



PIOTR GÓRAK

Politechnika Częstochowska
piotr.gorak@pcz.pl
ORCID: 0000-0003-3479-7647



PRZEMYSŁAW POSTAWA

Politechnika Częstochowska
przemyslaw.postawa@pcz.pl
ORCID: 0000-0001-7654-2963

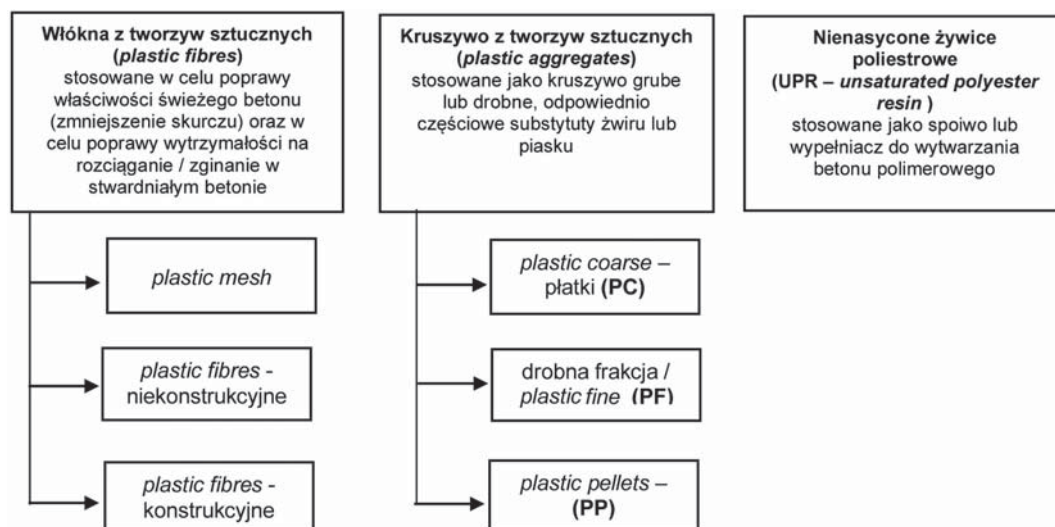
Lekkie kruszywo ultrakompozytowe – idea ekologicznego i użytecznego wykorzystania odpadów mineralnych i sztucznych jako składnika betonu

Poszukiwanie nowych dróg zagospodarowania odpadów staje się obecnie kluczowe dla nowoczesnego świata. Szereg przyjmowanych strategii rozwojowych ma na względzie nie tylko procesy dekarbonizacji, walki z globalnym ociepleniem, ale także zrównoważony rozwój przy maksymalizacji wykorzystania gospodarki cyrkularnej. Gospodarka materiałami w obiegu zamkniętym to przyszłość, a zwiększenie udziału recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów odpadowych z każdej dziedziny przemysłu to konieczność. Właściwe zarządzanie zasobami naturalnymi,

przetwarzania odpadów dotąd zalegających na hałdach lub wysypiskach to droga, która długofalowo będzie miała wpływ na procesy dekarbonizacyjne i walkę z globalnym ociepleniem. Tworzywa sztuczne są zarówno wyjątkowym wynalazkiem, jak i zmurą naszych czasów. Według danych Plastics Europe [1] zapotrzebowanie na produkcję tworzyw sztucznych w Europie (EU 27+3) w roku 2020 wyniosło ponad 49 mln ton. Produkcja PET głównie na potrzeby opakowań wyniosła 4,14 mln ton i stanowiła 8,4% całości produkcji tworzyw sztucznych. W tym samym roku w Polsce zużyto 7,5 mln ton tworzyw sztucznych. Niestety, według szacunków tej organizacji, tylko poniżej 30% produkowanych w Polsce tworzyw sztucznych zostaje ponownie przetworzone i wykorzystane w procesie klasycznego recyklingu lub w formie odzysku energii jako paliwo alternatywne RDF, reszta trafia na składowiska, a przez to wypada z obiegu zamkniętego.

Recykling tworzyw sztucznych jest jedną z najbardziej ekologicznych dróg zagospodarowania tego typu odpadów, ale wymaga czasem skomplikowanych procesów przygotowawczych oraz przeróbczych i nie zawsze może być efektywny energetycznie i całkowicie stosowalny. Nie jest powszechna wiedza, że poważnym problemem, jaki pojawia się w przetwórstwie tworzyw termoplastycznych jest fakt, że ich wielokrotne re-stosowanie jest możliwe w określonym zakresie. Po kilku cyklach przetworzenia recyklatów, tworzywa takie nie nadają się do ponownego wykorzystania z racji degradacji termicznej i znacznej utraty pierwotnych właściwości. Jedną z przyczyn jest wrażliwość tego materiału na wilgoć podczas przetwarzania, co może spowodować jego nieodwracalną chemiczną degradację [2]. Kolejne ograniczenie obejmuje cechę wszystkich wielkocząsteczkowych materiałów polimerowych, które podczas przetwarzania wykazują sukcesywną redukcję łańcucha długości połączeń cząsteczkowych i redukcję masy cząsteczkowej w efekcie degradacji termicznej, co prowadzi do spadku mechanicznych właściwości materiału poddawanego kilkukrotnej obróbce [3].

Zagospodarowanie odpadowego PET w funkcji składnika betonu nie jest pomysłem nowym. Od wielu lat trwają na świecie badania i próby stosowania tego materiału jako zamiennika części kruszywa drobnego lub grubego. Z przeglądu literatury na świecie i stanu wiedzy wynika [4–15],



Rys. 1. Formy i funkcje stosowania PET w kompozytach cementowych / Forms and functions of using PET in cement composites

że wielu badaczy rozważało możliwość wykorzystania odpadów z tworzyw sztucznych jako składnika kompozytów cementów pełniącego różne funkcje. Szereg badań, prowadzonych przez różnych autorów, skupiających się na zagadnieniach związanych z wykorzystaniem PET w betonie, opisuje trzy zasadnicze kierunki wykorzystania odpadowego PET w kompozytach na bazie cementu.

Zastosowanie czystego, nieprzetworzonego tworzywa PET w betonie, czy też innych kompozytach na bazie cementu, wydaje się problematyczne ze względu na konieczność rozwiązania problemu jego trwałości fizykochemicznej. Poli(tereftalan etylenu) w środowisku alkalicznym (pH 13–13,5) zaczynu cementowego ulega reakcji hydrolizy, przez co właściwości mechaniczne kompozytów cementowych z tym dodatkiem z czasem się pogarszają [16–17].

Odpady pochodzące z różnych procesów spalania są wykorzystywane najczęściej bez dodatkowej przeróbki, między innymi do produkcji cementów, betonów lub też jako materiały „saute” do wykonywania stabilizacji / wzmocnienia gruntów. Znaczna ich część, ze względu na nieodpowiednie cechy fizyczne lub chemiczne, kierowana jest jednak również do składowania [3]. Nieco lepiej wygląda zagospodarowanie popiołów lotnych ze spalania węgla. W tym wypadku tylko 7% jest unieszkodliwione poprzez składowanie. Na uwagę zasługuje jednak ilość nagromadzonych odpadów, które mogą stanowić swoisty rezerwuuar antropogenicznych surowców możliwych do wykorzystania. Dla mieszanek popiołowo-żużlowych zinventaryzowano aż 320 037 tys. ton, a dla popiołów lotnych z węgla 250 131 tys. ton odpadów. Nowym i dość problematycznym ubocznym produktem spalania jest popiół lotny pochodzący ze spalania komunalnych osadów ściekowych. Ze względu na prognozy i rozwój tej technologii utylizacji osadów ściekowych szacuje się, że ilość tego rodzaju popiołu lotnego będzie w kolejnych latach rosła, zatem jego zagospodarowanie będzie z punktu widzenia środowiska istotne [19].

Powyższe założenia doprowadziły autorów do konkluzji, że w projektowanym doświadczalnie kruszywie kompozytowym warto rozważyć wykorzystanie dwóch rodzajów materiałów odpadowych, których całkowity powrót do ponownego wykorzystania jest obecnie trudny [29].

Materiały i składniki wykorzystane do wytworzenia kompozytu

Z reguły własności tworzonego kompozytu są modelowane pod jego zastosowanie, a więc powinny charakteryzować się dodatkowymi cechami w stosunku do własności każdej z faz użytych do jego wytworzenia. W przypadku materiałów użytych do projektowanego kompozytu, podstawowym celem było znalezienie użytecznego kierunku ich wspólnego zastosowania, niemożliwego lub trudnego do osiągnięcia w przypadku stosowania ich jako oddzielnych materiałów.

Składnikami tworzonego kompozytu opisanymi w niniejszym artykule były płatki pochodzącego z odpadowego PET uzyskanych w wyniku recyklingu mechanicznego opakowań (butelek). Poli(tereftalan) etylenu, czyli w skrócie PET, należy do termoplastycznych tworzyw częściowo krystalicznych,

z grupy poliestrów, otrzymywanych z kwasu tereftalowego (PTA) lub jego estrudimetylotereftalanu (DMT) oraz glikolu etylenowego (EG). Właściwości płatków z odpadowych opakowań spożywczych (przede wszystkim butelek) zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości płatków PET / *Properties of PET flakes*

Właściwości	Wartość	Jednostka
Kolor	mix/niebieski	–
Forma (kształt)	płatki	–
Lepkość właściwa (iV-Value)	0,74 +/-0,03	dl/g
Rozmiar ziarna (płatka)	<12	mm
Gęstość nasypowa	260 +/- 50	kg/m ³
Gęstość objętościowa	1200–1350	kg/m ³
Wilgotność	< 1	%
Zawartość pyłów	< 0,5	%
Temperatura topnienia	ok. 250	°C

Do wytworzenia lekkiego kruszywa ultrakompozytowego, jako składnik mineralny zostały wykorzystane uboczne produkty spalania. W procesie wytwarzania UCLA wykorzystano trzy rodzaje UPS-ów o właściwościach jak w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny i wybrane właściwości surowców / *Chemical composition and selected properties of raw materials*

Właściwości	Jednostka	Oznaczenie		
		popiół lotny za spalania osadów ściekowych ssFA	popiół lotny krzemionkowy FA	mieszanka popiołowo-żużlowa MPŻ
Cl ⁻	%	0,044	0,020	0,026
SO ₃	%	1,130	0,30	0,31
CaO	%	16,880	9,11	1,73
SiO ₂	%	44,310	47,73	55,04
Al ₂ O ₃	%	17,380	28,90	22,70
Fe ₂ O ₃	%	10,590	7,77	12,99
MgO	%	5,250	2,59	2,75
P ₂ O ₅	%	25,400	n.b.	n.b.
Straty prażenia	%	1,57	7,94	11,27
Gęstość nasypowa	kg/m ³	1,30	1,10	1,25
Gęstość objętościowa	kg/m ³	2,42	2,22	2,40

W eksperymencie wykorzystano uboczne produkty spalania, których zastosowanie jako normowych składników produkcji cementu, czy też dodatków do produkcji betonu, jest praktycznie niedozwolone. Wynika to przede wszystkim z braku spełnienia definicji pochodzenia popiołu jako składnika betonu, zgodnie z norma PN-EN 450-1, lub jako skład-

nika cementu powszechnego użytku według PN-EN 197-1. Dodatkowo znaczna część tego typu UPS-ów ma bardzo wysokie straty prażenia, które negatywnie wpływają na właściwości wykonanych przy ich użyciu betonów.

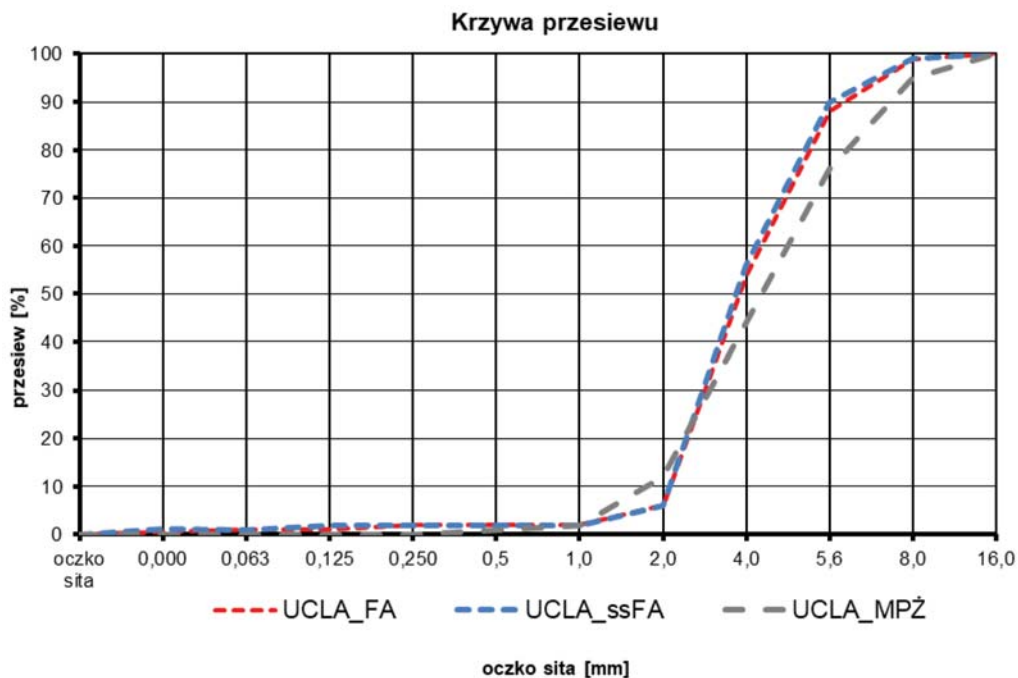
Opis eksperymentu – technologia wytwarzania

Obecnie do wytworzenia kruszyw lekkich z popiołów lub z innych produktów ubocznych spalania (UPS) niezbędne jest dostarczenie znacznej ilości energii niezbędnej do procesu spiekania. W zależności od technologii lub wytwarzanego materiału jest to zakres temperatur od 900°C do 1300°C. Tak wysokie temperatury czynią proces bardzo energochłonnym. Zatem przetworzenie odpadu, mające niewątpliwie działanie proekologiczne, wiąże się z zastosowaniem wysokotemperaturowej obróbki termicznej, a więc dostarczeniem znacznych ilości energii wytworzonej pośrednio lub bezpośrednio w procesie spalania, co generuje dodatkowo znaczący ślad węglowy. Lekkie kruszywo ultrakompozytowe (UCLA – *Ultracomposite Lightweight Aggregates*) zostało otrzymane w wyniku termicznej obróbki odpadów pochodzących z tworzyw sztucznych oraz mineralnych ubocznych produktów spalania. Technologia wytwarzania polegała na wykorzystaniu właściwości fizycznych materiałów użytych do tworzenia tego kompozytu. Odrębne składniki połączone zostały razem w kompozyt wiązaniem fizycznym powstałym na skutek termicznego, niskotemperaturowego procesu produkcyjnego. Zgodnie z literaturą [22, 23] w zespole kompozytowym PET-FA występuje tylko i wyłącznie fizyczne wiązanie.

Cały opracowany przez autorów proces wytwarzania wymaga dostarczenia dużo mniej energii cieplnej niż dotychczasowe sposoby otrzymywania kruszyw lekkich i pozwala na obniżenie zakresu temperatur nawet o 65–75% w stosunku do wytwarzania lekkich kruszyw spiekanych [29].

Właściwości wytworzonych lekkich kruszyw ultrakompozytowych (UCLA)

W wyniku termicznej, niskotemperaturowej obróbki płatków z odpadowego PET oraz ubocznych produktów spalania otrzymano granulki kruszywa o przeważającej ilości ziaren zbliżonych do kulistych. Krzywe uziarnienia uzyskanych kruszyw UCLA zestawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Krzywe uziarnienia kruszyw UCLA / UCLA aggregate grading curves

Rezultatem przeprowadzonych eksperymentów było powstanie trzech odmian kruszywa UCLA o zbliżonym uziarnieniu odpowiadającym frakcji 2–8 mm, a różniącymi się między sobą kształtem i rozmiarem ziaren (rys. 3–5).



Rys. 3. Kruszywo UCLA_FA / UCLA_FA aggregate



Rys. 4. Kruszywo UCLA_ssFA / UCLA_ssFA aggregate



Rys. 5. Kruszywo UCLA_MPŻ / UCLA_MPŻ aggregate

W zależności od rodzaju wypełniacza mineralnego zostały wytworzone lekkie kruszywa ultralekkie, charakteryzujące się nieco innymi właściwościami. Proporcje objętościowe składników, czas i temperatura obróbki termicznej były takie same dla każdego uzyskanego kruszywa.

Porównanie właściwości wytworzonych kruszyw przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wybrane właściwości fizyczne kruszyw UCLA / Selected and physical properties UCLA aggregate

Właściwości	Metoda badania	Wyniki badań		
		UCLA_FA	UCLA_ssFA	UCLA_MPŻ
Gęstość nasypowa [Mg/m ³]	PN-EN 1097-3	0,76	0,70	0,72
Gęstość objętościowa ziaren [Mg/m ³]	PN-EN 1097-6:2013-11 Aneks A	1,81	1,83	1,67
Gęstość ziarn wysuszonych w suszarce ρ_{rd} , [Mg/m ³]		1,43	1,33	1,48
Gęstość ziarn nasyconych i powierzchniowo osuszonych ρ_{ssd} , [Mg/m ³]		1,64	1,61	1,58
Nasiąkliwość WA_1 , [%]		10,4	16,1	4,9
Nasiąkliwość WA_{24} , [%]		14,5	20,5	7,7
Wskaźniki płaskości FI [%]	PN-EN 933-3	22	26	17
Odporność na miażdżenie C_a [N/mm ²]	PN-EN 13055-1	8,9	9,4	8,9

Dla wytworzonych kruszyw przeprowadzono badania podstawowych właściwości fizycznych. Kruszywa zostały scharakteryzowane i ocenione w sposób przewidziany dla kruszyw lekkich zgodnie z normą PN-EN 130550-1 oraz PN-EN 206 ze względu na kryteria:

- gęstość nasypowa poniżej 1,2 Mg/m³
- gęstość objętościowa ziaren poniżej 2,0 Mg/m³

Otrzymane wyniki badań nasiąkliwości WA_{24} i WA_1 są typowe dla lekkich kruszyw zawierających znaczną ilość pustek i muszą być uwzględniane przy projektowaniu i wykonywaniu mieszanek lekkich betonów. Największy udział ziaren płaskich wyrażony wskaźnikiem płaskości wykazuje kruszywo wykonane przy użyciu popiołów lotnych pochodzących ze spalania osadów ściekowych, najniższy wskaźnik płaskości uzyskano dla kruszywa wykonanego przy użyciu mieszanki popiołowo-żużlowej. Porównanie wyników badań odporności na miażdżenie kruszyw UCLA wykonanych dla różnych mineralnych składników wskazuje, że oscylują w obrębie porównywalnego poziomu – 8 N/mm².

Lekkie kruszywo ultralekkie – wstępne badania aplikacyjne

Zamierzonym, głównym zastosowaniem uzyskanego kruszywa kompozytowego miało być przede wszystkim użycie takiego materiału jako składnika betonu, będącego częściowym zamiennikiem kruszywa naturalnego. Wpływ lekkich kruszyw kompozytowych UCLA na właściwości kompozytów cementowych zbadano wykorzystując wyjściowo standardowe składy zapraw cementowych zgodne z PN-EN 196-1 [30]. Kruszywa naturalne (w tym przypadku piasek normowy 0/2 mm) zastąpiono odpowiednio taką samą objętościową ilością UCLA (25% obj). Zakres planowanych badań obejmował właściwości reologicznych mieszanek oraz cechy stwardniałych kompozytowych cementowych dla kompozycji opartych na kruszywach UCLA, wprowadzonych jak częściowe zamienniki piasku naturalnego w ilości 25%, a wyniki odniesiono do mieszanki referencyjnej wykonanej według składu zaprawy normowej [30] z domieszką plastyfikującą BV w ilości 0,75% m.c. Na podstawie zaleceń literaturowych [30] w przypadku stosowania lekkiego kruszywa ultralekkiego zastosowano wstępny proces

nasączenia tego materiału przez czas 1h przed rozpoczęciem procesy dozowania i mieszania składników [31, 32]. To działanie miało ułatwić uzyskanie stabilnej urabialności mieszanki w czasie, a także zapewnić odpowiednią szczelność matrycy cementowej na styku ziarna kruszywa – zaczyn cementowy.

W badaniach został wykorzystany cement CEM I 42,5 R-NA produkowany w cementowni CEMEX Polska w Rudnikach (tab. 4).

Oznaczenia i składy receptur przygotowanych do badań i zawierających badane zamienniki części piasku przedstawiono w tabeli 5.

Dla wykonanych mieszanek zostały przeprowadzone badania konsystencji przy wykorzystaniu metody normowej

Tabela 4. Parametry cementu CEM I 42,5 R-NA użytego w badaniach

Parametr	Jednostka	Wynik
Początek wiązania	min	169
Koniec wiązania	min	185
Powierzchnia właściwa	cm ² /g	3 720
Wodozadržność	%	27,5
Wytrzymałość na ściskanie 2d	MPa	25,5
Wytrzymałość na ściskanie 28d	MPa	56,5
Części nierozpuszczalne	%	0,4
Strata prażenia	%	2,8

Tabela 5. Skład mieszanek kruszywowych badanych kompozytów cementowych

Opis serii	Udział objętościowy składników w całym szkielecie kruszywowym				
	Piasek 0/2 mm	PET	UCLA_FA	UCLA_ssFA	UCLA_MPŻ
Z0	100	–	–	–	–
Z1	75	25	–	–	–
Z2	75	–	25	–	–
Z3	75	–	–	25	–
Z4	75	–	–	–	25

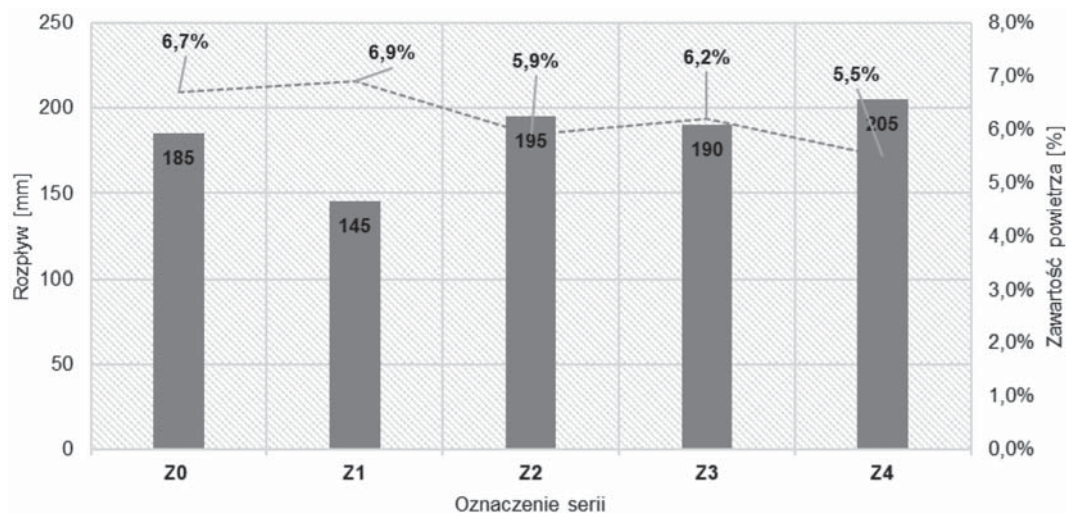
oraz badania zawartości powietrza metodą ciśnieniową według PN-EN 1015-3 [33]. Wyniki tych dwóch cech reologicznych mieszanek zaprezentowano na rysunku 6.

W przypadku zastosowania 25% płatków PET jako zamiennika kruszywa naturalnego 0/2 mm zaobserwowano obniżenie konsystencji (rozplywu) o 22% przy porównywal-

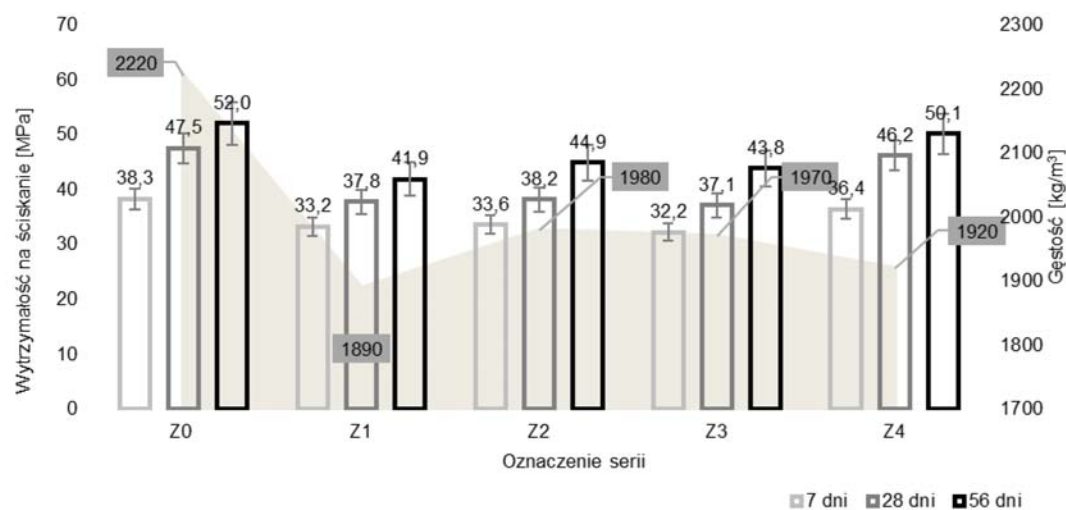
nej zawartości napowietrzenia mieszanki. Wprowadzenie zamiennika piasku 0/2 mm w postaci lekkich kruszyw ultra-kompozytowych odpowiednio wcześniej przygotowanych (nasączenie wodą w ilości odpowiadającej wartości WA_{1h}) spowodowało wzrost konsystencji mieszanek odpowiednio od 2 do 10% przy zaobserwowanej nieco niższej zawartości powietrza w mieszance.

Po wykonaniu badań konsystencji próbki mieszanki zaformowano w formy beleczkowe (40 mm × 40 mm × 160 mm) zagęszczono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 1015-11 [35]. Przez pierwsze 24 godziny próbki przechowywano w formie w komorze wilgotnościowej o ustalonych warunkach dojrzewania temperatura 20°C +/-2°C i wilgotność względna > 95%. Następnie próbki wyjęto z formy po 24 godzinach i przechowywano w wodzie do dnia badania. Przetestowano następujące właściwości stwardniałych kompozytów cementowych – wytrzymałość na zginanie i na ściskanie po 7, 28 i 56 dniach dojrzewania zgodnie z normą badawczą PN-EN 196-1.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykonanych



Rys. 6. Wyniki badań właściwości reologicznych testowanych mieszanek



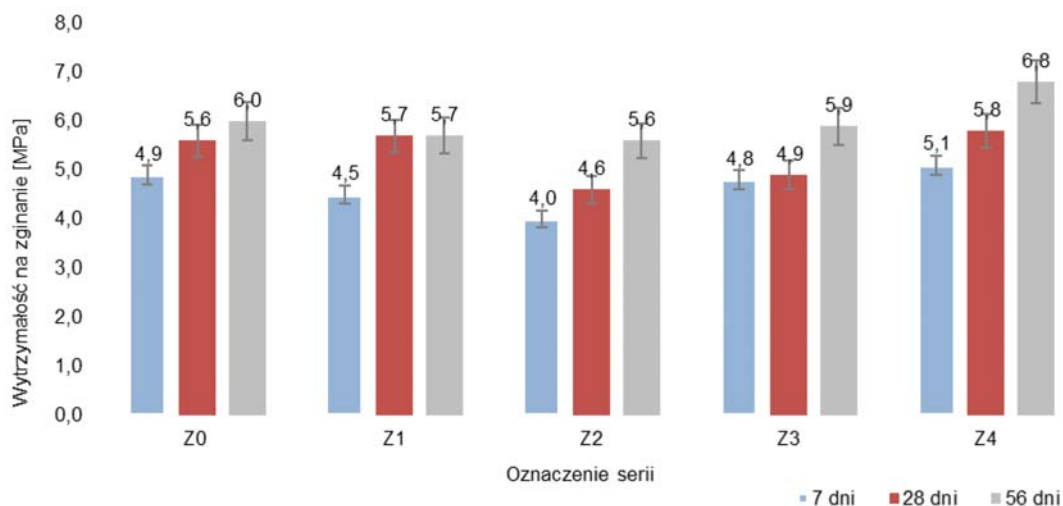
Rys. 7. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do gęstości stwardniałych próbek badanych po 28 dniach

kompozytów cementowych po odpowiednich czasach dojrzewania zaprezentowane zostały w postaci wykresów na rysunku 7 w odniesieniu do gęstości stwardniałego kompozytu cementowego.

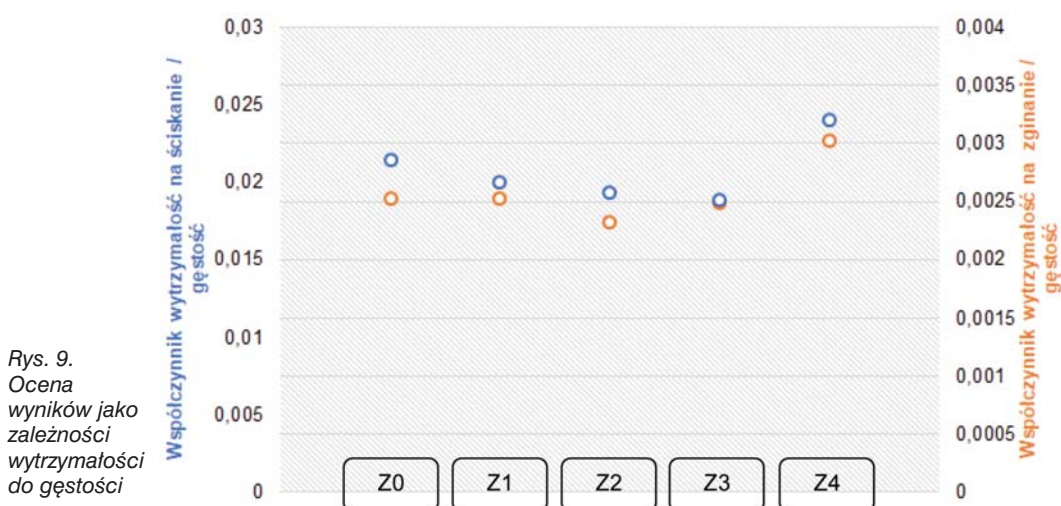
Z kolei na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na zginanie po 7, 28 i 56 dniach twardnienia.

W przypadku oceny wytrzymałości na ściskanie/zginanie kompozytów na bazie cementu dość istotnym aspektem jest ocena tego parametru w odniesieniu do gęstości stwardniałego materiału. Taką próbę oceny przeprowadzono wykorzystując stosunek wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach do gęstości (po 28 dniach) wyrażony w MPa / (kg/m³). Dla badanych próbek uzyskano wyniki wskazujące, że seria wykonana na kruszywie UCLA_MPŻ charakteryzuje się najlepszym wskaźnikiem – rysunek 8.

Na podstawie takiej analizy wyników można sformułować wnioski, że skład kruszywa kompozytowego ma znaczenie jeśli zostanie ono wyko-



Rys. 8. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie



Rys. 9. Ocena wyników jako zależności wytrzymałości do gęstości

rzystane jako zamiennik części kruszywa naturalnego. Zależność między gęstością stwardniałych kompozytów cementowych, a ich właściwościami mechanicznymi pozwala najpełniej opisać wpływ kruszyw lekkich na podstawowe właściwości mechaniczne wykonanych na nich kompozytów betonowych. Zastosowanie odpowiednio dobranej mineralnej materii odpadowej przy zachowaniu tych samych warunków wytwarzania kruszywa wpływa na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych na nim wykonanych. Najlepszą korelację współczynników określonych jako stosunek wytrzymałości (ściskanie i zginanie) do gęstości uzyskano dla mieszanki Z4 – najwyższe wyniki. Przy porównaniu osobnych współczynników można zauważyć, że serie Z1, Z2 i Z3 mieszczą się w przedziale różnic w stosunku do referencji w zakresie jedynie 0,02–0,025 dla wytrzymałości na ściskanie. W przypadku porównania współczynników zależnych od wytrzymałości na zginanie do gęstości, wartość obliczona dla Z1 i Z3 w odniesieniu do referencji nie różni się niczym, a w przypadku Z4 przewyższają współczynnik uzyskany dla Z0.

zamiennika naturalnych kruszyw w kompozytach betonowych, a zastosowanie tego typu kruszyw ma jeszcze jeden aspekt niezwykle ważny w obecnym świecie, dążącym do zrównoważonego rozwoju, czyli możliwość wykorzystania problematycznych odpadów z równoczesnym ograniczeniem stosowania materiałów naturalnych pochodzących z nieodnawialnych zasobów.

Projekt realizowano w ramach Inkubatora Innowacyjności 4.0 przez CTT Politechniki Częstochowskiej

Bibliografia

- [1] https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf
- [2] Bimestre, B.H., Saron, C., 2012. Chain extension of poly (ethylene terephthalate) by reactive extrusion with secondary stabilizer. *Mat. Res.* 15 (3), 467e472.
- [3] Lopez, M. del M.C., Pernas, A.I.A., Lopez, M.J.A., Latorre, A.L., Vilariño, J.M.L., Rodríguez, V.G., 2014. Assessing changes

Wnioski

Lekkie kruszywa ultra-kompozytowe jako kruszywa budowlane to potencjalnie nowy kierunek na zagospodarowanie odpadów, i to odpadów o skrajnie różnych właściwościach. Niewątpliwą zaletą tego typu kruszyw jest możliwość łączenia różnych materiałów z grup termoplastycznych polimerów oraz mineralnych odpadów z procesów spalania lub innych procesów technologicznych. Jak wskazują doświadczenia autorów, w takich przypadkach należy ustawić parametry procesu produkcji, biorąc pod uwagę nie tylko właściwości termoplastycznych polimerów jak np. temperatury mięknięcia, krystalizacji czy też topnienia, ale także właściwości fizyczne mineralnych wypełniaczy, przede wszystkim gęstość i rozkład ziarnowy. Uzyskane wyniki badań wykonanych kruszyw UCLA wskazują, że cechują się one właściwościami interesującymi z punktu widzenia zastosowania jako

- on poly(ethylene terephthalate) properties after recycling: mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material. *Mater. Chem. Phys.* 147 (3), 884e894
- [4] De Brito J., Evangelista L., Silvestre J.D. Chapter 11 – Equivalent functional unit in recycled aggregate concrete. Pages 293–327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00011-7>.
- [5] Al-Tulaian BS., Al-Shannag MJ., Al-Hozaimy AR., 2016. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials* 127, 102–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.
- [6] Kim JHJ., Park CG., Lee SW., Won JP. 2008. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites: Part B* 39, 442–50. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- [7] B.S. Al-Tulaian, M.J. Al-Shannag, A.R. Al-Hozaimy, Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar, *Construction and Building Materials* 127 (2016) 102–110.
- [8] Silva DA., Betioli AM., Gleize PJP, Roman HR., Gomez LA., Ribeiro, JLD. 2005. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 35, 1741–1746.
- [9] J.-H. J. Kim, C.-G. Park, S.-W. Lee, S.-W. Lee, J.P. Won, Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites, *Composites: Part B* 39 (2008) 442–450.
- [10] Wiliński D., Łukowski P., Rokicki G. 2016. Application of fibres from recycled PET bottles for concrete reinforcement. *J. Build. Chem.* 1, 1–9,
- [11] Pereira de Oliveira LA., Castro-Gomes JP. 2011. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials* 25, 1712–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.
- [12] Han, C.-G., Hwang, Y.-S., Yang, S.-H., Gowripalan, N., 2005. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and Concrete Research.* 35, 1747–1753.
- [13] Karahan, O., Atis, C.D., 2011. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Mater. Des.* 32, 1044–1049.
- [14] Rebeiz K.S., Fowler D.W., Paul D.R.: Formulating and evaluating unsaturated polyester composite made with recycled PET. *Journal of Material Education* 13 (1991), 441–454.
- [15] Rebeiz K.S.: Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cement and Concrete Composites* 17 (1995), 119–124.
- [16] Pelisser, F., Montedo, O.R.K., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., 2012. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Mater. Res.* 15, 679–686.
- [17] Foti D.: Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials* 2011, vol. 25, s. 1906–1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- [18] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-przemyslu-2021,5,15.html>
- [19] Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014 (M. P. nr 101, poz. 1183).
- [20] PNPN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- [21] PN-EN 197-1:2012. Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [22] Yadong Li, et al., “Composite material from fly ash and post-consumer PET”, *Resources, Conservation and Recycling* 24 (1998) 87–93
- [23] Sushovan Dutta et al., “An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications”, *Procedia Environmental Sciences* 35 (2016) 681 – 691
- [24] PN-EN 206+A1:2016-12. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [25] PN-EN 12620+A1:2010. Kruszywa do betonu
- [26] PN-EN 13055:2016-07. Kruszywa lekkie. Część 1: Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy
- [27] PN-EN 1097-6:2013-11. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości
- [28] PN-EN 933-3:2012. Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości
- [29] P. Górak, Postawa P. 2022. Lekkie kruszywo ultrakompozytowe – ekologiczne i użyteczne wykorzystanie odpadów mineralnych i sztucznych. *Materiały Budowlane* 598 (6): 56-59. DOI: 10.15199/33.2022.06.08
- [30] PN-EN 196-1. Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [31] Neville A.M – Właściwości betonu. (Properties of concrete). Wydawnictwo Polski Cement. Kraków 2012 (5th edition)
- [32] Domagała L., Lekkie betony konstrukcyjne–projektowanie, wykonywanie, właściwości, Przegląd budowlany 87,2016
- [33] PN-EN 1015-3. Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplwywu).
- [34] PN-EN 1015-11. Metody badań zapraw do murów – Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2023 roku

prenumerata roczna normalna 300 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 26 zł }

prenumerata roczna studencka 150 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 13 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

07 1240 6973 1111 0011 0889 5231

Wydawnictwa SITK RP sp. z o.o., ul. Świętokrzyska 14A lok. 150, 00-050 Warszawa

Redakcja