the

usprawnić odgazowanie żywicy, formę umieszczono na stole wibracyjnym na 20 sekund. Następnie formy pozostawiono na 24 godziny w temperaturze pokojowej w celu utwardzenia. Po utwardzeniu próbki przetrzymano w temperaturze 50°C przez 24 godziny [dotwardzanie]. Skład poszczególnych rodzajów próbek do badań przedstawiono w tablicy 2. Dla każdego polimerobetonu przygotowano grupę 5 próbek.

2.2. Metody

Stwardniałe próbki poddano statycznej próbie zginania. Badania przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN 196-1:2016-07 oraz PN-EN ISO 291:2010. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Heckert FPZ-100/1.

Badano też absorpcję wody przez przygotowane próbki, przez siedem dni. Próbki umieszczano w wodzie destylowanej, następnie wyjmowano i ważono po 24 godzinach. Ilość zaabsorbowanej wody określano według następującego wzoru:

$$W = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \cdot 100\% \quad [1]$$

gdzie:

m_t – masa próbki po zanurzeniu, g,

m_0 – początkowa masa próbki, g.

Badano odporność polimerobetonów na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Najpierw próbki suszono w temperaturze 80°C przez 18 godzin, a następnie infiltrowano wodą pod zmniejszonym ciśnieniem. Dla każdej próbki przeprowadzono czterdzieści cykli zamrażania próbek do -10°C i rozmrażania w temperaturze 30°C. Czas każdego cyklu wynosił 4 godziny. Po badaniu przeprowadzono pomiary właściwości mechanicznych próbek w celu określenia ich odporności na cykle zamrażania-rozmrażania.

W celu określenia wpływu środowiska na przygotowane próbki, kondycjonowano je przez dwa tygodnie w 10% roztworach NaCl, H₂SO₄ i NaOH, w temperaturze 55°C, zgodnie z zasadami normy PN-EN ISO 175. Badania takie są powszechnie stosowane podczas oceny kruszyw i betonów (33). Rejestrowano zmiany masy próbek. Po badaniu przeprowadzono pomiary właściwości mechanicznych próbek w celu określenia ich odporności na cieczy o różnej wartości pH.

3. Wyniki badan

3.1. Podstawowe wyniki badań

Na rys. 4 przedstawiono wpływ składu na wytrzymałość na zginanie wytworzonych polimerobetonów.

Można zauważyć, że dla większych objętości popiołu wytrzymałość mieściła się w przedziale 26 – 27 MPa. Zwiększająca się zawartość piasku powodowała poprawę właściwości mechanicznych kompozytów, co wskazywało na lepsze oddziaływanie międzyfazowe tego kruszywa z osnową polimerową (34). Niemniej jednak

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY MATERIAŁOWE PRÓBEK POLIMEROBETONOWYCH PRZYGOTOWANYCH DO BADAN

COMPOSITION OF POLYMER CONCRETES USED IN THE RESEARCH

Składnik / Component	Rodzaj próbki / Samples						
	1	2	3	4	5	6	7
	Zawartość / Content, % mas.						
Żywica / Resin	14.68						
Metox 50	0.3						
Naftenian kobaltu Cobaltium naphthalene	0.02						
Piasek / Sand 0.1-1.2 mm	25	35	45	55	65	75	85
Popiół / Ash	60	50	40	30	20	10	0

dimensions of 40 x 40 x 160 mm. To enhance the degassing of resin, mold was placed on the vibration table for 20 s. Next to this, the molds were left for 24 h in room temperature for curing. After curing, samples were kept at 50 °C for 24 h [post-curing]. The composition of particular samples for testing is presented in table 2. A group of 5 specimens was prepared for each tested sample.

2.2. Methods

The cast and cured specimens were put to static bending tests. The tests were carried out in accordance with the PN-EN 196-1:2016-07 and the PN-EN ISO 291:2010 standards. The tests were performed using FPZ-100/1 Heckert testing machine.

The water uptake of the prepared specimens was studied for seven days. The samples were put into distilled water, then taken out and weighed after 24 h. Water uptake was determined according to the following formula:

$$W = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \cdot 100\% \quad [1]$$

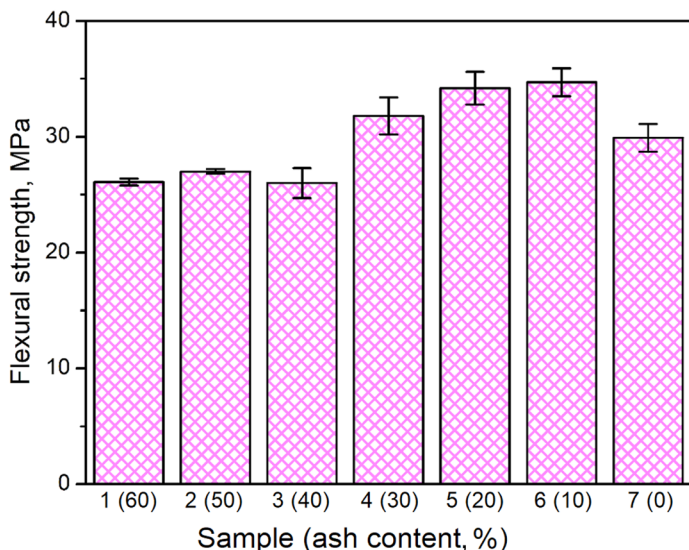
where:

m_t - the mass of the sample after immersion, g,

m_0 - the initial mass of the sample, g.

The resistance of polymer concretes to cyclic freezing and thawing was investigated. At first, samples were dried at 80 °C for 18 hours, then filtrated with water under reduced pressure. Fourty cycles of freezing samples to -10 °C and thawing at 30 °C were performed for each sample. The time of each cycle equaled 4 h. After the test, the mechanical properties of samples were measured to determine their resistance to freezing.

To determine the environment impact on prepared lightweight aggregates, samples were conditioned for two weeks in 10% solutions of NaCl, H₂SO₄, and NaOH at 55 °C, based on the PN-EN ISO 175 standard. Such tests are commonly applied during the investigation of aggregates and concretes (33). Changes in the mass of samples were recorded. After the test, the mechanical properties of samples were measured to determine their resistance to different pH values.



Rys. 4. Wytrzymałość na zginanie badanych polimerobetonów – każda wartość jest średnią z wyników 5 próbek

Fig. 4. Flexural strength of tested polymer concretes – each sample contains of 5 specimens

w przypadku stosowania samego piasku bez popiołu zauważalny był spadek wytrzymałości na zginanie. Efekt taki przypisano obecności mniejszych cząstek popiołu o średnicy poniżej 0,1 mm. W przypadku żywicy polimerowych obecność mniejszych cząstek umożliwia rozgałęzianie wierzchołka pęknięcia zamiast jego przeskakiwania z jednej większej cząstki na drugą, zmniejszając jednocześnie koncentrację naprężeń wewnątrz materiału (35). Efekt taki prawdopodobnie występuje także w przypadku osnowy z żywicy poliestrowej. W rezultacie zwiększa się wytrzymałość materiałów (36). Można zatem stwierdzić, że przy mniejszych zawartościach popiołu zanotowano korzystny, synergistyczny efekt pomiędzy piaskiem i popiołem. Podobne efekty stwierdzili Lokuge i Aravinthan (37). Na podstawie wyników prób zginania próbki 5 i 6 poddano dalszej analizie. W ramach badań nie przeprowadzono statycznych prób ściskania, ponieważ są one mniej istotne niż próby zginania w przypadku płyt ostojowych, jednakże zachowanie badanych materiałów jest typowe dla polimerobetonów. Dlatego też, na podstawie wyników wcześniejszych badań (38,39), założono, że wytrzymałość na ściskanie badanych polimerobetonów powinna wynosić 70 MPa i więcej.

Rys. 5 przedstawia zmiany masy wybranych próbek 5 i 6 po teście wchłaniania wody, cyklach zamrażania i rozmrażania oraz starzeniu w różnych środowiskach.

Można zauważyć, że zmiany masy, zwłaszcza dodatnie, były stosunkowo niewielkie. Po teście wchłaniania wody i cyklach zamrażania i rozmrażania przyrost masy nie przekraczał 0,1% wag. Niemniej jednak wzrost masy próbek można przypisać adsorpcji wody na cząstkach piasku i popiołu. Pobór wody był nieco większy dla próbki 5 zawierającej większą ilość popiołu, co wskazuje na wyższą hydrofilowość popiołu w porównaniu z piaskiem. Ponadto przyrost masy można powiązać z adsorpcją wilgoci w porach analizowanych próbek, co można zobaczyć na rys. 6 przedstawiającym obrazy próbki 5 poddanej starzeniu w różnych środowiskach.

3. Results

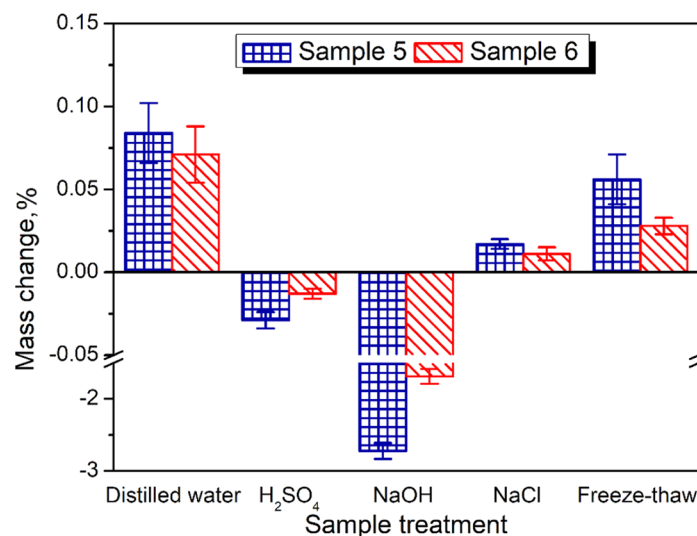
3.1. Basic test results

Fig. 4 presents the influence of the applied composition on the flexural strength of prepared polymer concretes.

It can be seen that for the highest volumes of ash, the strength was in the range of 26 - 27 MPa. The increase in the content of sand resulted in the enhancement of the mechanical performance, which pointed to better interfacial interactions with the polymer matrix (34). However, when only sand was used, a noticeable drop in flexural strength was observed. This effect was attributed to the presence of smaller ash particles of ash with diameters below 0.1 mm. In the case of epoxy resins, presence of smaller particles enables branching of the crack tip instead of its jumping from one bigger particle to another, simultaneously reducing the stress concentration inside the material (35). This effect probably occurs also in the case of the polyester resin matrix. As a result, the strength is enhanced (36). Therefore, it can be stated that at lower ash additions, a beneficial synergistic effect was observed between the sand and ash. Similar effects were noted by Lokuge and Aravinthan (37). Based on the results of the bending tests, polymer concrete 5 and 6 were subjected to further analysis. Static compression tests were not carried out as a part of the study, as they are less important than bending tests in the case of the footing slabs, but the behavior of the materials tested is typical for polymer concrete. Therefore, based on previous research results (38, 39), the compressive strength of the polymer concretes should be at 70 MPa or higher.

Fig. 5 shows the mass changes of selected polymer concrete 5 and 6 after water uptake test, freeze-thaw cycles, and aging in different environments.

It can be seen that the mass changes, especially the mass gains, were relatively low. After water uptake test and freeze-thaw cycles,



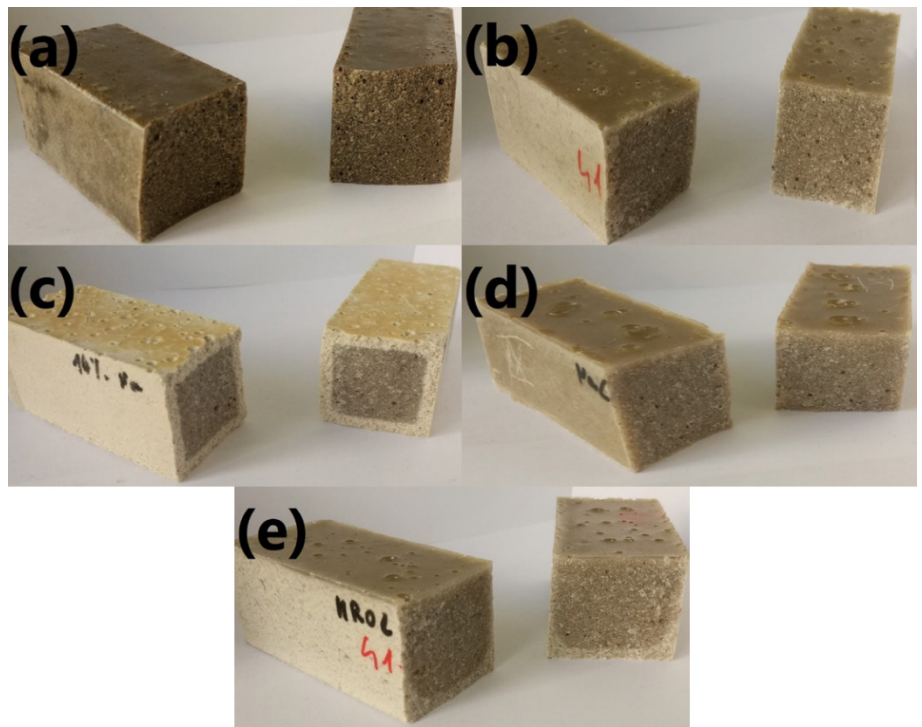
Rys. 5. Zmiana masy wytypowanych polimerobetonów po starzeniu w różnych środowiskach

Fig. 5. Mass change of polymer concretes after aging in different environments

Biorąc pod uwagę sztuczne starzenie w różnych środowiskach, zanotowano nieznacznie dodatnią zmianę masy próbek starzonych w roztworze NaCl. Podobnie małą, ale ujemną zmianę masy zaobserwowano po zanurzeniu w roztworze H_2SO_4 . Jednocześnie, dla roztworu wodorotlenku sodu efekt był około dziesięciokrotnie większy, co wskazuje, że jest to najbardziej agresywne środowisko dla badanych kompozytów. Bez wątpliwości zmiany masy wiązały się z uwolnieniem poszczególnych substancji chemicznych z betonów, zwłaszcza z fazy piaskowej lub popiołowej. W przypadku roztworu chlorku sodu zaobserwowano przyrost masy, prawdopodobnie wynikający z małej agresywności roztworu i jednoczesnego osadzania się kryształków soli w porach materiału. Zdjęcia postarzonej próbki pokazane na rysunku 6 nie wskazują na odbarwienie materiału poddanego działaniu NaCl. Carroll i Starkey (40) podali znacznie mniejsze uwalnianie składników różnych minerałów indukowane chlorkiem sodu w porównaniu z bardziej agresywną obróbką wodorotlenkiem sodu i kwasem solnym. Jednakże, w tamtym przypadku cząstki mineralne zostały częściowo zabezpieczone żywicą epoksydową, która charakteryzuje się zauważalnie wyższą odpornością chemiczną w porównaniu z żywicą poliestrową. W rezultacie w przypadku roztworu NaCl efekt adsorpcji soli był bardziej intensywny od rozpuszczania materiału.

W porównaniu z roztworem soli, działanie roztworu H_2SO_4 było bardziej szkodliwe dla fazy mineralnej kompozytów, co również podali Smeck i Novak (41). Potwierdzili oni wyniki badań Carolla i Starkeya (40) wskazujących, że kwasowa obróbka minerałów powoduje uwolnienie znacznych ilości magnezu, potasu, żelaza i glinu.

Jak wspomniano powyżej, najbardziej znaczący ubytek masy zanotowano w przypadku obróbki NaOH. Efekt taki związany był ze zmianami chemicznymi zachodzącymi we wnętrzu kompozytów. Z przytoczonych prac literaturowych (40,41) wynika, że moczenie minerałów w kwasie powoduje głównie usuwanie jonów wymiennych, co wskazuje na zmiany w strukturze chemicznej materiału. Jednocześnie, obróbka alkaliczna powoduje usunięcie krzemionki, glinu i żelaza, powodując ługowanie materiału bez wymiany jonowej. Podobny efekt stwierdziliśmy w naszej poprzedniej pracy dotyczącej kruszyw lekkich (42). Ponadto, według (43), niektóre formy krzemionki obecne w kruszywach mogą reagować z wodorotlenkami metali alkalicznych i tworzyć żel, powodując pęcznienie materiału.



Rys. 6. Powierzchnie przelamów (a) próbki niestarzonej, próbki poddanej zanurzeniu w (b) roztworze H_2SO_4 , (c) roztworze NaOH, (d) roztworze NaCl oraz (e) badaniu cyklicznego zamrażania i rozmrażania

Fig. 6. Fracture surface areas of (a) unaged sample and subjected to (b) H_2SO_4 , (c) NaOH, and (d) NaCl solutions, as well as (e) freeze-thaw test

the mass gain did not exceed 0.1 %. However, the increase in the mass of the samples could be attributed to the adsorption of water on the particles of sand and ash. Water uptake was slightly higher for concrete 5 containing a higher ash loading, indicating the higher hydrophilicity of ash compared to sand. Moreover, the mass gain could be associated with the moisture adsorption in pores of analyzed samples, which can be seen in Fig. 6 showing the images of concrete 5 subjected to aging in different environments.

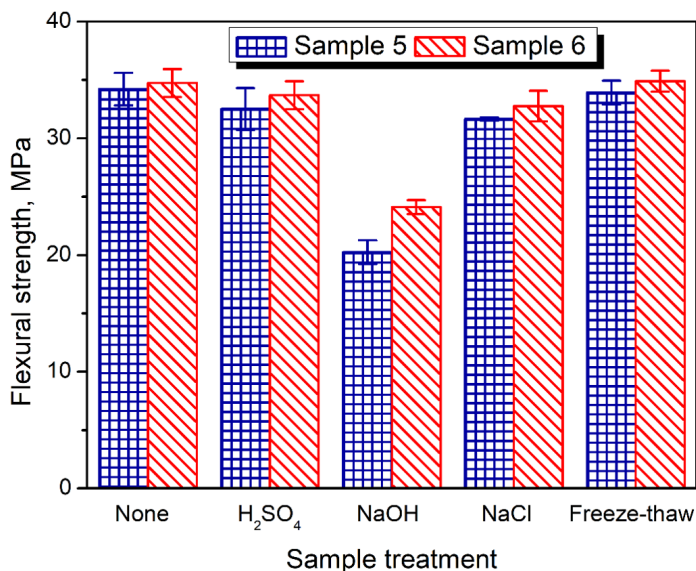
Considering the artificial aging in various environments, slightly positive mass change was noted for the aging in the NaCl solution. Similarly low, but negative mass change was observed for the immersion in H_2SO_4 . At the same time, for the sodium hydroxide solution, the effect was around ten times higher, which indicates the most aggressive environment for the tested composites. Without a doubt, mass changes were associated with the release of the particular chemicals from the concretes, especially from sand or ash phases. In case of the sodium chloride solution, the mass gain was noted, probably due to the low aggressivity of solution and simultaneous deposition of salt crystals in the pores of material. Images of aged sample shown in Fig. 6 do not indicate any discoloration of material subjected to the NaCl treatment. Carroll and Starkey (40) reported significantly smaller release of oxides from various minerals induced by sodium chloride compared to more aggressive treatments with sodium hydroxide and hydrochloric acid. It is important that in the presented case, the mineral particles were partially protected by the epoxy resin, which is characterized by the noticeably higher chemical resistance in comparison to

3.2. Wpływ starzenia na wytrzymałość na zginanie badanych polimerobetonów

Badane polimerobeton zawierające popiół denny poddano starzeniu środowiskowemu w roztworach H_2SO_4 , NaOH, NaCl oraz w warunkach zamrażania i rozmrażania. Próbki wykazały pewne zmiany masy – patrz wyżej. Starzone próbki poddano także próbom zginania i określono dla nich wytrzymałość na zginanie. Wpływ starzenia polimerobetonów na ich wytrzymałość na zginanie przedstawiono na rys. 7.

Zmiany właściwości użytkowych przygotowanych kompozytów po starzeniu są związane z wpływem różnych środowisk chemicznych na strukturę i mikrostrukturę analizowanych próbek. Powszechnie stwierdzonym efektem jest pogorszenie wytrzymałości na zginanie po starzeniu (44). Betony epoksydowe charakteryzują się na ogół dobrą odpornością chemiczną (45-47). W różnych pracach badawczych stwierdzono najbardziej znaczące pogorszenie właściwości mechanicznych polimerobetonów po obróbce kwasem. Autorzy wskazali, że degradacja następuje na skutek porowatości oraz możliwości reakcji chemicznych pomiędzy kwasami i kruszywami (48-50). Niemniej jednak, autorzy cytowanych prac zastosowali w kompozytach mniejszą zawartość żywicy epoksydowej - do 12% masowych, podczas gdy w prezentowanej pracy zastosowano 15% mas. poliestru. Różnica ta umożliwiła lepsze zwilżanie cząstek kruszyw żywicą i zwiększyła ich odporność chemiczną. Efekt taki potwierdzili Ghassemi i Toufigh (48), którzy podali znacznie wyższą odporność chemiczną polimerobetonów przy zwiększeniu udziału żywicy epoksydowej z 10 do 12% mas. Największe pogorszenie właściwości mechanicznych polimerobetonu odnotowano po zanurzeniu w roztworze wodorotlenku sodu. Jak wspomniano powyżej, efekt taki można przypisać znacznemu ubytkowi masy próbki spowodowanemu pęcznieniem betonu w wyniku oddziaływań chemicznych pomiędzy wodorotlenkiem i krzemionką obecną w kruszywach (46,49,51). Podobne efekty zaobserwowali ponownie Ghassemi i Toufigh, którzy dodatkowo zauważyli mikropęknięcia żywicy epoksydowej i osłabienie globalnego wiązania międzyfazowego (48). Ponadto wizualne zmiany wyglądu polimerobetonów po zanurzeniu w różnych roztworach [patrz rozdział 3.1] wskazały na istotne zmiany w strukturze chemicznej po zastosowaniu NaOH. Stosunkowo wysoką odporność betonów polimerowych z epoksydów na cykle zamrażania i rozmrażania przypisuje się niskiej hydrofilowości materiału (52). Ze względu na małą absorpcję wody wilgoć nie gromadzi się w próbce, w związku z czym prawie nie powstają uszkodzenia od mrozu, gdyż ma na nie wpływ właśnie stopień nasycenia próbek wodą (53). Podobny wpływ cykli zamrażania i rozmrażania zauważyli również inni badacze (54).

Na podstawie przedstawionych wyników pokazujących wpływ różnych środowisk na parametry użytkowe polimerobetonów do dalszych badań i wykonania standardowych płyt ostojowych pod słupy energetyczne wybrano polimerobeton oznaczony numerem 6.



Rys. 7. Wpływ różnych środowisk na wytrzymałość na zginanie wytworzonych polimerobetonów

Fig. 7. The impact of various environments on the flexural strength of prepared polymer concretes

polyester one. As a result, for NaCl solution, the salt adsorption effect overcame the cations exchange and release.

Compared to the salt solution, the treatment with H_2SO_4 was more aggressive for mineral phase of composites, which was also reported by Smeck and Novak (41). They confirmed the results of Carroll and Starkey (40) indicating that the acid treatment of minerals results in the release of significant amounts of magnesium, potassium, iron and aluminum cations and oxides.

As mentioned above, the most significant mass loss was observed for the NaOH treatment. Such an effect was related to the chemical changes occurring inside composites. The above mentioned works (40, 41) indicated that the acid treatment of minerals causes mainly removal of exchangeable ions, pointing to the changes in chemical structure of material. At the same time, alkali treatment results in the removal of silicon, aluminum and iron oxides, causing simple removal of material without any replacement. Similar effect was noted in our previous work related to the lightweight aggregates (42). Moreover, according to study (43) the certain forms of silica present in aggregates may react with alkali hydroxides and form a gel resulting in swelling of material.

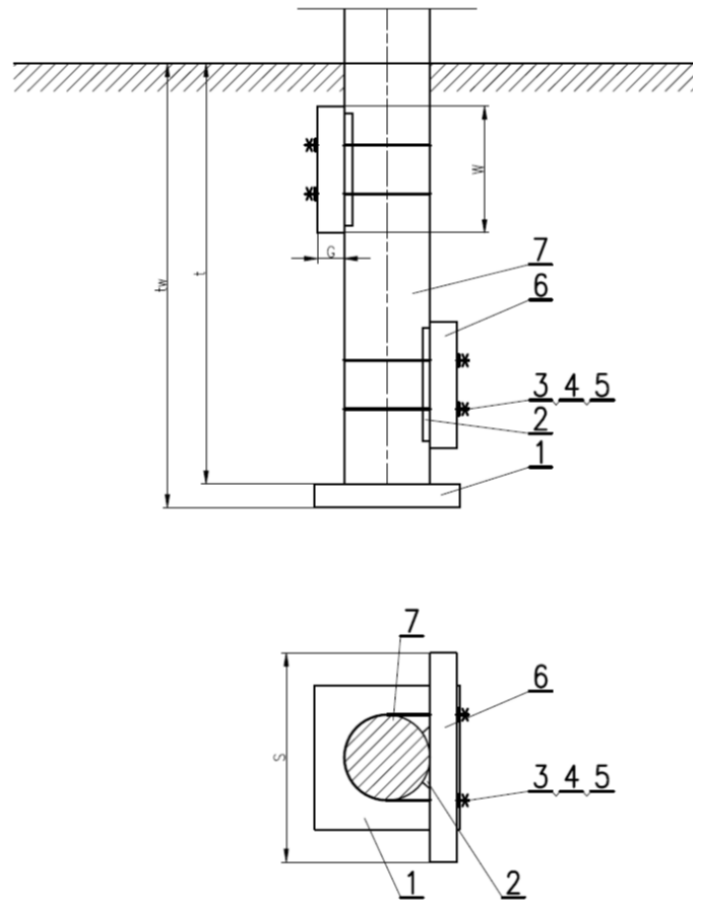
3.2. Effect of aging on flexural strength of tested polymer concretes

Polymer concretes containing bottom ash were exposed to environmental aging in H_2SO_4 , NaOH, NaCl solutions and freeze-thaw conditions. The samples showed some mass changes – see the descriptions above. The exposed specimens were also put to bending tests and flexural strength was determined for them. The impact of polymer concretes aging on their flexural strength is shown in Fig. 7.

4. Założenia i sposób projektowania płyt fundamentowych

Montaż płyt ostożowych stanowi część prac związanych z posadowieniem słupa energetycznego. Podłoże pod posadowienie słupa należy ocenić zgodnie z normą PN-81/B-03020. Wytyczne dotyczące kształtu płyt podane są w albumach Polskiego Towarzystwa Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej [PTPIREE]. Płyty kompozytowe są rozwiązaniem dla gruntów średnich i słabych. Jeżeli w miejscu zabudowy podłoże okaże się bardzo słabe, całość fundamentu należy zaprojektować indywidualnie. Przykładową konstrukcję posadowienia słupa pokazano na rys. 8.

Ze względów praktycznych, w związku z potencjalnym zapotrzebowaniem rynku, zdecydowano się opracować technologię dla dwóch podstawowych typów płyt fundamentowych: U-85 i U-130. Ze względu na nienormatywny materiał projekt poprzedzono analizą numeryczną. Miały one wykazać, że zaproponowana grubość płyty wytrzyma obciążenia nałożone na nią w gruncie. Obliczenia numeryczne wykonano w programie Solidworks w oparciu o algorytmy metody elementów skończonych. Analizy przeprowadzono na modelach układu „kolumnowo-nasypowego”, gdzie dla każdego z analizowanych schematów dobrano odpowiedni zestaw cech oporu gruntu [dla gruntu słabego $k_s=13 \text{ MN/m}^3$, dla gruntu średniego $k_s=21,3 \text{ MN/m}^3$ – wg (53)], odpowiednią głębokość posadowienia słupa oraz wartość obciążenia. Schemat obliczeniowy każdego modelu opierał się na obciążeniu punktowym, zlokalizowanym w najwyższym punkcie słupa oraz podporze podatnej zlokalizowanej na powierzchni płyty ostożowej i odcinkach słupa poniżej poziomu gruntu – rys. 9.



Rys. 8. Schemat posadowienia słupa energetycznego: 1 – stopa dolna, 2 – obejma, 3, 4, 5 – śruba, podkładka, nakrętka, 6 – płyta ostożowa, 7 – słup

Fig. 8. Power pole foundation scheme: 1 – bottom footplate, 2 – mouthpiece, 3, 4, 5 – bolt, washer, nut, 6 – footing plate, 7 – pole



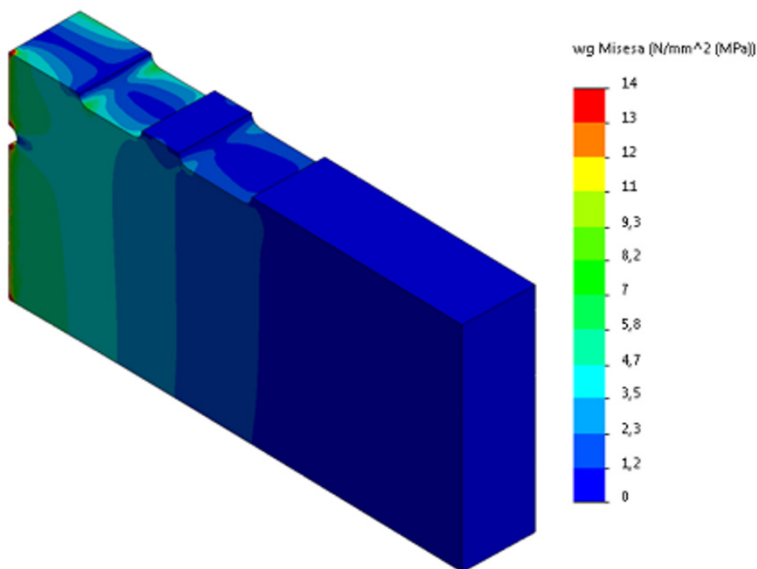
Rys. 9. Schemat warunków brzegowych zastosowanego modelu [widok „na leżąco”]

Fig. 9. Diagram of boundary conditions of models [rotated view]

Obliczenia dla obydwu typów płyt U-85 i U-130 wykonano dla grubości $G=40 \text{ mm}$. Model materiałowy płyt [liniowy] przyjęto na podstawie laboratoryjnych badań zginania polimerobetonu na próbkach o przekroju kwadratowym. Dlatego przyjęto: moduł Younga $E = 10 \text{ GPa}$, współczynnik Poissona $\nu = 0,2$, średnią wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $\sigma = 39 \text{ MPa}$. Wartości te przyjęto na podstawie wcześniejszych doświadczeń autorów. Aby uprościć model, założono, że model słupowy jest sztywny. W wyniku obliczeń otrzymano wartości naprężeń zredukowanych i głównych, przemieszczeń i odkształceń modelu. Nie stwierdzono przekroczenia przyjętego kryterium naprężeń, w związku z czym wykazano prawidłowość doboru materiału oraz optymalną grubość opracowanych płyt ostożowych z polimerobetonu. Przykładowe wyniki przedstawiono w postaci map naprężeń von Misesa na rys. 10 i 11.

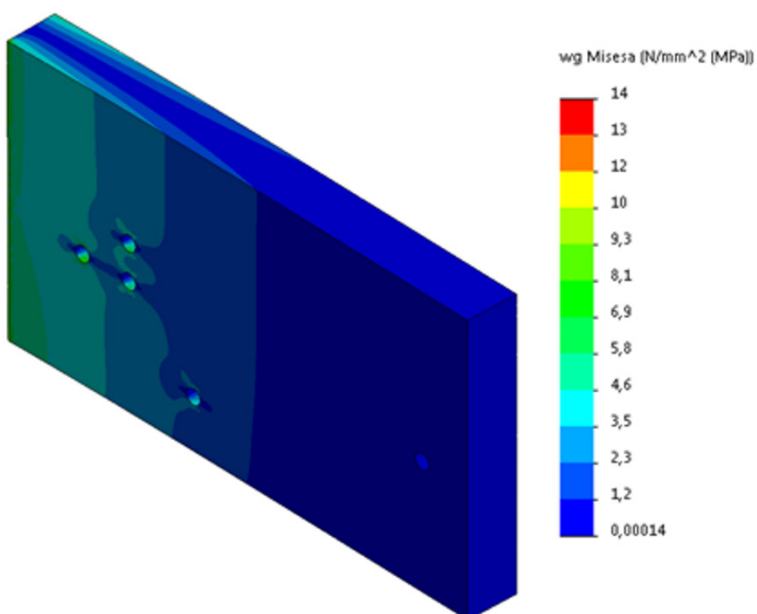
Do celów analizy porównawczej wzięto pod uwagę wartości naprężeń rozciągających podczas zginania próbki. Jako parametr

Changes in the performance of prepared composites after aging are associated with the influence of various chemical environments on the structure of the analyzed samples. The deterioration of the flexural strength after aging is a commonly noted effect (44). However, epoxy-based concretes are generally characterized by high chemical resistance (45-47). Different research works reported the most significant deterioration of the mechanical performance after the acid treatments. The authors indicated that the deterioration occurs due to the porosity of the concretes and the possibility of chemical reactions between acids and aggregates (48-50).. Nevertheless, the Authors of cited works applied lower contents of epoxy resin in composites - up to 12 % by mass, while in presented work the 15 % of polyester was applied. This difference enabled better wetting of aggregate particles with the resin and enhanced their chemical resistance. This effect was confirmed by Ghassemi and Toufigh (48), who reported significantly higher chemical resistance of polymer concretes when the share of epoxy resin increased from 10 to 12 %. The strongest deterioration of



Rys. 10. Rozkład naprężenia zastępczego w płycie ostożkowej U-85

Fig. 10. Reduced stress distribution in the U-85 footing plate



Rys. 11. Rozkład naprężenia zastępczego w płycie ostożkowej U-130

Fig. 11. Reduced stress distribution in the U-130 footing plate

optymalizacyjny wykorzystano wynikową objętość każdej z badanych płyt. Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresów na rys. 12 – 14.

Z analizy wynika, że płyty przenoszą założone obciążenie przy grubości 30 mm. Mniejsza grubość płyty przy założonym obciążeniu może wiązać się z jej uszkodzeniem na skutek przekroczenia wytrzymałości zastosowanego materiału kompozytowego. Mając powyższe na uwadze proponuje się wykonanie paneli o grubości 40-50 mm, co pozwoli na uzyskanie określonego współczynnika bezpieczeństwa w zakresie 1,3 – 1,6. Jak wynika z wykresu przedstawionego na rys. 14, przy grubości większej niż 30 mm, zapewniającej zakładane przeniesienie obciążenia, płyty serii U

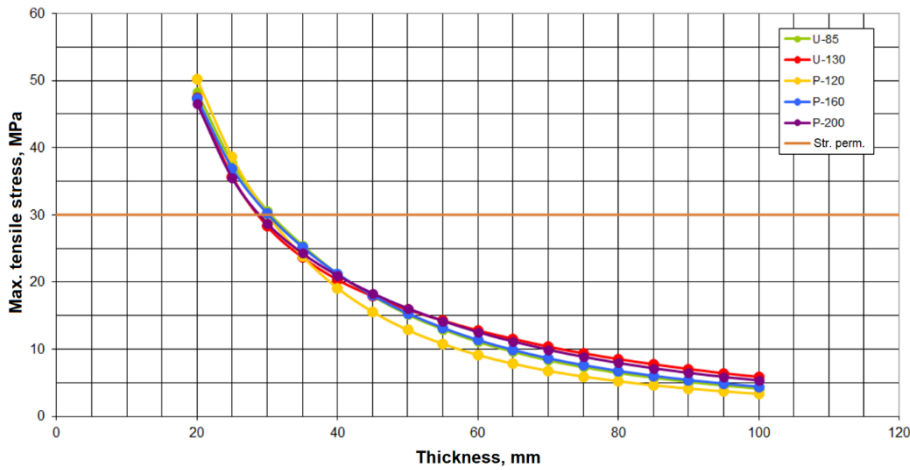
the polymer concrete mechanical performance was observed with immersion in the sodium hydroxide. As mentioned above, this effect may be attributed to the substantial mass loss of the sample caused by the swelling of the concrete due to the chemical interactions between hydroxide and silica present in the aggregates (46,49,51). Similar effects were recently noticed by Ghassemi and Toufigh, who additionally noted the microcracks of the epoxy resin and weakening of the interfacial bonding (48). Moreover, the visual changes in the appearance of polymer concretes after immersion in different media [see Section 3.1] pointed to the significant changes in the chemical structure after application of NaOH. Relatively high resistance of epoxy-based polymer concretes to freeze-thaw cycles is attributed to the low hydrophilicity of the material (52). Other researchers (54-56) noted similar influence of the freeze-thaw cycles.

Based on the presented results showing the impact of different environments on the performance of polymer concretes, polymer concrete 6 was selected for further tests and manufacturing of standard footing plates for the foundation of power poles.

4. Assumptions and design procedure for footing slabs

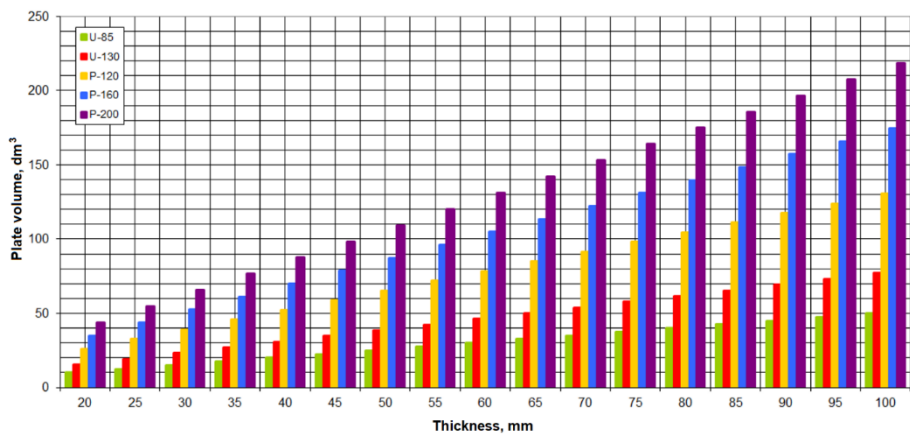
The installation of the footing plates is a part of the works related to the foundation of the power pole. The ground for basing the pole must be assessed in accordance with the PN-81/B-03020 standard. The shape guidelines for the plates are given in the Polish Power Transmission and Distribution Association [PTPIREE] albums. The composite footing plates are a solution for medium and weak soils. If a very weak ground is found in the place of development, the whole foundation should be designed individually. Exemplary stand construction is shown in Fig. 8.

For practical reasons - due to the potential market demand, it was decided to develop a technology for two basic types of footing plate: U-85 and U-130. Due to the non-normative material, the design was preceded by a numerical analysis. They were to show that the proposed thickness of the slab would withstand the loads imposed on it in the soil. Numerical calculations were performed using Solidworks software, based on finite element method algorithms. Analyses were carried out on the models of the "column-and-bank" system, where for each of the analyzed schemes the corresponding set of soil resistance features was selected: for weak soil $k_s = 13 \text{ MN/m}^3$, for medium soil $k_s = 21.3 \text{ MN/m}^3$ - according to (53), appropriate depth of the column foundation, as well as the value of load. The calculation scheme of each model was based on the point load, located at the highest point of the column, and the susceptible support located on the surface of the footing plate and the sections of the column below ground level – Fig. 9.



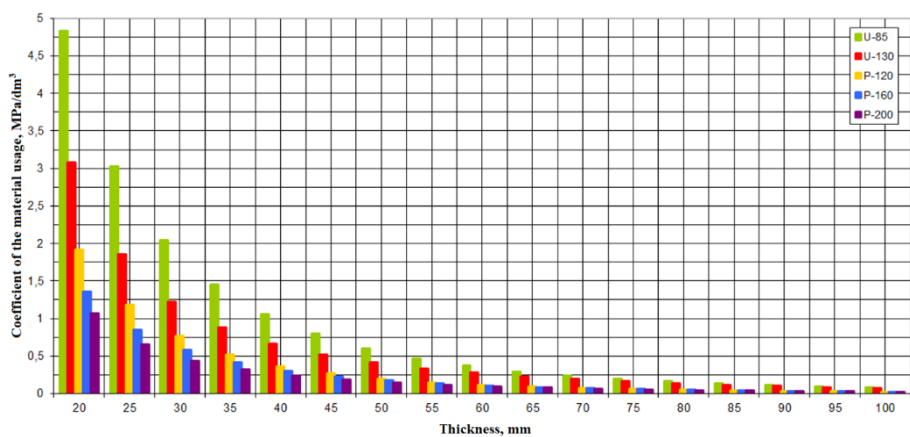
Rys. 12. Zależność maksymalnego naprężenia rozciągającego przy zginaniu płyty ostojowej od jej grubości dla $F = 42$ kN i różnych wariantów geometrii

Fig. 12. Relationship between the maximum tensile stress at bending of the footing plate and its thickness for $F = 42$ kN and different geometry variants



Rys. 13. Zmiana objętości płyty ostojowej w zależności od zmiany jej grubości (dla różnych wariantów geometrii)

Fig. 13. Changing the volume of the footing plate depending on the change in its thickness (for different geometry variants)



Rys. 14. Współczynnik zużycia materiału w funkcji grubości płyty ostojowej

Fig. 14. Coefficient of the material usage as a function of footing plate thickness

Calculations for both types of plates, U-85 and U-130, were made at the thickness of $G=40$ mm. The material model of the plates [linear] was adopted according to the laboratory bending tests of the conditioned polymer concrete sample [square section]. Therefore, the following were assumed: Young's modulus $E = 10$ GPa, Poisson's coefficient $\nu = 0.2$, average tensile strength [at bending] $\sigma = 39$ MPa. The values were assumed on a base of previous experience of authors. To simplify the model, the column model was assumed to be rigid. As a result of the calculations, the values of reduced and main stresses, displacement and deformation of the model were obtained. It was not found that the adopted stress criterion was exceeded, therefore the correctness of the material selection as well as the optimal thickness of the developed polymer concrete footing plates were proved. Examples of the results are presented in the form of von Mises stress maps in Figures 10 and 11.

For the purposes of comparative analysis, the values of tensile stresses during bending specimen were taken into account. The resultant volume of each of the tested plates was used as an optimization parameter. The obtained results are presented in the form of diagrams in figures 12 - 14.

According to the analysis, the plates carry the assumed load with their thickness of 30 mm. Smaller thickness of the panel at the assumed load may be associated with its damage resulting from exceeding the strength of the composite material used. Bearing this in mind, it is proposed to make panels with a thickness of 40-50 mm, which will allow one to obtain a certain safety factor [1.3 – 1.6]. As results from the graph presented in Fig. 8, at a plate thickness greater than 30 mm [ensuring the assumed load transfer], plates from the U series are still characterized by good material usage. So, the obtained thickness range is optimal.

5. Manufacturing of prototypical footing plates

As a result of the materials investigations the composition of polymer concrete referring to polymer concrete 6 [15% resin system, 75% sand, 10% ash] has been assumed as the

nadal charakteryzują się dobrym zużyciem materiału. Uzyskany zakres grubości jest zatem optymalny.

5. Wytworzenie prototypowych płyt ostojowych

W wyniku badań materiałowych za ostateczny dla płyt przyjęto skład odpowiadający polimerobetonowi 6 [15% żywicy, 75% piasku, 10% popiołu]. Płyty U-85 i U-130 zostały wybrane do produkcji w trakcie projektowania.

Pierwszym punktem procesu produkcyjnego jest przygotowanie form. Formy zaprojektowano zgodnie z danymi procedury projektowania płyt. Formę przedstawiono na rys. 15 i 16.

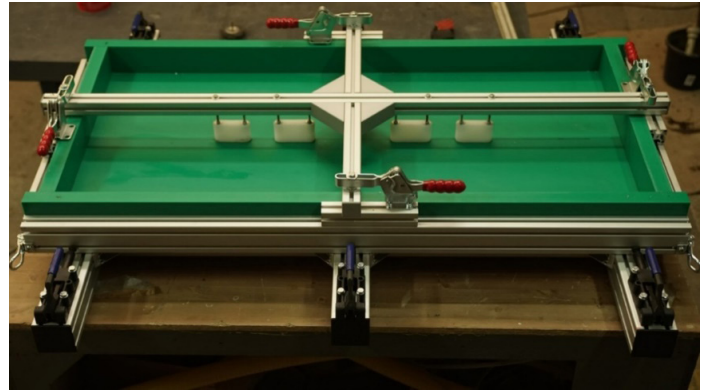
Głównymi założeniami projektowymi formy były:

- wyłożenie formy materiałem o niskiej przyczepności w celu umożliwienia stosowania żywic syntetycznych,
- szybki demontaż formy,
- krótki czas przygotowania formy do kolejnego odlewu - przeznaczenie do produkcji seryjnej,
- prostota konstrukcji,
- niski koszt,
- maksymalne ograniczenie procesów technologicznych potrzebnych do wykonania formy.

Forma została zaprojektowana tak, aby była wykonana w jak największym stopniu z elementów prefabrykowanych. Podstawę i elementy konstrukcyjne wykonano z profili aluminiowych 80 x 80 mm, 80 x 40 mm i 40 x 40 mm, i skrócono za pomocą wkrętów i dedykowanych łączników. Skrzynia odlewnicza wykonana jest z płyt polietylenowych, które wykazują dobrą odporność chemiczną i znikomą przyczepność do żywic syntetycznych. Elementy skrzynki wycięto na obrabiarce CNC w celu uzyskania dobrego dopasowania powierzchni i szczelności. Elementy wykonane z płyt polietylenowych zostały połączone śrubami z aluminiową konstrukcją ramową. Do mechanizmów ślizgowych mocowane są burtki boczne, co umożliwia ich usuwanie i ułatwia rozformowanie odlanej płyty. Płyty czołowe mocowane są za pomocą zatrzasków. Dodatkowym elementem nakładanym od góry jest ramka w kształcie krzyża mocowana i osadzana w specjalnych gniazdach. Umożliwia prawidłowe pozycjonowanie otworów w płytach.

Aby otrzymać dobrej jakości polimerobeton, formowaną masę należy jak najbardziej odpowietrzyć. Dlatego podczas odlewania płyt formę mocuje się na stole wibracyjnym. Przygotowanie formy do odlewu składa się z następujących etapów:

- maksymalne przesunięcie zatrzasków bocznych, aż do ich zablokowania,
- założenie przednich ścian formy i ich zablokowanie,
- nałożenie wosku lub innego preparatu antyadhezyjnego na wewnętrzne części formy,
- mocowanie elementów nośnych ramy mocujących otwory na górnej krawędzi formy,



Rys. 15. Kompletna forma do odlewania płyt ostojowych U-130 z polimerobetonów

Fig. 15. The complete mold for casting of U-130 footing plates from polymer concretes



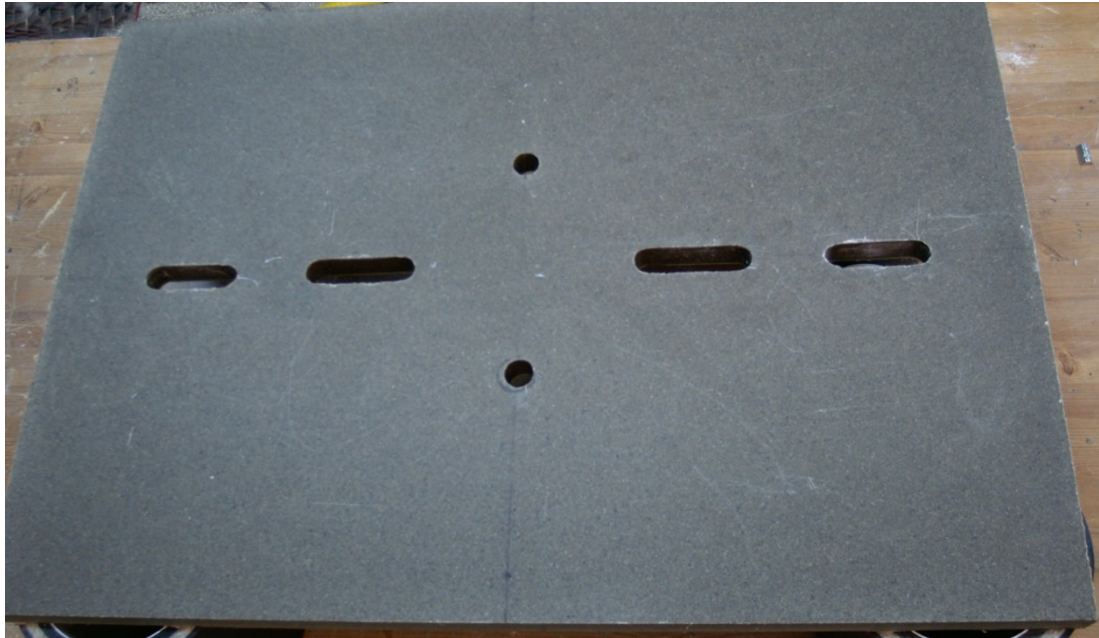
Rys. 16. Zaprojektowana forma ze specjalnymi wkładkami do przygotowania płyt ostojowych U-85

Fig. 16. Designed mold with special inserts for preparation of U-85 footing plates

final one for the plates. Plates U-85 and U-130 have been selected for production during the design procedure.

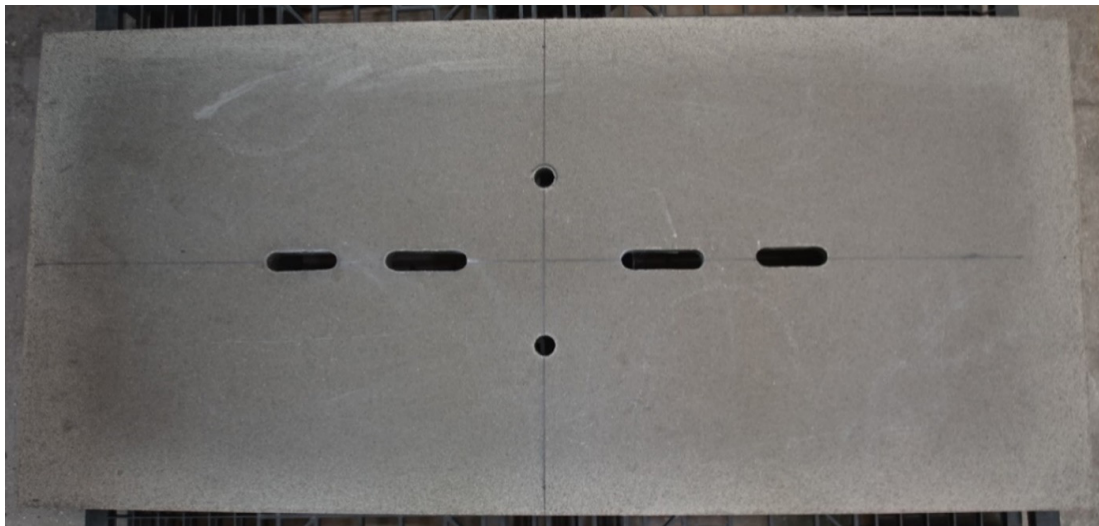
First point of the manufacturing process is preparation of molds. Molds were designed in accordance with the plate design procedure data. The mold is presented in Figs. 15 and 16.

The main design assumptions for the mold were:



Rys. 17. Płyta ostojowa typu U-85 wykonana z polimerobetonu 6, zawierającego 10% popiołów dennych

Fig. 17. U-85 type footing plate made from polymer concrete 6, containing 10% of bottom fluidal ash



Rys. 18. Płyta ostojowa typu U-130 wykonana z polimerobetonu (skład materiałowy „próbka 6”, zawierający 10% wag. popiołów dennych)

Fig. 18. U-130 type footing plate made from polymer concrete 6, containing 10% of bottom fluidal ash

- sprawdzenie prawidłowo zapięcia zatrzasków,
- przygotowanie odmierzonej masy polimerobetonowej,
- uruchomienie stołu wibracyjnego,
- wypełnienie formy wcześniej przygotowanym polimerobetonem.

Gotowe produkty – płyty ostojowe wykonane z polimerobetonu przedstawiono na rys. 17 i 18.

6. Szacowanie kosztów

Uproszczona analiza ekonomiczna opiera się na rzeczywistej cenie płyt ostojowych słupów energetycznych na rynku. Zakładamy,

- lining the mold with a low-adhesion material to enable the use of synthetic resins,
- quick disassembly of the mold,
- quick time of mold preparation for the next casting (intended for serial production),
- simplicity of construction,
- the lowest cost,
- maximum limitation of technological processes needed to produce the mold.

The mold has been designed to be made as much as possible from prefabricated elements. The base and structural parts were made of 80 x 80 mm, 80 x 40 mm and 40 x 40 mm aluminum profiles and

że będzie to 107 PLN [na listopad 2023 r.]. W wyniku częściowej analizy ustalono, że koszt materiałów wliczony w cenę płyty fundamentowej wynosi 25,50 PLN – uwzględnia on aktualne ceny hurtowe kruszywa i cementu. W przypadku polimerobetonów z żywicy poliestrowej koszt materiałów wzrósłby do 108 PLN – łącznie z hurtowymi cenami żywicy, kruszywa i przygotowania popiołu. Najbardziej kosztownym składnikiem jest koszt żywicy poliestrowej, który w analizowanym przypadku jest ponad 20-krotnie wyższy od kosztu cementu. Przy powyższych założeniach cena 1 płyty fundamentowej wykonanej z polimerobetonu wyniosłaby aż 190 PLN. Należy ją jednak zmniejszyć o kwotę związaną ze wzrostem efektywności procesu produkcyjnego. Z przeprowadzonej analizy wynika, że efektywność produkcji płyt fundamentowych z polimerobetonu powinna być aż 16-krotnie większa niż w przypadku płyt fundamentowych betonowych. Biorąc pod uwagę koszty robocizny, główny koszt produkcji poza materiałami, cenę jednostkową podstaw należy obniżyć o 20 PLN. Zatem cena 1 stopy polimerobetonowej wynosi 170 PLN. Wartość ta jest o 59% wyższa od ceny płyty betonowej [107 PLN]. Biorąc pod uwagę znacznie dłuższą oczekiwaną trwałość i odporność środowiskową płyty polimerobetonowej w porównaniu do stopy betonowej, można już powiedzieć, że oba rozwiązania są wobec siebie konkurencyjne. A biorąc pod uwagę spodziewane w nadchodzących latach znaczne wzrosty cen cementu, ze względu na koszty emisji CO₂, które niewątpliwie będą nieporównywalnie wyższe niż potencjalne podwyżki cen żywic syntetycznych, konkurencyjność prefabrykowanych elementów polimerobetonowych będzie się zwiększać.

7. Wnioski

Badania nad optymalizacją materiału i wykonaniem płyt ostojowych słupów energetycznych z polimerobetonów zawierających denny popiół przemysłowy pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków.

- Badane polimerobetony nie wykazały żadnych problemów podczas procesów produkcyjnych przy założonym zakresie zawartości popiołu 10 - 60%.
- Polimerobetony zawierające 10 - 20% popiołu miały większą wytrzymałość na zginanie niż polimerobeton zawierający 100% piasku.
- Wytrzymałość na zginanie równa 35 MPa jest wystarczająca do stosowania badanych polimerobetonów w płytach ostojowych słupów energetycznych.
- Stosunkowo niewielkie zmiany masy spowodowane czynnikami środowiskowymi pozwalają przypuszczać, że badane materiały spełnią wymagania co do trwałości stawiane płytom ostojowym.
- Badane polimerobetony są obiecującym materiałem na płyty ostojowe słupów energetycznych i dalsze ich badania w tym kierunku mają sens.
- Beton zawierający 10% popiołu dennego jest optymalnym materiałem do produkcji płyt. Wykazał się najlepszą, z pośród badanej grupy, odpornością na starzenie środowiskowe.
- Jakość wizualna wyprodukowanych płyt była bardzo dobra.

screwed with screws and dedicated connectors. The casting box is made of polyethylene plates which show good chemical resistance and negligible adhesion to synthetic resins. The box elements were cut on a CNC machine tool to obtain a good surface fit and tightness. Elements made of polyethylene plates were connected to the aluminum frame structure with screws. Side boards are attached to the slide mechanisms which enable their sliding and make it easier to pull out the cast plate. The faceplates are fastened with snap fasteners. An additional element applied from above is a cross-shaped frame fixed and positioned in special sockets. It enables correct positioning of the plateholes.

In order to obtain good quality polymer concrete, the molded mass should be properly compacted. Therefore, when casting the slabs, the mold is fixed on a vibrating table. The preparation of the mold for casting consists of the following steps:

- sliding latches on the sides until they are locked,
- putting on the front sides and fastening their clasps,
- application of wax or other release preparation on the inner parts of the mold,
- fastening of the frame carrying elements that fix holes on the upper edge of the mold,
- check that all clasps are fastened correctly,
- preparation of the polymer concrete weight deducted,
- starting the vibrating table,
- filling the mold with previously prepared polymer concrete.

The final products – footing plates made from polymer concrete, are presented in Figs. 17 and 18.

6. Cost evaluation

The simplified economic analysis is based on the actual price of the power pole footing plates on the market. We assume it to be PLN 107 for November 2023. As a result of a partial analysis, it was determined that a cost of materials included in the price of the footing plate amounts to PLN 25.50, including current wholesale prices of aggregate and cement. In the case of polymer concrete based on polyester resin, materials cost would rise to PLN 108 - including wholesale prices of resin, aggregate and ash preparation. The highest cost component is the cost of polyester resin, which - in analyzed case - is over 20 times higher than the cost of cement. The price of 1 footing plate made of polymer concrete would be as much as PLN 190 under the above assumptions. However, it should be reduced by an amount related to the increase in the efficiency of the production process. The analysis indicates that the efficiency of producing polymer concrete footing plates should be up to 16 times higher than that of concrete footing plates. Taking into account the labor costs, the main production cost, apart from materials, the unit price of the footing plates should be reduced by PLN 20. So, the price of 1 polymer concrete footing plate is PLN 170. This value is 59% higher than the price of a concrete slab [PLN 107]. Taking into account the much longer expected

- Zaprojektowany system form jest prosty i niezawodny. Może mieć zastosowanie przemysłowe do seryjnej produkcji płyt.
- Płyty ostojowe wykonane z polimerobetonu pod względem rzeczywistej ceny i oczekiwanej trwałości są konkurencyjne w stosunku do płyt wykonanych z betonu tradycyjnego.

Podziękowania

Badania zostały częściowo sfinansowane w ramach Pracy Statutowej Głównego Instytutu Górnictwa nr 11184010-160.

Literatura / References

1. T. Hop, *Betony Polimerowe Tom I*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, 1992.
2. T. Hop, *Betony Polimerowe Tom II*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, Poland, 1992.
3. C. Vipulanandan, E. Paul, Characterization of Polyester Polymer and Polymer Concrete. *J. Mater. Civil Eng.* **5**,(1), 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)).
4. E. Kirlikovali, Polymer/concrete composites - A review. *Polym. Eng. Sci.* **21**(8), 507-509 (1981). <https://doi.org/10.1002/pen.760210811>.
5. M. Kozioł, N. Żuczek, P. Olesik, J. Wieczorek, Preliminary analysis of concept of producing polymer concrete surface for outdoor terraces. *Compos. Theory Pract.* **20**(3-4), 102-110 (2020).
6. R.J. Stevens, W.S. Guthrie, J.S. Baxter, B.A. Mazzeo, Field Evaluation of Polyester-Polymer Concrete Overlays on Bridge Decks Using Nondestructive Testing. *J. Mater. Civil Eng.* **33**(7), 04021155 (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003810](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003810).
7. M. Nodehi, Epoxy, Polyester and Vinyl Ester Based Polymer Concrete: A review, *Innovative Infrastructure Solutions.* **7**, 64 (2022), <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00661-3>.
8. C. Vipulanandan, E. Paul, Performance of Epoxy and Polyester Polymer Concrete. *Mater. J.* **87**(3), 241-251 (1990). <https://doi.org/10.14359/2187>.
9. M. Ribeiro, C. Tavares, A. Ferreira, Chemical Resistance of Epoxy and Polyester Polymer Concrete to Acids and Salts. *J. Polym. Eng.* **22**(1), 27-44 (2002). <https://doi.org/10.1515/POLYENG.2002.22.1.27>.
10. R. Kumar, A Review on Epoxy and Polyester Based Polymer Concrete and Exploration of Polyfurfuryl Alcohol as Polymer Concrete. *J. Polym.* **2016**, 7249743 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/7249743>.
11. P. Torkittiku, T. Nochaiya, A. Chaipanich, The Investigation of Polyester Resin Polymer Concrete With Various Amount of Construction Aggregate. *AIP Conf. Proc.* **2279**, 100004, (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0023372>.
12. G. Asachi, M. Barbuta, A.A. Serbanoiu, D. Babor, A. Burlacu, Wastes as Aggregate Substitution in Polymer Concrete. *Proc. Manuf. Iasi Rom.* **22**, 347-351, (2018) <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.052>.
13. J. Hodul, J. Hodna, R. Dorchytko, M. Vyhankova, Utilization of Waste Glass in Polymer Concrete. *Mater. Sci. Forum*, **856**, 171-177 (2016) <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.865.171>.
14. R. Oliwa, K. Bulanda, M. Oleksy, P. Ostyńska, G. Budzik, M. Płocińska, S. Krauze, Fire resistance and mechanical properties of powder-epoxy composites reinforced with recycled glass fiber laminate. *Polimery*, **65**(4), 280-288 (2020). <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.4.4>.
15. M.L. Berndt, Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* **23**(7), 2606-2613 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011>.
16. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak, Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopoly-

durability and environmental resistance of the polymer concrete footing plate compared to the concrete footing plate, it could already be said that both solutions are competitive with each other. And taking into account the significant increases in cement prices expected in the coming years, due to the costs of CO₂ emissions, which will undoubtedly be incomparably higher than the potential increases in the prices of synthetic resins, the competitiveness of prefabricated polymer concrete elements will increase.

7. Conclusions

Research procedure including optimization of the material and the production of power pole footing plates from polymer concretes containing industrial bottom ash allowed the following conclusions to be drawn:

- The tested polymer concretes showed no problems during manufacturing procedures with the assumed range of the ash content of 10 - 60%.
- Compositions containing 10 - 20% by mass of the ash showed higher flexural strength than polymer concrete containing 100% sand.
- The flexural strength at 35 MPa is sufficient for use in footplates for power poles.
- Relatively small changes in mass caused by environmental factors allow us to assume that the tested materials will meet the strength requirements for the footplates.
- The tested polymer concretes are a promising material for power poles footplates and their further research in this direction makes sense.
- The concrete containing 10% of the ash is optimal material for producing the plates. It has showed the best, from the tested group, resistance to environmental aging.
- Visual quality of the produced plates was very good.
- The designed mold system is simple and reliable. It is applicable for industrial application for serial production of the plates.
- Concerning real price and expected durability, the foot plates made of polymer concrete are competitive to the ones made of traditional concrete.

Acknowledgments

The research was supported by the Central Mining Institute Statutory Work No. 11184010-160.

- mers. *Waste Manag.* **29**(2), 539-543 (2009) <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.023>.
17. M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. Hussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Constr. Build. Mater.* **116**, 15-24 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080>.
 18. R.K. Seals, L.K. Moulton, B.E. Ruth, Bottom Ash: An Engineering Material. *J. Soil Mech. Found. Divis.* **98**(4), 311-325 (1972). <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001741>.
 19. S. Torrey, Coal ash utilization. Fly ash, bottom ash and slag. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1978.
 20. H. Kurama, M. Kaya, Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Constr. Build. Mater.* **22**(9), 1922-1928 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.008>.
 21. L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, T. Manfredini, Use of municipal incinerator bottom ash as sintering promoter in industrial ceramics. *Waste Manag.* **22**(8), 859-863 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00077-6](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00077-6).
 22. A.C.M. Loy, S. Yusup, M.K. Lam, B.L.F. Chin, M. Shahbaz, A. Yamamoto, M.N. Acda, The effect of industrial waste coal bottom ash as catalyst in catalytic pyrolysis of rice husk for syngas production. *Energy Conv. Manag.* **165**, 541-554 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.063>.
 23. K.T. Varughese, B.K. Chaturvedi, Fly Ash as Fine Aggregate in Polyester Based Polymer Concrete. *Cem. Concr. Comp.* **18**(2), 105-108 (1995). [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00006-2](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00006-2).
 24. C.Y. Sung, J.H. Kim, Engineering Properties of Permeable Polymer Concrete Using Bottom Ash and Recycled Coarse Aggregate. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* **48**(7), 25-31 (2006). <https://doi.org/10.5389/KSAE.2006.48.7.025>.
 25. M.T. Lakhari, Y. Bai, L.S. Wong, S.C. Paul, V. Anggraini, S.Y. Kong, Mechanical and durability properties of epoxy mortar incorporating coal bottom ash as filler. *Constr. Build. Mater.* in press, available online 24 November 2021, 125677, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125677>.
 26. O. Hammoud, D. Blanc, M. Lupsea-Toader, C. de Brauer, F. El Hassouni, Reuse of municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI-BA) in ready-mix concrete – technical and environmental assessment. *Wascon 2018 - 10th Int. Conf. Env. Techn. 2018, TAMPERE, Finland, hal-02048767*.
 27. <https://www.intechopen.com/chapters/55912> (access on 12.12.2021).
 28. Z. Kłosowska-Wołkiewicz, W. Królikowski, P. Penczek, Nienasycone żywice poliestrowe. WNT, Warszawa, Poland, 2016.
 29. K. Dana, S. Das, S.K. Das, Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin-quartz-feldspar system. *J. Europ. Cer. Soc.* **24**(10-11), 3169–3175 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.10.008>
 30. L. Gong, Y. Wang, X. Cheng, R. Zhang, H. Zhang, Porous mullite ceramics with low thermal conductivity prepared by foaming and starch consolidation. *J. Porous Mater.* **21**(1), 15–21 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10934-013-9741-z>
 31. I.C. Madsen, N.V.Y. Scarlett, A. Kern, Description and survey of methodologies for the determination of amorphous content via X-ray powder diffraction. *Zeitsch. Kristal.* **226**(12), 944–955 (2011). <https://doi.org/10.1524/zkri.2011.1437>
 32. J. Korol, J. Lenża, K. Formela, Manufacture and research of TPS/PE biocomposites properties, *Compos. B* **68**, 310–316 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.045>
 33. S. Kumar, R.C. Gupta, S. Shrivastava, L.J. Csetenyi, Sulfuric Acid Resistance of Quartz Sandstone Aggregate Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* **29**, 06017006 (2017).
 34. J.M.L. Reis, Effect of aging on the fracture mechanics of unsaturated polyester based on recycled PET polymer concrete. *Mater. Sci. Eng. A*, **528**(6), 3007–3009 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.12.073>
 35. A. Hejna, J. Korol, M. Przybysz-Romatowska, Ł. Zedler, B. Chmielnicki, K. Formela, Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers – A review. *Waste Manag.* **108**, 106–118 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.032>.
 36. R. Bagheri, B.T. Marouf, R.A. Pearson, Rubber-toughened epoxies: A critical review. *Polym. Rev.* **49**(3), 201–225 (2009). <https://doi.org/10.1080/15583720903048227>.
 37. W. Lokuge, T. Aravinthan, Effect of fly ash on the behaviour of polymer concrete with different types of resin. *Mater. Des.* **51**, 175–181 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.078>.
 38. J. Smoleń, B. Degirmenci, B.D. Tekeli, B. Nowacki, The application of automotive glass waste in the production of epoxy polymer concrete. *Cem. Wapno Beton*, **26**(5), 402–412 (2021). <https://doi.org/10.32047/cwb.2021.26.5.4>.
 39. J. Smoleń, The use of recycled carbon fibers (rCF) in production of polymer concrete to improve mechanical properties. *Compos. Theory Pract.* **23**(3), 167-172 (2023).
 40. D. Carroll, H.C. Starkey, Reactivity of Clay Minerals with Acids and Alkalies. *Clay. Clay Miner.* **19**, 321–333 (1971). <https://doi.org/10.1346/CCMN.1971.0190508>.
 41. N.E. Smeck, J.M. Novak, Weathering of soil clays with dilute sulfuric acid as influenced by sorbedhumic substances. *Geoderma* **63**, 63–76 (1994). [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90110-4).
 42. J. Korol, M. Głodniok, A. Hejna, T. Pawlik, B. Chmielnicki, J. Bondaruk, Manufacturing of Lightweight Aggregates as an Auspicious Method of Sewage Sludge Utilization. *Materials* **13**, 5635 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13245635>.
 43. J.M.L. Reis, Fracture assessment of polymer concrete in chemical degradation solutions. *Constr. Build. Mater.* **24**(9), 1708–1711 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.020>.
 44. D. Ma, Z. Pan, Y. Liu, Z. Jiang, Z. Liu, L. Zhou, L. Tang, Residual Flexural Performance of Epoxy Polymer Concrete under Hygrothermal Conditions and Ultraviolet Aging. *Materials* **12**, 3472 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12213472>.
 45. M. Golestaneh, G. Najafpour, G. Amini, M. Beygi, Evaluation of Chemical Resistance of Polymer Concrete in Corrosive Environments. *Iran. J. Ener. Env.* **4**(3), 304–310 (2013).
 46. M.J. Hashemi, M. Jamshidi, Flexural Behavior of Polyester Polymer Concrete Subjected to Different Chemicals. *Int. J. Eng.* **28**(7), 978-983 (2015). <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2015.28.07a.03>.
 47. M.M. El-Hawary, H. Abdel-Fattah, Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete. *Constr. Build. Mater.* **14**, 317-323 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00032-5).
 48. P. Ghassemi, V. Toufigh, Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments. *Constr. Build. Mater.* **234**, 117887 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117887>.
 49. J.M.L. Reis, Fracture assessment of polymer concrete in chemical degradation solutions. *Constr. Build. Mater.* **24**(9), 1708–1712 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.020>.
 50. Y. Shen, B. Liu, J. Lv, M. Shen, Mechanical Properties and Resistance to Acid Corrosion of Polymer Concrete Incorporating Ceramsite, Fly Ash and Glass Fibers. *Materials* **12**, 2441 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12152441>.
 51. J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, The effects of atmospheric exposure on the fracture properties of polymer concrete. *Build. Env.* **41** 262–267 (2006).
 52. J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, Freeze–thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **20**(10), 888–892 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.021>.
 53. J.M.L. Reis, A.J.M. Ferreira, Freeze–Thaw resistance of epoxy polymer concrete. In: *Proc. Int. Conf. Polym. Concr. Mortars Asphalts. Porto, 2002*. p. 101–11.
 54. M. Heidari-Rarani, M.R.M. Aliha, M.M. Shokrieh, M.R. Ayatollahi, Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal

cyclic loadings – An experimental study. *Constr. Build. Mater.* **64**, 308–315 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.031>.

55. M.M. Shokrieh, M. Heidari-Rarani, M. Shakouri, E. Kashizadeh, Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete. *Constr. Build. Mater.* **25**(8), 3540–3549 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.047>.

56. Z. Meyer, M. Olszewska, Methods Development for the Constrained Elastic Modulus Investigation of Organic Material in Natural Soil Conditions. *Materials* **14**(22), 6842 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14226842>.

57. O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, M. Ben Oueddou, Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250°C. *Constr. Build. Mater.* **27**, 415–424 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027>.