



BERNARDETA DĘBSKA

Politechnika Rzeszowska
bdebska@prz.edu.pl
ORCID: 0000-0002-4377-9937

Betony żywiczne zawierające odpady do zastosowań w infrastrukturze komunikacyjnej

Nie ocalimy wszystkiego, co byśmy pragnęli. Ale uratujemy o wiele więcej, niż mogłoby ocaleć, gdybyśmy w ogóle nie podjęli naszych starań.

Sir Peter Scott

Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ) obejmuje m.in. recykling istniejących materiałów i produktów tak długo, jak to możliwe. Podporządkowanie się jej zasadom stało się szczególnie ważne od chwili, gdy zauważono, że surowce, z których korzystamy kurczą się, a ceny produktów i ich dostawy mogą być niestabilne.

Zasady GOZ stosowane są również w budownictwie i przyczyniły się do wzmocnienia gałęzi gospodarki, związanej ze zbieraniem i zagospodarowaniem różnego rodzaju odpadów (nie tylko budowlanych). Można to zauważyć śledząc rozwój takiej dziedziny jak inżynieria komunikacyjna. Dotyczy ona przede wszystkim dróg, mostów i kolei, ale w zakres budownictwa infrastrukturalnego wchodzi również wiadukty, sieć kanalizacyjna czy studnie. Profesjonalne budownictwo drogowe to budowa dróg, ulic, skrzyżowań, mostów, ale także parkingów czy chodników. W jego obszar wpisują się również remonty oraz modernizacje powstałych już wcześniej obiektów, które mają na celu m.in. naprawy, polepszenie wyglądu oraz zabezpieczenie dróg i mostów przed czynnikami korozyjnymi. Dążenie do poprawy stanu infrastruktury komunikacyjnej ma ścisły związek z koniecznością odbierania wód opadowych w system odwodnienia liniowego czy tunelowego. Szczególne znaczenie ma odpowiednie odprowadzenie i zagospodarowanie wód opadowych pochodzących z powierzchni zanieczyszczonych (centra miast, tereny przemysłowe, składowiska baz transportowych, drogi i parkingi o trwałej nawierzchni). W tym

kontekście rodzaj użytych materiałów oraz technologia wykonania odgrywają kluczową rolę, zarówno w aspekcie bezpieczeństwa, jak i trwałości obiektów inżynierskich [1]. Szczególne znaczenie ma odporność chemiczna użytych materiałów budowlanych. Kompozytem, który świetnie wpisuje się w te kryteria jest beton żywiczny, zaliczany do grupy betonów polimerowych (polimerobeton) (rys. 1). Podstawowy skład tego kompozytu to: żywica syntetyczna (najczęściej poliestrowa, epoksydowa, poliuretanowa, metakrylowa), utwardzacz i kruszywo (np. mieszanka piaskowo-żwirowa oraz mączka kwarcowa, gryz bazaltowy lub granitowy). Dodatkowo można stosować różnego typu modyfikatory, które powinny korzystnie wpływać na wybrane właściwości materiału [2].

Do charakterystycznych cech technicznych betonów żywicznych zalicza się wysoką wytrzymałość mechaniczną, niewielki skurcz, bardzo niską nasiąkliwość i dużą szczelność, niską ścieralność i wyjątkowo niską chropowatość (możliwość uzyskania bardzo gładkich powierzchni), świetną odporność na działanie agresywnych substancji chemicznych oraz doskonałą przyczepność do wielu innych materiałów. Nie bez znaczenia jest również krótki czas wiązania i szybki przyrost wytrzymałości koniecznej do osiągnięcia sprawności montażowej i eksploatacyjnej. Krótki czas utwardzania jest pożądanym w przypadku szybkich napraw konstrukcji betonowych, które mogą pomóc na przykład w zmniejszeniu opóźnień w ruchu drogowym [3]. Przy produkcji elementów



Rys. 1. Charakterystyka betonów żywicznych (polimerobetonów) (opracowanie własne)

prefabrykowanych istotna jest również szybka rotacja form, co wiąże się ze skróceniem czasu realizacji zamówień. Opisane wyżej właściwości betonu żywicznego predestynują go szczególnie do zastosowań w trudnych warunkach pracy, a zwłaszcza w warunkach zagrożenia korozyjnego.

Na rodzimym rynku działa wiele firm z powodzeniem produkujących polimerobetonowe elementy prefabrykowane do zastosowań w inżynierii komunikacyjnej, które wykorzystują wszystkie opisane zalety betonu żywicznego. Aby stojąca woda opadowa nie stwarzała zagrożenia na drogach i innych ciągach komunikacyjnych, należy stosować odpowiednie spadki lub zastosować w czasie ich budowy wysokiej jakości odwodnienie, które pozwoli na sprawne odprowadzenie wody. Taką rolę może pełnić odwodnienie liniowe, czyli ciąg korytek z przykrywającym je rusztem. Rozwiązanie to z uwagi na jego umiejscowienie może być montowane w poprzek drogi, w strefie przykrawężnikowej. Specjalistyczny system odwodnień liniowych, montowanych w tunelu, nazywany jest odwodnieniem tunelowym. Z kolei korytka ściekowe układane wzdłuż krawężnika, elementy krawężdziowe to wyroby, które mogą stanowić zabezpieczenie konstrukcji mostu przed niszczącym wpływem czynników atmosferycznych oraz szkodliwym działaniem agresywnych chemicznie wód opadowych, splukujących z nawierzchni jezdni sole, kwasy, zasady, czy substancje ropopochodne. Wraz z deskami gzymsowymi stanowią system odwodnień mostowych. Innymi elementami uzupełniającymi te systemy są pokrywy wpustów ulicznych [4–8].

Z prefabrykatów polimerobetonowych można szybko i w sposób nieskomplikowany wykonać trwałe odwodnienia, odporne na różnego rodzaju obciążenia mechaniczne. Jednocześnie należy uwzględnić fakt, że obecne tendencje w budownictwie infrastrukturalnym zmierzają do zmniejszenia wykorzystania surowców, głównie mineralnych, co jest możliwe m.in. poprzez włączenie w skład kompozytów materiałów pochodzących z recyklingu. Takie podejście jest zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju. Ekologiczne budownictwo przyszłości ma zredukować liczbę odpadów oraz minimalizować zużycie energii związane z produkcją i transportem materiałów budowlanych. Należy minimalizować powstawanie odpadów, a jeśli już się pojawią, warto traktować je jako surowce wtórne. Takie podejście jest zgodne także z założeniami ważnej obecnie koncepcji gospodarczej, jaką jest gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ, ang. *circular economy*). Polimerobeton świetnie wpisuje się w ten trend. Otrzymywanie kompozytów żywicznych z wykorzystaniem odpadów jest nie tylko możliwe, ale dodatkowo stwarza korzyści techniczne, ekonomiczne i środowiskowe. Wprowadzenie odpadów w skład polimerobetonów może się odbywać na różne sposoby, zarówno w obrębie osnowy żywicznej, jak i wypełniacza. Przykłady tego typu modyfikacji wraz z uzyskanymi rezultatami opisano w dalszej części artykułu.

Polimerobeton modyfikowany materiałami pochodzącymi z recyklingu

Jednym ze sposobów zahamowania destrukcyjnych konsekwencji nadmiernej eksploatacji złóż naturalnych jest

wdrożenie szerokich działań w celu ponownego, najlepiej wielokrotnego, użycia materiałów odpadowych. Podstawową czynnością powinno być mądre dysponowanie surowcami naturalnymi i stosowanie rozwiązań maksymalnie przyjaznych dla środowiska. Przy wprowadzaniu materiału odpadowego w skład betonów żywicznych, kluczowy jest właściwy dobór i odpowiednie połączenie substratów, gdyż ma to decydujący wpływ na unikalne właściwości gotowego produktu, m.in. bardzo wysoką wytrzymałość mechaniczną, świetną przyczepność do wielu innych materiałów, niską nasiąkliwość, czy doskonałą odporność chemiczną, co przekłada się na specyficzne możliwości aplikacyjne m.in. w systemach odwodnień liniowych, mostowych, czy tunelowych.

Dobór modyfikatorów kompozytów żywicznych w postaci konkretnych materiałów odpadowych powinien wynikać ze szczegółowych analiz statystyk, raportów, dokumentów prawnych i urzędowych, dotyczących odpadów. Na tej podstawie, jak również w oparciu o wiedzę z zakresu właściwości i możliwości aplikacyjnych betonów żywicznych, wśród stosowanych modyfikatorów znalazły się szczególnie trudne w utylizacji odpady, takie jak:

- **Tworzywa sztuczne – poli(tereftalan etylenu) (PET), polietylen (PE)**

Materiały te nie rozkładają się na substancje naturalne, a poddane długotrwałemu działaniu wody morskiej i słońca ulegają rozpadowi na mikroskopijne fragmenty, zwiększając swoją toksyczność. Wśród plastikowych odpadów wytwarzanych na świecie największy udział mają poliolefiny (polietylen (PE) i polipropylen (PP)) oraz poli(tereftalan etylenu) (PET). Znaczna ilość tych odpadów to materiały opakowaniowe m.in. torby i worki z PE czy butelki i opakowania PET, które są bardzo trudne w utylizacji, a na wysypiskach z racji swej popularności zajmują ogromne objętości. Prowadzenie badań związanych z możliwością zagospodarowania odpadów tworzyw sztucznych ma w tym kontekście ogromne znaczenie [9–13].

- **Guma pochodząca z odpadowych opon samochodowych**

Ze względu na dynamiczny rozwój motoryzacji oraz poprawę komfortu życia, lawinowo wzrasta zakup samochodów, przez co problemem globalnym stał się nadmiar odpadów opon. Odpadowa guma z opon nie ulega biodegradacji, a usieciowana struktura i różnego typu dodatki stosowane w procesie produkcyjnym sprawiają, że naturalny rozkład jest bardzo długi, rzędu setek lat. Stosowane sposoby ograniczania szkodliwości odpadów opon, takie jak spalanie czy składowanie, powodują powstawanie szkodliwych gazów, a także poważne zanieczyszczenia gleby, wody i atmosfery. Dlatego istnieje potrzeba poszukiwania alternatywnych sposobów recyklingu np. przez ich ponowne wykorzystanie w kompozytach żywicznych [14].

- **Szkło**

Szkło ze względu na skład i budowę nie stanowi dla środowiska zagrożenia, jedynie obciążenie, gdyż nie ule-

ga rozkładowi i w znacznych ilościach może zalegać na składowiskach. Szkło odpadowe może stać się jednak wartościowym surowcem. Ponowne użycie szkła przez przemysł opakowań szklanych daje możliwość zaoszczędzenia energii i zasobów naturalnych, a tym samym pozwala na zmniejszenie śladu środowiskowego. Wykorzystanie odpadów szklanych do otrzymywania zapraw może być także odpowiedzią na problem związany z kurczeniem się zasobów kruszyw naturalnych, które są jednymi z najczęściej stosowanych surowców w budownictwie. W ten sposób realizowana jest w praktyce idea gospodarki o obiegu zamkniętym [15].

Modyfikacja spoiwa żywicznego

Wbudowanie odpadów w matrycę żywiczną, która stanowi najdroższy składnik zaprawy, pozwala obniżyć cenę kompozytów polimerowych przy zachowaniu korzystnych właściwości fizyko-mechanicznych. Ta metoda modyfikacji ma również korzystny wpływ na środowisko, ponieważ pozwala na redukcję ilości bardzo powszechnych odpadów, które są trudne w utylizacji.

Synteza żywicy z wykorzystaniem odpadów PET

Liczne informacje dotyczące ponownego wykorzystania odpadów poli(tereftalanu etylenu) pojawiają się w kontekście syntezy nienasyconych żywic poliestrowych [16–26], które następnie mogą zostać wykorzystane m.in. jako spoiwo w betonach żywicznych. Rebeiz [27, 28] wykazał, że betony, których spoiwem jest nienasycona żywica poliestrowa otrzymana z odpadów PET, charakteryzują się większą wytrzymałością w porównaniu ze zwykłymi betonami, nawet pomimo strat wytrzymałości spowodowanych działaniem wysokiej temperatury. Osiągają one więcej niż 80% ich finalnej wytrzymałości w ciągu jednego dnia, co jest niezwykle ważne w wielu zastosowaniach. Fakt wyższej wytrzymałości betonów otrzymanych z dodatkiem recyklatu PET potwierdzają także badania przeprowadzone przez Mahdiego i in. [29, 30]. Abdel-Azim oraz Ignacio i in. [16, 31] zbadali, że na wytrzymałość betonów opartych na nienasyconej żywicy poliestrowej otrzymanej drogą syntezy z odpadów PET ma wpływ także rodzaj układu utwardzającego. Inni autorzy [20, 26] oprócz badań wytrzymałościowych przeprowadzili także testy odporności chemicznej otrzymanych próbek betonów na działanie mediów agresywnych, co jest istotne w kontekście rozważanej aplikacyjności w obszarze budownictwa inżynierskiego. Otrzymane przez Tawfika i Eskandera [26] betony, których spoiwo stanowiła nienasycona żywica poliestrowa zsyntezowana z udziałem odpadowego PET, wykazały dobrą odporność chemiczną na działanie 20% węgla sodu, 10% wodorotlenku sodu oraz wody wodociągowej, gruntowej i morskiej. Korzystnie dla tego typu betonów wypadły także badania dotyczące odporności na działanie kwasu solnego i alkaliów, przeprowadzone przez inną grupę badawczą [20]. Alkalia nie powodowały praktycznie żad-

nych zmian wagi i wytrzymałości na ściskanie otrzymanych próbek zapraw.

Odpady poli(tereftalanu etylenu) mogą być poddane degradacji chemicznej m.in. na drodze glikolizy i następnie użyte do syntezy i modyfikacji żywic epoksydowych [17]. Kompozycje z dodatkiem żywicy epoksydowej otrzymanej z glikolizatu PET w ilości 5–10% wag. wykazały większą wytrzymałość na statyczne rozciąganie, zginanie i ściskanie oraz większą twardość w stosunku do żywicy niemodyfikowanej. Zdecydowanie niższa była jednak udarność. Nie wielki dodatek (5% wag.) zastosowanych żywic powodował obniżenie chłonności wody otrzymanych próbek oraz wzrost odporności kompozycji na działanie niektórych kwasów.

Substytucja części żywicy przy pomocy glikolizatu PET

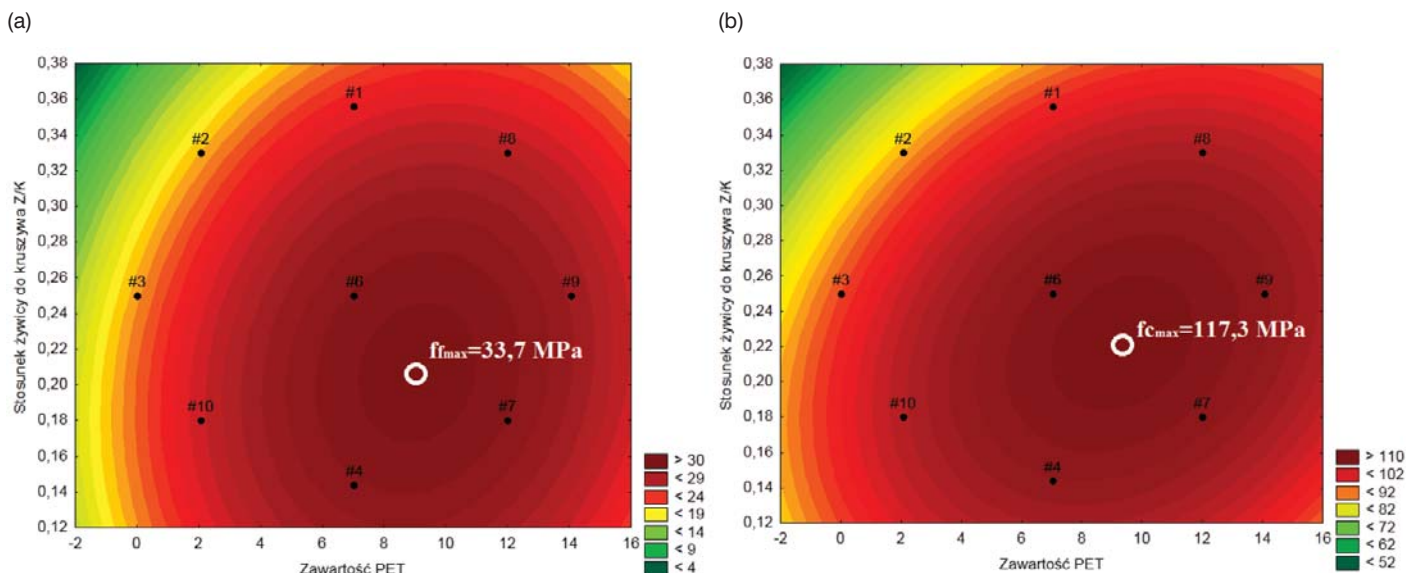
Innym sposobem modyfikacji osnowy w polimerobetonach jest częściowa substytucja żywicy glikolizatem uzyskanym z udziałem odpadów poli(tereftalanu etylenu) (kompozyty EP-PET). Rozwiązanie to przedstawione zostało w wielu naszych pracach [9–11, 32–38], w których wykazaliśmy, że kompozyty te cechują poprawione właściwości wytrzymałościowe w stosunku do tego samego typu kompozytów niezawierających glikolizatu. Materiały te charakteryzuje wytrzymałość na zginanie powyżej 30 MPa, wytrzymałość na ściskanie powyżej 100 MPa. Parametry wytrzymałościowe zależą od zastosowanego stosunku żywica/kruszywo i ilości dodanego modyfikatora, co można zaobserwować na warstwicznych wykresach funkcji wygenerowanych w programie Statistica 12 [39], zestawionych na rysunku 2.

Udowodniono również, że kompozyty EP-PET wykazują bardzo dobrą odporność chemiczną, szczególnie w odniesieniu do roztworów alkalicznych. Waga próbek wystawionych na działanie roztworów chlorku sodu i wodorotlenku sodu stabilizuje się w dłuższym czasie monitorowania i osiąga plateau (rys. 3). Uzyskane przez nas wyniki są unikalne, gdyż czas monitorowania zmiany parametrów charakteryzujących próbki obejmował bardzo długi okres, niespotykany w pracach innych badaczy. Po 5 latach zanurzenia w wodnych roztworach mocnych kwasów zaobserwowano jednak, że powierzchnie próbek przechowywanych w roztworze kwasu azotowego silnie pożółkły, a w poddanych działaniu kwasu siarkowego zmatowiały. Zaprawy EP-PET cechuje gęstość objętościowa na poziomie poniżej 2,1 g/cm³ oraz nasiąkliwość mieszcząca się w przedziale 0,2%–0,6%.

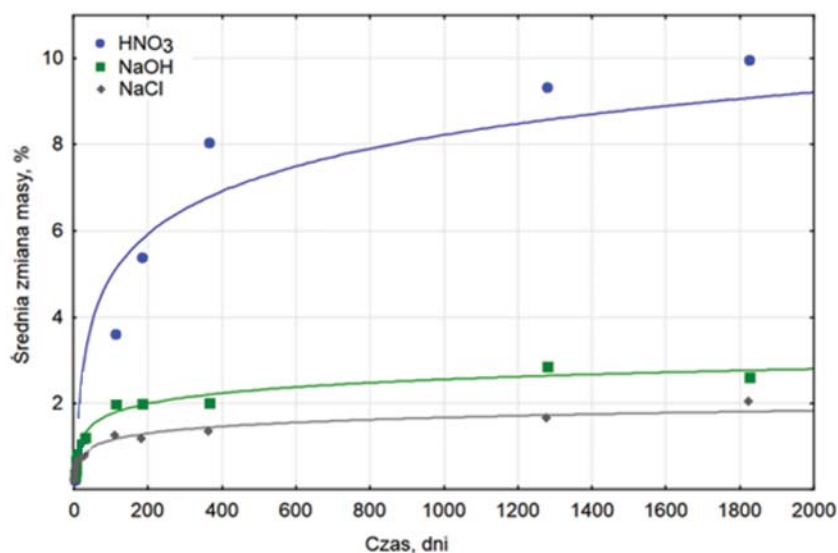
W analogiczny sposób modyfikowano także zaprawy, których spoiwo stanowiła żywica poliestrowa (kompozyty P-PET). Efekt był pozytywny, jednak uzyskane właściwości wytrzymałościowe próbek były znacznie niższe w porównaniu do kompozytów o matrycy epoksydowej [40].

Substytucja kruszywa

Modyfikacja składu kompozytu poprzez wprowadzenie materiału odpadowego jako zamiennika spoiwa ma



Rys. 2. Warstwicowe wykresy funkcji wyznaczone dla wytrzymałości (a) na zginanie i (b) na ściskanie kompozytów EP-PET z zaznaczonym maksimum



Rys. 3. Logarytmiczne linie trendu obrazujące średnie zmiany masy w czasie 5 lat, próbek zapraw epoksydowych modyfikowanych glikolizatem poli(tereftalanu etylen), zanurzonych w trzech różnych mediach korozyjnych

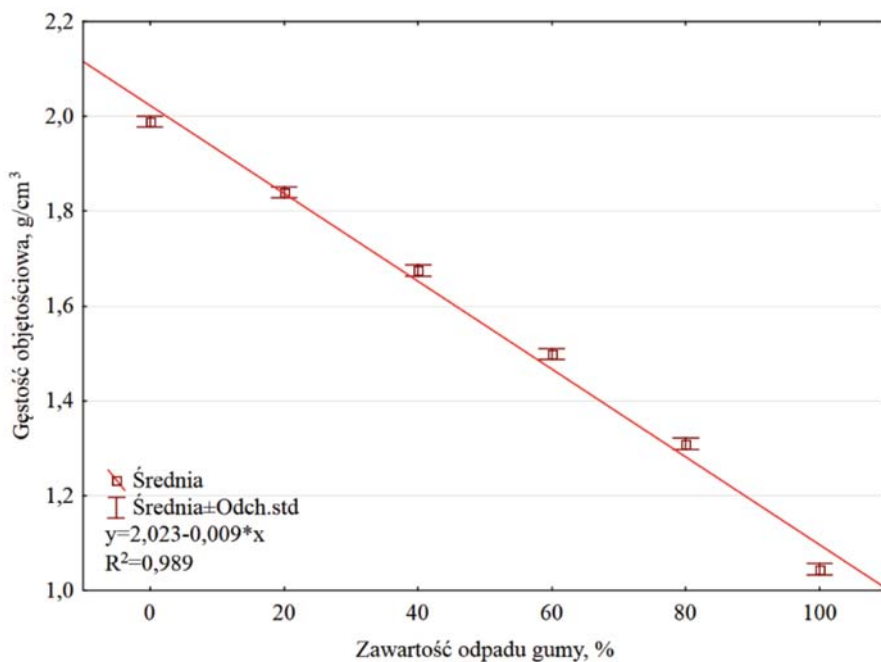
uzasadnienie zarówno środowiskowe, jak i kosztowe, gdyż żywica stanowi najdroższy składnik zaprawy. Należy jednak wziąć także pod uwagę fakt, że kruszywo stanowi około 90 procent masy kompozytu żywicznego, dlatego ma również ogromny wpływ na jego jakość i ostateczną cenę produktu. Do produkcji kompozytów żywicznych stosuje się kruszywo trwałe i czyste. Jednocześnie należy uwzględnić występujące obecnie coraz częściej ograniczenia w dostępności kruszyw oraz w wydolności systemu logistycznego. Zaczyna brakować tradycyjnych surowców, np. piasku, jednocześnie następuje stały wzrost kosztów ich wydobycia, przetwarzania, transportu i dystrybucji. Jednym z rozwiązań tego problemu może być zwrot myślenia – od globalnego, ku lokalnemu – szersze wykorzy-

stanie materiałów lokalnych, zagospodarowanie odpadów.

Kompozyty żywiczne modyfikowane odpadami gumy pochodzącej z opon samochodowych

M. Halil Akın i R. Polat [41] otrzymywali betony poliestrowe zastępując częściowo (0–20%) kruszywo odpadowym granulatem gumowym. Wzrost udziału żywicy poliestrowej powodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie, co można powiązać z dokładniejszym otoczeniem kruszywa przez matrycę żywiczną. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie równą 84,9 MPa odnotowano dla próbek bez odpadu i z 25% udziałem żywicy. W przypadku zastosowania 5%, 12,5% i 20% zużytych opon następuje obniżenie wytrzymałości na ściskanie odpowiednio o 15%, 50%

i 70% w porównaniu z betonem niemodyfikowanym. Wzrosła jednak plastyczność kompozytów. Korzystny wpływ gumy pochodzącej z recyklingu opon na właściwości mechaniczne i termiczne betonów epoksydowych wykazał J. Wang z zespołem [3]. Inni autorzy zwrócili uwagę na fakt, że elementy wykonane na bazie żywicy epoksydowej i cząstek odpadowej gumy wykazują wysoką zdolność pochłaniania energii [42, 43]. Absorpcja energii przez matrycę epoksydową wzmocnioną cząstkami gumy (10, 20 i 30% obj.) wykazuje wzrost od 34% do 73% w porównaniu z czystą próbką epoksydową [43]. Wyniki przedstawione w pracy [44] sugerują, że kompozyty epoksydowe zawierające cząstki gumy mogą być skutecznie wykorzystywane w zastosowaniach wymagających wyższego mo-



Rys. 4. Wykres funkcji opisujący zależność gęstości objętościowej od procentowego udziału odpadów w kompozytach epoksydowych

dułu sprężystości przy zginaniu i właściwości wytrzymałościowych.

Szczegółowe badania przeprowadzone przez nasz zespół [14], w sposób jednoznaczny pokazują, że zawsze należy dokonywać ostatecznej oceny użyteczności kompozytów w ścisłym powiązaniu z założonym obszarem jego stosowalności. W zależności od stopnia substytucji (0–100% obj.) kruszywa granulatem odpadowej gumy, wytrzymałość na zginanie otrzymanych kompozytów epoksydowych (EP-RUB) kształtowała się w zakresie 21–8 MPa, wytrzymałość na ściskanie należała do przedziału 100–25 MPa. Ponadto, materiał cechuje niska nasiąkliwość, nieprzekraczająca 0,2%. Przy całkowitym zastąpieniu kruszywa odpadem gumy gęstość objętościowa jest o 50% niższa (1,05 g/cm³) w porównaniu do kompozytów kontrolnych (bez odpadu) (rys. 4) [14]. Czyli nawet przy znacznym zastąpieniu piasku recyklatem z opon można uzyskać atrakcyjne produkty, możliwe do aplikacji w budownictwie infrastrukturalnym.

Kompozyty żywiczne modyfikowane odpadami szkła

Wyniki badań opisanych w pracach [45–47] wskazują, że przy odpowiednio dobranych proporcjach żywicy poliestrowej i sproszkowanych odpadów szklanych, można poprawić parametry wytrzymałościowe kompozytów żywicznych. Nie bez znaczenia jest także technologia procesu produkcyjnego, co udowodnili Heriyanto, Pahlevani i Sahajwall [48, 49]. Wykorzystali oni odpady szklane do produkcji kompozytów epoksydowych. Beton epoksydowy zawierający odpady szklane został przebadany również przez Shi-Cong i Chi-Sun [50]. W tym przypadku najmniejsza frakcja kruszywa została dodatkowo częściowo zastą-

piona przez metakaolin lub popiół lotny, co miało korzystny wpływ na parametry wytrzymałościowe zapraw.

Kompozyty epoksydowe modyfikowane odpadami szkła okiennego (EP-GLS) opisano w pracy [15]. W zależności od stopnia substytucji piasku odpadem (0–100%) wytrzymałość na zginanie kształtuje się w zakresie 27–22 MPa, a wytrzymałość na ściskanie wynosi od 96,65 MPa do 68,67 MPa. Kompozyt cechuje także bardzo niska nasiąkliwość, której wartości mieściły się w przedziale 0,2%–0,7%, nawet po siedmiu dniach zanurzenia próbek w wodzie. Większość wyników nasiąkliwości, otrzymanych dla badanych próbek, charakteryzowana była przez wartości należące do dolnej granicy tego przedziału. Stwierdzono, że różnice wynikają głównie z faktu, iż obowiązujące obecnie niejednoznaczne zapisy normowe dotyczące wymiarów próbek poddawanych badaniu nasiąkliwości, wprowadzają duży margines błędów do wyników badania laboratoryjnego. Gęstość objętościowa zaprojektowanych i przebadanych kompozytów przyjmuje wartości z zakresu 1,78–2,03 g/cm³.

Kompozyty żywiczne modyfikowane odpadami polietylenu

W badaniach opisanych w pracy [51] oznaczono wpływ odpadowego polipropylenu (PP) z zakrętek do butelek oraz odpadowego polietylenu (PE) z butelek na właściwości mechaniczne zapraw polimerowych. Zaprawy wykonano z nienasyconej żywicy poliestrowej w proporcji 20% i piasku kwarcowego w ilości 80%. Piasek zastępowano odpadami w trzech różnych proporcjach 1, 2 i 3% mas. oraz uziarnieniu 0,71, 1,4 i 2,38 mm. Autorzy uzyskali poprawę wytrzymałości na ściskanie o około 27% i 82% na ugięcie przy zginaniu po dodaniu cząstek PP oraz 30% na odkształcenie ściskające (dodając PE). Jednocześnie wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości zapraw polimerowych zmniejszyły się w zależności od przyrostu zawartości i wielkości stosowanych odpadów.

B. Dębska i G. Brigolini [13] badali kompozyty epoksydowe modyfikowane glikolizatem poli(tereftalanu etylenu) (PET) na zasadzie częściowej substytucji spoiwa, przy jednoczesnej częściowej zamianie piasku aglomeratem otrzymanym z odpadowych worków polietylenowych (PE) (kompozyty EP-PET-PE). Sprawdzono, że w zależności od poziomu zawartości odpadu PE, wytrzymałość na zginanie kształtuje się na poziomie od 30,3 MPa do 35,7 MPa, a wytrzymałość na ściskanie przyjmuje wartości z przedziału 86–107,2 MPa. Przeprowadzona analiza zdjęć, uzyskanych podczas badania SEM, pozwoliła w sposób jednoznaczny wykazać, że odpad ma działanie podobnie do włókien. Fakt ten potwierdzają także wykresy siła-przemieszczenie,

otrzymane podczas badania wytrzymałości na zginanie. Kompozyt cechuje niska nasiąkliwość, nie przekraczająca 0,2%. Odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy składników pozwolił na uzyskanie kompozytu cechującego się korzystniejszymi cechami wytrzymałościowymi, pomimo zastosowania „gorszych” substratów w postaci materiałów odpadowych.

Ocena możliwości zastosowania betonów żywicznych zawierających odpady w systemach odwodnień

Na rysunkach 5–7 zestawiono w postaci słupków odpowiednio najkorzystniejsze wartości parametrów wytrzymałościowych, gęstości objętościowej i nasiąkliwości wybranych, opracowanych przez nas kompozytów żywicznych modyfikowanych odpadami (EP-PET, EP-RUB, EP-GLS, EP-PET-PE, P-PET, P-PE) na tle zakresów zmienności tych cech deklarowanych przez czołowych producentów prefabrykatów żywicznych, wykorzystywanych w systemach mostowych i drogowych (linie poziome).

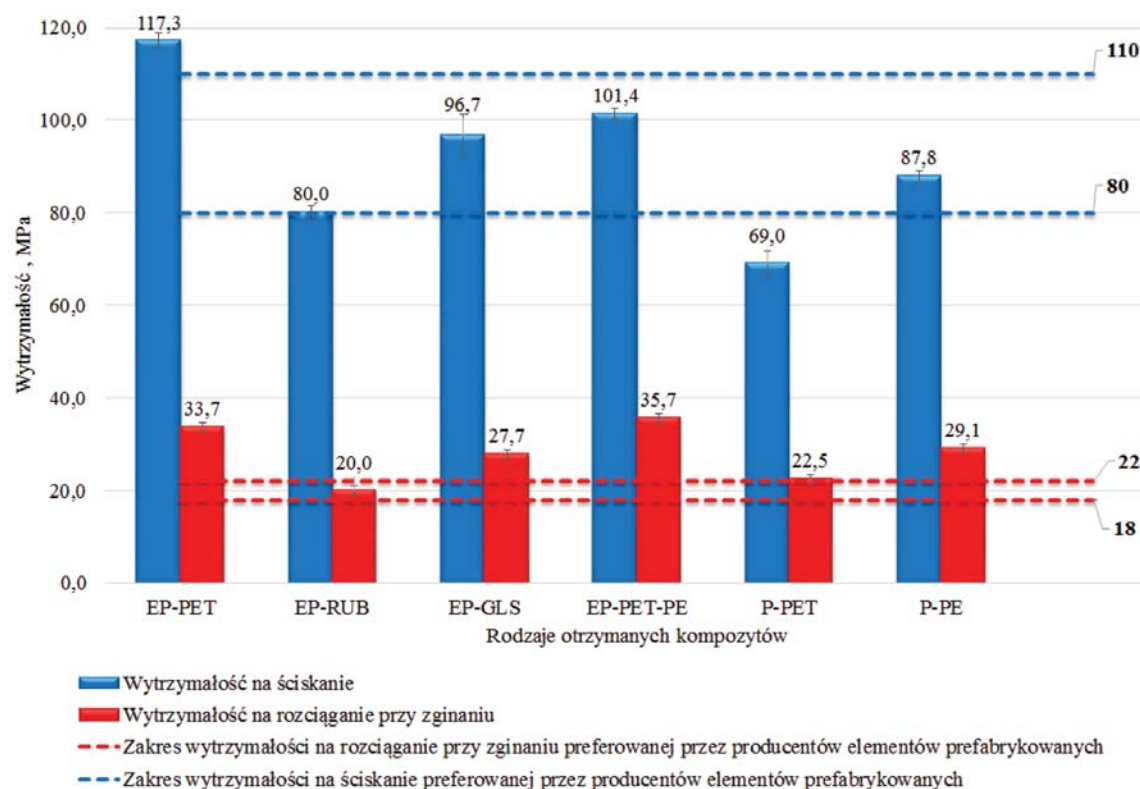
Jak można zauważyć, kompozyty żywiczne modyfikowane odpadami osiągają bardzo dobre lub dobre właściwości wytrzymałościowe, które mieszczą się w zakresach wytrzymałości wymaganych przez wiodących producentów prefabrykowanych elementów żywicznych lub, tak jak w przypadku kompozytu EP-PET, znacznie przekraczają tę ramy. Warto nadmienić, że wartości te można jeszcze popra-

wić m.in. poprzez dotwardzenie wyrobów w podwyższonej temperaturze.

Dodatkowo, co potwierdzają wykresy zamieszczone na rysunku 6, otrzymane przez nas nowe materiały są lżejsze od tych dostępnych handlowo, co w przypadku wykonywania elementów metodą prefabrykacji ma duże znaczenie. Ponadto, zaproponowane przez nas kompozyty zawierające odpady cechuje bardzo dobra odporność chemiczna na wybrane media agresywne i charakteryzuje niewielka nasiąkliwość wodą (rys. 7). Osiągnięcie wspomnianych powyżej właściwości dla omawianych kompozytów ma istotne znaczenie aplikacyjne, ponieważ gwarantują one jednocześnie uzyskanie wielu ważnych cech technicznych tych materiałów. Właściwości te determinują kierunki zastosowania opracowanych nowych kompozycji żywicznych, tj. uzyskania materiałów, które z powodzeniem można będzie wykorzystać w sektorze budownictwa inżynierskiego.

Podsumowanie

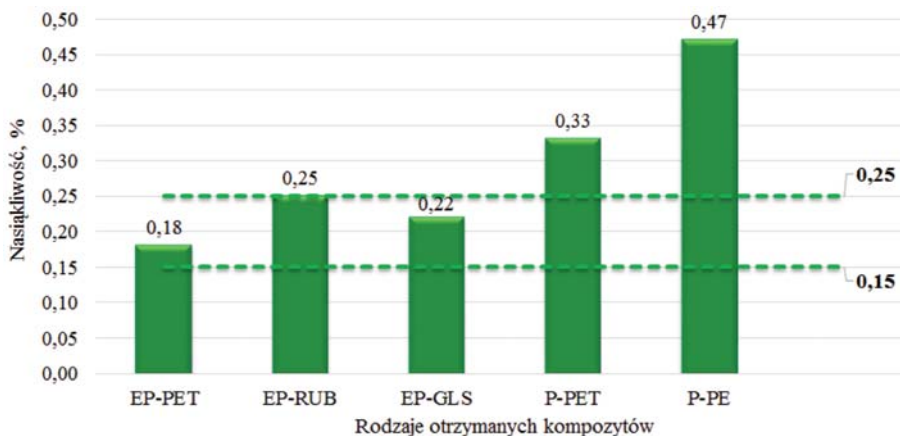
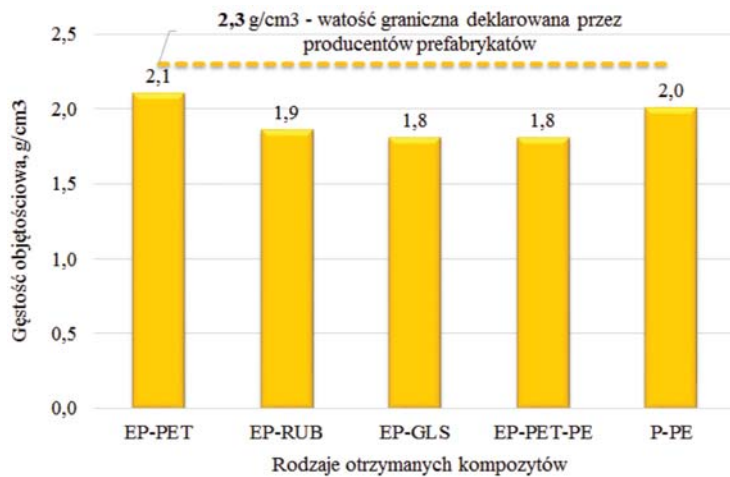
Analiza dostępnej literatury wskazuje, że w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad zastosowaniem odpadów, w szczególności odpadów tworzyw sztucznych, jako napełniaczy matryc żywicznych. Ich wyniki potwierdzają możliwość uzyskania kompozytów nadających się do zastosowania w infrastrukturze budowlanej, której elementy poddawane są obciążeniom mechanicznym i chemicznym. Włączenie odpadów w skład kompozytów polimerowych może



Rys. 5. Zestawienie najkorzystniejszych parametrów wytrzymałościowych kompozytów żywicznych zawierających odpady, na tle wymagań producentów elementów polimerobetonowych stosowanych w systemach odwodnień

stanowić nowy sposób pozyskiwania surowców i określać skuteczne podejście do projektowania materiałów odpowiednich do zastosowań inżynierskich, w oparciu o założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Stosowanie takich materiałów jak polimerobeton otrzymywany z wykorzystaniem odpadów stanowi interesujące połączenie troski o kondycję środowiska naturalnego i zmniejszenie emisji dwutlenku węgla, a ponadto zapewnia uzyskanie korzystnych parametrów wyrobów finalnych.

Rys. 6. Zestawienie gęstości objętościowej kompozytów żywicznych zawierających odpady na tle wymagań producentów elementów polimerobetonowych stosowanych w systemach odwodnień



Rys. 7. Porównanie wartości nasiąkliwości kompozytów żywicznych zawierających odpady z deklarowanymi przez producentów elementów polimerobetonowych stosowanych w systemach odwodnień

Bibliografia

- [1] Wysokowski A., Howis J., Przepusty wielootworowe w infrastrukturze drogowej i kolejowej. Cz.1. Zagadnienia ogólne, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 3 (96) (2021)
- [2] Czarnecki L. Betony polimerowe, Cement Wapno Beton, 2 (2010) 63–85
- [3] Wang J., Dai Q., Guo S., Si R. Mechanical and durability performance evaluation of crumb rubber-modified epoxy polymer concrete overlay, Construction and Building Materials 203 (2019) 469–480
- [4] <https://sytec.pl/>
- [5] <https://www.bielbet.pl/>
- [6] <https://www.irma.szczecin.pl/>
- [7] <https://www.stora-drain.pl/>
- [8] [http://m.ankrakompozyty.pl/files/nasza-oferta\[1\].pdf](http://m.ankrakompozyty.pl/files/nasza-oferta[1].pdf)
- [9] Dębska B., Lichołai L., The effect of the type of curing agent on selected properties of epoxy mortar modified with PET glycolisate, Construction and Building Materials, 124 (2016) 11–19
- [10] Dębska B., Lichołai L., Resin composites with high chemical resistance for application in civil engineering, Periodica Polytechnica-Civil Engineering, 60(2) (2016) 281–287
- [11] Dębska B., Lichołai L., Long-Term Chemical Resistance of Ecological Epoxy Polymer Composites, Journal Of Ecological Engineering, 19(2) (2018) 204–212
- [12] Dębska B., Dębska B.J., Lichołai L., Evaluation of the Utility of Using Classification Algorithms when Designing New Polymer Composites, Journal Of Ecological Engineering, 20(8) (2019) 212–225
- [13] Dębska B., Brigolini Silva G.J., Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortars Made with Polyethylene and Poly(Ethylene Terephthalate) Waste, Materials, 14(9) (2021) 2203, 1–18
- [14] Dębska B., Lichołai L., Miąsik P., Assessment of the Applicability of Sustainable Epoxy Composites Containing Waste Rubber Aggregates in Buildings, BUILDINGS, 9(2) (2018) 1–16
- [15] Dębska B., Lichołai L., Brigolini Silva G.J., Effects of waste glass as aggregate on the properties of resin composites, Construction And Building Materials, 258 (2020) 1–11
- [16] Abdel-Azim A.A., Unsaturated polyester resins from poly(ethylene terephthalate) waste for polymer concrete, Polymer Engineering and Science, 36 (1996) 2973–2977
- [17] Czub P., Zastosowanie produktów glikolizy odpadowego poli(tereftalanu etylenowego) do syntezy i modyfikacji żywic epoksydowych, XVII Konferencja Naukowa Wrocław-Kudawa 23–26.09.2007, 400–403
- [18] Eskander S.B., Bayoumi T.A., Tawfik M.E., Immobilization of borate waste simulate in cement-water extended polyester composite based on poly(ethylene terephthalate) waste, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 45 (2006) 939–945
- [19] Ignacio C., Ferraz V., Oréfica R.L., Study of the behavior of polyester concretes containing ionomers as curing agents, Journal of Applied Polymer Science, 108 (2008) 2682–2690
- [20] Jo B.W., Park S.K., Park J.Ch., Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, 22 (2008) 2281–2291
- [21] Jo B.W., Tae G.H., Kim Ch.H., Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete, Construction and Building Materials, 21 (2007) 1552–1559
- [22] Kawamura Ch., Ito K., Nishida R., Yoshihara I., Numa N., Coating resins synthesized from recycled PET, Progress in Organic Coatings, 45 (2002) 185–191
- [23] Mahdi F., Khan A.A., Abbas H., Physicochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles, Cement and Concrete Composites, 29 (2007) 241–248
- [24] Rebeiz K.S., Fowler D.W., Paul D.R., Recycling Plastics in Polymer Concrete Systems for Engineering Applications, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 30 (1991) 809–825
- [25] Rebeiz K.S., Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste, Construction and Building Materials, 10 (1996) 215–220
- [26] Tawfik M.E., Eskander S.B., Polymer concrete from Marble Wastes and Recycled Poly(ethylene terephthalate), Journal of Elastomers and Plastics, 38 (2006) 65–79
- [27] Rebeiz K.S., Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste, Construction and Building Materials, 10 (1996) 215–220
- [28] Rebeiz K.S., Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET, Cement and Concrete Composites, 17, (1995) 119–124
- [29] Mahdi F., Abbas H., Khan A.A., Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles, Construction and Building Materials, 24 (2010) 25–36

- [30] Mahdi F., Khan A.A., Abbas H., Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles, *Cement and Concrete Composites*, 29 (2007) 241–248
- [31] Ignacio C., Ferraz V., Oréfica R.L., Study of the behavior of polyester concretes containing ionomers as curing agents, *Journal of Applied Polymer Science*, 108 (2008) 2682–2690
- [32] Lichołai L., Dębska B., The multidimensional response function exemplified by epoxy mortars: Looking for the global extreme, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14 (2014) 644–675
- [33] Dębska B., Lichołai L., A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars, *Construction and Building Materials* 65 (2014) 604–611
- [34] Dębska B., Materiały budowlane produkowane z wykorzystaniem odpadów (cz.2). Studium przypadku, *Izolacje*, 147(6) (2010) 38–45
- [35] Dębska B., Żmihorska-Gotfryd A., Wpływ recyklatu PET na wybrane właściwości zapraw na podstawie żywic epoksydowych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 252(47) (2008) 89–98
- [36] Dębska B., Żmihorska-Gotfryd A., Modification of epoxy mortars by a PET hydrolysate, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 265(53) (2009) 47–56
- [37] Dębska B., Lichołai L., Wpływ dodatku odpadowego PET na wytrzymałość zapraw żywicznych, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 271(57) (2010) 119–126
- [38] Dębska B., Lichołai L., Badanie możliwości wykorzystania modyfikowanych zapraw epoksydowych w procesach naprawczych betonów. Cz. 1. Oznaczenie właściwości wytrzymałościowych, absorpcji wody oraz odporności chemicznej, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 59(2) (2012)/II 149–159
- [39] STATISTICA 12, StatSoft Polska Sp. z o. o., www.statsoft.pl
- [40] Dębska B., Żmihorska-Gotfryd A., Analiza porównawcza właściwości zapraw na podstawie nienasyconych żywic poliestrowych i epoksydowych modyfikowanych recyklatem PET, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 252(47) (2008) 79–88
- [41] Halil Akın M., Polat R., The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress-strain properties of polyester-based polymer concretes, *Construction and Building Materials* 325 (2022) 126741
- [42] Shahapurkar K., Soudagar M.E.M., Shahapurkar P., Mathapathi M., Khan T.M.Y., Mujtaba M.A., Ali M.D.I., Thanaiah K., Siddiqui M.I.H., Ali M.A., Effect of crump rubber on the solid particle erosion response of epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science* 139(2) (2022) e51470
- [43] Shahapurkar K., Compressive behavior of crump rubber reinforced epoxy composites, *Polymer Composites* 42 (2021) 329–341
- [44] Shahapurkar K., Alblalaid K., Chenrayan V., Alghtani A.H., Tirth V., Algahtani A., Alarifi I.M., Kiran M.C., Quasi-Static Flexural Behavior of Epoxy-Matrix-Reinforced Crump Rubber Composites, *Processes*, 10(5) (2022) 956
- [45] Saribiyik M., Piskin A., Saribiyik A., The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties, *Construction and Building Materials* 47 (2013) 840–844
- [46] Hameed A.M., Daway E.G., Mohammad S.H., Investigation the properties of polyester polymer reinforced with recycled glass powder, *IJMET* 9(13) (2018) 34–44
- [47] Taurino R., Pozzi P., Lucchetti G., Paterlini L., Zanasi T., Ponzoni C., Schivo F., Barbieri L., New composite materials based on glass waste, *Composites: Part B* 45 (2013) 497–503
- [48] Heriyanto H., Pahlevani F., Sahajwall V., From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass, *Journal of Cleaner Production* 191 (2018) 192–206
- [49] Heriyanto H., Pahlevani F., Sahajwall V., Effect of glass aggregates and coupling agent on the mechanical behaviour of polymeric glass composite, *Journal of Cleaner Production* 227 (2019) 119–129
- [50] Shi-Cong K., Chi-Sun P., A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin, *Construction and Building Materials* 41 (2013) 146–151
- [51] Martínez-López M., Martínez-Barrera G., Salgado-Delgado R., Gencel O., Recycling polypropylene and polyethylene wastes in production of polyester based polymer mortars, *Construction and Building Materials* 274 (2021) 121487

Z ŻAŁOBNEJ KARTY



Wspomnienie o Andrzej Pawlaczyku (1940–2022)

18 września 2022 roku zmarł Andrzej Pawlaczyk, w latach 1992–2011 dyrektor spółki Transprojekt Gdański.

Andrzej Pawlaczyk urodził się w 1940 roku w Lwówku. Ukończył Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Poznańskiej. W trakcie swojej pracy zawodowej był

inżynierem budowy w Rejonie Eksploatacji Dróg Publicznych w Świeciu (1963–1967), kierownikiem Powiatowego Zarządu Dróg Lokalnych w Świeciu (1967–1970), dyrektorem Wojewódzkiej Dyrekcji Dróg Lokalnych w Bydgoszczy (1970–1975), naczelnym

Dyrektorem Dyrekcji Okręgowej Dróg Publicznych w Gdańsku (1975–1992), a w latach 1992–2011 (do uzyskania emerytury) dyrektorem Transprojektu Gdańskiego. Pod kierowniczym nadzorem Andrzeja Pawlaczyka Transprojekt Gdański współrealizował wiele kluczowych dla naszego kraju inwestycji infrastrukturalnych, m.in. autostrady A1, A2, A4 oraz S3 na odcinku Gorzów – Szczecin, a także obwodnice Bydgoszczy i Torunia, Trasę Siekierkowską w Warszawie, jak również mosty przez Wartę w Gorzowie, przez Dziwnę w Wolinie.

Andrzej Pawlaczyk angażował się również w tworzenie form samorządu zawodowego i samoorganizacji w ramach Gdańskiego oddziału Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji, jako jego członek w latach (1981–1998), a także pełniąc aktywnie funkcję Zastępcy Przewodniczącego /W-ce Przewodniczącego Oddziału Gdańskiego SITK (1981–1987 i 1994–1998), oraz funkcję Prezesa Zarządu oddziału Gdańskiego SITK RP (1987–1994), będąc równocześnie Członkiem Zarządu Głównego SITK RP (1984–1994). W uznaniu zasług dla polskiego drogownictwa został wyróżniony przez Polski Kongres Drogowy w 2016 roku tytułem „Zasłużony dla sprawy drogowej”.