

mgr inż. Piotr Górak^{1)*}

ORCID: 0000-0003-3479-7647

dr hab. inż. Przemysław Postawa, prof. PCz¹⁾

ORCID: 0000-0001-7654-2963

Lekkie kruszywo ultrakompozytowe – ekologiczne i użyteczne wykorzystanie odpadów mineralnych i sztucznych

Ultracomposite lightweight aggregates – ecological and usefull management mineral and plastic waste

DOI: 10.15199/33.2022.06.08

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac projektowych i badawczych, których celem było wytworzenie lekkiego kruszywa ultrakompozytowego (UCLA – *ultracomposite lightweight aggregate*) w wyniku połączenia odpadów pochodzących z różnych źródeł. Opracowana technologia wytwarzania pozwoliła na wykorzystanie odpadów pochodzących z termoplastycznych polimerów (PET) oraz mineralnych odpadów z procesów spalania, i pozyskanie kruszywa lekkiego mogącego znaleźć powszechne zastosowanie w budownictwie. W trakcie prac nad technologią wytwarzania nowego, ekologicznego kruszywa wykorzystano właściwości fizyczne termoplastycznych tworzyw sztucznych, w tym ich dużą lepkość w stanie stopionym. W wyniku odpowiednio przeprowadzonej obróbki termicznej w specjalnie zaprojektowanych warunkach wytworzono kompozyt w postaci granulek odpowiadających frakcji kruszywowej 2 – 8 mm. Uzyskano różne rodzaje kruszyw lekkich wykonanych przy użyciu różnych drobnoziarnistych wypełniaczy mineralnych – ubocznych produktów spalania, których podstawowe właściwości zostały zbadane i zaprezentowane. **Słowa kluczowe:** PET; lekkie kruszywo; uboczne produkty spalania; kompozyt; odpady; gospodarka obiegu zamkniętego.

Abstract. The paper presents the results of design and research work aimed at producing ultracomposite lightweight aggregate (UCLA) as a result of combining waste from different sources. The developed production technology allowed to utilize waste from thermoplastic polymers (PET) with mineral waste from combustion processes, and to produce a lightweight aggregate that can be widely used in construction. During the development of the technology to produce a new, ecological aggregate, the physical properties of thermoplastics and their high viscosity in the molten state were used. As a result of a properly conducted thermal treatment in specially designed conditions, a composite in the form of granules corresponding to an aggregate fraction of 2 – 8 mm was produced. Different types of lightweight aggregates made with various fine-grained mineral fillers – by-products of combustion – were obtained, the basic properties of which were studied and presented.

Keywords: PET; lightweight aggregates; coal combustion products; composite; wastes; circular economy.

Poszukiwanie nowych dróg zagospodarowania odpadów staje się obecnie kluczowe dla nowoczesnego świata. Wiele strategii rozwojowych uwzględnia 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 oraz przetwarzanie odpadów dotąd zalegających na hałdach lub wysypiskach to kierunek, który długofalowo będzie miał wpływ na procesy dekarbonizacyjne i walkę z globalnym ociepleniem.

¹⁾ Politechnika Częstochowska; Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki

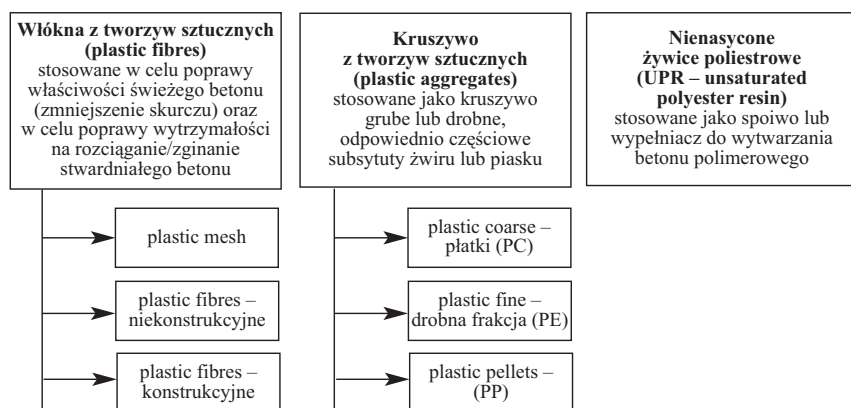
^{*} Adres do korespondencji: piotr.gorak@pcz.pl

Tworzywa sztuczne są zarówno wyjątkowym wynalazkiem, jak i zmartwą naszych czasów. Z danych Plastics Europe [1] wynika, że w 2020 r. zapotrzebowanie na produkcję tworzyw sztucznych w Europie (EU 27 + 3) wyniosło ponad 49 mln ton, w tym produkcja PET głównie na potrzeby opakowań – 4,14 mln ton, co stanowiło 8,4% całej produkcji tworzyw sztucznych. W tym samym roku w Polsce zużyto 7,5 mln ton tworzyw sztucznych. Zdaniem Plastics Europe do 60% produkowanych w Polsce tworzyw sztucznych zostaje ponownie przetworzone i wykorzystane w procesie klasycznego recyklingu lub w formie odzysku energii jako paliwo alternatywne RDF, a reszta trafia na składowiska, a więc wypada z obiegu zamkniętego.

Recykling tworzyw sztucznych jest jedną z najbardziej ekologicznych dróg zagospodarowania tego typu odpadów, ale wymaga czasem skomplikowanych procesów przygotowawczych oraz prze-

róbczych i nie zawsze może być efektywny energetycznie oraz całkowicie stosowalny. 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 ze względu na degradację termiczną i znaczną utratę właściwości pierwotnych. Jedną z przyczyn jest wrażliwość tworzyw sztucznych na wilgoć podczas przetwarzania, co może powodować jego nieodwracalną degradację chemiczną [2]. Kolejne ograniczenie dotyczy cechy wielkość-cząsteczkowych materiałów polimerowych, które podczas przetwarzania wykazują sukcesywną redukcję łańcucha długości połączeń cząsteczkowych i masy cząsteczkowej w efekcie degradacji termicznej, co prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych materiału poddawanego kilkukrotnej obróbce [3].

Zagospodarowanie odpadowego PET jako składnika betonu nie jest nowym pomysłem. Od wielu lat trwają na świecie badania i próby stosowania tego materiału jako zamiennika części kruszywa drobnego lub grubego. Z przeglądu literatury na świecie wynika [4 ÷ 15], że wielu badaczy rozważało możliwość wykorzystania odpadów z tworzyw sztucznych jako składnika kompozytów cementowych pełniącego różne funkcje. Trzy główne kierunki wykorzystania odpadowego PET w kompozytach na bazie cementu przedstawiono na rysunku 1.



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

Zastosowanie czystego, nieprzetworzonego tworzywa PET w betonie lub innych kompozytach na bazie cementu wydaje się problematyczne ze względu na jego trwałość fizykochemiczną. Poli(tereftalan etylenu), czyli PET, w środowisku alkalicznym (pH 13 – 13,5) zaczynu cementowego ulega reakcji hydrolizy i w efekcie z czasem pogarszają się właściwości mechaniczne kompozytów cementowych z tym dodatkiem [16 ÷ 17].

Odpady pochodzące z różnych procesów spalania są wykorzystywane najczęściej bez dodatkowej przeróbki, m.in. do produkcji cementów, betonów lub jako materiały „saute” do stabilizacji/wzmocnienia gruntów. Ze względu na nieodpowiednie cechy fizyczne lub chemiczne znaczna ich część jest składowana [3]. Nieco lepiej są zagospodarowane popioły lotne ze spalania węgla, których tylko 7% jest unieszkodliwiane przez składowanie. Na uwagę zasługuje jednak ilość nagromadzonych odpadów, które mogą stanowić swoisty rezerwuar antropogenicznych surowców możliwych do

wykorzystania. W przypadku mieszanki popiołowo-żużlowych zainventaryzowano aż 320 037 tys. ton odpadów, a popiołów lotnych z węgla 250 131 tys. ton odpadów. Nowym i dość problematycznym ubocznym produktem spalania jest popiół lotny ze spalania komunalnych osadów ściekowych. Ze względu na prognozy i rozwój technologii utylizacji osadów ściekowych szacuje się, że ilość tego rodzaju popiołu lotnego będzie zwiększała się w kolejnych latach, a zatem jego zagospodarowanie będzie istotne z punktu widzenia środowiska

ce z odpadowego PET pozyskane w wyniku recyklingu mechanicznego opakowań (butelek). Poli(tereftalan etylenu) należy do termoplastycznych tworzyw częściowo krystalicznych, z grupy poliestrów, otrzymywanych z kwasu tereftalowego (PTA) lub jego estru – dimetylotereftalanu (DMT) oraz glikolu etylenowego (EG). Właściwości płatków PET z odpadowych opakowań spożywczych (przede wszystkim butelek) zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości płatków PET
Table 1. Properties of PET flakes

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

Jako składnik mineralny lekkiego kruszywa ultrakompozytowego (UCLA) wykorzystano trzy rodzaje ubocznych produktów spalania o właściwościach jak w tabeli 2. Ich zastosowanie jako normowych składników produkcji cementu czy też dodatków do produkcji betonu jest praktycznie niedozwolone. Wynika to przede wszystkim z braku

Tabela 2. Skład chemiczny i wybrane właściwości surowców mineralnych
Table 2. Chemical composition and selected properties of raw mineral materials

Skład chemiczny	Zawartość [%]		
	popiół lotny ze spalania osadów ściekowych ssFA	popiół lotny krzemionkowy FA	mieszanka popiołowo-żużłowa 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 ₃	25,400	n.b.	n.b.
Właściwości			
Straty prażenia	1,57	7,94	11,27
Gęstość nasypowa [kg/dm ³]	1,30	1,10	1,25
Gęstość objętościowa [kg/dm ³]	2,42	2,22	2,40

[19]. Założenia te doprowadziły do konkluzji, że w projektowanym doświadczalnie kruszywie kompozytowym warto rozważyć wykorzystanie dwóch rodzajów materiałów odpadowych, których zagospodarowanie w konkretnym zastosowaniu budowlanym jako oddzielnych materiałów jest trudne.

Materiały i składniki wykorzystane do wytworzenia kompozytu

Z reguły właściwości kompozytu są modelowane pod jego zastosowanie, a więc powinien on charakteryzować się dodatkowymi cechami w stosunku do każdego ze składników użytych do jego wytworzenia. W przypadku materiałów stosowanych 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 opracowywanego lekkiego kruszywa ultrakompozytowego (UCLA) były płátky pochodzą-

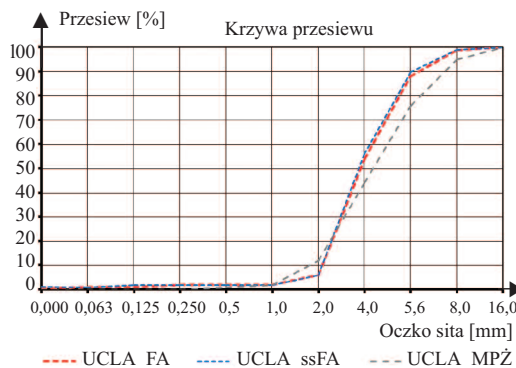
spełnienia definicji pochodzenia popiołu jako składnika betonu zgodnie z PN-EN 450-1, lub jako składnika cementu powszechnego użytku wg normy PN-EN 197-1. Ponadto znaczna część UPS-ów ma bardzo duże straty prażenia, które negatywnie wpływają na właściwości betonów wykonanych przy ich użyciu.

W celu wytworzenia kruszyw lekkich z popiołów lub innych ubocznych produktów spalania (UPS) konieczne jest dostarczenie dużej ilości energii niezbędnej w procesie spiekania, który przebiega w temperaturze $900 \div 1300^{\circ}\text{C}$. Tak wysokie temperatury powodują, że proces jest bardzo energochłonny. Zatem przetworzenie odpadu, mające niewątpliwie działanie proekologiczne, wiąże się z zastosowaniem wysokotemperaturowej obróbki termicznej, a więc dostarczeniem znacznej ilości energii wytworzonej pośrednio lub bezpośrednio w procesie spalania, co generuje dodatkowo znaczny ślad węglowy.

Lekkie kruszywo ultrakompozytowe (UCLA – *Ultracomposite Lightweight Aggregates*) zostało otrzymane w wyniku niskotemperaturowej obróbki termicznej odpadów pochodzących z tworzyw sztucznych oraz mineralnych ubocznych produktów spalania. Wykorzystano ich właściwości fizyczne. Zastosowane składniki zostały połączone wiązaniem fizycznym powstałym na skutek termicznego, niskotemperaturowego procesu produkcyjnego. Zgodnie z literaturą [22, 23] w zespole kompozytowym PET – popiół lotny występuje tylko wiązanie fizyczne. Opracowany proces wytwarzania wymagał dostarczenia dużo mniej energii cieplnej niż dotychczasowe technologie otrzymywania kruszyw lekkich i pozwala na obniżenie zakresu temperatury o $65 - 75\%$ w stosunku do wytwarzania lekkich kruszyw spiekanych.

Właściwości wytworzonych lekkich kruszyw ultrakompozytowych (UCLA)

W wyniku termicznej obróbki płatków z odpadowego PET oraz ubocznych produktów spalania otrzymano granulki kruszywa o ziarnach zbliżonych do kulistych. Krzywe uziarnienia kruszywa UCLA pokazano na rysunku 2. Uzyskano trzy odmiany tego kru-



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



Fot. 1. Kruszywo UCLA_FA
Photo 1. UCLA_FA aggregate



Fot. 2. Kruszywo UCLA_ssFA
Photo 2. UCLA_ssFA aggregate



Fot. 3. Kruszywo UCLA_MPŻ
Photo 3. UCLA_MPŻ aggregate

szywa o zbliżonym uziarnieniu odpowiadającym frakcji 2–8 mm, ale różniącym się między sobą kształtem ziaren (fotografie 1 ÷ 3). W zależności od rodzaju zastosowanego wypełniacza mineralnego kruszywo charakteryzowało się nieco innymi właściwościami. W przypadku każdego kruszywa proporcje objętościowe składników, czas i temperatura obróbki termicznej były takie same. Wybrane właściwości fizyczne otrzymanych kruszyw porównano w tabeli 3. Oceniano je zgodnie

z normami PN-EN 206 [24] oraz PN-EN 13055-1 [25], uwzględniając kryteria:

- gęstości nasypowej poniżej $1,2 \text{ Mg/m}^3$;
- gęstości objętościowej ziaren poniżej $2,0 \text{ Mg/m}^3$.

Otrzymane wyniki badań nasiąkliwości W_{A24} i W_{A1} są analogiczne jak kruszywo lekkich zawierających znaczną liczbę pustek i powinny być uwzględniane przy projektowaniu oraz wykonywaniu mieszanek betonów

lekkih. Największy udział ziaren płaskich wyrażony wskaźnikiem płaskości wykazuje kruszywo wykonane z użyciem popiołów lotnych pochodzących ze spalania osadów ściekowych (ssFA), a najmniejszy kruszywo wykonane z zastosowaniem mieszanki popiołowo-żuźlowej (MPŻ).

Przeprowadzone testy wymywalności metali ciężkich, wykonane wg procedur badawczych zawartych w normach [29, 30], wykazały mniejsze wartości w przypadku kruszyw UCLA w odniesieniu do wartości uzyskanych w badaniach wypełniaczy mineralnych stosowanych do ich wytwarzania. Prawdopodobnie jest to efekt ograniczenia wnikania wody do ziaren popiołów wskutek otoczenia ich stopionym PET. Na znaczne różnice wymywalności metali ciężkich z kruszywa UCLA_ssFA w odniesieniu do czystego popiołu ssFA (tabela 4) miała wpływ także mniejsza zawartość popiołu w kompozycie.

Wnioski

Lekkie kruszywa ultrakompozytowe jako kruszywa budowlane to potencjalnie nowy kierunek zagospodarowania odpadów o skrajnie różnych właściwościach. Niewątpliwą zaletą tego typu kruszyw jest możliwość łączenia różnych materiałów z grupy termoplastycznych polimerów oraz mineralnych odpadów z procesów spalania lub innych procesów technologicznych. Jak wskazują doświadczenia, parametry procesu produkcji należy ustalić, biorąc pod uwagę nie tylko właściwości polimerów termoplastycznych, jak np. temperaturę mięknięcia, krystalizacji czy topnienia, ale także właściwości

Tabela 3. Wybrane właściwości fizyczne kruszyw UCLA
Table 3. 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 [27]	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 [28]	22	26	17
Odporność na miażdżenie C_a [N/mm ²]	PN-EN 13055-1 [25]	8,9	9,4	8,9

Tabela 4. Porównanie wymywalności metali ciężkich
Table 4. Comparison of leached heavy metals

Metal ciężki	Uwalniana (wymywana) ilość metali ciężkich [mg/kg]		Różnica [%]
	popiół lotny ze spalania osadów ściekowych ssFA	UCLA_ssFA	
Bar (Ba)	2,33	0,31	▼ 87%
Kadm (Cd)	0,005	< 0,05	–*
Chrom (Cr)	0,086	< 0,05	–*
Molibden (Mo)	8,13	2,0	▼ 75%
Ołów (Pb)	0,218	< 0,05	–*
Selen (Se)	2,0	1,2	▼ 40%
Cynk (Zn)	0,05	< 0,05	–*

fizyczne wypełniaczy mineralnych, przede wszystkim gęstość i rozkład ziarnowy. Uzyskane wyniki badań kruszyw UCLA wskazują, że cechują się one właściwościami interesującymi z punktu widzenia zastosowania jako zamiennika kruszyw naturalnych w kompozytach betonowych. W takim przypadku ekologiczny aspekt kruszywa UCLA jest potrójny, ponieważ po pierwsze pozwala na zagospodarowanie problematycznych odpadów, po drugie do jego wytworzenia nie jest wymagana znaczna ilość energii (o 65 – 75% mniej niż w przypadku lekkich kruszyw spiekanych), a po trzecie zastąpienie części kruszyw naturalnych pozwala na oszczędzanie nieodnawialnych zasobów naturalnych. Zastosowanie kruszyw UCLA wymaga dodatkowych i szczegółowych badań pod kątem potencjalnych aplikacji, np. w kompozytach na bazie cementu lub jako kruszyw wypełniających, izolacyjnych oraz wykorzystywanych w warstwach drenażowych.

Literatura

- [1] https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf.
- [2] Bimestre BH, Saron C. Chain extension of poly (ethylene terephthalate) by reactive extrusion with secondary stabilizer. *Mat. Res.* 2012; 15 (3): 467 – 472.
- [3] Lopez M. del MC., Pernas AIA, Lopez MJA, Latorre AL, Vilari-no JML, Rodríguez VG. Assessing changes on poly (ethylene terephthalate) properties after recycling: mechanical recycling in laboratory versus postconsumerrecycled material. *Mater. Chem. Phys.* 2-14; 147 (3): 884 – 894.
- [4] De Brito J, Evangelista L, Silvestre JD. 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. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials.* 2016; 127: 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.
- [6] Kim JHJ, Park CG, Lee SW, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites: 2008; Part B* 39: 442–50. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- [7] Al-Tulaian BS, Al-Shannag MJ, Al-Hozaimy AR. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. *Construction and Building Materials.* 2016; 127: 102 – 110.
- [8] Silva DA, Betioli AM, Gleize PJP, Roman HR, Gomez LA, Ribeiro JLD. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research.* 2005; 35: 1741 – 1746.
- [9] Kim J-H, Park C-G, Lee S-W, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites: 2008; Part B* 39: 442 – 450.
- [10] Wiliński D, Łukowski P, Rokicki G. Application of fibres from recycled PET bottles for concrete reinforcement. *J. Build. Chem.* 2016; 1: 1 – 9.
- [11] Pereira de Oliveira LA, Castro-Gomes JP. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and*

Building Materials. 2011; 25: 1712 – 1717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.

[12] Han C-G, Hwang Y-S, Yang S-H, Gowripalan N. Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and Concrete Research.* 2005; 35: 1747 – 1753.

[13] Karahan O, Atis CD. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Mater. Des.* 2011; 32: 1044 – 1049.

[14] Rebeiz KS, Fowler DW, Paul DR. Formulating and evaluating unsaturated polyester composite made with recycled PET. *Journal of Material Education.* 1991; 13: 441 – 454.

[15] Rebeiz KS. Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cement and Concrete Composites.* 1995; 17: 119 – 124.

[16] Pelisser F, Montedo ORK, Gleize PJP, Roman HR. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Mater. Res.* 2012; 15: 679 – 686.

[17] Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials.* 2011; 25: 1906 – 1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>.

[18] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczny-przemyslu-2021,5,15.html>

[19] Krajowy Plan Gospodarki Odpadami 2014 (M.P. nr 101, poz. 1183).

[20] PN-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.* 1998; 24: 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.* 2016; 35: 681 – 691.

[24] PN-EN 206+A1:2016-12. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[25] PN-EN 13055:2016-07. Kruszywa lekkie. Część 1: Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy.

[26] PN-EN 12620+A1:2010. Kruszywa do betonu.

[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] PN-EN ISO 11885:2009. Jakość wody – Oznaczanie wybranych pierwiastków metodą optycznej spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-OES).

[30] PN-EN 12457-4:2006. Charakteryzowanie odpadów – Wymywanie.

Projekt realizowano w ramach Inkubatora Innowacyjności 4.0 przez CTT Politechniki Częstochowskiej.

Przyjęto do druku: 07.06.2022 r.