

Proekologiczne kruszywo z odpadów tworzyw sztucznych jako alternatywa kruszywa naturalnego do betonów lekkich

Environmentally friendly aggregate from plastic waste as an alternative to natural aggregate for lightweight concrete

dr hab. inż. Jolanta Anna Prusiel, prof. PB (ORCID: 0000-0001-6827-1059), Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka, mgr inż. Kevin Bujnarowski (ORCID: 0000-0002-6471-8180), Szkoła Doktorska Politechniki Białostockiej

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1329

Streszczenie: W artykule opisano możliwość wykorzystania w budownictwie poprodukcyjnych odpadów plastikowych, takich jak folia zwykła i termokurczliwa. Wykorzystując specjalistyczną technologię, wytworzono kruszywo łamane o uziarnieniu do 8 mm z mieszanki materiałów syntetycznych PET/PVC/OPS (PPO). Materiały te pochodziły z odpadów generowanych podczas produkcji etykiet foliowych. W artykule przedstawiono wyniki badania właściwości kruszywa z recyklingu tworzyw sztucznych, takich jak gęstość nasypowa i ziaren, nasiąkliwość oraz parametry mechaniczne betonu. Przedstawiono również zdjęcia z mikroskopu skaningowego dla kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych oraz dla betonu z jego zawartością. Zastosowanie ekologicznego kruszywa do betonu lekkiego wpłynie pozytywnie na ochronę środowiska naturalnego.

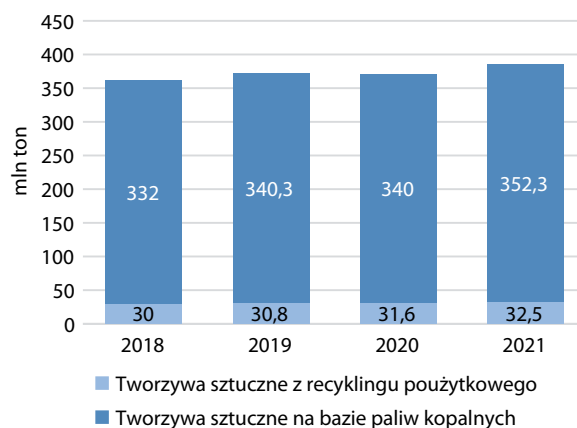
Słowa kluczowe: odpady poprodukcyjne, lekkie kruszywa sztuczne, recykling, mikroskopia skaningowa, zagospodarowanie odpadów.

Abstract: The article describes the possibility of using post-production plastic waste, such as ordinary and shrink film, in construction. Using specialized technology, a crushed aggregate with a grain size of up to 8 mm was produced from a mixture of PET/PVC/OPS (PPO) synthetic materials. These materials were derived from waste generated during the production of film labels. In the article the results of testing the properties of the recycled plastic aggregate, such as bulk and grain density, absorbability and mechanical parameters of concrete, were presented. Scanning microscope images for aggregate made from plastic waste and for concrete with its content were also presented. The use of pro-ecological aggregate for lightweight concrete will have a positive impact on protection of natural environment.

Keywords: post-production waste, lightweight artificial aggregates, recycling, scanning microscopy, waste management.

1. Wprowadzenie

Nowoczesne materiały syntetyczne mają szerokie zastosowanie w gospodarce, są podstawowym składnikiem wielu produktów, co umożliwia redukcję emisji CO₂ oraz obniżenie zużycia energii i wody. Tworzywa sztuczne mają kluczowe znaczenie w koncepcji gospodarki cyrkularnej i w zwalczaniu zmian klimatycznych. Pełne wykorzystanie tych materiałów nastąpi wtedy, gdy zredukuje się ich składowanie na wysypiskach poprzez recykling i ponowne zastosowanie w różnych sektorach przemysłu, w tym w budownictwie [3]. Dane z raportu „Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022” [6], dotyczące światowej produkcji plastiku przedstawiono na rysunku 1. Po stagnacji w 2020 r., spowodowanej pandemią Covid-19, produkcja tworzyw sztucznych w 2021 roku wzrosła na świecie do 384,8 mln ton. Z danych w raporcie [6] wynika, że w Chinach



Rys. 1. Światowa produkcja plastiku w latach 2018–2021 (tworzywa sztuczne na bazie paliw kopalnych – polimery wytwarzane z produktów petrochemicznych)

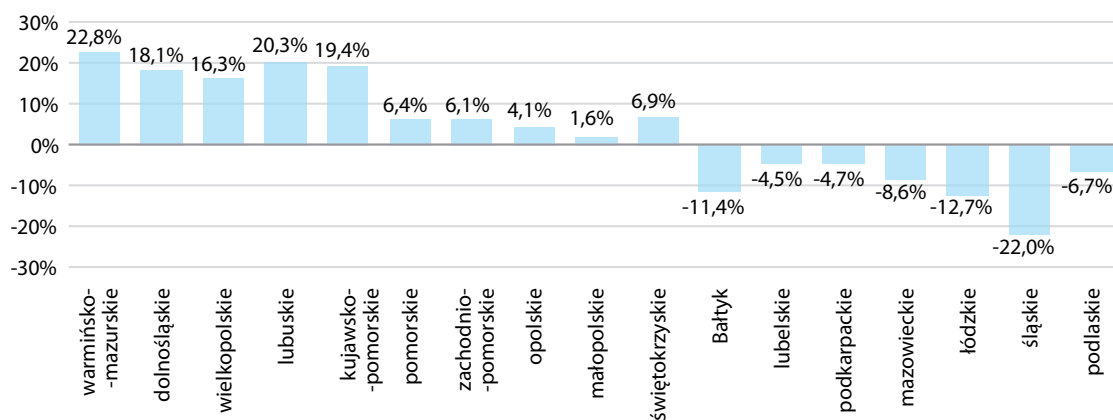
jest 1/3 światowej produkcji tworzyw sztucznych, która w latach 2017–2021 wzrosła z 29% do 32%, podczas gdy w Europie obniżyła się z 19% do 15%. W 2020 r. w UE zebrano 29,5 mln ton pokonsumpcyjnych odpadów tworzyw sztucznych. Ponadto stwierdzono, że wskaźniki recyklingu odpadów tworzyw sztucznych są 13 razy wyższe w przypadku selektywnej zbiórki odpadów w porównaniu ze zbiórką odpadów zmieszanych, co potwierdza zasadność segregacji odpadów. Obecnie wzrost wydobywania złóż naturalnych przyczynia się do znacznego ich zmniejszenia oraz wpływa negatywnie na środowisko naturalne. Z bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce według stanu na 31.12.2021 r. [1] wynika, że największy wzrost wydobywania piasków i żwiru w stosunku do 2020 r. odnotowano w województwach: warmińsko-mazurskim, lubuskim, kujawsko-pomorskim, dolnośląskim, wielkopolskim (od 22,8% do 16,3%). Jednocześnie w 40% województwach znacząco spadło wydobycie kruszywa naturalnego (rys. 2).

W pracy przedstawiono wykorzystanie mieszanych tworzyw sztucznych do produkcji kruszywa do betonu lekkiego, co przyczyni się do ochrony środowiska naturalnego i zmniejszenia ilości odpadów składowanych na wysypiskach.

2. Właściwości kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych

Kruszywo do betonu lekkiego wyprodukowano z mieszanki odpadów tworzyw sztucznych PET/PVC/OPS. Surowiec pochodził z odpadów poprodukcyjnych wytwarzanych podczas produkcji etykiet w postaci folii. Kruszywo wyprodukowano przy użyciu wyciśkarki dwuślimakowej o średnicy ślimaka 35 mm i mającej 11 stref grzejnych. W pierwszym etapie produkcji folię poddano zagęszczeniu oraz rozdrobnieniu do frakcji około 5 mm. W kolejnym etapie przetopiono w temperaturze około 270°C odpady z tworzyw sztucznych do postaci elementów prętowych o średnicy 16–20 mm. Ostatnim etapem było przekruszenie prętów w rozdrabniaczu do tworzyw sztucznych w celu uzyskania frakcji kruszywa 2–8 mm (rys. 3). Do zbadania właściwości kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych przygotowano trzy próbki, które przed przystąpieniem do badania wysuszono w temperaturze 110±5°C do stałej masy.

Rys. 2. Zmiany wydobywania piasków i żwirów w Polsce w 2021 r. w stosunku do 2020 r.

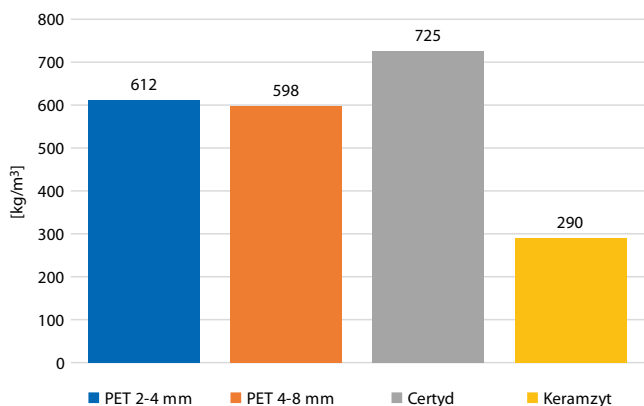


Rys. 3. Kruszywo sztuczne wyprodukowane z mieszanki PET/PVC/OPS

Zgodnie z procedurą badawczą zawartą w normach PN-EN 1097-3:2000 [9] i PN-EN 932-5:2012 [10] zbadano gęstość nasypową ekologicznego kruszywa lekkiego, wyniki pokazano na rysunku 4. Gdy porównamy ze sobą kruszywo popiołoporytowe certyd o gęstości nasypowej wynoszącej 725 kg/m³ i proekologiczne kruszywo z tworzyw sztucznych, to okaże się, że to drugie ma gęstość nasypową mniejszą o 18% (rys. 4). Co więcej, stosując środek spieniający w procesie produkcji tego innowacyjnego kruszywa, można zmniejszyć jego gęstość nasypową do wartości 460 kg/m³ [5]. Wyniki z własnych badań właściwości kruszyw lekkich, typu certyd, keramzyt, perlit, granisil i penostek opisano w pracach [2, 4, 5]. Przeprowadzono również badanie nasiąkliwości i gęstości ziarn na podstawie normy PN-EN 1097-6:2013-11 [11], z wykorzystaniem piknometru. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 5 i w tabeli 1.

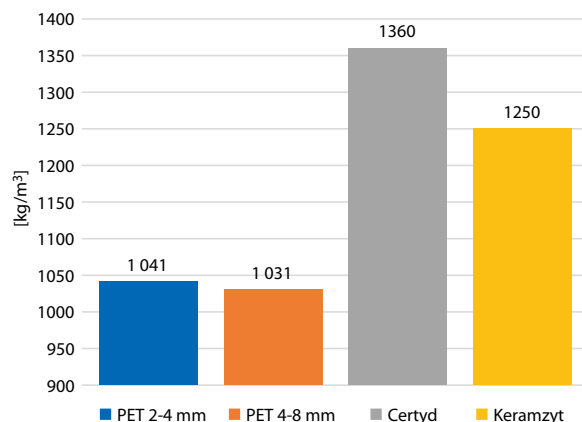
Tabela 1. Nasiąkliwość kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych o frakcji 2-4 i 4-8 mm

Rodzaj kruszywa	PET 2-4 mm	PET 4-8 mm	Certyd	Keramzyt
Nasiąkliwość [%]	1,56	1,12	18	35



Rys. 4. Gęstość nasypowa kruszyw z odpadów tworzyw sztucznych (PET) dla frakcji 2–4 mm i 4–8 mm oraz kruszywa lekkiego certyd i keramzyt

Porównując gęstość ziarn kruszyw lekkich, należy zauważyć, że kruszywo z odpadów tworzyw sztucznych ma niższą gęstość w stosunku do certydu o 24% i keramzytu o 17% (rys. 5), co ma bezpośredni wpływ na nasiąkliwość kruszywa. Niewątpliwie występuje duża różnica w nasiąkliwości lekkich kruszyw sztucznych. Zwykle wraz ze zmniejszeniem gęstości ziarn kruszyw wzrasta ich nasiąkliwość. Jednak w przypadku kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych nasiąkliwość jest minimalna i wynosi ok. 1,12–1,56% (tab. 1). Stanowi to znaczną różnicę w zestawieniu z istniejącymi kruszywami lekkimi, która wynosi w przypadku keramzytu nawet 95%.





Rys. 5. Gęstość ziarn kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych (PET) o frakcji 2–4 i 4–8 mm oraz kruszywa lekkiego certyd i keramzyt



Podczas badań właściwości kruszywa lekkiego z odpadów tworzyw sztucznych wykonano również zdjęcia mikroskopem skaningowym KEYENCE VHX 7000N, których opis zamieszczono w tabeli 2.

3. Zastosowanie ekologicznego kruszywa do betonu lekkiego

W celu oznaczenia właściwości betonu lekkiego na kruszywie z odpadów tworzyw sztucznych opracowano recepturę mieszanki betonowej o następującym składzie: 280 kg/m³ cementu, 154 kg/m³ wody zarobowej, 678 kg/m³ piasku

Tabela 2. Zdjęcia z opisem kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych

Lp.	Zdjęcie	Opis
1		struktura kruszywa jest w postaci nieregularnej; powierzchnia wykazuje znaczną szorstkość, co pozytywnie wpływa na kontakt kruszywa z matrycą cementową; pojawiają się tylko pojedyncze pory, co świadczy o braku zawilgocenia materiału wsadowego oraz o litej strukturze kruszywa, która sprzyja dużej wytrzymałości na miazdzenie;
2		na zdjęciu jest widoczna skala 1000 μm; uwidocznione są nieregularne kształty kruszywa, jak również jego chropowata powierzchnia; brak widocznych porów w kruszywie, świadczy o niskiej nasiąkliwości;

Lp.	Zdjęcie	Opis
3		na zdjęciu widoczna jest skala 200 μm; takie przybliżenie znacznie uwidacznia chropowatość kruszywa pokazaną również na zdjęciach 1 i 2; widoczne są kolorowe zabarwienia w strukturze kruszywa pochodzące z farby znajdującej się na etykietach z folii; równomiernie rozłożone punkty zabarwień świadczą o prawidłowym przetopieniu odpadów i ich wymieszaniu w procesie produkcji;
4		na zdjęciu widoczna jest skala 50 μm; widoczne są fragmenty włókniste, które mogły pojawić się w fazie kruszenia przetopionych odpadów z tworzyw sztucznych; widoczne są fragmenty świadczące o chropowatości kruszywa, sięgające rozmiarów 50 μm;

o frakcji 0–2 mm, 205 kg/m³ kruszywa z mieszanki odpadów o frakcji 2–4 mm i 270 kg/m³ o frakcji 4–8 mm, domieszka uplastyczniająca Chryso Omega 132 w ilości 2,8 kg/m³. Wykonano badania gęstości betonu i wytrzymałości betonu na ściskanie. Próbkę betonu poddano dojrzewaniu przez 28 dni, po czym wykonano badania właściwości betonu zgodnie z normami PN-EN 12390-7:2019-08 [8] i PN-EN 12390-3:2019-07 [7]. Wyniki zamieszczono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Wyniki gęstości betonu na kruszywie z odpadów tworzyw sztucznych

Lp.	Wymiary próbki [mm]			Ciężar [g]	Gęstość [kg/m ³]
	a	b	h		
1	150	150	150	5108	1513
2	150	150	150	5083	1506
3	150	150	150	5091	1508
4	150	150	150	5123	1518
5	150	150	150	5135	1521
6	150	150	150	5064	1500

Tabela 4. Wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu na kruszywie z odpadów tworzyw sztucznych

Lp.	Wymiary próbki [mm]			Pole przekroju [mm ²]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Średnia [MPa]
	a	b	h				
1	150	150	150	22500	479,6	21,32	21,53
2	150	150	150	22500	491,1	21,83	
3	150	150	150	22500	483,6	21,49	
4	150	150	150	22500	489,2	21,74	
5	150	150	150	22500	487,2	21,65	
6	150	150	150	22500	475,4	21,13	


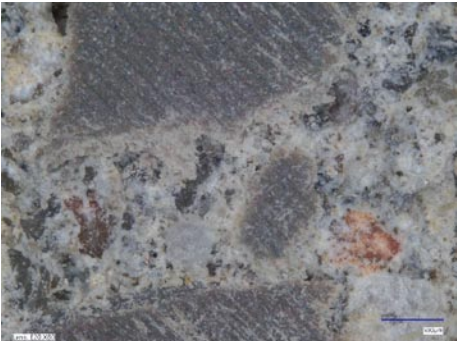
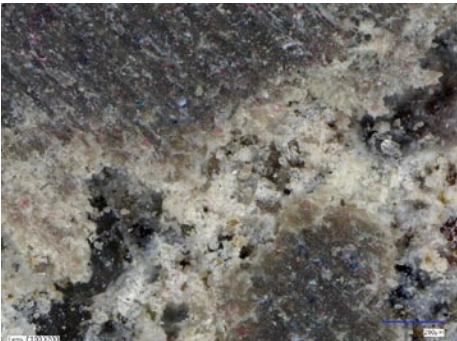
Beton lekki na kruszywie z odpadów tworzywa sztucznego osiągnął wytrzymałość na ściskanie 21,53 MPa, która jest porównywalna z wytrzymałością na ściskanie betonu na kruszywie keramzyt (21,2 MPa [2]), pomimo znacznie niższej zawartości cementu oraz wyższego współczynnika w/c.

Beton na kruszywie sztucznym poddano badaniu w mikroskopie skaningowym KEYENCE VHX 7000N (opis w tabeli 5). Analiza przekroju próbki betonowej wykazała występowanie porów w okolicy kruszywa, które powstały w wyniku odparowania niezwiązanej wody zarobowej. Ponadto zauważono jasną obwódkę na krawędziach kruszywa w strefie kontaktu z zaczynem cementowym (tab. 5, zdjęcie 3). Może to być efekt reakcji chemicznej pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym, co wpływa pozytywnie na połączenie kruszywa z zaczynem.

4. Podsumowanie

Uzyskane z badań właściwości kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych wskazują na jego duży potencjał w zastosowaniu do betonów lekkich. Może ono stanowić alternatywę dla kruszywa naturalnego i innych kruszyw lekkich stosowanych do betonu. Ponadto kruszywo z odpadów tworzyw sztucznych wydaje się być najbardziej ekologiczne z uwagi na niski ślad węglowy. Podczas jego produkcji uwalnia

Tabela 5. Zdjęcia przekroju próbki betonu lekkiego na kruszywie z odpadów tworzyw sztucznych

Lp.	Zdjęcie	Opis
1		zdjęcie wykonane w powiększeniu x20; kruszywo w postaci łamanej widoczne na przekroju próbki betonowej jest równomiernie rozłożone; miejscowo widoczne są puste przestrzenie w okolicy kruszywa, które świadczą o zbyt dużej ilości wody w mieszance betonowej; na kruszywie pojawiła się jasna obwódka, niewidoczna na zdjęciach samego kruszywa (tab. 2), a która może świadczyć o interakcji chemicznej na styku kruszywa i zaczynu cementowego;
2		zdjęcie wykonane w powiększeniu x80; takie powiększenie pozwala zauważyć znaczną ilość porów wokół kruszywa, co ewidentnie wpływa na kontakt kruszywo-zaczyn oraz na wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych; widoczne są ziarna kruszywa frakcji 0–2 mm;
3		zdjęcie wykonane w powiększeniu x200; takie powiększenie uwidocznilo krystaliczną strukturę zaczynu cementowego; znacznie lepiej widoczne są pory w okolicy kruszywa; w miejscach gdzie nie występują pory, widoczne jest dobre połączenie kruszywa z zaczynem cementowym;

się mniej CO₂, ponieważ jest dużo niższa temperatura przetwarzania odpadów na kruszywo (około 270°C) w porównaniu z innymi kruszywami lekkimi (certyd, keramzyt, perlit), które wymagają temperatur powyżej 1000°C [2].

Zastosowanie kruszywa z odpadów tworzyw sztucznych w sektorze budowlanym przyczyni się do rozwiązania problemu zagospodarowania tych odpadów na skalę globalną. Beton lekki z zastosowaniem ekologicznego kruszywa sztucznego może znaleźć zastosowanie m.in.: przy modernizacji i wzmacnianiu istniejących konstrukcji, gdzie z uwagi na optymalizację obciążeń istotne jest zastosowanie lekkich materiałów, również jako wkład do ekranów akustycznych i w podwalinach pod ekrany akustyczne, do ciepłych posadzek przemysłowych, jak i posadzek w obiektach mieszkalnych oraz do produkcji galerii betonowej i obiektów małej architektury ogrodowej.

Badania zostały zrealizowane w ramach prac WZ/WB-III/6/2023 i WI/WB-III/1/2021 w Politechnice Białostockiej i sfinansowane z subwencji badawczej przekazanej przez MEiN.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2021 r., Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2022
- [2] Bujnarowski K., Grygo R., Właściwości kruszyw lekkich do zastosowania w budownictwie, Instal, 7/8–2022, str.71–75, doi:10.36119/15.2022.7-8.10
- [3] Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., Production, use, and fate of all plastics ever made, Science Advances 3(7)2017, doi.org/10.1126/sciadv.1700782
- [4] Grygo R., Bujnarowski K., Prusiel J. A., Analysis of the possibility of using plastic post-production waste in construction, Ekonomia i Środowisko, tom 81, 2/2022, str. 241–256, doi:10.34659/eis.2022.81.2.467
- [5] Grygo R., Prusiel J. A., Bujnarowski K., Use of ecological lightweight aggregates in reinforced concrete structures, Ekonomia i Środowisko 4/2021, str. 112–132
- [6] Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022. Belgium, October, 2022
- [7] PN-EN 12390-3:2019-07: Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [8] PN-EN 12390-7:2019-08: Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu
- [9] PN-EN 1097-3:2000: Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości
- [10] PN-EN 932-5:2012: Badania podstawowych właściwości kruszyw – Część 5: Wyposażenie podstawowe i wzorcowanie
- [11] PN-EN 1097-6:2013-11: Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości
- [12] PN-EN 13055:2016-07: Kruszywa lekkie