

dr inż. Maja Kępniak
Politechnika Warszawska
mgr inż. Magdalena Bardan
mgr inż. Aleksandra Mazurek
dr hab. inż. Artur Piekarczyk, prof. Instytutu
Instytut Techniki Budowlanej
Dr inż. Rafał Panek
Politechnika Lubelska

Od konstrukcji do kruszywa – wieloetapowa ocena jakości kruszywa z recyklingu

From Structure to Aggregate – A Multistage Quality Assessment of Recycled Concrete Aggregate

Streszczenie

W referacie przedstawiono kompleksową procedurę badawczą umożliwiającą efektywne wykorzystanie kruszyw z recyklingu, obejmującą etapy od wstępnych analiz konstrukcji aż po badania mikrostruktury materiałów recyklingowych. W pierwszej fazie, kluczowe jest odtworzenie projektu konstrukcji, co pozwala na oszacowanie ilości oraz identyfikację rodzajów materiałów budowlanych. Proponowaną metodą jest skaning 3D, który zapewnia precyzyjne i szybkie pozyskanie informacji o geometrii obiektu. Kolejny etap to badania nieniszczące i niszczące, pozwalające na podział elementów nie tylko według rodzaju, ale również jakości, np. wytrzymałości na ściskanie, karbonatyzacji czy poziomu zanieczyszczeń. Takie podejście umożliwia rzeczywiście selektywną rozbiórkę, maksymalizując możliwości ponownego wykorzystania materiałów. Po wyburzeniu przeprowadzane są badania kruszyw grubych i drobnych, w tym analizy jakościowe oraz określenie składu materiałowego. Procedura obejmuje również badania mikrostrukturalne, takie jak analizy optyczne, SEM oraz XRD, pozwalające na szczegółową ocenę cech fizykochemicznych uzyskanego materiału.

Abstract

The paper presents a comprehensive research procedure enabling the effective use of recycled aggregates, encompassing stages from preliminary structural analysis to the investigation of the microstructure of recycled materials. In the first phase, reconstructing the structural design is crucial, as it allows for the estimation of quantities and identification of types of construction materials. The proposed method is 3D scanning, which provides precise and rapid acquisition of information about the geometry of the structure. The next stage involves both non-destructive and destructive testing, allowing elements to be classified not only by type but also by quality, e.g., compressive strength, carbonation, or contamination levels. This approach enables truly selective demolition, maximizing the potential for material reuse. After demolition, tests are conducted on coarse and fine aggregates, including qualitative analyses and determination of material composition. The procedure also includes microstructural studies such as optical analyses, SEM, and XRD, enabling detailed assessment of the physico-chemical properties of the obtained material.

1. Wprowadzenie

W obliczu wyzwań związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz koniecznością ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych, rosnące znaczenie zyskują działania ukierunkowane na odzysk i ponowne wykorzystanie materiałów budowlanych [1], [2], [3]. Recykling materiałów budowlanych, w szczególności gruzu betonowego, stanowi obecnie jeden z kluczowych filarów gospodarki o obiegu zamkniętym w budownictwie [4]. Transformacja odpadów konstrukcyjnych w pełnowartościowe kruszywo nie powinna rozpoczynać się dopiero po zakończeniu użytkowania obiektu – lecz znacznie wcześniej, już na etapie planowania jego rozbiórki, a w optymalnym scenariuszu nawet podczas projektowania [5], [6]. Możliwe jest wtedy pełne wykorzystanie potencjału materiałowego przyszłych odpadów, poprzez identyfikację ich pierwotnych właściwości, warunków eksploatacji oraz jakości wykonania. Tego typu podejście znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w normach – przykładowo, załącznik A do normy PN-EN 206 [7] dopuszcza stosowanie kruszywa z recyklingu do wszystkich klas ekspozycji, o ile beton źródłowy spełniał odpowiednie wymagania środowiskowe. Informacja ta jest jednak możliwa do zweryfikowania tylko wtedy, gdy znany jest pierwotny kontekst techniczny danego elementu. W przeciwnym razie – gdy materiał trafia do przetworzenia jako nieselekcjonowany gruz betonowy – bardzo utrudnione staje się przeprowadzenie jego jakościowego rozróżnienia. W konsekwencji jakość uzyskanego kruszywa z recyklingu zostaje zdeterminowana przez najłagodniejszy jego składnik, co istotnie ogranicza możliwości jego dalszego wykorzystania [6].

Co więcej, projektowanie zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju zakłada optymalizację nie tylko pod kątem ilości materiałów, ale także w zakresie stawianych wymagań [8]. Przykładowo, zaleca się różnicowanie klas ekspozycji w zależności od funkcji i lokalizacji elementów konstrukcyjnych, zamiast stosowania najbardziej wymagających parametrów dla całej konstrukcji. Takie podejście ogranicza przeprojektowanie i zmniejsza zapotrzebowanie na surowce, lecz jednocześnie prowadzi do powstawania w jednej konstrukcji elementów o różnej trwałości i właściwościach. W momencie rozbiórki oznacza to konieczność zróżnicowanego

traktowania poszczególnych elementów – tak, aby uniknąć obniżenia jakości całej partii odzyskanego materiału [9], [10], [11].

Dodatkowym wyzwaniem jest obecność elementów zanieczyszczonych – np. uszkodzonych chemicznie, zaolejonych, zawierających elementy instalacyjne lub powłoki malarskie [12], [13], [14]. Nawet niewielki procent tego typu ziaren w kruszywie z recyklingu może wpłynąć negatywnie na właściwości całej partii kruszywa, czyniąc je nieprzydatnym do ponownego zastosowania. Z tego względu kluczowe staje się wczesne wykrycie i skuteczne oddzielenie materiałów niespełniających kryteriów jakościowych [15].

W odpowiedzi na powyższe problemy, niniejszy referat prezentuje kompleksową metodykę oceny jakości kruszyw z recyklingu, obejmującą wszystkie istotne etapy – od analizy dokumentacji i geometrii obiektu, przez badania konstrukcji in situ, aż po laboratoryjną ocenę właściwości fizykochemicznych i mikrostrukturalnych materiału. Proponowane podejście integruje wykorzystanie nowoczesnych narzędzi diagnostycznych oraz selektywnej rozbiórki, umożliwiając racjonalne i zgodne z obowiązującymi normami wykorzystanie kruszywa z recyklingu.

2. Metodyka oceny jakości kruszywa z recyklingu

Metodyka oceny jakości kruszywa z recyklingu została opracowana jako wieloetapowy proces, obejmujący zarówno działania poprzedzające rozbiórkę, jak i badania laboratoryjne materiału po jego przetworzeniu. Jej celem jest stworzenie uporządkowanej procedury pozwalającej na racjonalne wykorzystanie potencjału materiałowego odzyskanych surowców oraz minimalizację ryzyka związanego z ich heterogenicznością.

1. Analiza dokumentacji technicznej

Podstawowym krokiem jest zgromadzenie i przeanalizowanie dostępnej dokumentacji obiektu, w tym projektu budowlanego oraz ekspertyz powykonawczych. Pozwala to na wstępną identyfikację klasy betonu, przyjętych obciążeń i potencjalnych warunków ekspozycji, co stanowi punkt wyjścia do dalszych badań.

2. Skanowanie 3D konstrukcji

W kolejnym etapie stosuje się naziemne skanowanie laserowe (TLS), które umożliwia szybkie i dokładne odwzorowanie geometrii obiektu. Chmura punktów uzyskana z pomiarów pozwala nie tylko na ilościową weryfikację elementów konstrukcyjnych, ale również na optymalne wytypowanie miejsc do poboru próbek w postaci odwiertów rdzeniowych. Dzięki temu proces diagnostyczny jest bardziej reprezentatywny i bezpieczny.

3. Pobieranie i badanie próbek betonu

Odwierty rdzeniowe wykonuje się w wybranych elementach konstrukcji, zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12504-1 i PN-EN 13791. Pobranie próbek umożliwia ocenę wytrzymałości na ściskanie, określenie składu materiałowego, stopnia karbonatyzacji oraz obecności ewentualnych zanieczyszczeń. Kryteriami doboru miejsc odwiertów są m.in. reprezentatywność, minimalny wpływ na nośność konstrukcji oraz bezpieczeństwo wykonania.

4. Rozbiórka i sortowanie materiałów

Na etapie rozbiórki prowadzi się selektywną segregację elementów konstrukcyjnych. Beton oddzielany jest od zbrojenia, cegły, drewna czy metali. Kluczowym etapem jest kruszenie z zastosowaniem odpowiednich typów kruszarek, a następnie przesiewanie i – w razie potrzeby – płukanie. Dzięki temu uzyskuje się określone frakcje kruszywa, które podlegają dalszej ocenie.

5. Badania laboratoryjne kruszywa grubego i drobnego, w tym badania mikrostrukturalne

W laboratorium ocenie poddawane są właściwości fizyczne, mechaniczne i chemiczne kruszyw. Obejmują one m.in. gęstość ziaren, nasiąkliwość, odporność na rozdrabnianie, mrozoodporność, zawartość chlorków i siarczanów oraz skład materiałowy. Uzyskane wyniki klasyfikowane są zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 12620 i powiązanych specyfikacji.

Etapem proponowanej metodyki są badania mikrostruktury, takie jak mikroskopia optyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) oraz analiza rentgenowska (XRD). Umożliwiają one szczegółową ocenę cech fizykochemicznych kruszyw, identyfikację faz mineralnych oraz określenie jakości zaprawy cementowej związanej z ziarnami.

6. Ocena właściwości betonu z udziałem kruszywa z recyklingu – w tym etapie kruszywa z recyklingu stanowią składnik nowych mieszanek betonowych. Analizuje się ich wpływ na konsystencję, urabialność, wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, mrozoodporność, nasiąkliwość czy cechy związane z trwałością. Pozwala to na weryfikację, czy dane kruszywo może zastąpić surowiec naturalny w określonych klasach betonu oraz w jakim udziale objętościowym jego użycie jest technicznie, ekologicznie i ekonomicznie uzasadnione.

Proponowany układ etapów tworzy algorytm działań – od identyfikacji materiału w konstrukcji, przez jego selektywne pozyskanie, aż po laboratoryjną ocenę właściwości. Takie podejście zapewnia, że decyzje o zastosowaniu kruszywa z recyklingu są oparte na wiarygodnych i kompletnych danych, a jednocześnie wykorzystany jest cały potencjał materiału z recyklingu.



Rys. 1. Proponowany algorytm oceny kruszywa z recyklingu

3. Identyfikacja i ocena materiałów przed rozbiórką

Przed przystąpieniem do rozbiórki budynku kluczowym etapem jest analiza istniejącej dokumentacji obiektu. Najlepiej rozpocząć od dokumentacji projektowej, która zawiera szczegółowe informacje o konstrukcji, materiałach oraz przeznaczeniu obiektu, a tym samym zakładanych klasach ekspozycji. Jeśli dokumentacja projektowa nie jest dostępna, można sięgnąć po inne dostępne analizy lub ekspertyzy wykonane w trakcie użytkowania budynku, które również dostarczają cennych danych na temat stanu technicznego i charakterystyki konstrukcji. Problem z oceną charakterystyki materiałów dotyczy również magazynów odpadów, gdzie przez lata gromadzony jest materiał rozbiórkowy, często bez danych o jego pochodzeniu i wcześniejszych warunkach eksploatacji.

Współczesną, bardzo pomocną metodą w ocenie ilościowej i wstępnej jakościowej jest wykorzystanie skanowania 3D istniejącej konstrukcji. Skanowanie 3D to technika optycznego pozyskiwania informacji o geometrii obiektów fizycznych z wykorzystaniem sztucznie generowanych zewnętrznych źródeł światła [16]. Dane uzyskane w trakcie skanowania zapisywane są w formie cyfrowej chmury punktów, odwzorowującej przestrzenne położenie elementów skanowanego obiektu [17]. W postprocessingu – chmura punktów jest oczyszczana z artefaktów, a następnie poddawana triangulacji, co umożliwia wygenerowanie trójkątnej siatki STL [18].

W systemach skanowania wykorzystywane są różne typy urządzeń projekcyjnych, w tym aktywne jednostki, takie jak skanery laserowe oraz skanery światła strukturalnego, a także jednostki pasywne, oparte na analizie naturalnego światła odbitego od obiektu lub promieniowania w paśmie podczerwonym.

W przypadku skanowania dużych obiektów, takich jak budynki [19],[20], najczęściej stosuje się pasywne skanery optyczne, charakteryzujące się wysoką wydajnością i dobrą dokładnością pomiarową. Proces ten obejmuje wykonywanie pomiarów z wielu pozycji obserwacyjnych, przy czym sąsiadujące stanowiska mają wspólne obszary pomiarowe, co umożliwia precyzyjne łączenie i integrację danych.

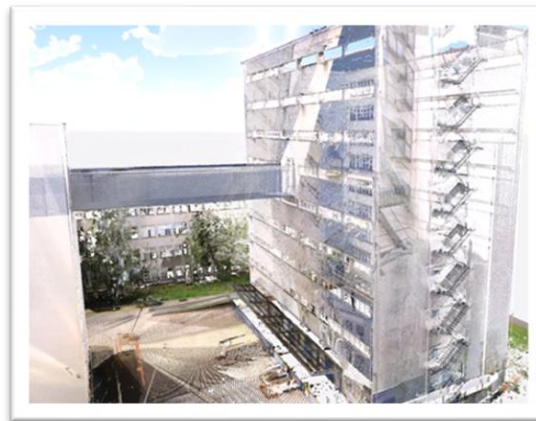
Technologia ta umożliwia szybkie i precyzyjne odwzorowanie geometrii obiektu, co pozwala na określenie wymiarów i liczby elementów konstrukcyjnych oraz na wstępną ocenę ilości i jakości betonu. Skan 3D ułatwia także optymalne wytypowanie miejsc do wykonania odwiertów, pozwalając na dokładną analizę przestrzenną i minimalizację ryzyka uszkodzeń podczas pobierania próbek. Dzięki temu proces badania stanu konstrukcji jest bardziej efektywny i bezpieczny. Przykładem takiego urządzenia jest naziemny skaning laserowy Terrestrial Laser Scanners (TLS) [20]. Działanie TLS opiera się na precyzyjnym pomiarze odległości pomiędzy skanerem a powierzchnią obiektu, co w połączeniu z pomiarem kąta umożliwia wyznaczenie współrzędnych 3D dużej liczby punktów w krótkim czasie. Skaner charakteryzuje się zakresem pomiarowym od 0,6 m do 70 m oraz rozdzielczością obrazu dochodzącą do 165 megapikseli w kolorze. Maksymalna dokładność pomiarowa wynosi ± 1 mm. Urządzenie zapewnia szerokie pole widzenia, obejmujące 360° w płaszczyźnie poziomej oraz 300° w pionie. Skanowanie odbywa się z wysoką prędkością, osiągającą do 2 milionów punktów na sekundę. Przystosowany jest do pracy w zróżnicowanych warunkach środowiskowych – działa w zakresie temperatur od -5°C do $+40^\circ\text{C}$ oraz cechuje się odpornością na podwyższoną wilgotność i zapylenie. Dane z pomiarów 3D znajdują zastosowanie przy cyfryzacji obiektów budowlanych. Trójwymiarowe skany umożliwiają tworzenie

dokładnych modeli, wykorzystywanych m.in. do analiz inżynierskich i obliczeń numerycznych [21], [22].

Przykład rezultatu badań skanerem przedstawiono na Rys. 2 i Rys. 3. Obiekt to budynek magazynu opakowań, który został zaprojektowany w konstrukcji żelbetowej, prefabrykowanej.



(a)



(b)

Rys. 2. Dokumentacja konstrukcji obiektu przed rozbiórką (a) zdjęcie tradycyjne, (b) obraz wykonany przy użyciu skanera 3D Faro Focus



(a)



(b)

Rys. 3. Dokumentacja wnętrza konstrukcji obiektu przed rozbiórką (a) zdjęcie tradycyjne, (b) obraz wykonany przy użyciu skanera 3D Faro Focus

3. Badania betonu przed rozbiórką

Po zgromadzeniu i przeanalizowaniu dokumentacji w tym danych z pomiarów 3D, kolejnym krokiem jest wytypowanie miejsc do wykonania odwiertów rdzeniowych w istniejącej konstrukcji. Odwierty te pozwalają na pobranie próbek betonu, które umożliwiają ocenę jego właściwości fizycznych i jakościowych, takich jak wytrzymałość na ściskanie, skład kruszywa, czy obecność ewentualnych zanieczyszczeń, zasięg

karbonatyzacji. Miejsca odwiertów powinny być dobrane tak, by minimalnie wpływać na integralność konstrukcji (Rys. 4).

Wytypowanie odpowiednich miejsc do wykonania odwiertów rdzeniowych jest kluczowe dla uzyskania reprezentatywnych i wiarygodnych wyników badań. Najważniejsze z kryteriów, które należy uwzględnić przy planowaniu lokalizacji odwiertów:

- **Reprezentatywność różnych elementów konstrukcyjnych** - Odwierty powinny obejmować różnorodne elementy nośne budynku, takie jak słupy, belki, płyty stropowe czy ściany nośne. Każdy z tych elementów może charakteryzować się innymi właściwościami materiałowymi i technologicznymi, wynikającymi z różnic w projektowaniu, wykonaniu czy eksploatacji. Pobranie próbek z różnych typów elementów pozwala na kompleksową ocenę stanu technicznego całej konstrukcji oraz identyfikację ewentualnych miejsc o obniżonej jakości lub uszkodzeniach. Ponadto, analiza różnych elementów umożliwia lepsze zrozumienie rozkładu naprężeń i zachowania konstrukcji podczas rozbiórki.



Rys. 4. Przykład odwiertów wykonanych w celu oceny charakterystycznej wytrzymałości na ściskanie

- **Minimalizacja wpływu na nośność i stabilność konstrukcji** - Podczas wyboru miejsc odwiertów należy zadbać o to, aby pobieranie próbek nie osłabiło istotnie nośności i stabilności konstrukcji, zwłaszcza jeśli rozbiórka będzie realizowana etapami lub jeśli obiekt będzie nadal użytkowany do momentu rozpoczęcia prac rozbiórkowych. Odwierty powinny być wykonywane w miejscach, które nie są kluczowe dla utrzymania integralności konstrukcji, a ich rozmiar i liczba powinny być ograniczone do niezbędnego minimum. W praktyce oznacza to unikanie wykonywania odwiertów w bezpośrednim sąsiedztwie połączeń konstrukcyjnych, stref koncentracji naprężeń czy elementów poddanych największym obciążeniom.
- **Dostępność techniczna i bezpieczeństwo wykonania odwiertów** - Kolejnym istotnym kryterium jest zapewnienie, że wytypowane miejsca będą dostępne technicznie i bezpieczne do wykonania odwiertów. Należy uwzględnić warunki przestrzenne, takie jak dostęp do powierzchni elementów konstrukcyjnych, obecność instalacji technicznych, przeszkód architektonicznych czy ograniczeń związanych z bezpieczeństwem pracy. W niektórych przypadkach konieczne może być zastosowanie specjalistycznego sprzętu lub metod umożliwiających wykonanie odwiertów w trudno dostępnych miejscach. Ponadto, podczas

planowania należy uwzględnić kwestie związane z ochroną osób wykonujących prace oraz minimalizacją wpływu na otoczenie, zwłaszcza w obiektach użytkowanych.

4. Rozbiórka i sortowanie materiałów

Proces recyklingu materiałów budowlanych rozpoczyna się już na placu budowy, gdzie prowadzona jest selektywna segregacja odpadów. W ramach tego etapu oddzielane są frakcje takie jak beton, cegła, ceramika, asfalt, metal, drewno oraz tworzywa sztuczne. Taki podział pozwala na bardziej efektywne przetwarzanie surowców i minimalizację zanieczyszczeń między poszczególnymi materiałami [25,26,27]. W zależności od charakteru inwestycji oraz dostępnych zasobów, przetwarzanie może odbywać się bezpośrednio na miejscu lub w specjalistycznych zakładach recyklingowych. Do jednego z kluczowych etapów należy oddzielenie zbrojenia stalowego od gruzu betonowego. W tym celu wykorzystuje się mobilne kruszarki wyposażone w elektromagnesy lub separatory magnetyczne, które skutecznie wyłapują elementy metalowe z rozdrobnionego materiału. Następnie odpady trafiają do kruszenia, gdzie wykorzystywane są różne typy kruszarek, m.in. szczękowe, udarowe (HSI i VSI) oraz stożkowe. Dobór maszyny zależy od rodzaju surowca oraz wymaganej frakcji końcowej. Kruszarki szczękowe lepiej sprawdzają się przy redukcji większych elementów i pozwalają na zachowanie części zaprawy cementowej przy ziarnach. Z kolei kruszarki udarowe skuteczniej rozbijają materiał i nadają kruszywom bardziej kulisty kształt, choć generują większy udział drobnych frakcji i wyższą nasiąkliwość. Po kruszeniu następuje przesiewanie przy użyciu przesiewaczy wibracyjnych, które pozwalają oddzielić materiał na poszczególne frakcje oraz usunąć zanieczyszczenia i pyły. W wielu zakładach stosuje się dodatkowo płukanie wodne, które poprawia czystość materiału i znacząco obniża jego nasiąkliwość, co ma duże znaczenie przy późniejszym zastosowaniu kruszyw w betonie. Wydajność tych procesów może wynosić od kilkudziesięciu do kilkuset ton na godzinę, w zależności od konfiguracji maszyn i rodzaju materiału wejściowego [28,29]. Sposób kruszenia oraz dalszej obróbki ma bezpośredni wpływ na właściwości kruszyw z recyklingu. Dlatego kompleksowa ocena aspektów ekonomicznych, ekologicznych i technicznych związanych z wykorzystaniem kruszyw z recyklingu powinna stanowić niezbędny element przy wyborze rozwiązań proekologicznych i ich praktycznych zastosowań w betonie. Niemniej jednak, wciąż brakuje narzędzi, które w sposób holistyczny wspierałyby proces podejmowania decyzji dotyczących zastosowania kruszyw [30, 31].

5. Badania laboratoryjne grubych kruszyw z recyklingu

W procesie oceny przydatności kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu do zastosowań w betonie kluczowe jest przeprowadzenie kompleksowych badań jego właściwości fizycznych, mechanicznych oraz chemicznych. Analiza tych parametrów pozwala na ocenę jakości materiału oraz jego wpływu na trwałość i bezpieczeństwo elementów konstrukcji wytwarzanych z użyciem kruszywa z recyklingu.

Podstawowym etapem jest określenie wymiaru i uziarnienia kruszywa, które wpływają na strukturę oraz urabialność mieszanki betonowej. Zawartość frakcji drobnej jest

istotna z punktu widzenia właściwości roboczych i wytrzymałościowych betonu. Gęstość ziaren oraz chłonność wody są kluczowe dla bilansu wodnego mieszanki oraz trwałości konstrukcji. Indeksy kształtu i płaskości ziaren wpływają na zagęszczenie i właściwości mechaniczne betonu. Odporność na rozdrabnianie oraz na miażdżenie świadczą o trwałości kruszywa pod wpływem obciążeń mechanicznych.

Istotna jest także ocena naturalnej radioaktywności materiału, która ma znaczenie dla bezpieczeństwa użytkowników konstrukcji. Analiza zawartości metali ciężkich i innych substancji niebezpiecznych pozwala na kontrolę toksyczności i wpływu na środowisko, co jest szczególnie ważne w przypadku kruszyw z recyklingu. Niska zawartość chlorów, siarki i siarczanów wpływa na przydatność kruszywa z recyklingu w kontekście korozji zbrojenia. Jakość pyłu oraz odporność na działanie mrozu są kolejnymi parametrami decydującymi o trwałości materiału w zmiennych warunkach atmosferycznych.

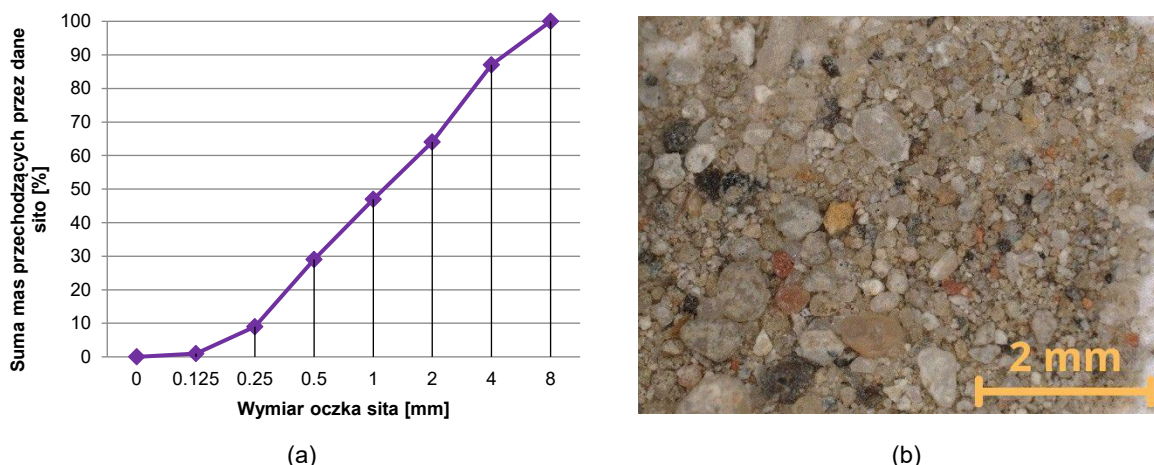
Analiza składu kruszywa pozwala na określenie udziału różnych komponentów, co wpływa na stabilność właściwości mechanicznych i fizycznych materiału. Klasyfikacja zgodna z obowiązującymi normami umożliwia właściwe zastosowanie kruszywa w budownictwie.

6. Badania laboratoryjne drobnych kruszyw z recyklingu

W świetle obowiązujących przepisów i zaleceń norm, drobne kruszywo z recyklingu, dopuszczane do stosowania w produkcji betonu, podlega weryfikacji szeregu istotnych właściwości fizykochemicznych, określonych m.in. w tabeli E.3.1 zawartej w załączniku do normy EN 12620:2002+A1:2008 [16]. Tabela 1 przedstawia zakres podstawowych wymagań wobec kruszyw recyklingowych, klasyfikowanych jako typ A, co oznacza materiały spełniające najwyższe wymagania jakościowe dla zastosowań konstrukcyjnych. Wymagana jest między innymi kontrola zawartości pyłów, która musi być określona ilościowo lub przypisana do odpowiedniej kategorii. Jakość frakcji pylastych oceniana jest poprzez wskaźnik błękitu metylowego, którego wartość nie powinna przekraczać 1,2 g/100 g. Gęstość ziaren w stanie suchym powinna wynosić co najmniej 2100 kg/m³, natomiast nasiąkliwość musi zostać zadeklarowana na podstawie wyników badań. Ponadto niezbędne jest określenie składu materiałowego frakcji, zgodnie z klasyfikacją zawierającą komponenty takie jak beton (Rc), beton oraz kruszywa niezwiązane (Rcu), ceramika czerwona (Rb), inne odpady ceramiczne (Ra), tworzywa lekkie (FL) oraz pozostałe (XRg). Wymagania te są zgodne z dopuszczalnymi udziałami poszczególnych składników, wskazującymi na dominację frakcji betonowych. Kolejnymi parametrami podlegającymi weryfikacji są: zawartość siarczanów rozpuszczalnych w wodzie, która nie powinna przekraczać SS_{0,2}, zawartość jonów chlorkowych rozpuszczalnych w kwasie – dla której wymaga się wartości deklarowanej – oraz wpływ kruszywa na początek czasu wiązania cementu, który nie powinien przekraczać wartości odpowiadającej A₄₀.

Norma EN 12620:2002+A1:2008 [16] formalnie nie wymaga badania składu drobnych frakcji kruszywa z recyklingu (składników Rc, Rcu, Rb, Ra itd.) – wymaganie to dotyczy jedynie kruszywa grubego z tego samego źródła. Jednak, zasadnym podejściem badawczym jest wykonanie również analizy składu dla drobnych frakcji. W praktyce można to osiągnąć poprzez np. analizę zdjęć mikroskopowych (optycznych

lub SEM) - Rys. 5, które pozwalają na oszacowanie udziałów składników mineralnych i pochodzenia materiału (np. ceramika, zaprawa, beton, inne zanieczyszczenia).



Rys. 5. Drobne kruszywo z recyklingu: a – uziarnienie, b – obraz mikroskopowy

7. Sprawdzenie potencjału kruszywa z recyklingu w mieszance betonowej i betonie

Końcowym i niezbędnym etapem proponowanej metodyki jest weryfikacja właściwości kruszyw z recyklingu w recepturach betonowych. Obejmuje ona zarówno analizę cech świeżej mieszanki (urabialność, konsystencja), jak i ocenę parametrów stwardniałego betonu (wytrzymałość, mrozoodporność, cechy związane z trwałością). Uzupełnieniem jest ocena ekologiczna i ekonomiczna, pozwalająca określić, czy zastosowanie kruszyw z recyklingu stanowi realną alternatywę dla kruszyw naturalnych.

8. Podsumowanie

W obliczu wyzwań związanych ze zrównoważonym rozwojem oraz koniecznością ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych, coraz większego znaczenia nabierają działania ukierunkowane na odzysk materiałów. Ocena właściwości kruszyw pochodzących z recyklingu wykorzystywanych w betonie potwierdza ich proekologiczny potencjał i wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. Problematyka kruszyw z recyklingu związana z ich praktycznym zastosowaniem dotyczy ich heterogeniczności. Konstrukcje przeznaczone do rozbiórki stanowią źródło kruszyw wtórnych o zmiennych właściwościach, których jakość zależy od rodzaju zastosowanych materiałów, wieku obiektu oraz warunków eksploatacyjnych. Żeby móc w sposób zrównoważony zarządzać ich jakością, można na etapie przed rozbiórką wykonać badania identyfikujące w celu określenia charakterystyk związanych i prognozować możliwe zastosowanie kruszyw. Aby móc w sposób zrównoważony zarządzać jakością pozyskiwanych kruszyw, warto już na etapie poprzedzającym rozbiórkę przeprowadzić badania identyfikacyjne. Pozwalają one określić kluczowe charakterystyki materiałów oraz prognozować ich potencjalne zastosowanie w dalszych procesach budowlanych.

Zaproponowana metodyka stanowi kompleksowe podejście do oceny jakości kruszywa z recyklingu, umożliwiające pełne wykorzystanie potencjału materiałowego zarówno frakcji drobnych, jak i grubych. Jej wieloetapowy charakter zapewnia spójność i wiarygodność wyników, a pominięcie któregośkolwiek z etapów może prowadzić do utraty części tego potencjału oraz ograniczenia możliwości praktycznego zastosowania kruszywa z recyklingu.

8. Literatura

- [1] J. Skocek, A. Ouzia, E. Vargas Serrano, and N. Pato, "Recycled Sand and Aggregates for Structural Concrete: Toward the Industrial Production of High-Quality Recycled Materials with Low Water Absorption," *Sustainability*, vol. 16, no. 2. 2024. doi: 10.3390/su16020814.
- [2] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S. K. Panda, S. Nayak, and S. C. Dutta, "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 721–740, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>.
- [3] L. Kacimi, A. Simon-Masseron, S. Salem, A. Ghomari, and Z. Derriche, "Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 7, pp. 559–565, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.02.004>.
- [4] M. Bardan and L. Czarnecki, "Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study," *Materials*, vol. 18, no. 3. 2025. doi: 10.3390/ma18030488.
- [5] J. Hu, X. He, Q. Li, and S. Bai, "Experimental Study on the Influence of Specific Factors on the Compressive Strength of Recycled Fine Aggregate Concrete," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/304/5/052083.
- [6] F. de Andrade Salgado and F. de Andrade Silva, "Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 52, p. 104452, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104452>.
- [7] "PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność."
- [8] M. Kępniać and P. Łukowski, "Multicriteria Analysis of Cement Mortar with Recycled Sand," *Sustainability*, vol. 16, no. 5. 2024. doi: 10.3390/su16051773.
- [9] O. Boudlal and B. Melbouci, "Study of the behavior of aggregates demolition by the proctor and CBR tests," in *Geotechnical Special Publication*, 2009, pp. 75–80. doi: 10.1061/issno(352)12.
- [10] K. A. Mocová, H. Roztočilová, and D. Mariaková, "ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF RECYCLED AGGREGATE AND CONCRETE VIA AQUATIC BIOTESTS," in *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2022, pp. 672–677. doi: 10.14311/APP.2022.38.0672.
- [11] S. Jeon, "Study on the Validity of Tertiary Testing of Certified Recycled Coarse Aggregates Based on the Analysis of Follow-up Audits," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, vol. 39, no. 2, pp. 160–165, 2022, doi: 10.9786/kswm.2022.39.2.160.
- [12] B. Melbouci, "Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 8, pp. 2723–2730, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.03.004.

- [13] J. Tavira, J. R. Jiménez, J. Ayuso, M. J. Sierra, and E. F. Ledesma, "Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil," *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 57–69, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195.
- [14] A. Naim et al., "Assessing the Feasibility, Usability, and Durability of Recycled Construction and Demolition Waste in Road Construction in Morocco," in *Materials Research Proceedings*, 2024, pp. 19–32. doi: 10.21741/9781644903117-3.
- [15] V. W. Y. Tam, C. Y. Lo, and J. Xiao, "Bringing recycled aggregate to its full potential," *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.*, vol. 166, no. 3, pp. 128–136, 2013, doi: 10.1680/warm.12.00020.
- [16] J. Flugge, K. Wendt, H. Danzebrink, and A. Abou-zeid, "Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 2, pp. 685–699, 2002.
- [17] V. Peansupap and A. M. May, "Development of a System for Measuring Surface Slope with Point Cloud Data," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 369, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 507–516. doi: 10.1007/978-981-99-4049-3_40.
- [18] M. Szilvási-Nagy and G. Mátyási, "Analysis of STL Files," *Math. Comput. Model.*, vol. 38, no. 7–9, pp. 945–960, 2003, doi: 10.1016/s0895-7177(03)90079-3.
- [19] H. H. Tran, H. Q. Vu, and A. Van Tran, "Application of FARO Focus 3D S350 Terrestrial Laser Scanner in Building 3D Models of Potential Areas of Landslides and Rocks—Case Study in Ha Giang Province, Vietnam," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 344 LNCE, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 703–710. doi: 10.1007/978-981-99-2345-8_72.
- [20] N. Shen et al., "A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 223, p. 113684, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113684.
- [21] A. Piekarczyk, E. Sudoł, and A. Mazurek, "Measurement analysis of large-area elements of External Thermal Insulation Composite Systems using 3D scanning techniques," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 233, no. April, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114755.
- [22] A. Piekarczyk, A. Mazurek, J. Szer, and I. Szer, "A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3703, 2024.
- [23] M. Gruszczyński and A. Golda, "Zmiany w normalizacji betonu," *Bud. • Technol. • Arch.*, vol. 1 (109), pp. 76–78, 2025.
- [24] WOYCIECHOWSKI, Piotr. Model karbonatyzacji betonu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo*, 2013.
- [25] NEDELJKOVIĆ, Marija, et al. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102196.
- [26] BRAVO, Miguel, et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 357-369.
- [27] DELVOIE, Simon, et al. Construction and Demolition Wastes: specific conditions for recycling in North West Europe. *Cement, Wapno, Beton*, 2020, 1.
- [28] PEIRIS, Dulshi, et al. Impact of treatment methods on recycled concrete

- aggregate performance: a comprehensive review. Environmental Science and Pollution Research, 2025, 1-34.
- [29] BARDAN, Magdalena; CZARNECKI, Lech. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. Materials, 2025, 18.3: 488.
- [30] HUBERT, Julien, et al. Effect of crushing method on the properties of produced recycled concrete aggregates. Buildings, 2023, 13.9: 2217.
- [31] SALEHI, Safoura, et al. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127936.