

KOMPOZYTY CEMENTOWE MODYFIKOWANE AKTYWOWANYM TERMICZNIE DODATKIEM RECYKLINGOWYM

Katarzyna Kalinowska-Wichrowska✉

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, Białystok

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano wyniki badań własnych nad kompozytami cementowymi, których skład zmodyfikowano dodatkiem recyklingowym powstałym (obok kruszyw recyklingowych) w wyniku specjalnie opracowanego procesu recyklingu betonu objętego polskim patentem PAT.229887 (2018). Wykorzystanie tak przygotowanej zaprawy recyklingowej w charakterze dodatku typu II lub jedynie wypełniacza w kompozytach cementowych to trafna droga do zagospodarowania tego materiału i silny akcent w kierunku zrównoważonego budownictwa. Jak dowodzą wyniki badań, odpowiednio dobrane parametry procesu obróbki cieplno-mechanicznej pozwalają na aktywację właściwości pucolanowych tego materiału. Proponowana metoda recyklingu jest przykładem kompleksowego rozwiązania problemu, jakim jest całkowite przetworzenie gruzu betonowego w wartościowe produkty wtórne i ponowne włączenie ich do procesu produkcji budowlanej.

Słowa kluczowe: zaprawa recyklingowa, recykling betonu, zrównoważony rozwój, gospodarka odpadami

WSTĘP

Drobna frakcja z recyklingu betonu to głównie fragmenty rozdrobnionych kruszyw, piasek recyklingowy oraz stary zaczyn. W badaniach Il'iny i Mukhiny (2016) badano skład chemiczny zaprawy recyklingowej i stwierdzono, że zawiera ona uwodnione cząstki cementu oraz drobne kruszywo. Zawartość objętościowa zaprawy na kruszywach recyklingowych może wynosić 41% (Abbas i in., 2008; Nam, An i Youn, 2016). W innych badaniach stwierdzono także, że w obrębie kruszywa recyklingowego (zaprawy) występuje nieprzehydratyzowany cement, wodorotlenek wapnia (CH) i krzemian dwuwapniowy (C₂S) (Poon, Qiao i Chan, 2006; Chai, Monismith i Harvey, 2009) i są one zdolne do uwodnienia i tworzenia produktów rehydratacji (Shui, Xuan, Wan i Cao, 2008; Paige-Green, 2010). W związku z tym, jak podali Lotfi,

Eggimann, Wagner, Mróz i Deja (2015), w trakcie produkcji kompozytów cementowych z wykorzystaniem wtórnych zapraw można zmniejszyć zużycie cementu o 10%. Zważywszy na znaczną ilość nieprzehydratyzowanego cementu znajdującego się w drobnej frakcji z recyklingu betonu, Bordy, Younsi, Aggoun i Fiorio (2017) analizowali właściwości kompozytów wykonanych z substytutem drobno zmielonego proszku cementowego. Zauważono, że w zaczynie było około 24% aktywnego nieprzereagowanego klinkieru, który może na nowo ulec hydratacji. Niestety parametry wytrzymałościowe takich kompozytów uległy spadkowi. Shui i inni (2008) studiowali właściwości wiążące takiego materiału po jego prażeniu w temperaturze 800°C, jednak ze względu na kalcynację węgla nie uzyskano oczekiwanych rezultatów. Ponowne zastosowanie

✉k.kalinowska@pb.edu.pl

drobnej frakcji recyklingowej w kompozytach cementowych jest chętnie podejmowanym tematem badań naukowców, a sam materiał wydaje się rokować jako wartościowy składnik takich kompozytów. Najbardziej istotną kwestią pozostaje jednak odpowiednie jego uzdatnienie w celu uzyskania poprawy parametrów kompozytów, np. wytrzymałościowych.

MATERIAŁ I METODY

Charakterystyka surowców

Do badań zastosowano cement, piasek i zaprawę recyklingową. Cement portlandzki: CEM I 42,5R odpowiadał wymogom normy PN-EN 197-1. Wykorzystany piasek spełnia normę CEN frakcji 0–2 mm i ma certyfikat zgodności z normą PN-EN 196-1:2006. Został on dostarczony (w workach o masie netto 1350 ± 5 g) z firmy KWARCMIX. Zaprawę recyklingową uzyskano z odsiania frakcji mniejszej od 0,25 mm, pochodzącej z obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego (parametry obróbki według planu eksperymentu). Gruz betonowy pochodził z krawężników drogowych po trzyletniej eksploatacji. Beton pierwotny (klasa wytrzymałości C35/35) zawierał 360 kg cementu na 1 m^3 mieszanki betonowej, przy zachowaniu proporcji wody do cementu (w/c) na poziomie 0,5. W przyjętym eksperymencie 25% masy potrzebnego cementu zastąpiono zaprawą recyklingową.

Metodyka badań

Badania wytrzymałości na zginanie przeprowadzono na sześciu próbkach losowo wybranych z każdej serii liczącej 18 beleczek o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm, a badania wytrzymałości na ściskanie wykonano na 12 przelomach tych próbek ($4 \times 4 \times 8$ cm) uzyskanych po wykonaniu badania wytrzymałości na zginanie. Badania wykonano z użyciem maszyny wytrzymałościowej zgodnie z normą PN-EN 196-1:2006.

Badanie konsystencji zapraw wykonano metodą stolika rozpliwowego według normy PN-EN 1015-3:2000/A1:2005.

Eksperyment badawczy

Doświadczenie zakładało określenie najkorzystniejszej temperatury i czasu prażenia zaprawy recyklingowej (pozyskanej z obróbki termiczno-mechanicznej

gruzu betonowego) wykorzystanej jako zamiennik części cementu na wybrane właściwości kompozytów cementowych. W pierwszej kolejności gruz betonowy poddano obróbce termiczno-mechanicznej, która polegała na jego wyprażeniu w piecu termicznym, a następnie mechanicznemu odspajaniu zaprawy od kruszywa, która odbywała się w bębnie Los Angeles nastawionym na 500 obrotów. Jednorazowy wsad wynosił około 30 kg. Parametry obróbki termicznej stały się czynnikami zmiennymi w zaplanowanym eksperymencie. Metoda i sposób przyjętej obróbki gruzu betonowego są efektem wieloletnich badań zespołu badawczego z Politechniki Białostockiej i przedmiotem patentu PAT.229887 (2018).

Przedziały zmienności czynników wejściowych (ilościowych) przedstawiają się następująco:

- X_1 – temperatura prażenia gruzu betonowego (finalnie zaprawy) – 430–770°C;
- X_2 – czas prażenia gruzu betonowego (finalnie zaprawy) – 31–90 min.

W przyjętym eksperymencie 25% masy potrzebnego cementu zastąpiono zaprawą recyklingową uzyskaną po przesianiu przez sito o średnicy oczek 0,25 mm gruzu betonowego poddanego opisanej wcześniej obróbce. Użycie zaprawy recyklingowej w tej ilości pozwala jednocześnie na kwalifikację materiału pod kątem dodatku pucolanowego według normy PN-EN 450-1:2012.

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnych opisów matematycznych rozpatrywanych funkcji celu i możliwość skrócenia liczby prób. Eksperyment oparto na planie dwuczynnikowym polisekcyjno-rotalno-quasi-uniformalnym (PS/DS.-P: $\lambda(\tilde{\lambda})$, $i = 2$) z dwukrotnym powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym. Macierz planowania eksperymentu dla wielkości kodowanych i rzeczywistych przedstawiono w tabeli 1.

Próbki laboratoryjne zostały wykonane w 10 różnych seriach (seria 9 powtórzona). Wykonano także serię kontrolną (11) – bez dodatku zaprawy recyklingowej oraz serię 12 zawierającą dodatek zaprawy recyklingowej niepoddawanej obróbce termicznej. Po 27 dniach dojrzewania w warunkach wodnych wykonano pomiary wytrzymałości na zginanie i nasiąkliwości na beleczkach o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm oraz wytrzymałości

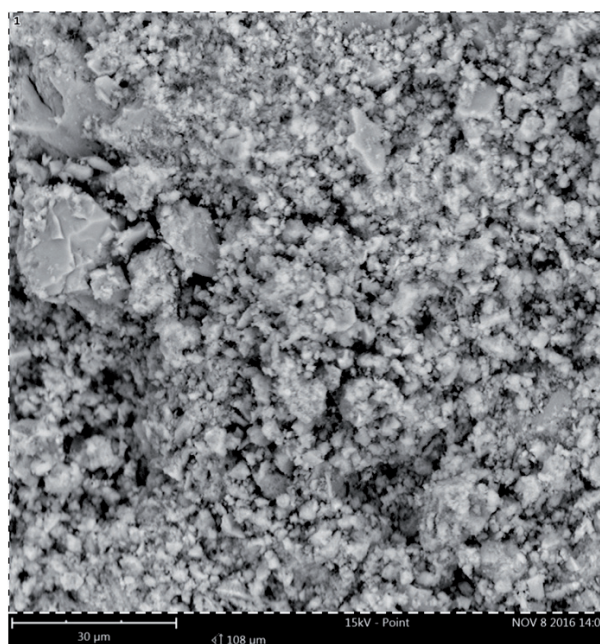
Tabela 1. Macierz planowania eksperymentu dla naturalnych i kodowanych czynników wejściowych w postaci temperatury prażenia (X_1) i czasu prażenia (X_2) gruzu betonowego

Table 1. The experiment planning matrix for natural and coded input factors in the form of roasting temperature (X_1) and roasting time (X_2) of concrete debris

Seria Series	Wielkości kodowane Coded values		Wielkości rzeczywiste Real values	
	x_1	x_2	X_1 [°C]	X_2 [min]
1	-1	-1	550	39
2	-1	1	550	81
3	1	-1	650	39
4	1	1	650	81
5	-1,414	0	430	60
6	1,414	0	770	60
7	0	-1,414	600	30
8	0	1,414	600	90
9	0	0	600	60
10	0	0	600	60

na ściskanie na próbkach o wymiarach $4 \times 4 \times 8$ cm pochodzących z przełamania beleczek o wymiarach $4 \times 4 \times 16$ cm. Receptury poszczególnych mieszanek zapraw cementowych przedstawiono w tabeli 2.

Na rysunku 1 zamieszczono zdjęcie skaningowe zaprawy recyklingowej poddanej prażeniu w 770°C . Widoczne są na nim spieki charakterystyczne dla struktury cementowej poddanej obróbce termicznej w wysokiej



Rys. 1. Zdjęcie SEM zaprawy recyklingowej po obróbce termicznej w 770°C

Fig. 1. The SEM photo of recycled mortar after calinated in 770°C

temperaturze. Oprócz tego widoczne są prawdopodobnie resztki nieprzehydratyzowanego cementu.

Skład tlenkowy wykonany za pomocą techniki EDS jest następujący: wapń 66,82; krzem 16,23; glin 13,87; siarka 2,11 i magnez 0,97.

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiaru konsystencji wybranych serii zapraw z wykorzystaniem materiału recyklingowego.

Tabela 2. Receptury mieszanek kompozytów cementowych na jedną formę (trzy beleczki $4 \times 4 \times 16$ cm)

Table 2. Mixtures of cement composites with one form (three bars $4 \times 4 \times 16$ cm)

Seria Series	Proporcja w/c + zaprawa w/c + mortar ratio	CEM I 42,5R [g]	Zaprawa recyklingowa Recycling mortar [g]	Woda Water [cm ³]	Piasek normowy Standard sand [g]
Serie podstawowe (1–10) Basic series (1–10)	0,5	337,5	112,5	225	1350
Seria kontrolna (11) Control (11)	0,5	450	0	225	1350
Seria dodatkowa (12), zaprawa recyklingowa bez obróbki termicznej Extra series (12), recycling mortar without thermal treatment	0,5	337,5	112,5	225	1350

Tabela 3. Zestawienie wyników konsystencji badanych kompozytów cementowych (świeżych zapraw)

Table 3. Comparison of the consistency results of the cementitious composites tested (fresh mortars)

Rodzaj kompozytu Type of composite	Miara konsystencji ^a Consistency mass [cm]
Zaprawa z dodatkiem zaprawy recyklingowej poddanej uprzedniemu prażeniu w 430°C Standard mortar with addition recycling mortar calcinated in 430°C	15
Zaprawa z dodatkiem zaprawy recyklingowej poddanej uprzedniemu prażeniu w 650°C Standard mortar with addition recycling mortar calcinated in 650°C	14
Zaprawa z dodatkiem zaprawy recyklingowej poddanej uprzedniemu prażeniu w 770°C Standard mortar with addition recycling mortar calinated in 770°C	13,5
Zaprawa normowa Standard mortar	17

^a Średnia arytmetyczna obu średnic z dwóch pomiarów – Arithmetic average of both diameters from two measurements.

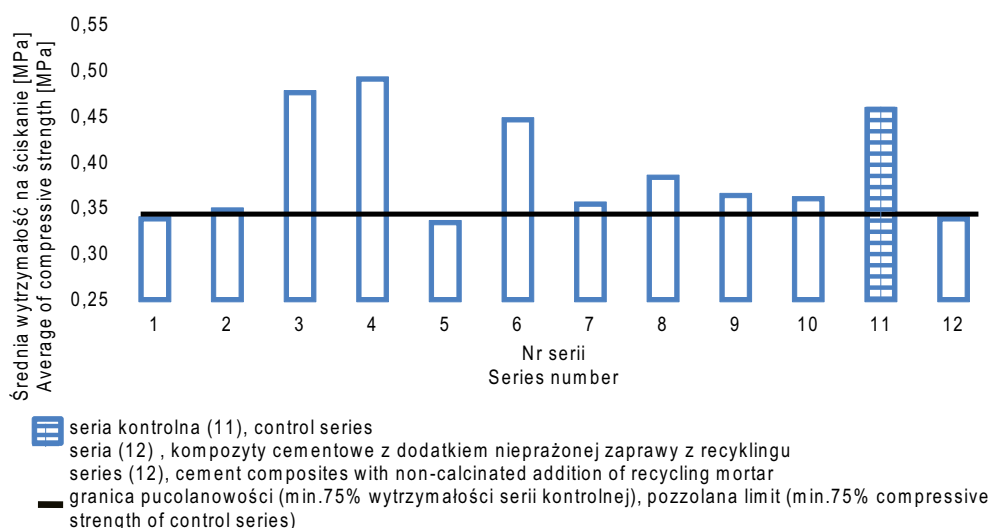
Zaprawa recyklingowa użyta do badań charakteryzowała się znaczną zawartością frakcji mniejszej od 0,063 mm (ok. 60%), w której skład wchodził zmielony kamień cementowy, fragmenty kruszywa i nieprzehydratyzowany cement, co odpowiada za jej wzmoczoną wodozadržność. Pomimo tego przy wykonywaniu mieszanek kompozytów nie było konieczne zwiększenie ilości wody w recepturze w celu dokładnego wymieszania wszystkich składników.

WYNIKI

Wytrzymałość na ściskanie i wskaźnik pucolanowości

Na rysunku 2 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych z dodatkiem zaprawy recyklingowej.

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 2, stwierdzono, że największe wartości wytrzymałości



Rys. 2. Zestawienie wyników średniej wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych z dodatkiem zaprawy recyklingowej

Fig. 2. Comparison of the results of medium compressive strength of cementitious composites with the addition of a recyclable mortar

na ściskanie uzyskano dla serii 4, w której zastosowano temperaturę prażenia około 650°C. Był to wzrost o około 7% w stosunku do wyników uzyskanych dla serii kontrolnej. W przypadku serii 12 wykonanej z dodatkiem zaprawy recyklingowej, która nie była poddawana obróbce termicznej, zanotowano spadek wytrzymałości w stosunku do serii kontrolnej (11) o około 26% i 31% w porównaniu do serii 4 – najkorzystniejszej pod względem uzyskanych parametrów wytrzymałości na ściskanie. Zauważyć także należy, że jedynie w przypadku serii, w których temperatura prażenia wynosiła ponad 600°C, odnotowywano wystąpienie właściwości pucolanowych dodatku zaprawy recyklingowej (wytrzymałość na ściskanie wynosiła przynajmniej 75% wytrzymałości na ściskanie serii kontrolnej), a najkorzystniejsze rezultaty świadczące o dużej aktywności pucolanowej materiału uzyskano w przypadku zastosowania temperatury prażenia 650°C (wskaźnik pucolanowości na poziomie 107%).

Wytrzymałość na zginanie

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 3, stwierdzono, że największe wyniki wytrzymałości na zginanie uzyskano dla serii 3 i 4 (prażenie w 650°C) i były one zbliżone do tych uzyskiwanych w serii kontrolnej (na poziomie 7,8 MPa). W przypadku temperatury prażenia 770°C odnotowano niewielki

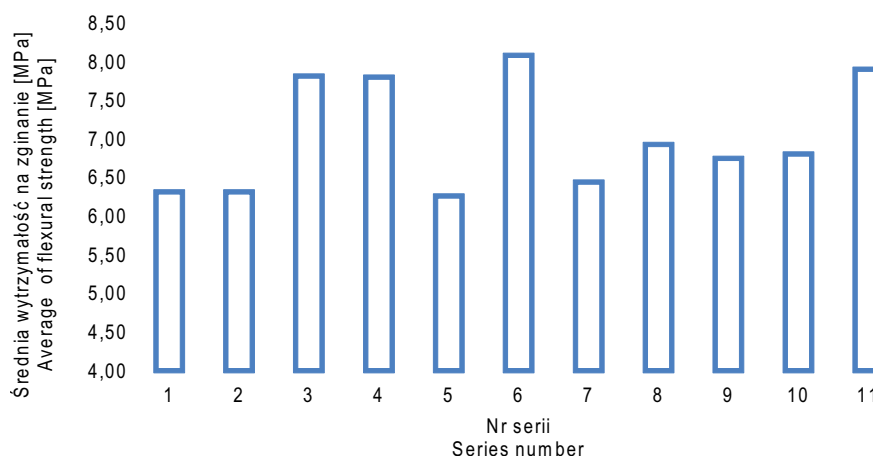
(ok. 3%) przyrost wytrzymałości względem serii kontrolnej.

Analizując zebrane dane, stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury prażenia zaprawy recyklingowej wytrzymałość na zginanie kompozytu cementowego generalnie wzrastała. Z rysunku 3 także można odczytać, że najkorzystniejsze wyniki uzyskano podczas prażenia gruzu (zaprawy recyklingowej) w temperaturze 770°C. Wydłużanie czasu prażenia w przypadku niższej temperatury (430°C, 550°C) nieznacznie przyczyniało się do wzrostu wartości analizowanego parametru.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W procesie recyklingu konstrukcji betonowych uzyskuje się zwykle grube frakcje kruszywa większe od 4 mm, stosowane np. jako częściowy zamiennik kruszywa naturalnego w betonach, oraz frakcje drobne do 4 mm traktowane jako materiał odpadowy m.in. ze względu na ich dużą nasiąkliwość.

W pracy podjęto próbę sprawdzenia możliwości zagospodarowania tego odpadu jako częściowego zamiennika cementu w kompozytach cementowych. Wykonano 11 serii beleczek zapraw normowych (w tym seria kontrolna) zawierających zaprawę recyklingową w charakterze zamiennika cementu. Zaprawa recy-



Rys. 3. Zestawienie wyników średniej wytrzymałości na zginanie kompozytów cementowych z dodatkiem zaprawy recyklingowej

Fig. 3. Comparison of the results of medium flexural strength of cementitious composites with the addition of a recyclable mortar

klingowa została uzyskana podczas procesu obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego, którego parametry stały się czynnikami zmiennymi w zaplanowanym eksperymencie (czas i temperatura prażenia). Otrzymane wyniki badań wskazują, że odpowiednio dobrane parametry obróbki zaprawy recyklingowej przekładają się na uzyskiwane dobre wyniki wytrzymałościowe przy jednoczesnym, słabym wpływie na nasiąkliwość kompozytów. Wprowadzenie obróbki termicznej korzystnie wpływa na badane właściwości pucolanowe materiału recyklingowego. Prawdopodobnie zapewnienie odpowiednio wysokiej temperatury prażenia tego odpadu umożliwia częściowe odwrócenie procesów hydratacji, wzbudzając utajone właściwości wiążące materiału. Dostarczenie zbyt wysokiej temperatury, w której prażony jest gruz betonowy, pogarsza właściwości takiego dodatku jako pucolan typu II. Prawdopodobnie wynika to z rozpadu węgla wapnia na tlenek wapnia i dwutlenek węgla w wyższej temperaturze. Ogólna analiza wyników badań pozwoliła na stwierdzenie, iż najkorzystniejsze parametry analizowanych właściwości, tj. wytrzymałości na ścislenie i zginanie oraz nasiąkliwość, uzyskano podczas prażenia gruzu w temperaturze około 650°C i czasie prażenia nie dłuższym niż 60 min. Otrzymane wyniki dowodzą, iż jest możliwe zagospodarowanie tej masy odpadów do produkcji nowych kompozytów cementowych, lecz konieczne są dalsze badania nad wyjaśnieniem procesów zachodzących podczas prowadzonej obróbki termicznej. W przyszłości planuje się wykonanie analiz pozwalających na ocenę ekonomiczną zaproponowanego rozwiązania.

PIŚMIENNICTWO

- Abbas, A., Fathifazl, G., Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., Fournier, B. i Foo, S. (2008). Proposed method for determining the residual mortar content of recycled concrete aggregates. *Journal of ASTM International*, 5 (1), 1–12. doi: 10.1520/JAI101087
- Bordy, A., Younsi, A., Aggoun, S. i Fiorio, B. (2017). Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. *Construction and Building Materials*, 132, 1–8. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.080
- Chai, L., Monismith, C. L. i Harvey, J. (2009). *Re-Cementation of Crushed Material in Pavement Bases* (Technical Memorandum UCPRC-TM-2009-04). Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. Pobrano z lokalizacji: <http://www.ucprc.ucdavis.edu/PDF/UCPRC-TM-2009-04.pdf>.
- Il'ina, L. V. i Mukhina, I. N. (2016). Estimation of the Applicability for the Filler Produced by Recycling of Concrete and Reinforced Concrete Used in Heavy Concrete. *Procedia Engineering*, 150, 1525–1530. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.102
- Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R. i Deja, J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, 95, 243–225. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021
- Nam, B. H., An, J. i Youn, H. (2016). Accelerated calcite precipitation (ACP) method for recycled concrete aggregate (RCA). *Construction and Building Materials*, 125, 749–756. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.048
- Paige-Green, P. (2010). Preliminary evaluation of the reuse of cementitious materials. W *Proceedings of 29th Annual Southern African Transport Conference* (strony 520–529). Pretoria, South Africa. Pobrano z lokalizacji: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/14877/PaigeGreen_Preliminary%282010%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- PN-EN 1015-3:2000/A1:2005. Metody badań zapraw do murów. Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu).
- PN-EN 196-1:2006. Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- PN-EN 197-1:2012. Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- PN-EN 450-1:2012. Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- Politechnika Białostocka (2018). PAT.229887. Warszawa: Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej.
- Poon, C. S., Qiao, X. i Chan, D. (2006). The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management*, 26, 1166–1172. doi: 10.1016/j.wasman.2005.12.013
- Shui, Z., Xuan, D., Wan, H. i Cao, B. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22 (8), 1723–1729. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.012

CEMENT COMPOSITES MODIFIED WITH A THERMALLY ACTIVATED RECYCLED ADDITION

ABSTRACT

The article presents the results of the research on cementitious composites, the composition of which was modified by a recycled additive, created (next to recycling aggregates) as a result of a specially selected concrete recycling process according to Polish patent PAT.229887 (2018). The use of a specially prepared recycling mortar as a type II additive or only a filler in cement composites, is the right way to develop this material and a strong stress towards sustainable construction. Properly selected parameters of the thermo-mechanical treatment process enable activation of pozzolana properties of this material. The proposed recycling method is an example of a comprehensive solution to the problem of complete conversion of concrete debris into valuable secondary products and their re-integration into the construction production process.

Key words: recycling mortar, concrete recycling, sustainable development, waste management

