

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk^{1)*}

ORCID: 0000-0003-0840-5048

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki¹⁾

ORCID: 0000-0002-7577-6319

Wpływ piasku korundowego na właściwości betonu cementowego

Influence of corundum sand on the properties of cement concrete

DOI: 10.15199/33.2023.09.03

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu odpadowego piasku korundowego używanego do piaskowania konstrukcji metalowych na właściwości betonu. Piasek korundowy zastosowano jako zamiennik 25, 50 i 75% objętości kruszywa drobnego. Przeprowadzone zostały badania konsystencji mieszanek betonowych i gęstości objętościowej betonów. Badano wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu betonów po 7 i 28 dniach dojrzewania. Określono również nasiąkliwość betonów i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem. Badania potwierdziły możliwość zastosowania piasku korundowego jako zamiennika kruszywa drobnego w betonach cementowych.

Słowa kluczowe: beton cementowy; piasek korundowy; zamiennik kruszywa drobnego; tlenek glinu; właściwości mechaniczne.

Abstract. The paper presents the results of research on the influence of waste corundum sand used for sandblasting metal structures on the properties concrete. Corundum sand was used as a substitute for sand in the amount of 25%, 50 and 75% of the fine aggregate volume. Tests were carried out on the consistency of concrete mixes and the bulk density of concretes. The compressive strength and tensile splitting strength were measured at the age of the concrete of 7 and 28 days. The water absorption of concretes and the depth of water penetration under pressure were also determined. The tests confirmed the possibility of using corundum sand as a substitute for fine aggregate in cement concrete.

Keywords: cement concrete; corundum sand; substitute for fine aggregate; aluminum oxide; mechanical properties.

Zasada 3R oznaczająca redukcję ilości odpadów, ponowne użycie tych, których nie udało się zredukować oraz których nie można użyć ponownie, jest stosowana m.in. w odniesieniu do produkcji materiałów budowlanych, w tym betonu. Przemysł wytwarza ogromne ilości stałych produktów ubocznych. Wiele odpadów przemysłowych ma właściwości hydrauliczne lub pucolanowe, dlatego stosowane są jako częściowy zamiennik cementu w ilości nawet do 95% jego masy. W produkcji cementu i betonu od wielu lat na skalę przemysłową wykorzystuje się odpady pochodzące z energetyki i hutnictwa, takie jak popiół lotny, pyły krzemionkowe czy granulowany żużel wielkopiecowy [1 – 4].

W odniesieniu do betonów cementowych najwięcej badań prowadzi się z wykorzystaniem różnych rodzajów odpadów przemysłowych. Kierunek ten jest jak najbardziej zasadny z punktu widzenia ekologicznego i ekonomicz-

nego, gdyż to właśnie kruszywo naturalne stanowi 70 – 80% objętości betonu. Pomimo dużej różnorodności badanych odpadów przemysłowych, możliwości ich zastosowania jako zamiennika kruszywa w betonach cementowych, przy założeniu, że nie nastąpiło pogorszenie ich właściwości mechanicznych i urabialności, najczęściej oscylują wokół 10% całkowitej masy kruszywa zastosowanego w badanym betonie. Tak mała ilość odpadu zastosowanego jako zamiennik kruszywa nie jest na ogół opłacalna w produkcji przemysłowej betonu [5]. Przykładem odpadów przemysłowych wykorzystywanych jako zamiennik kruszywa w betonach może być szkło, guma, polistyren ekspandowany czy ścierniwo stosowane w obróbce strumieniowo-ścierniej [6 – 10], która służy do gratowania materiałów lub przygotowania ich powierzchni do kolejnych zabiegów technologicznych. Proces ten jest stosowany m.in. podczas usuwania starych warstw farby i zanieczyszczeń, takich jak rdza [11]. Odpady powstające w tych procesach, to zużyte ścierniwo, które musi zostać nieszkodliwione lub poddane recyklingowi [12].

Oprócz tradycyjnego piasku kwarcowego, w procesach przemysłowej obróbki strumieniowo-ścierniej coraz częściej stosowane są syntetyczne materiały ściernie zawierające tlenek glinu, takie jak elektrokorund lub piasek korundowy. Ścierniwa te mają dwie istotne zalety w porównaniu z piaskiem: są trwalsze i wytwarzają mniej pyłu, a ponadto są zazwyczaj odzyskiwane i ponownie wykorzystywane, np. odpadowy tlenek glinu w betonach SCC jako zamiennik kruszywa drobnego [13] oraz w nawierzchniach betonowych [14].

W artykule przedstawiono wyniki badań konsystencji oraz wybranych właściwości fizykomechanicznych betonów cementowych zawierających 0; 25; 50 i 75% odpadowego piasku korundowego (PK), zastosowanego jako zamiennik kruszywa drobnego. Celem tych badań jest określenie użyteczności odpadowych materiałów na bazie tlenku glinu w betonach cementowych.

Zastosowane materiały i metody badań

Zaprojektowano 4 różne betony cementowe zawierające różną ilość piasku korundowego. Jest to materiał odpadowy o bar-

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*} Adres do korespondencji: elzbieta.horszczaruk@zut.edu.pl



Fot. 1. Odpadowy piasek korundowy (PK)
Photo 1. Waste corundum sand (PK)

wie szarobrazowej, pochodzący z przemysłowej obróbki strumieniowo-ściernej powierzchni stalowych konstrukcji wsporczych i ogrodzeń (fotografia 1). Wszystkie betony wykonano z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, przyjmując stałą ilość spoiwa 340 kg/m^3 i stały wskaźnik $w/c = 0,5$. Jako kruszywo podstawowe zastosowano piasek rzeczny oraz żwir frakcjonowany o uziarnieniu 2–8 mm i 8–16 mm. Nasiąkliwość piasku zastosowanego w badaniach wynosiła 2,1%, natomiast nasiąkliwość PK 3,2%. Uziarnienie kruszyw zastosowanych w badanych betonach przedstawiono w tabeli 1.

PK zastosowano w badanych betonach, zastępując 25, 50 i 75% objętości piasku. Maksymalne uziarnienie piasku korundowego nie przekraczało 1 mm. Uziarnienie piasku korundowego przedstawiono w tabeli 1, a skład chemiczny i właściwości fizyczne w tabeli 2. Zanieczyszczenia wchodzące w skład PK, pochodzące z czyszczonych powierzchni, to przede wszystkim tlenki żelaza (Fe_2O_3) i krzemu (SiO_2) oraz śladowe ilości Ni i Cr (poniżej 0,3%).

Tabela 1. Uziarnienie kruszyw stosowanych w badaniach

Table 1. Granulation of the aggregates used in the tests

Kruszywo	Pozostałość [%] na sicie o oczku [mm]										
	< 0,063	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Piasek 0/2 mm	0	0	13,6	0,3	47,7	26,3	4,8	6,7	0,6	0	0
Żwir 2/8 mm	0	0	0	0,9	0,9	7,9	3,5	35,1	49,4	2,3	0
Żwir 8/16 mm	0	0	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	9,3	84,8	4,8
Piasek korundowy	1,2	2,8	18,1	56,9	18,6	1,4	0	0	0	0	0

Tabela 2. Skład chemiczny i właściwości fizyczne piasku korundowego

Table 2. Chemical composition and physical properties of corundum sand

Al_2O_3 [%]	SiO_2 [%]	Fe_2O_3 [%]	TiO_2 [%]	Straty prażenia [% ubytku masy]	Gęstość nasypowa [kg/m^3]	Gęstość właściwa [kg/m^3]	Twardość w skali Mohsa
93,42	2,54	0,57	2,32	0,01	1950	3680	9

W celu sprawdzenia, jak wpływa PK na konsystencję i urabialność badanych mieszank betonowych zastosowano w ich składzie stałą ilość superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksylowych (tabela 3).

Wykonano badanie konsystencji wszystkich zaprojektowanych mieszank betonowych metodą opadu stożka zgodnie z normą PN-EN 12350-2, a także badanie gęstości objętościowej. Pozostałe badania zostały przeprowadzone na próbkach sześciennych o wymiarach $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$. Próbkę betonów rozformowano po 24 h i były przechowywane w komorze klimatycznej do czasu dalszych badań.

Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3, z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej, po 7 i 28 dniach dojrzewania próbek, a wytrzy-

Tabela 3. Skład mieszank betonowych [kg/m^3]

Table 3. Composition of concrete mixes [kg/m^3]

Oznaczenie próbki	Cement	Woda	Piasek 0/2 mm	Piasek korundowy	Żwir 2/8 mm	Żwir 8/6 mm	Superplastyfikator
BR	340	170	580	0	720	580	4,8
B25PK	340	170	435	165	720	580	4,8
B50PK	340	170	290	330	720	580	4,8
B75PK	340	170	145	495	720	580	4,8

Tabela 4. Wyniki badań mieszank betonowych i betonów z różną zawartością PK

Table 4. Test results of concrete mixes and concretes with different PK content

Oznaczenie próbki	Opad stożka [mm]	Klasa konsystencji	Gęstość objętościowa [kg/m^3]		Średnia nasiąkliwość betonu [%]	Max. głębokość penetracji wody [mm]
			mieszanki	betonu w stanie suchym		
BR	165	S4	2360	2240	3,8	43
B25PK	68	S2	2440	2340	4,6	48
B50PK	50	S2	2505	2430	4,1	53
B75PK	33	S1	2595	2515	5,3	68

małość próbek oznaczono z dokładnością 0,1 MPa.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 12390-6 na maszynie wytrzymałościowej o maksymalnym obciążeniu 100 kN. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem oznaczono na próbkach sześciennych o boku 100 mm, po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą PN-EN 12390-8.

Badanie gęstości objętościowej betonów w stanie suchym wykonano na podstawie normy PN-EN 12390-7. Do badań wytrzymałościowych przygotowano po 6 próbek każdego rodzaju betonu, do pozostałych po 3 próbki.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań konsystencji mieszank betonowych, gęstości objętościowej mieszank i stwardniałych beto-

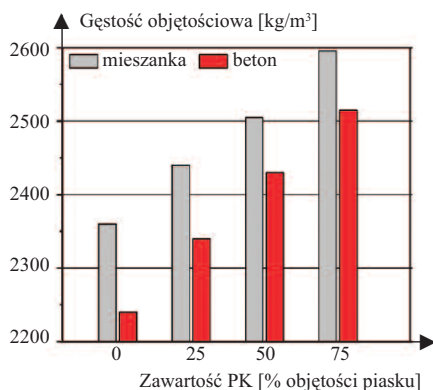
nów oraz maksymalnej głębokości penetracji wody pod ciśnieniem badanych betonów zestawiono w tabeli 4. Z analizy badań konsystencji wynika, że wraz ze wzrostem udziału PK w mieszance betonowej klasa konsystencji zmniejszyła się do S2, a w przypadku B75PK do S1 (fotografia 2). Zaobserwowano spadek wilgotności mieszank betonowych przy stałej ilości superplastyfikatora.

Gęstość mieszank betonowych B25PK, B50PK i B75PK zwiększyła się odpowiednio o 3,4; 6,14 i 9,95% w porównaniu z mieszanką referen-



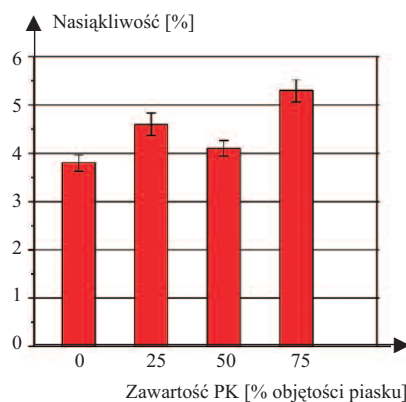
Fot. 2. Badanie konsystencji mieszanki B75PK – metoda opadu żożka
Photo 2. Testing the consistency of the B75PK mix – slump test

cyjną BR. Podobnie gęstość stwardniałych betonów B25PK, B50PK i B75PK zwiększała się wraz ze wzrostem zawartości PK w betonie odpowiednio o 4,4; 8,4 i 11,23%. Duża gęstość mieszanek zawierających PK była spowodowana dużą gęstością cząstek PK i efektem lepszego upakowania cząstek kruszywa w matrycy cementowej [13]. Na podstawie pomiaru gęstości wszystkie badane betony zaliczane są do betonów zwykłych, ponieważ ich gęstość wynosiła $2200 \div 2600 \text{ kg/m}^3$ (rysunek 1).

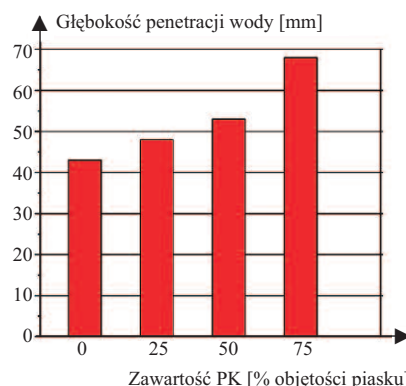


Rys. 1. Gęstość objętościowa mieszanek i betonów z różną zawartością odpadowego piasku korundowego PK
Figure 1. Bulk density of mixes and concretes with different content of waste corundum sand PK

Duża zawartość drobnych frakcji w PK (0,25 – 0,50 mm) była głównym powodem zwiększenia nasiąkliwości badanych betonów (rysunek 2). Zaobserwowano również zmniejszenie szczelności betonów zawierających PK w porównaniu z betonem referencyjnym BR w badaniu głębokości penetracji wody pod ciśnieniem (rysunek 3). Jak wynika z badań [13] poprawę szczelności betonów z PK można uzyskać, stosując dodatek popiołów lot-



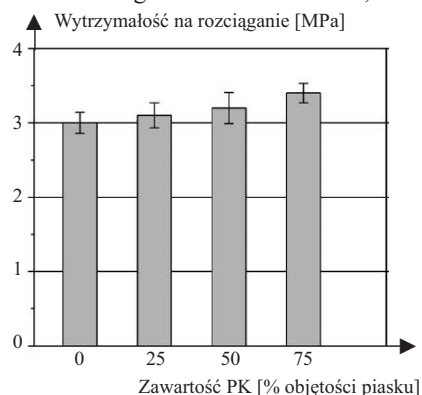
Rys. 2. Średnia nasiąkliwość badanych betonów
Fig. 2. Average water absorption of tested concretes



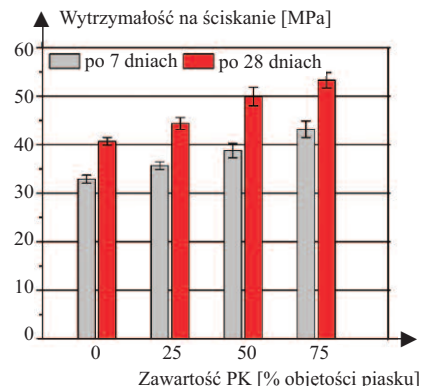
Rys. 3. Maksymalna głębokość penetracji wody w badanych próbkach betonowych
Fig. 3. Maximum depth of water penetration of tested concrete samples

nych, które mogą również poprawić urabialność mieszanek betonowych z PK. Wytrzymałość mechaniczną badanych betonów przedstawiono w tabeli 5 oraz na rysunkach 4 i 5.

Wraz ze wzrostem zawartości PK w betonie średnia wytrzymałość na rozciąganie próbek (rysunek 4) zwiększyła się o 3,3 – 13,3% w porównaniu z wytrzymałością próbek referencyjnych BR. Wzrost wytrzymałości na rozciąganie wynika przede wszystkim z ostrego kształtu ziaren PK, któ-



Rys. 4. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach
Fig. 4. Average splitting tensile strength after 28 days



Rys. 5. Średnia wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach
Fig. 5. Average compressive strength after 7 and 28 days

Tabela 5. Średnia wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i na ściskanie badanych betonów

Table 5. Average splitting tensile strengths and compressive strengths of the tested concretes

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach [MPa]	% wytrzymałości kontrolnej	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach [MPa]	% wytrzymałości kontrolnej	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	% wytrzymałości kontrolnej
BR	3,0	100	32,9	108,5	40,7	100
B25PK	3,1	103,3	35,7	2340	44,4	109,1
B50PK	3,2	106,6	38,8	2430	49,9	122,6
B75PK	3,4	113,3	43,2	2515	53,3	130,9

re lepiej klinują się w matrycy cementowej niż ziarna piasku. Przyczyną wzrostu wytrzymałości może być również większa o 50% nasiąkliwość PK niż piasku [14].

Wytrzymałość na ściskanie badanych betonów zwiększyła się również wraz ze wzrostem zawartości PK jako zamiennika kruszywa drobnego (rysunek 5). Wytrzymałość na ściskanie próbek zawierających PK, po siedmiu dniach dojrzewania, wynosiła 35,7 – 43,2 MPa. W odniesieniu do wytrzymałości próbek referencyjnych BR, średnia siedmiodniowa wytrzymałość na ściskanie próbek B25PK, B50PK i B75PK zwiększyła się odpowiednio o 8,5; 17,9 i 31,3%. Podobny wzrost średniej wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano po 28 dniach dojrzewania próbek. Wytrzymałość na ściskanie próbek B25PK, B50PK i B75PK wynosiła 44,4 – 53,3 MPa i zwiększyła się odpowiednio o 9,1, 22,6 i 30,9% w porównaniu ze średnią wytrzymałością betonu referencyjnego BR.

Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie przypisano lepszemu upakowaniu drobnych ziaren PK oraz większej nasiąkliwości PK w porównaniu z piaskiem, która spowodowała zmniejszenie efektywnego wskaźnika w/c. Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, mechaniczna zdolność blokowania między drobnymi cząstkami PK a matrycą cementową poprawia sztywność strefy przejściowej, co przekłada się również na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie [15]. Obie te właściwości poprawiają mikrostrukturę zaprawy w betonie oraz właściwości w strefie przejściowej kruszywo-zaczyn przy wystarczającej ilości spoiwa do otulenia ziaren PK [13].

W badaniach kompozytów cementowych i geopolimerów potwierdzono, że PK mogą pełnić rolę wypełniacza o charakterze obojętnym [13 – 16], a w niektórych przypadkach zaobserwowano ograniczoną reaktywność PK o bardzo drobnym uziarnieniu [17].

Wnioski

Na podstawie badań dotyczących zastąpienia drobnego kruszywa odpadami tlenku glinu w postaci piasku korundo-

wego PK w betonach cementowych stwierdzono, że:

1) PK stosowany w dużej ilości jako zamiennik piasku w betonach zwykłych cementowych pogarsza konsystencję (płynność) mieszanek betonowych. W celu poprawy konsystencji i urabialności mieszanki betonowej konieczne byłoby zwiększenie ilości plastyfikatorów/superplastyfikatorów, a to podroży jej produkcję;

2) dodatek PK zwiększa gęstość mieszanki oraz stwardniałego betonu;

3) zastosowanie PK jako zamiennika kruszywa drobnego zwiększa wytrzymałość na ściskanie betonów cementowych, po 7 i 28 dniach dojrzewania, nawet o jedną trzecią w porównaniu z wytrzymałością betonu niezawierającego PK;

4) wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów z piaskiem korundowym zwiększa się wraz z jego zawartością w betonie, ale nie tak znacznie, jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie (wzrost nie przekroczył 12% w przypadku próbek betonowych zawierających 75% PK);

5) w przypadku próbek betonowych zawierających PK następuje zwiększenie nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, ale właściwości uzyskane w badaniach nie wykluczają zastosowania tych betonów do wykonywania konstrukcji budowlanych.

Zastosowanie PK w betonach cementowych zwykłych jako zamiennika kruszywa drobnego wykazuje duży potencjał aplikacyjny zarówno pod względem poprawy właściwości mechanicznych betonu, jak i aspektów środowiskowych związanych z ograniczeniem zużycia kruszywa naturalnego do jego produkcji.

Literatura

- [1] Singh N, Bhardwaj A. Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construct Build Mater.* 2020; 233: 117276.
- [2] Sun J, Shen X, Tan G, Tanner JE. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash. *J Therm Anal Calorim.* 2019; 136 (2): 565e80.
- [3] Ganesh P, Murthy AR. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. *Construct Build Mater.* 2019; 197: 667e80.

[4] Qureshi LA, Ali B, Ali A. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Construct Build Mater.* 2020; 263: 120636.

[5] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res.* 2007; 37: 735 – 742.

[6] Chung SY, Abd Elrahman M, Sikora P, Rucińska T, Horszczaruk E, Stephan D. Evaluation of the Effects of Crushed and Expanded Waste Glass Aggregates on the Material Properties of Lightweight Concrete Using Image-Based Approaches. *Materials.* 2017; DOI: 10.3390/ma10121354.

[7] Ołdakowska E. Ocena wybranych właściwości betonów zwykłych z rozdrobnioną gumą ze zużytych opon samochodowych. *Ecological Engineering.* 2015; DOI: 10.12912/23920629/58902.

[8] Akcaozoglu S, Atis CD, Akcaozoglu K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Manage.* 2010; DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.

[9] Medina NF, Medina DF, Hernandez-Olivares F, Navacerrada MA. Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling. *Constr Build Mater.* 2017; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196.

[10] Zain MFM, Islam MN, Radin SS, Yap SG. Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag. *Cem. Concr. Compos.* 2004; 26: 845 – 851

[11] Aurich JC, Linke B, Hauschild M, Carrella M, Kirsch B. Sustainability of abrasive processes. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2013; 62: 653 – 672.

[12] Borucka-Lipska J, Techman M, Skibicki S. Use of contaminated sand blasting grit for production of cement mortars. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/3/032055art.no.032055>.

[13] Sua-iam G, Makul N. Rheological and mechanical properties of cement-fly ash self-consolidating concrete incorporating high volumes of alumina-based material as fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2015; 95: 736 – 747.

[14] Pranav S, Lahoti M, Shan X, En-Hua Yang E-H, Muthukumar G. Economic input-output LCA of precast corundum-blended ECC overlay pavement. *Resources, Conservation, and Recycling.* 2022; 184: 106385.

[15] Sua-iam G, Makul N. Use of recycled alumina as fine aggregate replacement in self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 2013; 47: 701 – 710.

[16] Dal Poggetto G, Kittisayarm P, Pintasiri S, Chiyasak P, Leonelli C, Chaysuwat, D. Chemical and Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymers with Waste Corundum Powder Resulting from Erosion Testing. *Polymers.* 2022; 14: 5091.

[17] Dal Poggetto G, D'Angelo A, Catauro M, Barbieri L, Leonelli C. Recycling of Waste Corundum Abrasive Powder in Mk-Based Geopolymers. *Polymers.* 2022, 14, 2173.

Przyjęto do druku: 17.08.2023 r.