

Bernardeta DĘBSKA ^{a)}

^{a)}Zakład Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów
e-mail: bdebska@prz.edu.pl

Modyfikacja zapraw budowlanych ścinkami otrzymanymi z odpadowych tworzyw sztucznych

Streszczenie: Postęp technologiczny powoduje, że praktyczne zastosowanie znajdują liczne nowe rozwiązania materiałowe. Jednocześnie istotnym zadaniem współczesnego budownictwa stało się poszukiwanie technologii i rozwiązań gwarantujących racjonalne gospodarowanie zasobami środowiska naturalnego. Uwagę wielu ośrodków badawczych na świecie przyciąga więc możliwość modyfikacji materiałów za pomocą substancji wyjątkowo uciążliwych dla środowiska, takich jak odpady z tworzyw sztucznych. Liczne opracowania naukowe (publikacje, patenty) dowodzą, że odpady polimerów mogą pozytywnie wpływać na właściwości betonów i zapraw budowlanych. Jednym z powszechnie stosowanych tworzyw sztucznych jest poli(tereftalan etylenu) PET. Wykonuje się z niego m.in. opakowania i butelki na napoje, które bardzo szybko stają się odpadem. PET nie stwarza bezpośredniego zagrożenia dla środowiska, jednak słaba biodegradowalność oraz ogromna ilość wytwarzanych odpadów skłaniają do poszukiwania sposobów jego recyklingu. W artykule przedstawiono wyniki badań fizyko-mechanicznych modyfikowanych zapraw epoksydowych. Modyfikacja polegała na dodaniu do zaprawy wąskich ścinków poli(tereftalanu etylenu) (PET), otrzymanych z odpadowych butelek po napojach. Przeprowadzone badania wykazały, że zaprawy epoksydowe z dodatkiem ścinków odpadowego PET charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami wytrzymałościowymi oraz niską nasiąkliwością. Wykonanie próbek oraz przeprowadzenie badań poprzedzono opracowaniem planu eksperymentu, dzięki czemu wielokrotnie ograniczono liczbę eksperymentów badawczych koniecznych do wykonania. Na podstawie analizy statystycznej uzyskano modele statystyczne adekwatne do właściwości obiektu badań. Przeprowadzona modyfikacja stwarza możliwości wykorzystania do produkcji zapraw materiałów odpadowych, które stanowią zazwyczaj duży problem środowiskowy, co wpisuje się w założenia zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Słowa kluczowe: zaprawy epoksydowe, włókna PET, odpady PET, właściwości wytrzymałościowe

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach na całym świecie obserwuje się znaczny wzrost zużycia tworzyw sztucznych, co powoduje również zwiększenie wytwarzania odpadów tych materiałów. Odpadowe tworzywa sztuczne charakteryzuje uniwersalność wielu właściwości. Niska waga, wytrzymałość, odporność na działanie różnych roztworów korozyjnych, doskonałe właściwości termo- i elektroizolacyjne - to cechy, które mogą być wykorzystane do otrzymywania innowacyjnych materiałów kompozytowych, wpisujących się w założenia zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Tworzywem sztucznym, które wyróżnia się dużą gęstością (ułatwia to jego wyodrębnianie z mieszaniny tworzyw), wysoką odpornością mechaniczną, chemiczną i termiczną oraz szczególnie właściwościami optycznymi jest poli(tereftalan etylenu) (PET). PET jest liniowym poliestrem kwasu tereftalowego oraz glikolu etylenowego (lub tlenku etylenu). Początkowo z PET produkowano folię i włókna poliestrowe. Już wtedy pojawił się problem związany z utylizacją jego odpadów. Obecnie masowo wykorzystuje się ten termoplastyczny polimer w produkcji butelek na napoje bezalkoholowe i to właśnie zużyte butelki są głównym źródłem odpadów PET. Z roku na rok zapotrzebowanie na to tworzywo

wzrasta, wzrasta zatem ilość odpadów PET, dlatego tak ważne jest, aby zmienić postawę bierności i obojętności wobec skali tego zjawiska. PET uważany jest za tworzywo nowoczesne, ekologiczne i niedrogi. Jednak szybki wzrost zużycia opakowań z poli(tetraftalanu etylenu) stwarza problemy środowiskowe. Względy ekologiczne i ekonomiczne przemawiają więc za tym, aby odpady PET poddać recyklingowi.

Przegląd literatury krajowej i zagranicznej wskazuje na bardzo duże zainteresowanie możliwością wykorzystania odpadów PET do modyfikacji materiałów budowlanych, szczególnie betonów i zapraw. Wielu badaczy zastosowało te odpady jako zamiennik kruszywa w betonach cementowych lub jako zbrojenie w postaci włókien.

Silva i in. [1] badali zachowanie się włókien odpadowego poli(tereftalanu etylenu) w materiałach opartych na cemencie portlandzkim. Dodano włókna odpadowego PET w proporcji odpowiednio 0,4 i 0,8% objętościowych. Badania wykazały, że włókna odpadowego PET nie tylko nie wpływają znacząco na poprawę parametrów wytrzymałościowych zaprawy, ale jednocześnie same mogą ulec uszkodzeniu, w szczególności pod wpływem działania alkalicznego środowiska. Aby zminimalizować ten problem D. Wiliński z zespołem zastosowali odpowiednie powleczenie włókien kopolimerem etylen/octan winylu (EVA) [2]. Autorzy [3] badali długoterminową trwałość kompozytów cementowych wzmacnianych włóknami odpadowego PET. Dodatek włókien PET nie powodował znaczących zmian w przenikalności chlorków w porównaniu do próbek kontrolnych. Próbkę modyfikowanego betonu poddane testowi cyklicznego zamrażania-rozmrażania wykazały większą odporność niż beton niemodyfikowany. Badano również zachowanie się próbek poddanych działaniu różnych mediów korozyjnych. Wraz z upływem czasu pogorszeniu ulegała powierzchnia stosowanych włókien PET narażonych na działanie środowiska zasadowego. Podobnie zachowywały się włókna poddane działaniu kwasu siarkowego. W innym eksperymencie zauważono,

że bardzo dobrą odpornością chemiczną charakteryzują się włókna zanurzone w siarczanie sodu i chlorku sodu. Włókna uzyskane z odpadowych butelek po wodzie oraz napojach bezalkoholowych zostały wykorzystane w procesie otrzymywania betonów cementowych i miały spowodować zwiększenie ich plastyczności [4]. Stwierdzono, że próbki betonów z dodatkiem modyfikatora charakteryzowały się większą odpornością na pękanie w porównaniu do próbek kontrolnych. Autorzy powyższej publikacji widzą sens prowadzenia dalszych badań nad doborem rodzaju i wielkości włókien odpadowego PET, aby móc zoptymalizować proces produkcji. Pozytywny wpływ włókien odpadowego PET na plastyczność betonów cementowych (wzrost wskaźnika plastyczności o 7–10 razy) potwierdzono również w pracy [5]. Badania uwidoczniły jednak jednoczesny spadek wytrzymałości na ściskanie od 1 do 9% w porównaniu do próbek kontrolnych.

Pereira de Oliveira oraz Castro-Gomes [6] do przygotowania próbek zapraw zastosowali włókna odpadowego PET, uzyskane w wyniku bezpośredniego pocięcia boków butelek PET, co zmniejszyło koszty ich otrzymania w stosunku do włókien uzyskanych drogą przemysłową. Dodatek modyfikatora wynosił odpowiednio 0, 0,5, 1 i 1,5% obj. Wprawdzie autorzy zaobserwowali efekt obniżania się wytrzymałości na ściskanie, ale odnotowali również korzystne zmiany w wartościach wytrzymałości na zginanie, szczególnie dla próbek z półtoraprocentową zawartością włókien odpadowego PET. Beton cementowy modyfikowano również włóknami przetworzonymi przemysłowo z odpadów PET i PP [7]. Włókna te różniły się m.in. długością oraz parametrami wytrzymałościowymi. Otrzymane próbki betonów charakteryzowały się niższymi o ok. 18% wartościami współczynnika przewodzenia ciepła niż próbki wzorcowe. Dla wszystkich rodzajów zastosowanych włókien obserwowano również wzrost wytrzymałości na ściskanie (nawet o 35% w przypadku najkrótszych włókien PET). Badania przeprowadzone w ramach cytowanej pracy pokazują, że zbrojenie betonu za pomocą włókien pochodzących z recyklingu PET

powoduje zwiększenie odporności termicznej oraz wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie, a także poprawia plastyczność betonu. W opinii autorów cytowanych powyżej publikacji, uzyskane przez nich wyniki badań skłaniają do podjęcia dalszej eksperymentalnej i teoretycznej analizy dotyczącej modyfikacji betonów cementowych przetworzonymi odpadowymi włóknami PET. Sugerują oni, że szczególną uwagę należałoby poświęcić optymalizacji składu mieszanki pod kątem doboru wielkości, kształtu, parametrów wytrzymałościowych oraz zawartości włókien PET, wyrażonej w procentach masowych lub objętościowych. Należałoby rozszerzyć zakres analiz także o badania związane z odpornością ogniową. Uwzględnienie wymienionych czynników może doprowadzić do zaprojektowania innowacyjnych betonów łączących bardzo dobre właściwości techniczne z wymaganiami stawianymi pod kątem ochrony środowiska.

Zdecydowanie mniej liczne są prace wiążące odpady PET i kompozyty żywiczne. Dotyczą one głównie zapraw żywicznych otrzymanych przy częściowym zastąpieniu kruszywa opisywanym recyklatem. Niniejsza praca dotyczy badań fizyko-mechanicznych zapraw epoksydowych zawierających dodatek wąskich ścinków odpadowego poli(tereftalanu etylenu) (PET).

Aby ograniczyć ilość koniecznych do przeprowadzenia eksperymentów posłużono się algorytmem statystycznym pozwalającym na znaczną redukcję liczby próbek zapraw, które należało przebadać. Do utworzenia planu wykorzystano pakiet STATISTICA. Wybrano plan centralny kompozycyjny z powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Proces doboru planu eksperymentu przebiegał w sposób analogiczny do opisanego w [8]. Plan eksperymentu przyjął formę tabeli (tabela 1).

Tab. 1. Zestawienie parametrów opisujących skład zaprawy dla poszczególnych punktów planu eksperymentu
Tab. 1. List of parameters describing mortar composition for particular points of experiment plan

Nr punktu planu eksperymentu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zawartość włókien PET, % wag.	2,93	0,86	0,00	2,93	2,93	2,93	5,00	5,00	5,86	0,86
Stosunek mas żywicy do kruszywa Z/K	0,36	0,33	0,25	0,14	0,25	0,25	0,18	0,33	0,25	0,18



Rys. 1. Butelki PET przed i po pocięciu

Fig. 1. PET bottles before and after cutting

Każda z dziesięciu kolumn tabeli przedstawia jeden punkt planu i opisuje skład badanych zapraw. Wybrany plan eksperymentu zakładał powtórzenie badania w punkcie centralnym, dlatego punkty planu oznaczone jako 5 i 6 nie różnią się składem.

2. OPIS BADAŃ

2.1. MATERIAŁY UŻYTE W BADANIACH

Do otrzymania zapraw żywicznych zastosowano żywicę epoksydową Epidian 5. Do utwardzenia żywicy wykorzystano utwardzacz Z-1 (trietylenotetramina) w ilości 10% wag. w stosunku do żywicy. Kruszywo stanowił piasek kwarcowy o uziarnieniu 0 - 2 mm zgodny z wymaganiami normy PN EN 196-1. W oparciu o dostępne dane literaturowe oraz własne wyniki wstępnych badań dotyczących tego typu zapraw ustalono, że zakres stosunku żywicy do kruszywa będzie wynosił od 0,14 do 0,36, zgodnie z przyjętym planem eksperymentu (Tabela 1). Do otrzymywanych zapraw dodawano wąskie ścinki PET o wymiarach: długość 20 mm, szerokość 2 mm, grubość 0,25 mm, uzyskane poprzez pocięcie odpadowych butelek po napojach (rys. 1), w ilości 0-5% obj. w stosunku do zawartości żywicy.

Odpowiednie ilości żywicy epoksydowej wymieszano dokładnie z odpowiednią ilością utwardzacza Z-1 (10 cz.w./100 g żywicy) aż do uzyskania jednorodnej mieszaniny. Do misy mieszarki laboratoryjnej przeniesiono przygotowaną kompozycję żywiczną i wymieszano z piaskiem normowym i ścinkami PET, zachowując jednakowy czas mieszania i obroty mieszarki. Gotową zaprawę umieszczono w formach stalowych o wymiarach 40 x 40 x 160 mm, przeznaczonych do badań wytrzymałościowych. Wykonano również kształtki o wymiarach 6 x 60 x 5 mm do badania nasiąkliwości. Aby nastąpił proces utwardzenia, próbki pozostawiono przez 7 dni w warunkach laboratoryjnych.

2.2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Badanie wytrzymałości na zginanie oraz wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w maszynach wytrzymałościowych zaopatrzonych w odpowiednie wkładki, na próbkach o wymiarach 40 x 40 x 160 mm w przypadku wytrzymałości na zginanie oraz na połówkach tych próbek dla wytrzymałości na ściskanie, zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006.

2.3. NASIĄKLIWOŚĆ

Nasiąkliwość była badana na płytkach o wymiarach 60x60x5mm przez 7 dni zgodnie z normą PN-EN 206-1:2003 w temperaturze 23±1°C. Dla każdej z 10 kompozycji planu eksperymentu wykonano po 3 próbki. Przed rozpoczęciem badania próbki zostały zważone, po czym umieszczone w pojemniku z wodą dejonizowaną. Następnego dnia każdą z próbek zważono po wcześniejszym osuszeniu papierowym ręcznikiem, każdą w taki sam sposób. Całą procedurę ważenia powtarzano przez 7 dni oraz w 14 dniu.

Nasiąkliwość obliczono ze wzoru:

$$n = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie:

n – nasiąkliwość, %

m_1 – masa próbki przed badaniem, g

m_2 – masa próbki po określonym czasie zanurzenia w wodzie, g

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Analizę wyników badań wytrzymałościowych rozpoczęto od wyznaczenia wartości średnich oraz odchylenia standardowego. Dane te przedstawiono w tabeli 2.

Następnie wykorzystując program Statistica, przeprowadzono test F Fishera-Snedecora, na podstawie którego można odrzucić hipotezę statystyczną o równości średnich, co jest równoznaczne ze stwierdzeniem, że skład mieszaniny surowców istotnie różnicuje właściwości

Tab. 2. Zestawienie wyników wartości średnich oraz odchylenia standardowego wytrzymałości na zginanie i ściskanie otrzymanych zapraw epoksydowych

Tab. 2. List of mean values and standard deviation of flexural strength and compressive strength for obtained epoxy mortar

Nr punktu planu	Zawartość PET	Stosunek mas żywicy do kruszywa Z/K	Wytrzymałość na zginanie f_f	Wytrzymałość na ściskanie f_c
–	x_1 % obj.	x_2 –	z_1 MPa	z_2 MPa
1	2,93	0,36	20,80 ± 0,46	78,60 ± 1,93
2	0,86	0,33	21,73 ± 1,08	75,18 ± 1,78
3	0,00	0,25	24,31 ± 1,00	83,82 ± 0,97
4	2,93	0,14	25,30 ± 3,78	67,48 ± 3,32
5	2,93	0,25	24,21 ± 1,09	81,42 ± 0,72
6	2,93	0,25	23,55 ± 1,09	82,35 ± 3,27
7	5,00	0,18	28,40 ± 1,37	79,28 ± 1,65
8	5,00	0,33	23,52 ± 0,64	77,98 ± 1,81
9	5,86	0,25	23,94 ± 1,83	80,85 ± 2,74
10	0,86	0,18	29,24 ± 3,31	80,68 ± 3,59

próbek zapraw. Za pomocą testu Browna–Forsythe’a potwierdzono hipotezę o jednorodności wariancji, co umożliwiło przeprowadzenie procesu poszukiwania funkcji opisującej obiekt badań. Funkcja ta w sposób przybliżony opisuje zależność między wielkością wyjściową (wytrzymałość na zginanie, wytrzymałość na ściskanie) a wielkościami wejściowymi (zawartość ścinków PET, Z/K). Przyjęto, że funkcja aproksymująca będzie miała postać wielomianu drugiego stopnia. Taka postać funkcji sugerowana jest przez ekspertów firmy StatSoft dla przyjętego planu doświadczenia [9], a doświadczenie ośrodków badawczych wskazuje, że przyjęty model funkcji regresji dostatecznie dokładnie opisuje zależność między danymi charakteryzującymi skład kompozytu a technicznymi właściwościami badanych kompozytów żywicznych [10]:

$$\hat{z} = A_0 + A_1x_1 + A_2x_1^2 + A_3x_2 + A_4x_2^2 + A_5x_1x_2, \quad (2)$$

gdzie:

\hat{z} – wartość funkcji obiektu badań dla rzeczywistych wartości zmiennych,

x_1, x_2 – rzeczywiste zmienne wejściowe przyjęte w planie badań:

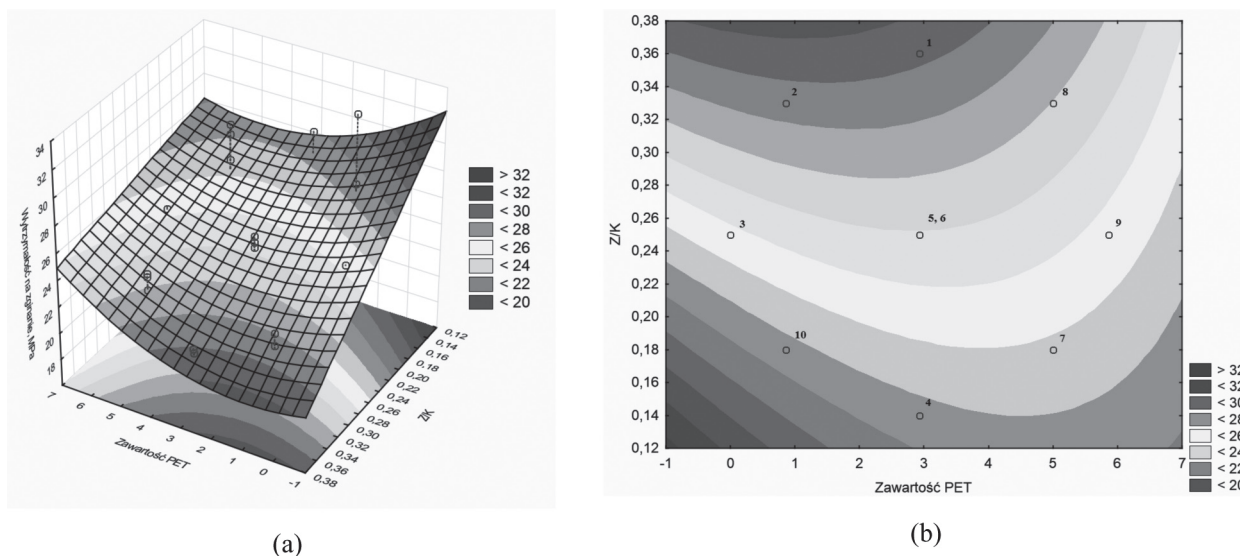
A_i – współczynniki równania dla zmiennych rzeczywistych.

Funkcja ta może zatem przyjąć postać:

$$\hat{z} = A_0 + A_1(\%PET) + A_2(\%PET)^2 + A_3(Z/K) + A_4(Z/K)^2 + A_5(\%PET)(Z/K) \quad (3)$$

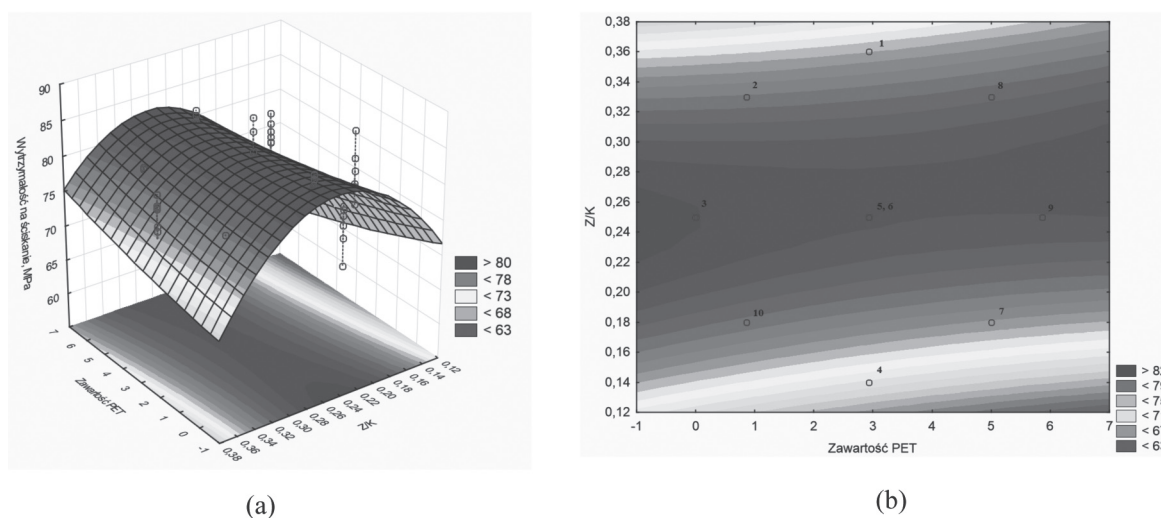
Dla wytrzymałości na zginanie:

$$\hat{z} = 35,877 - 1,911(\%PET) + 0,145(\%PET)^2 - 42,274(Z/K) - 0,713(Z/K)^2 + 4,316(\%PET)(Z/K) \quad (4)$$



Rys. 2. Przestrzenny (a) i warstwiczny (b) wykres powierzchni odpowiedzi dla wytrzymałości na zginanie

Fig. 2. Spatial (a) and contoured (b) charts of surface results for flexural strength



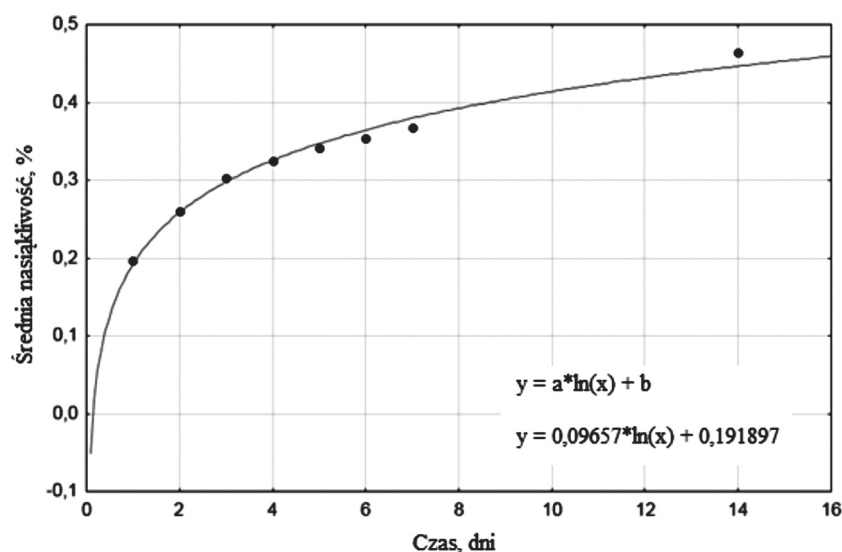
Rys. 3. Przestrzenny (a) i warstwiczny (b) wykres powierzchni odpowiedzi dla wytrzymałości na ściskanie

Fig. 3. Spatial (a) and contoured (b) charts of surface results for compressive strength

Dla wytrzymałości na ściskanie:

$$\hat{z} = 35,319 - 2,153A_1(\%PET) + 0,035(\%PET)^2 + 383,510(Z/K) - 770,218(Z/K)^2 + 7,048(\%PET)(Z/K) \quad (5)$$

Podsumowanie wyników doświadczenia zrealizowanego na podstawie planu centralnego kompozycyjnego można przedstawić w postaci przestrzennych i warstwicznych wykresów powierzchni odpowiedzi. Dla każdej ze zmiennych wyjściowych (wytrzymałość na



Rys. 4. Model funkcji trendu próbek zanurzonych w wodzie

Fig. 4. Trend graphs of functions for samples exposed in water

zginanie i ściskanie) wyznaczono odpowiednią powierzchnię odpowiedzi, które zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 1 i 3.

Najwyższe wartości wytrzymałości na zginanie odnotowano w 10, 7 i 4 punkcie planu eksperymentu, czyli w takich, które cechowały się największą zawartością kruszywa. Na podstawie uzyskanych danych można wnioskować, że dodatek ścinków odpadowego PET, wpływa korzystnie na wytrzymałość na zginanie jedynie przy stosunku żywica kruszywo zawierającego się w przedziale <0,14-0,18>.

Wartości wytrzymałości na ściskanie zależą w głównym stopniu od stosunku spoiwa do kruszywa (Z/K). Dodatek odpadowego PET powoduje nieznaczne obniżenie tej wytrzymałości z wartości 83,82 MPa uzyskanej dla zapraw niemodyfikowanych, do wartości 80,85 MPa dla zapraw z 5% dodatkiem ścinków PET. Uzyskane wyniki są jednak bardzo wysokie, wyższe niż te z zakresu 15-60 MPa przypisywane betonom cementowym [11].

Do wyników badania nasiąkliwości dopasowano funkcję trendu o następującej postaci:

$$y = a \cdot \ln(x) + b \quad (6)$$

Uzyskany współczynnik determinacji równy 0,99217 świadczy o tym, że model jest wysoce istotny statystycznie. Współczynnik determinacji w 99% wyjaśnia zależność średniej nasiąkliwości próbek zapraw od czasu trwania zanurzenia w wodzie.

Średnia nasiąkliwość próbek po 14 dniach nie przekracza wartości 0,5%. Zaprawy żywiczne charakteryzują się znacznie mniejszą absorpcją niż tradycyjne zaprawy cementowe, dla których cecha ta osiąga wartości z przedziału (4-10%) [11].

4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono wpływ dodatku wąskich ścinków odpadowego PET na wybrane właściwości zapraw żywicznych.

Na podstawie wykonanych badań i analiz statystycznych wyników przeprowadzonych eksperymentów, można przedstawić następujące wnioski:

- Dodatek materiału odpadowego ma wpływ na właściwości wytrzymałościowe zapraw, jednak dominujący jest w tym przypadku stosunek żywicy do kruszywa Z/K.

- Zaprawy epoksydowe zawierające odpady PET cechowały wysokie wartości wytrzymałości na zginanie mieszczące się w przedziale 20,80-29,24 MPa. Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie były wysokie (67,48-82,35 MPa) jednak niższe niż 83,82 MPa, otrzymane dla zapraw bez dodatku ścinków PET.
- Modyfikowane zaprawy epoksydowe cechuje bardzo niska nasiąkliwość, która po 14 dniach ekspozycji nie przekroczyła wartości 0,5%.
- Otrzymano kompozyt cechujący się dobrymi parametrami fizyko-mechanicznymi, a jednocześnie wykorzystano odpad, przyczyniając się do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska.

BIBLIOGRAFIA

1. Silva D.A., Betioli A.M., Gleize P.J.P., Roman H.R., Gómez L.A., Ribeiro J.L.D.: *Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials*. Cement and Concrete Research 2005, vol. 35, s. 1741–1746.
2. Wiliński D., Łukowski P., Rokicki G.: *Application of fibres from recycled PET bottles for concrete reinforcement*. Journal of Building Chemistry 2016, vol. 1, s. 1–9.
3. Won J.-P., Jang Ch.I., Lee S.-W., Lee S.-J., Kim H.-Y.: *Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites*. Construction and Building Materials 2010, vol. 24, s. 660–665.
4. Foti D.: *Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers*. Construction and Building Materials 2011, vol. 25, s. 1906–1915.
5. Kim S.B., Yi N.H., Kim H.Y., Kim J.H.J., Song Y.C.: *Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete*. Cement and Concrete Composites 2010, vol. 32, s. 232–240.
6. Pereira de Oliveira L.A., Castro-Gomes J.P.: *Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar*. Construction and Building Materials 2011, vol. 25, s. 1712–1717.
7. Fraternali F., Ciancia V., Chechile R., Rizzano G., Feo L., Incarnato L.: *Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete*. Composite Structures 2011, vol. 93, s. 2368–2374.
8. Lichołai L., Dębska B.: *The multidimensional response function exemplified by epoxy mortars: Looking for the global extreme*. Archives Of Civil And Mechanical Engineering 2014, vol.14, nr 3, s.466-475.
9. Polański Z., Pietraszek J.: *Komputerowe wspomaganie planowania i analizy statystycznej doświadczalnych badań innowacyjnych*, StatSoft, Rzeszów 2007.
10. Sokołowska J.J., Garbacz A.: *Model materiałowy popiołów betonów żywicznych*. 56. Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Kielce–Krynica 19–24 września 2010, s. 755–762.
11. Czarnecki L.: *Betony polimerowe*. Cement-Wapno-Beton 2010, vol. 2, s. 63-85.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 10-08-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 27-09-2017