

Kierunki wykorzystania drobnej frakcji z recyklingu betonu w materiałach budowlanych

Applications of fine fractions from concrete recycling in construction materials



dr inż. Katarzyna Kalinowska-Wichrowska

Politechnika Białostocka,
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
k.kalinowska@pb.edu.pl
ORCID 0000-0003-1760-3943



dr hab. inż. Edyta Pawluczuk

Politechnika Białostocka,
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
e.pawluczuk@pb.edu.pl
ORCID 0000-0002-8806-8637

Streszczenie

W procesie recyklingu gruzu betonowego, oprócz kruszywa grubego, powstaje znaczna ilość drobnej frakcji zawierającej rozdrobnioną, stwardniałą zaprawę cementową. Ze względu na dużą zawartość starego zaczynu cementowego, podwyższoną porowatość oraz zmienny skład materiał ten jest często traktowany jak produkt uboczny o ograniczonym zastosowaniu. Celem artykułu jest przedstawienie wybranych kierunków wykorzystania odpowiednio przygotowanej drobnej frakcji z recyklingu betonu w budownictwie. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań własnych obejmujących termiczno-mechaniczne przetwarzanie gruzu betonowego oraz zastosowanie odzyskanej zaprawy cementowej jako składnika wyrobów wapienno-

-piaskowych, częściowego zamiennika cementu oraz surowca do produkcji kruszyw sztucznych. Wykazano, że właściwości i przydatność drobnej frakcji z recyklingu gruzu betonowego zależą przede wszystkim od sposobu jej wydzielienia i uziarnienia oraz zastosowanej aktywacji. Obróbka termiczna umożliwia zwiększenie zdolności wiążących odzyskanej zaprawy, a rozdrobnienie pozwala na użycie jej jako aktywnego składnika kompozytów. Materiał może być także poddawany granulacji z innymi surowcami odpadowymi. Uzyskane wyniki potwierdzają, że drobna frakcja z recyklingu betonu może stanowić pełnowartościowy surowiec wtórny, a nie wyłącznie odpad procesu odzysku kruszywa grubego.

Słowa kluczowe recykling betonu, drobna frakcja, zaprawa z recyklingu, aktywacja termiczna, kruszywa sztuczne

Abstract

Concrete rubble recycling produces not only coarse recycled aggregate but also a considerable amount of fine material containing crushed hardened cement mortar. Due to its high content of old cement paste, increased porosity and variable composition, this material is frequently regarded as a by-product with limited application potential. The aim of this article is to present selected possibilities for using properly processed fine fractions from concrete recycling in construction materials. The analysis is based on the authors' research concerning the thermo-mechanical treatment of concrete rubble and the use of recovered cement mortar as a component of autoclaved sand-lime products, a partial cement replacement and a raw material

for artificial aggregate production. The results demonstrate that the properties and suitability of the fine fraction depend primarily on the separation method, particle size and activation procedure. Thermal treatment can restore or increase the binding ability of recycled cement mortar, while additional grinding enables its application as an active component of cement-based composites. The material may also be granulated with other waste-derived raw materials to produce artificial aggregates. The findings confirm that fine fractions generated during concrete recycling can be considered valuable secondary resources rather than merely residual waste from coarse aggregate recovery.

Keywords concrete recycling, recycled fine fraction, recycled cement mortar, thermal activation, artificial aggregates



WPROWADZENIE

Recykling betonu jest jednym z podstawowych kierunków ograniczania zużycia naturalnych surowców mineralnych oraz ilości odpadów budowlanych kierowanych do składowania. W tradycyjnych technologiach głównym produktem przeróbki gruzu betonowego jest kruszywo recyklingowe, natomiast frakcje drobne i pyłaste są często wykorzystywane jedynie w podbudowach drogowych, do stabilizacji gruntów albo pozostają odpadem procesu.

Drobna frakcja z recyklingu betonu nie jest materiałem jednorodnym. Może zawierać ziarna kruszywa naturalnego, stwardniałą zaprawę cementową, produkty hydratacji cementu, częściowo niezhydratyzowane ziarna klinkieru, a także produkty karbonatyzacji. Jej właściwości zależą od składu betonu pierwotnego, wieku konstrukcji, warunków użytkowania, stopnia karbonatyzacji, obecności zanieczyszczeń oraz technologii zastosowanej do rozdrabniania i separacji [1].

Szczególny potencjał wykazuje frakcja uzyskiwana w wyniku kontrolowa-

negu oddzielenia starej zaprawy cementowej od kruszywa grubego. Odpowiednie przetworzenie termiczne i mechaniczne pozwala jednocześnie uzyskać oczyszczone kruszywo grube oraz rozdrobnioną zaprawę cementową, która może zostać ponownie wprowadzona do obiegu materiałowego. Rozwiązanie takie stanowi podstawę technologii objętej patentem PL 229887, dotyczącej sposobu oddzielania stwardniałej zaprawy cementowej od kruszywa grubego, jej rozdrabniania oraz urządzenia służącego do realizacji procesu [4].

Celem artykułu jest przedstawienie różnych możliwości wykorzystania drobnej frakcji, powstającej podczas recyklingu betonu, na podstawie wyników badań, które dotyczyły:

- bezodpadowej technologii recyklingu gruzu betonowego,
- wykorzystania odzyskanej zaprawy jako aktywnego składnika wyrobów wapienno-piaskowych,
- stosowania aktywowanego proszku z recyklingu jako częściowego zamiennika cementu,
- produkcji kruszyw sztucznych.

POWSTAWANIE I CHARAKTERYSTYKA DROBNEJ FRAKCJI Z RECYKLINGU BETONU

Podczas konwencjonalnego kruszenia gruzu betonowego powstaje kruszywo o powierzchni częściowo pokrytej starą zaprawą cementową oraz materiał drobny, będący mieszaniną zaprawy i rozdrobnionego kruszywa naturalnego. Obecność porowatej zaprawy na ziarnach recyklingowego kruszywa zwiększa jego nasiąkliwość oraz wpływa niekorzystnie na właściwości betonów z niego wykonywanych. Z tego względu opracowano termiczno-mechaniczny sposób oddzielania zaprawy od kruszywa. Proces obejmuje kolejno:

- rozdrobnienie gruzu,
- obróbkę cieplną,
- ścieranie oraz kruszenie osłabionej zaprawy,
- rozdzielanie frakcji grubej od drobnej.

W warunkach laboratoryjnych korzystne rezultaty uzyskano po ogrzewaniu materiału w temperaturze 650°C przez 60 min. Obróbka termiczna powodowała dehydratację produktów hydratacji cementu i osłabienie przyczepności

na granicy zaprawa–kruszywo. Następująca po niej obróbka mechaniczna umożliwiła oddzielenie składników betonu [2].

W technologii objętej patentem proces może być prowadzony w jednym obrotowym urządzeniu składającym się z dwóch komór: prażenia oraz ścierania i kruszenia. Temperatura gazów w komorze prażenia wynosi ok. 750°C, co zapewnia ogrzanie gruzu do co najmniej 650°C. System półek i walców umożliwia równomierne nagrzewanie materiału, oddzielanie zaprawy oraz jej częściowe

WYKORZYSTANIE DROBNEJ FRAKCJI W WYROBACH WAPIENNO-PIASKOWYCH

Jednym z kierunków zagospodarowania drobnej frakcji jest jej dodanie do autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych. W badaniach wykorzystano materiał o uziarnieniu poniżej 2 mm, uzyskany podczas termiczno-mechanicznego przetwarzania gruzu betonowego klasy C30/37. Przygotowano serie kompozytów zawierających od 5 do 25% odzyskanej zaprawy cementowej oraz serię wykonaną wyłącznie z materiału z recyklingu [3].

Jednym z kierunków zagospodarowania drobnej frakcji jest jej dodanie do autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych.

rozdrabnianie bez nadmiernego niszczenia kruszywa grubego [5].

Produktami procesu są wysokiej jakości kruszywo grube oraz drobna frakcja stwardniałej zaprawy cementowej. W badaniach materiał przeznaczony do zastosowania w wyrobach wapienno-piaskowych rozdrabniano do frakcji 0–2 mm. Prawie 60,8% materiału przechodziło przez sito 0,063 mm, a jego powierzchnia właściwa według Blaine'a wynosiła ok. 3600 cm²/g [2, 3].

Skład takiej frakcji oraz obecność produktów do hydratacji decydują o możliwości jej dalszej aktywacji. Materiał nieaktywowany może działać głównie jako wypełniacz, natomiast odpowiednia obróbka termiczna może prowadzić do częściowej dehydratacji faz uwodnionych i zwiększenia ich zdolności do ponownej reakcji z wodą.

Badania kalorymetryczne wykazały istotny wpływ obróbki cieplnej na aktywność odzyskanej zaprawy. Materiał niepoddany prażeniu wydzielił w ciągu 48 h ok. 40 J/g ciepła. Po obróbce termicznej wartość ciepła skumulowanego wzrosła do ok. 125 J/g. To pokazuje, że aktywacja termiczna przywraca częściowo zdolność materiału do reagowania z wodą i tworzenia nowych produktów wiążących [3].

W przypadku wyrobów wapienno-piaskowych zawartość 5–10% frakcji z recyklingu powodowała tylko niewielkie obniżenie wytrzymałości na ściskanie, maksymalnie o ok. 4% w stosunku do serii kontrolnej. Przy większym udziale tego materiału obserwowano wyraźniejszy spadek wytrzymałości, który przy 25% zawartości frakcji z recyklingu wyniósł ok. 30%. Zależność pomiędzy udziałem odzyskanej zaprawy a wytrzymałością charakteryzo-

wała się wysokim dopasowaniem modelu przy $R^2 = 0,94$ [3].

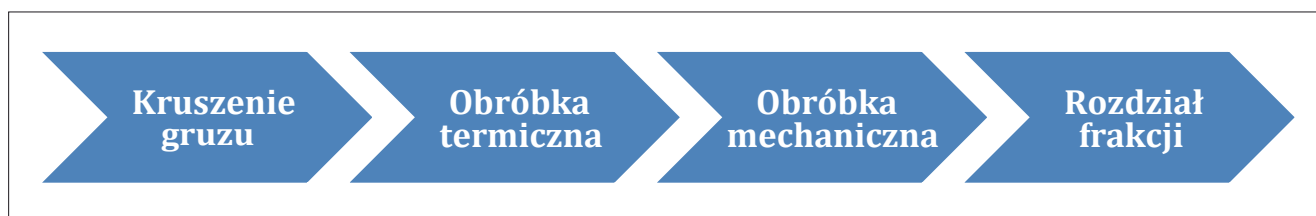
Kompozyty zawierające 5–25% drobnej frakcji cechowały się nasiąkliwością zbliżoną do serii kontrolnej, nieprzekraczającą 13%. Dopiero materiał wykonany wyłącznie z zaprawy z recyklingu osiągnął nasiąkliwość bliską 16%. Wyniki wskazują, że niewielki udział odpowiednio przygotowanej drobnej frakcji nie powoduje istotnego pogorszenia podstawowych właściwości wyrobów.

Wprowadzenie frakcji z recyklingu do autoklawizowanej mieszanki wapienno-piaskowej może przynosić efekt wypełniający, natomiast zawarte w niej składniki wapniowe i krzemianowe mogą brać udział w reakcjach zachodzących podczas autoklawizacji. Zakres wykorzystania materiału powinien jednak uwzględniać jego zmienność oraz konieczność zachowania wymaganej wytrzymałości wyrobów.

DROBNA FRAKCJA JAKO CZĘŚCIOWY ZAMIENNIK CEMENTU

Drobna frakcja może także znaleźć zastosowanie jako wtórny materiał wiążący po dodatkowym zmieleniu. W badaniach proszek z recyklingu uzyskiwano z zaprawy cementowej, którą poddawano obróbce termicznej przez 60 min w temperaturze 550, 650 lub 750°C, a następnie mielono do powierzchni właściwej zbliżonej do cementu CEM I 42,5 R [2]. Tak przygotowany materiał zastępował 25% masy cementu w zaprawach normowych. Oceniano jego wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach oraz wskaźnik aktywności wytrzymałościowej SAI.

Najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla proszku prażonego w temperaturze 650°C. Po 28 dniach wytrzymałość



Rys. 1. Schemat termiczno-mechanicznego przetwarzania gruzu betonowego

Tab. 1. Wybrane kierunki wykorzystania drobnej frakcji z recyklingu betonu

Kierunek wykorzystania	Przygotowanie materiału	Zalecany udział lub parametr	Najważniejszy efekt
Wyroby wapienno-piaskowe	rozdrobienie i przesianie do <2,000 mm	5–10% masy mieszanki	brak znacznego pogorszenia wytrzymałości
Zamiennik cementu, metoda według patentu PL 229887	prażenie i mielenie do <0,063 mm	• 25% cementu • 650°C/60 min	wzrost wytrzymałości po 28 dniach o ok. 10%; SAI ok. 1,1
Kruszywa sztuczne	mieszanie z innymi odpadami, aktywacja alkaliczna i granulacja	zasadniczy składnik (min. 70% masy surowców)	możliwość zastąpienia ok. 25% kruszywa naturalnego w kompozytach cementowych

kompozytu była o ok. 10% większa niż wytrzymałość serii kontrolnej, a wskaźnik aktywności osiągnął wartość ok. 1,1. Oznacza to, że odpowiednio aktywowana frakcja może nie tylko zastąpić część cementu, ale również uczestniczyć w kształtowaniu struktury i właściwości mechanicznych kompozytu [2].

Odmienne rezultaty otrzymano przy innych temperaturach. Materiał aktywowany w temperaturze 550°C powodował spadek wytrzymałości nawet o ok. 40% w stosunku do zaprawy kontrolnej. Dla temperatury 750°C wskaźnik SAI wyniósł ok. 0,81, a wytrzymałość była niższa niż w przypadku materiału aktywowanego w temperaturze 650°C. Wyniki te potwierdzają, że skuteczność aktywacji nie wzrasta liniowo wraz z temperaturą.

Zbyt niska temperatura może nie powodować wystarczającej dehydratacji faz uwodnionych. Zbyt wysoka może natomiast prowadzić do zmian fazowych ograniczających późniejszą reaktywność materiału, zwiększać zapotrzebowanie energetyczne i pogarszać bilans środowiskowy procesu. Dlatego dobór temperatury powinien uwzględniać zarówno aktywność wtórnego spoiwa, jak i energochłonność procesu jego wytworzenia.

Zastosowanie proszku z recyklingu jako zamiennika cementu ma niebagatelne znaczenie środowiskowe, ponieważ umożliwia jednoczesne zagospodarowanie odpadu i ograniczenie zużycia klinkieru portlandzkiego. Konieczne jest jednak każdorazowe określenie składu materiału, jego powierzchni właściwej, zawartości produktów karbonatyzacji oraz rzeczywistej aktywności wytrzymałościowej.

DROBNA FRAKCJA JAKO SUROWIEC DO PRODUKCJI KRUSZYW SZTUCZNYCH

Drobna zaprawa cementowa z recyklingu może także być podstawowym składnikiem kruszyw sztucznych. W takim rozwiązaniu proszek lub drobnoziarnisty materiał nie zastępuje bezpośrednio cementu ani piasku, lecz jest poddawany granulacji i przekształcany w ziarna o wymiarach umożliwiających zastosowanie ich jako zamiennika kruszywa naturalnego.

W przeprowadzonych badaniach zaprawa cementowa z recyklingu została połączona z popiołem ze spalania odpadów komunalnych, osadem dennym ze zbiornika wodnego oraz metakaolinem. Otrzymane mieszanki granulowano z zastosowaniem aktywatora alkalicznego, a następnie utwardzano w temperaturze 20, 200 lub 400°C. Głównym składnikiem odpadowym była zaprawa cementowa z recyklingu [4].

Najwyższą wytrzymałość pojedynczych ziaren, wynoszącą ok. 0,93 MPa, uzyskano dla kruszywa zawierającego 50% zaprawy z recyklingu i 10% osadu dennego, poddanego utwardzaniu w temperaturze 400°C. Dla tej kompozycji stwierdzono wyraźną zależność pomiędzy temperaturą utwardzania a wytrzymałością, opisaną współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,99$ [4].

W badaniach potwierdzono możliwość wytworzenia kruszyw zawierających do 70% składników odpadowych. Ich dodawanie do składu kompozytów cementowych wpływało jednak na konsystencję mieszanek ze względu na dużą nasiąkliwość i porowatość ziaren. Najkorzystniejsze właściwości wytrzymałościowe kompozytów uzyskano przy zastąpieniu 25% kruszywa naturalnego kruszywem sztucznym. Przy wyższym udziale gęstość kompozytów



Fot. © NorGal – stock.adobe.com, tab. oprac. autorek na podst [2, 5]



spadała poniżej $2,0 \text{ g/cm}^3$, lecz towarzyszył temu wzrost nasiąkliwości [4].

Zaletą tego sposobu zagospodarowania drobnej frakcji jest możliwość połączenia kilku strumieni odpadowych w jednym produkcie. Granulacja ogranicza pylenie drobnych materiałów i umożliwia nadanie im wymiarów oraz kształtu odpowiednich do zastosowania w kompozytach. Jednocześnie technologia wymaga dalszej optymalizacji w zakresie ograniczenia nasiąkliwości, zwiększenia wytrzymałości pojedynczych ziaren, zmniejszenia zużycia aktywatora alkalicznego oraz oceny trwałości kompozytów w warunkach eksploatacyjnych.

Wytworzone kruszywa mogą znaleźć zastosowanie przede wszystkim w materiałach niekonstrukcyjnych, kompozytach o obniżonej gęstości oraz elementach, w których priorytetem jest ograniczenie zużycia surowców naturalnych i zagospodarowanie odpadów.

PORÓWNANIE KIERUNKÓW WYKORZYSTANIA DROBNEJ FRAKCJI

Przedstawione kierunki nie są rozwiązaniami konkurencyjnymi, lecz mogą stanowić elementy kompleksowego systemu zagospodarowania odpadów betonowych. Wybór sposobu wykorzystania powinien wynikać z: uziarnienia i powierzchni właściwej, stopnia karbonatyzacji, zawartości kruszywa naturalnego, potencjalnych zanieczyszczeń, wymaganych właściwości produktu końcowego.

Materiał grubszy (frakcja $<2 \text{ mm}$) może być składnikiem wyrobów autoklawizowanych lub surowcem do granulacji. Frakcje bardzo drobne po zmieleniu i aktywacji mogą pełnić funkcję wtórnego składnika spoiwa. Takie podejście pozwala traktować frakcję drobną jak grupę surowców o różnych możliwościach zastosowania, a nie jak odpad.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że drobna frakcja powstająca podczas recyklingu betonu może być wykorzystana w kilku grupach materiałów budowlanych. Warunkiem jest jednak kontrolowane wydzielenie materiału, jego rozdrobnienie oraz – w zależności od przeznaczenia – odpowiednia aktywacja.

- Termiczno-mechaniczna obróbka gruzu betonowego umożliwia jednocześnie uzyskanie oczyszczonego kruszywa grubego i drobnej frakcji zaprawy cementowej, dzięki czemu proces może mieć charakter bezodpadowy.

- Drobna frakcja o uziarnieniu poniżej 2 mm może być składnikiem wyrobów wapienno-piaskowych. Udział wynoszący 5–10% nie powodował znacznego pogorszenia wytrzymałości na ściskanie, a nasiąkliwość pozostawała zbliżona do wartości uzyskanej dla materiału kontrolnego.

- Aktywacja termiczna zwiększa zdolności wiążące odzyskanej zaprawy cementowej. Najkorzystniejsze wyniki przynio-

sła obróbka w temperaturze 650°C przez 60 min. Proszek zastosowany jako zamiennik 25% cementu osiągnął wskaźnik aktywności SAI ok. 1,1.

- Zaprawa cementowa z recyklingu może być surowcem do produkcji kruszyw sztucznych zawierających kilka strumieni odpadów. Najkorzystniejsze właściwości kompozytów uzyskano przy zastąpieniu ok. 25% kruszywa naturalnego kruszywem sztucznym.

- Nie istnieje jeden uniwersalny sposób zagospodarowania drobnej frakcji. O jej zastosowaniu powinny decydować: skład, uziarnienie, reaktywność oraz bilans środowiskowy wymaganych procesów przygotowawczych.

- Wyniki potwierdzają przyjętą hipotezę, że drobna frakcja z recyklingu betonu może stanowić wartościowy surowiec wtórny do wytwarzania nowych materiałów budowlanych, zamiast być wykorzystywana wyłącznie jako materiał zasypowy lub kierowana do składowania. ■

Literatura

- [1] Nedeljković M. i in., „Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review” w: *Journal of Building Engineering*, t. 38, 2021, art. 102196 [dostęp: 3.07.2026], w: ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102196>.
- [2] Kalinowska-Wichrowska K., Pawluczuk E., Bołtryk M., „Waste-free technology for recycling concrete rubble” w: *Construction and Building Materials*, t. 234, 2020, art. 117407 [dostęp: 3.07.2026], w: ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117407>.
- [3] Bołtryk M., Kalinowska-Wichrowska K., „Frakcja drobna z recyklingu betonu jako aktywny wypełniacz wyrobów wapienno-piaskowych” w: *Materiały Budowlane*, nr 8, 2017, s. 52–54 [dostęp: 3.07.2026], w: SIGMA-NOT, <https://doi.org/10.15199/33.2017.08.16>.
- [4] Kalinowska-Wichrowska K. i in., „Properties of Eco-Friendly Cement Composites Made with Recycled Cement Mortar-Based Artificial Aggregates” w: *Materials*, t. 18, nr 22, 2025, art. 5115 [dostęp: 3.07.2026], w: MDPI, <https://doi.org/10.3390/ma18225115>.
- [5] Bołtryk M., Kalinowska-Wichrowska K., Pawluczuk E., *Sposób oddzielania stwardniałej zaprawy cementowej od kruszywa grubego i rozdrabniania tej zaprawy oraz urządzenie do stosowania tego sposobu*, patent nr PL 229887 B1, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa, 2018.