

mgr inż. Magdalena Bardan
Instytut Techniki Budowlanej
prof. dr hab. inż. Czarnecki Lech
Sekretarz naukowy, Instytut Techniki Budowlanej

Ocena stopnia zrównoważenia hybrydowego betonu z recyklingu Assessment of the Sustainability Index of Hybrid Recycled Concrete

Streszczenie

Zrównoważone materiały budowlane są definiowane jako te wpisujące się w założenia gospodarki obiegu zamkniętego (CE). Kluczowe pytanie badawcze dotyczy identyfikacji materiałów wystarczająco zrównoważonych dla sektora budownictwa, ze szczególnym uwzględnieniem kruszyw z recyklingu (RA, z ang. Recycled Aggregate). Kolejne zagadnienie badawcze: w jakim stopniu beton zawierający RA (RAC, z ang. Recycled Aggregate Concrete) zbliża się do koncepcji idealnego betonu zrównoważonego? Z przeprowadzono wielokryterialną analizę betonu z dodatkiem RA, uwzględniając pięć aspektów: środowiskowy, ekonomiczny, społeczny oraz techniczne właściwości RA i RAC. Dane pozyskano autorską metodą ekstrakcji z wykorzystaniem narzędzi opartych na sztucznej inteligencji (AI). Holistyczna perspektywa, uwzględniająca synergię kluczowych czynników w sposób zintegrowany, pozwala na określenie poziomu idealnego betonu-RAC. W wyniku oceny nie znaleziono wyrobu posiadającego wszystkie pożądane cechy, określane w tym artykule jako „idealne właściwości kruszyw do betonu”. Beton z kruszywem naturalnym (NAC, z ang. Natural Agregate Concrete) charakteryzuje się niższym stopniem zrównoważenia niż RAC; osiąga on ok. 55 % maksymalnej wartości w skali ideału, jednak tylko wówczas, gdy jest stosowany zgodnie z określonym reżimem technologicznym. Wielokryterialna analiza stanowi zaawansowane narzędzie wspierające podejmowanie decyzji przez producentów, umożliwiając wskazanie rozwiązań proekologicznych o istotnym wpływie na środowisko. Kolejne badania pilotażowe pozwolą zweryfikować praktyczną użyteczność i skuteczność w identyfikacji zrównoważonych rozwiązań technologicznych w budownictwie.

Abstract

Sustainable building materials are defined as those aligned with the principles of the circular economy (CE). The key research question concerns the identification of materials that can be considered sufficiently sustainable for application in the construction sector, with particular emphasis on recycled aggregates (RA). A further research issue is the extent to which concrete containing RA—referred to as Recycled Aggregate Concrete (RAC)—approaches the concept of an ideal sustainable concrete. To address these questions, a multi-criteria analysis of RAC was conducted, incorporating five key aspects: environmental, economic, and social dimensions, as well as the technical properties of both RA and RAC. Data were obtained using a proprietary data extraction method based on artificial intelligence (AI) tools. A holistic perspective, integrating the synergy of these critical factors, enabled the assessment of the degree to which RAC approaches an ideal state. The evaluation revealed that no product exhibited all the desirable characteristics referred to in this paper as “ideal aggregate properties for concrete.” Concrete with natural aggregates (NAC) demonstrated a lower sustainability index compared to RAC—reaching approximately 55% of the maximum value on the ideal scale—but only under specific technological conditions. The applied multi-criteria framework serves as an advanced decision-support tool for manufacturers, enabling the identification of environmentally friendly solutions with significant environmental and economic impact. Future pilot studies will aim to verify the practical applicability and effectiveness of this approach in identifying sustainable technological solutions for the construction industry.

1. Wprowadzenie

Kruszywa z recyklingu, uzyskiwane poprzez rozdrobnienie gruzu pochodzącego z rozbioru budynków – w tym również obiektów zniszczonych na skutek klęsk żywiołowych, takich jak powodzie czy silne wiatry – stanowią obiecującą alternatywę dla kruszyw naturalnych w produkcji betonu [1–5]. Z technicznego punktu widzenia, RA to kruszywa naturalne pokryte pozostałościami pierwotnej zaprawy cementowej [6]. Wykorzystanie RA jest szczególnie istotne w kontekście ograniczania eksploatacji surowców naturalnych oraz redukcji ilości odpadów budowlanych (CDW) trafiających na wysypiska [7–9]. Pomimo licznych doniesień naukowych potwierdzających zalety zastosowania RA, ich wykorzystanie w produkcji betonu konstrukcyjnego na skalę przemysłową nadal pozostaje marginalne [10]. Na tym tle rodzi się zasadnicze pytanie: czy beton z dodatkiem kruszyw z recyklingu wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej? Z perspektywy narzędzi opartych na sztucznej inteligencji odpowiedź brzmi jednoznacznie – TAK [11]. Jednak przy bardziej krytycznym podejściu należy zauważyć, że istnieją bariery ograniczające ten proces. Wymagają one dalszej analizy, aby wyznaczyć nowe kierunki rozwoju zrównoważonych rozwiązań betonowych opartych na wykorzystaniu RA [12].

Niniejszy artykuł stanowi opracowanie przeglądowe, którego głównym celem jest ocena możliwości zastosowania betonu RAC jako zamiennika dla tradycyjnego betonu opartego na kruszywie naturalnym (NAC). W badaniu zastosowano oryginalną metodologię wielokryterialnej oceny, która w sposób zintegrowany uwzględniała czynniki

środowiskowe, ekonomiczne, społeczne oraz techniczne, ze szczególnym naciskiem na jakość RA oraz ich oddziaływanie na właściwości eksploatacyjne i trwałość betonu RAC, co pozwoliło na identyfikację potencjalnych barier oraz możliwości wdrożenia tych materiałów w budownictwie zrównoważonym. Opracowano oryginalną metodę ekstrakcji danych literaturowych z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji (AI), która stanowiła podstawę przeprowadzonych analiz. Do oceny wyników zastosowano oryginalną metodę punktową opartą na skali „idealnych właściwości kruszyw do betonu” dla każdego z analizowanych aspektów, co umożliwiło przejrzystą prezentację wyników i ich interpretację.

2. Materiały i metody

2.1. Metody

Celem przeprowadzonych analiz było określenie, w jakim stopniu RAC spełnia kryteria zrównoważonego rozwoju w porównaniu do NAC. Opracowano autorską, czteroetapową metodykę, integrującą przegląd literatury z wykorzystaniem narzędzi sztucznej inteligencji (AI), ocenę wskaźnikową oraz analizę porównawczą kluczowych cech środowiskowych, ekonomicznych, społecznych i technicznych. Podejście to umożliwiło kompleksową ocenę potencjału zastosowania kruszyw z recyklingu w budownictwie zrównoważonym.

W etapie I – opracowano zestaw kluczowych aspektów i wskaźników zrównoważenia w oparciu o pożądane cechy produktu – na podstawie przeglądu literatury [13-24] zidentyfikowano pięć aspektów zrównoważenia: środowiskowy, ekonomiczny, społeczny, jakość kruszywa oraz właściwości betonu. Dla każdego aspektu dobrano trzy kluczowe wskaźniki, które umożliwiały identyfikację zalet i wad materiałów z uwzględnieniem analizy cyklu życia. W kontekście środowiskowym skupiono się na: emisji CO₂ w trakcie produkcji, zużyciu zasobów naturalnych oraz składowaniu odpadów. W ujęciu ekonomicznym analizowano: koszty produkcji, transportu oraz utylizacji odpadów. W obszarze społecznym uwzględniono: poziom akceptacji społecznej, przejrzystość przepisów oraz wpływ na projektowanie receptur betonowych. Dla jakości kruszyw analizowano: zawartość zanieczyszczeń, nasiąkliwość, odporność na rozkruszanie oraz jednorodność partii. W aspekcie właściwości betonu analizowano wpływ na trwałość, reologię mieszanki i wytrzymałość betonu.

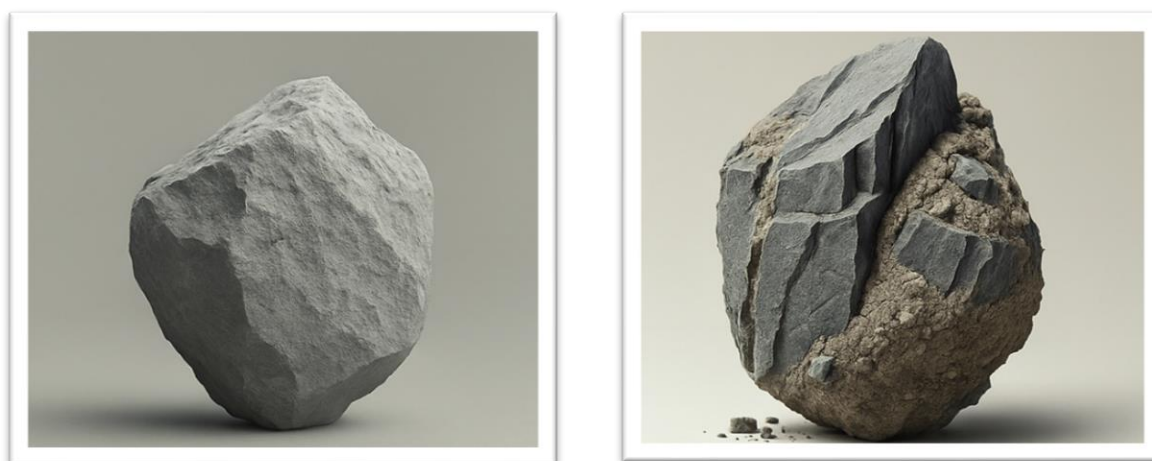
W etapie II – dokonano klasyfikacji wyników względem pożądanych cech produktu zrównoważonego - dokonano ekstrakcji danych - wykorzystano narzędzie AI (consensus.app) do pozyskania 100 publikacji z ponad 500 baz danych. Przeprowadzono selekcję treści na podstawie pytań analitycznych dotyczących RA, NA. Odpowiedzi sklasyfikowano jako: pozytywny wpływ, możliwy wpływ, negatywny wpływ.

W etap III – dokonano wielowymiarowej oceny cech zrównoważonego produktu – opracowano skalę oceny - kruszyw i betonów z ich udziałem, na podstawie udziału procentowego odpowiedzi. Przyjęto pięciostopniową skalę (1–5), od „nieakceptowalne” do „bardzo korzystne”.

W etapie IV - zidentyfikowano kluczowe wskaźniki zrównoważenia wpływających na efektywne zastosowanie RA- wpływające na skuteczność zastosowania RA. Wyniki przedstawiono graficznie, co umożliwiło wskazanie kierunków optymalizacji oraz ocenę potencjału materiałów w kontekście zrównoważonego budownictwa.

2.2. Materiały

Przedmiotem analizy były dwa rodzaje kruszyw stosowanych w produkcji betonu: kruszywa naturalne (NA) oraz kruszywa z recyklingu (RA), a także betony z ich udziałem. Dane pozyskano na podstawie przeglądu literatury naukowej oraz obowiązujących norm [24–26]. Na rysunku 1 zaprezentowano zdjęcia przedstawiające różnorodną budowę ziaren kruszywa tych kruszyw.



(a) NA, z ang Natural Aggregate (b) RA, z ang Recycled Aggregate
Rys.1. Struktura ziaren kruszywa grubego (a) naturalnego oraz (b) z recyklingu

Kruszywa naturalne (NA) pozyskiwane są w wyniku mechanicznej obróbki skał i cechują się niską porowatością, korzystną gęstością oraz stabilnymi właściwościami fizykochemicznymi. Kruszywa z recyklingu (RA) powstają z rozdrobnienia materiałów rozbiórkowych, takich jak beton czy cegły, i charakteryzują się wyższą porowatością, niejednorodnością oraz zmiennymi parametrami technicznymi, wynikającymi z obecności pierwotnej zaprawy cementowej na powierzchni ziaren. Wymagają one zwiększonego nadzoru i częstszej kontroli jakości w celu zapewnienia powtarzalności partii. Według danych z 2022 roku, w Europie wyprodukowano około 2,5 mld ton kruszyw naturalnych oraz 295 mln ton RA, z czego najwięcej wytworzono w Niemczech (80 mln ton), Francji (65,9 mln ton) i Niderlandach (23,5 mln ton) [27]. Zgodnie z normą [24], dopuszcza się stosowanie RA w betonie, pod warunkiem spełnienia odpowiednich klas ekspozycji oraz ograniczeń procentowego udziału w mieszance. Norma rozróżnia dwa typy RA (A i B) i określa metody badań, uwzględniające takie parametry jak kształt ziaren, odporność na rozkruszanie czy zawartość zanieczyszczeń. Chociaż wiele właściwości RA można ocenić podobnie jak NA, ze względu na ich zmienność materiałową konieczne jest rozwinięcie bardziej szczegółowych kryteriów jakości, które pozwoliłyby lepiej określić ich potencjalne zastosowania w budownictwie zrównoważonym.

3. Wyniki

Na podstawie sformułowanych pytań badawczych do pięciu aspektów środowiskowych, ekonomicznych, społecznej percepcji oraz jakości kruszyw i właściwości betonu, przeanalizowano po 50 publikacji dla każdego rodzaju kruszywa: RA oraz NA (łącznie 100 źródeł), w odniesieniu do każdego z wymienionych aspektów. W treści artykułów zidentyfikowano po trzy wskaźniki dla każdego aspektu. Na podstawie zebranych danych, wpływ został sklasyfikowany do jednej z trzech kategorii oceny: wpływ pozytywny, potencjalnie pozytywny oraz wpływ negatywny. Uzyskane wyniki zostały zregulowane i poddane analizie statystycznej, co umożliwiło określenie procentowego udziału każdej kategorii wpływu. Szczegółowe wyniki oceny oraz pełna bibliografia znajdują się w artykule „Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study” [28]. Zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Podsumowanie punktów i ocen w odniesieniu do „idealnych cech kruszyw”

Aspekt	Kruszywa naturalne (NA)	Kruszywa z recyklingu (RA)	Modelowe kruszywo – ideał zrównoważenia
Środkowy	2	10	10
Ekonomiczny	4	6	10
Społeczny	1	5	10
Techniczny – jakość kruszyw	6	1	10
Techniczny – trwałość betonu	6	5	10
Suma punktów	17	27	10

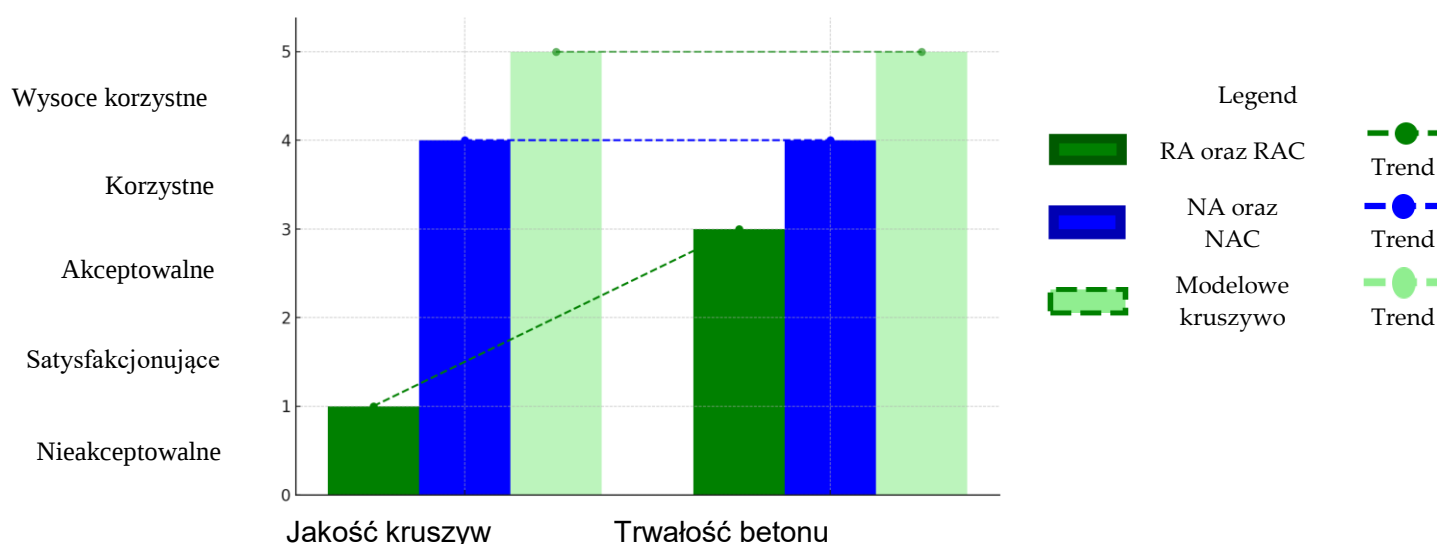
Na podstawie zsumowanych wyników punktowych przedstawionych w powyższej tabeli dokonano oceny poszczególnych aspektów. Ocena została przeprowadzona na podstawie przyjętej skali „idealnych właściwości kruszyw”, odnosząc się do wyników uzyskanych dla poszczególnych rodzajów kruszyw w pięciu kluczowych aspektach. Podsumowanie dotyczy odpowiedzi na pytania sformułowane w etapie II, których celem było określenie wpływu danego kruszywa na dany aspekt zrównoważenia. Zgodnie z autorską metodą punktową, końcowe oceny przedstawiają się następująco: Kruszywo z recyklingu (RA) uzyskało 16 punktów, co świadczy o jego wysokim potencjale w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, przy jednoczesnym wskazaniu konieczności poprawy jakości technicznej. Kruszywo naturalne (NA) osiągnęło 13 punktów – potwierdzając bardzo dobrą jakość techniczną i korzystny wpływ na właściwości betonu, jednak jego wynik obniżyły czynniki środowiskowe i wysokie koszty produkcji. Maksymalna możliwa liczba punktów – 25 – symbolizuje pełne spełnienie kryteriów zrównoważonego rozwoju. Żadne z badanych kruszyw nie osiągnęło tej wartości. Ostateczne wyniki wskazują, że mimo istotnych zalet, każde z analizowanych kruszyw wymaga dalszych działań optymalizacyjnych, aby mogło w pełni odpowiadać wymaganiom nowoczesnego budownictwa zrównoważonego. Zestawienie wyników zawarto w tabeli 2.

Tab. 2. Podsumowanie punktów i ocen w odniesieniu do „idealnych cech kruszyw”

Aspekt	Kruszywa naturalne (NA)	Kruszywa z recyklingu (RA)	Modelowe kruszywo – ideał zrównoważenia
Środkowiskowy	2 – zadawalające	5 – wysoce korzystne	5
Ekonomiczny	2 – zadawalające	4 - korzystne	5
Społeczny	1 - nieakceptowalne	3 - akceptowalne	5
Techniczny – jakość kruszyw	4 - korzystne	1 - nieakceptowalne	5
Techniczny – trwałość betonu	4 - korzystne	3 - akceptowane	5
Suma punktów	13	16	25

Rozważając aspekty jakości kruszyw oraz ich wpływ na jakość betonu, kruszywo naturalne (NA) uzyskało w obu kategoriach ocenę 4, co potwierdza jego wysoką jakość oraz pozytywny wpływ na właściwości betonu. W porównaniu z NA, kruszywo z recyklingu (RA) wypadło słabiej, uzyskując najniższą ocenę – 1 „nieakceptowalne”. Warto jednak zaznaczyć, że po zastosowaniu RA w mieszance betonowej, jego końcowa ocena wzrosła o dwa punkty, co wskazuje na możliwość zneutralizowania negatywnego wpływu jakości RA poprzez zastosowanie odpowiedniego reżimu technologicznego, szczególnie przy optymalnym udziale 25–30%, przy którym właściwości betonu pozostają na akceptowalnym poziomie. Wyniki ocen przedstawiono na rysunku 2.

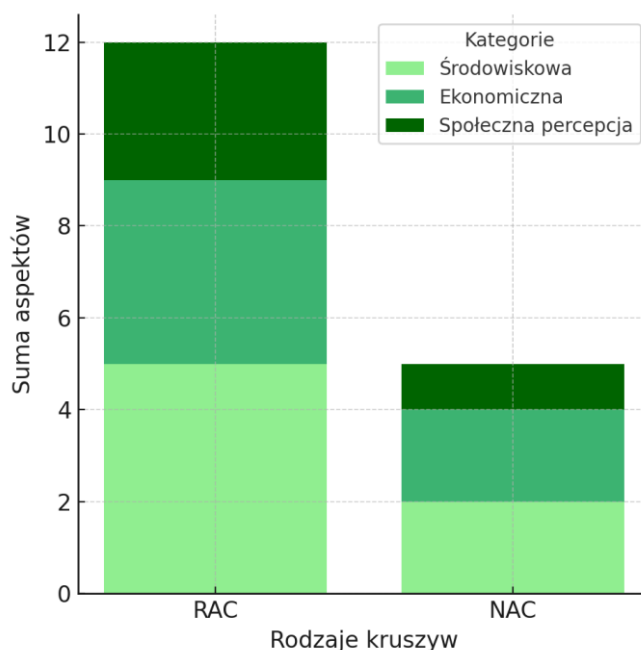
Ocena zrównoważenia kruszyw RA, NA oraz betonów RAC, NAC



Rys. 2. Wyniki oceny kruszyw RA, NA oraz betonów je zawierających w odniesieniu do pożądaných cech produktu zrównoważonego, na podstawie autorskiego systemu punktacji w zakresie tytułu wukresukresie jakości kruszywa i właściwości betonu.

Zastosowana skala punktowa odzwierciedla stopień spełnienia pożądanych cech materiału zrównoważonego, natomiast linie trendu ilustrują ogólne tendencje w analizowanych aspektach. W aspekcie środowiskowym, wszystkie 10 opinii (100%) dotyczących betonu z RA potwierdziły jego pozytywny wpływ ekologiczny. W przyjętej skali ocen sklasyfikowano ten wynik jako 5 – „bardzo korzystny”, co oznacza, że RA spełnia kryteria materiału zrównoważonego. Zastosowanie RA w betonie pozwala znacząco ograniczyć eksploatację kruszyw naturalnych, przyczyniając się do ochrony zasobów środowiskowych. Dla porównania, NA otrzymało niższą ocenę – 2 „zadowalające”, co wynika głównie z wysokiej emisji CO₂ oraz wpływu na degradację środowiska naturalnego. W zakresie ekonomicznym, RA uzyskało najwyższą ocenę – 4 „korzystna”, wskazując na istotne możliwości redukcji kosztów produkcji i transportu. NA wypadło słabiej, uzyskując ocenę 2 „zadowalająca”, co związane jest z wyższymi kosztami pozyskiwania i dostarczania surowca. W aspekcie percepcji społecznej, RA uzyskało ocenę 3 „akceptowalna”, natomiast NA – 1 „nieakceptowalna”. Pozytywne opinie w przypadku RA odnosiły się głównie do doświadczenia producentów betonu w projektowaniu receptur z wykorzystaniem materiałów pochodzących z recyklingu. W przypadku NA niska ocena może wynikać z rosnącej świadomości środowiskowej oraz preferencji dla rozwiązań bardziej ekologicznych.

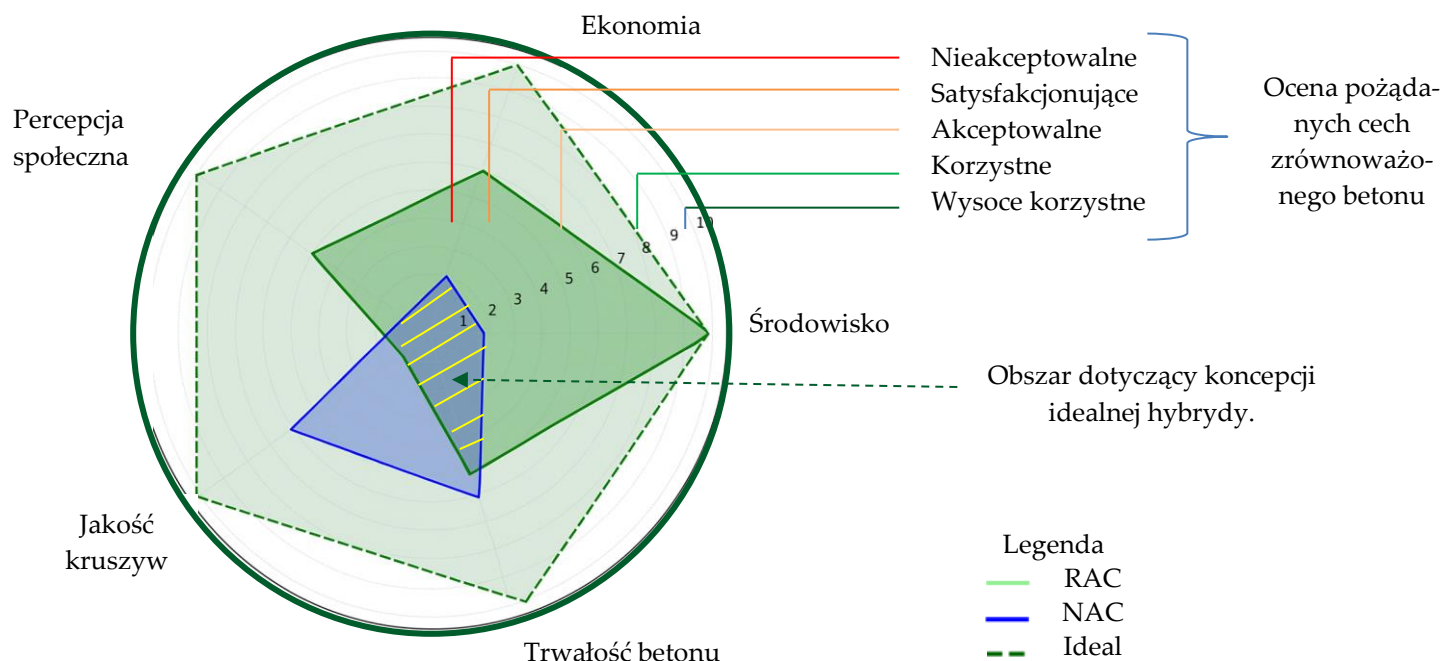
Żadne z badanych kruszyw nie spełnia w pełni wszystkich kryteriów zrównoważonego rozwoju. RA osiąga najlepsze wyniki w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, co potwierdza jego duży potencjał w kontekście zrównoważonego budownictwa. Z kolei NA pozostaje najbardziej korzystne pod względem parametrów technicznych oraz wpływu na właściwości mieszanki betonowej. Zestawienie wyników punktowych zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki oceny kruszyw RA, NA oraz betonów z ich udziałem w odniesieniu do pożądanych cech produktu zrównoważonego, na podstawie autorskiego systemu punktowego dla trzech aspektów: środowiskowego, ekonomicznego i społecznego

Dane zamieszczone na wykresie wskazują, że RAC jest najbardziej zrównoważonym rozwiązaniem spośród analizowanych materiałów, szczególnie w aspektach środowiskowym i ekonomicznym, co podkreśla jego potencjał jako materiału wspierającego zrównoważony rozwój. Dla porównania, NAC uzyskuje najniższe wyniki w „zielonych” kategoriach, co można przypisać jego negatywnemu wpływowi na środowisko oraz ograniczonej akceptacji społecznej – co stanowi wyzwanie dla jego postrzegania jako rozwiązania zgodnego z zasadami budownictwa zrównoważonego.

Przeprowadzona kompleksowa analiza pozwoliła na wskazanie kluczowych wskaźników mających istotny wpływ na ocenę zrównoważenia materiałów budowlanych. Wyniki zaprezentowano w formie punktowej i graficznej, co umożliwiło ocenę zalet i ograniczeń każdego z analizowanych rozwiązań. Takie podejście pozwoliło zidentyfikować obszary wymagające optymalizacji oraz cechy szczególnie sprzyjające rozwojowi zrównoważonemu. Porównując zrównoważony charakter RAC i NAC można wyróżnić dwie kluczowe kwestie. Po pierwsze, w ogólnej punktacji RAC uzyskało lepszy wynik — 27 punktów w porównaniu do 17 punktów zdobytych przez NAC. Po drugie, analizując punktację podzieloną na dwie grupy aspektów — pierwsza obejmuje kwestie środowiskowe, ekonomiczne oraz percepcję społeczną, natomiast druga — jakość kruszyw i ich wpływ na właściwości betonu — można zauważyć wyraźne różnice między tymi materiałami. RAC odgrywa kluczową rolę w pierwszej grupie, wyróżniając się jako zrównoważony produkt budowlany. Pozytywne aspekty z tej grupy stanowią aż 78% jego całkowitej oceny. Z kolei NAC dominuje w drugiej grupie dzięki wysokiej jakości kruszywa, co korzystnie wpływa na parametry betonu. W przypadku NAC, aspekty z pierwszej grupy stanowią jedynie 29% całkowitej oceny, co wskazuje na jego ograniczony wkład w zrównoważony rozwój w ujęciu środowiskowym i ekonomicznym. Beton z kruszywem z recyklingu osiągnął 54% wartości idealnej. Dla betonu z kruszywem naturalnym wartość ta wyniosła 34%. W kontekście środowiskowym beton z RAC uzyskał maksymalną liczbę punktów, a zatem wynik idealny.



Rys. Wizualizacja wskazuje kluczowy, wspólny obszar dla oceny zrównoważenia kruszyw.

Rys.4 przedstawia wyniki wielokryterialnej analizy, która ujawnia obszar wspólnych ograniczeń dotyczących wszystkich analizowanych typów kruszyw. Wskazany obszar skupia cechy uznane za nieakceptowalne zarówno dla samych kruszyw, jak i betonów, w których zostały one zastosowane. Zidentyfikowane problemy stanowią istotne bariery dla wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Dla kruszyw naturalnych największe wyzwania wynikają z ich negatywnego wpływu na środowisko, w szczególności z emisji CO₂ oraz skutków procesu wydobywania. Z kolei RA charakteryzują się niższymi parametrami jakościowymi, co wpływa na ograniczenia techniczne stosowanych mieszanek. W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskuje koncepcja betonu hybrydowego, która może stanowić kompromis między jakością a zrównoważeniem środowiskowym. RA (kruszony gruz betonowy) uzyskało najwyższy wynik w podsumowaniu wszystkich analizowanych aspektów.

4. Podsumowanie

Na podstawie Rysunków 2–4 naukowcy zidentyfikowali wspólne obszary, w których NA może być zastąpione kruszywem RA bez istotnego pogorszenia parametrów betonu, przy jednoczesnym zachowaniu korzyści wynikających ze zrównoważonego rozwoju. Na tej podstawie ponownie podkreślono istotną rolę betonu hybrydowego jako rozwiązania łączącego zalety obu rodzajów kruszyw. Inne istotne aspekty:

1. Optymalizacja ilości RA jako częściowego substytutu dla NA. Praktykowany poziom substytucji, przynoszący pozytywne efekty pod względem właściwości mechanicznych betonu RAC wynosi 25–30% [29]. Podobną analogię obserwuje się w mieszankach mineralno-asfaltowych, co podkreśla znaczenie precyzyjnego dostosowania proporcji RA w celu uzyskania optymalnych parametrów w obu materiałach [30]. Optymalne dozowanie RA skutecznie łagodzi problem jego heterogeniczności.
2. Ocena jakości RA jest kluczowa. Normy [24-26] dopuszczają stosowanie grubego kruszywa z recyklingu w betonie, jednak wymagania dotyczące jego jakości pozostają liberalne. Aby skuteczniej promować potencjał tego kruszywa w betonie, warto byłoby opracować i uzupełnić powszechnie obowiązujące dokumenty techniczne o precyzyjne kryteria oceny [31].
3. Analiza kosztów cyklu życia (LCA). Produkcja cementu ma największy wpływ na ograniczenie ilości równoważnika CO₂. Cement portlandzki odpowiada za 74–81% całkowitej emisji CO₂ związanej z betonem. Redukcja emisji CO₂ dzięki zastosowaniu RA wynosi ok 8%. Być może uwaga producentów cementu skupia się na rozwiązywaniu problemów związanych z wysoką emisją, przez co potencjał RA jest niedostatecznie dostrzegany. LCA to zatem narzędzie wspierające podejmowanie świadomych decyzji w zakresie wyboru zrównoważonych rozwiązań [32].
4. Promocja dobrych praktyk. Zamiast traktować odpady budowlane i rozbiórkowe (CDW) jako problem, należy je postrzegać jako wtórny surowiec o potencjale do generowania wartości ekonomicznej, np. poprzez recykling i produkcję nowych materiałów budowlanych. Taka zmiana podejścia wspiera gospodarkę o obiegu zamkniętym, zmniejszając marnotrawstwo zasobów i wpływ na środowisko [16-17]. Innym przykładem może być rozwój symbiozy przemysłowej, polegającej na efektywnej wymianie informacji, zasobów i technologii między

firmami i organizacjami [33]. Przykład udanego zastosowania grubego kruszywa z recyklingu na Sardynii również podkreśla znaczenie synergii między podmiotami [34].

5. Dodatki wspomagające rozwiązania hybrydowe. Wspierającym rozwiązaniem dla połączenia kruszyw naturalnych i z recyklingu mogą być zaawansowane domieszki, takie jak nanomateriały – szczególnie nano-krzemionka (NS), której zastosowanie wykazuje pozytywny wpływ na trwałość, mikrostrukturę i właściwości mechaniczne betonu z RA [35]. Inne badania wskazują, że włókna hybrydowe mogą wspierać zastosowanie RA w inżynierii budowlanej, dodatkowo zwiększając jego odporność na obciążenia dynamiczne [36-37]. Takie dodatki mogą również pochodzić z recyklingu, np. włókna z opon samochodowych [38].

5. Wnioski

Oparta na studium wykonalności analiza wielokryterialna pozwala na wszechstronną ocenę wzajemnych powiązań pomiędzy najważniejszymi aspektami wpływającymi na zrównoważony charakter produktów. Jest to zaawansowane narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji, szczególnie przy prognozowaniu rzeczywistych korzyści finansowych i energetycznych. Warto jednak zaznaczyć, że efektywne zastosowanie tego podejścia wymaga elastycznego dostosowania do konkretnych uwarunkowań i potrzeb danego projektu. Holistyczna perspektywa, uwzględniająca wszystkie kluczowe cechy w sposób zintegrowany, a nie izolowany, pozwala na bardziej rzetelną i wiarygodną ocenę ich przydatności oraz potencjalnego wpływu:

1. Beton z kruszywem z recyklingu, który uzyskał najwyższą ocenę w analizie zrównoważonego rozwoju przeprowadzonej w ramach kompleksowego studium wykonalności, został uznany za najbardziej korzystne rozwiązanie spośród analizowanych, otrzymując oznaczenie „zielony”.
2. Obecnie nie zidentyfikowano żadnego produktu na świecie, który spełniałby wszystkie pożądane cechy zrównoważonego materiału, określone w niniejszym opracowaniu jako „cechy idealne kruszyw do betonu”. RAC osiągnął 54% w odniesieniu do wartości idealnej. Dla NAC wskaźnik ten wyniósł 38%.
3. Wizualizacja wyników zaawansowanej analizy pozwoliła na zidentyfikowanie wspólnego obszaru dla wszystkich typów kruszyw, który można uznać za kluczowy w ocenie ich zrównoważonego charakteru. Obszar ten obejmuje cechy nieakceptowalne, wspólne dla wszystkich rodzajów kruszyw i betonów, w których zostały one zastosowane, co wskazuje na istotne wyzwania wymagające rozwiązania. Z tej perspektywy koncepcja betonu hybrydowego wyłania się jako potencjalny model mogący równoważyć te ograniczenia.

Aby wyjaśnić, dlaczego kruszywo z recyklingu (RA) nie jest powszechnie stosowane na skalę przemysłową, proponujemy rewizję dominującego paradygmatu, w którym beton z kruszywem naturalnym (NA) uznawany jest za najbardziej zrównoważone rozwiązanie. Przeprowadzona analiza wykazała, że mimo swoich zalet, beton z NA istotnie odbiega od ideału materiału zrównoważonego, co podważa jego pełną zgodność z wymaganiami współczesnego zrównoważonego rozwoju.

Kolejne badania pilotażowe będą koncentrować się na walidacji narzędzia analizy wielokryterialnej w rzeczywistych projektach budowlanych, w celu oceny jego praktycznej przydatności i skuteczności w identyfikacji zrównoważonych rozwiązań na podstawie porównania różnych wariantów RAC.

8. Literatura

- [1] Czarnecki, L. , D. J. Sustainable construction: In search of a Promethean transformation. *Engineering and Construction* 2021.
- [2] Czarnecki, L. Sustainable construction products – a beautiful idea, a civilizational necessity, or a thermodynamic imperative? *Construction Materials* 2022.
- [3] Czarnecki L.; Justnes H. Sustainable & durable concrete. *Cement Lime Concrete* 2012.
- [4] Ren, P.; Ling, T. C.; Mo, K. H. Recent advances in artificial aggregate production. *J Clean Prod* 2021, 291.
- [5] Kim, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater* 2022, 328.
- [6] Chen, J.; Dan, H.; Ding, Y.; Gao, Y.; Guo, M.; Guo, S.; Han, B.; Hong, B.; Hou, Y.; Hu, C.; et al. New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 2021, 8, 815–999.
- [7] Delvoie, S.; Courard, L.; Hubert, J.; Zhao, Z.; Michel, F. *Construction and Demolition Wastes: specific conditions for recycling in North West Europe*; 2020.
- [9] Villoria Sáez, P.; Osmani, M. A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *J Clean Prod* 2019, 241.
- [10] Kaptan, B. K.; Aguiar, J. L. B. Approaching Green Building Concept by Eco-Efficient Construction and Demolition Waste (CDW) in Portugal. *Springer Nature Switzerland*. 2023.
- [11] Consensus. Available online: <https://consensus.app/search/> (accessed on 11 December 2024).
- [12] Jorge de Brito, C. S. P. and B. Z. New Trends in Recycled Aggregate Concrete. 2019.
- [13] Jorge de Brito, C. S. P. and B. Z. New Trends in Recycled Aggregate Concrete. **2019**.
- [14] Hao, D. L. C.; Razak, R. A.; Kheimi, M.; Yahya, Z.; Abdullah, M. M. A. B.; Nergis, D. D. B.; Fansuri, H.; Ediat, R.; Mohamed, R.; Abdullah, A. Artificial Lightweight Aggregates Made from Pozzolan Material: A Review on the Method, Physical and Mechanical Properties, Thermal and Microstructure. *Materials* 2022, 15.
- [15] Czarnecki, L. Sustainable construction materials: A beautiful idea, a civilizational necessity, or a thermodynamic imperative? *Construction Materials* **2022**.
- [16] Czarnecki L.; Justnes H. Sustainable & durable concrete. *Cement Lime Concrete* **2012**.
- [17] Kim, J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater* 2022, 328.
- [18] Czarnecki, L.; Woyciechowski, P. Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* **2013**, 61, 173–181.
- [19] Kim, J.; Sadowski, Ł. The equivalent mortar volume method in the manufacturing of recycled aggregate concrete. *Czasopismo Techniczne* **2019**, 123–140.
- [20] Kim, J.; Grabiec, A. M.; Ubysz, A.; Yang, S.; Kim, N. Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Multi-Recycled Aggregate Concrete. *Materials* **2023**, 16.

- [21] Ren, P.; Ling, T. C.; Mo, K. H. Recent advances in artificial aggregate production. *J Clean Prod* 2021, 291.
- [22] Kępnia, M. The influence of the recycled aggregate preparing method on selected technical characteristics of concrete. *Concrete Days Conference Tradition and Modernity. Cement Manufacturers Association*. 2023.
- [23] Kępnia, M.; Chyliński, F.; Łukowski, P.; Woyciechowski, P. Recycled Aggregate Integration for Enhanced Performance of Polymer Concrete. *Materials* 2024, 17.
- [24] European Committee for Standardization CEN EN 206:2013+A2:2021 Concrete -- Specification, performance, production and conformity.
- [25] European Committee for Standardization EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete.
- [26] Polish Committee for Standardization PN-B-06265:2022-08 Concrete -- Specification, performance, production and conformity -- National Annex to PN-EN 206+A2:2021-08.
- [27] <https://www.aggregates-europe.eu/publications/>.
- [28] BARDAN, Magdalena; CZARNECKI, Lech. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials*, 2025, 18.3: 488.
- [29] Sabău, M.; Bompă, D. V.; Silva, L. F. O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. *Geoscience Frontiers* 2021, 12.
- [30] Visintin, P.; Xie, T.; Bennett, B. A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. *J Clean Prod* 2020, 248.
- [31] Tošić, N. ; Marinković, S. ; Dašić, T. ; Stanić, M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of cleaner production*, 87, 766-776. 2015.
- [32] Sabău, M.; Bompă, D. V.; Silva, L. F. O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. *Geoscience Frontiers* 2021, 12.
- [33] Yu, Y.; Yazan, D. M.; Bhochhibhoya, S.; Volker, L. Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. *J Clean Prod* 2021, 293.
- [34] Pani, L.; Rombi, J.; Francesconi, L.; Mereu, A. *Environmental Engineering and Management*; 2020; Vol. 19.
- [35] Zhang, X. , W. C. , W. J. , L. X. , H. Y. , W. L. , & D. Y. Experimental study on the compressive fatigue performance of nano-silica modified recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 447, 138161. 2024.
- [36] Zhang, X.; Zhu, Y.; Wang, J.; Zhou, G.; Huang, Y. Analysis of Impact Crushing Characteristics of Steel Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Based on Fractal Theory. *Fractal and Fractional* 2024, 8, 505.
- [37] Zhang, X. , S. Y. , F. Y. , & G. X. Experimental study on the triaxial compression mechanical performance of basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete after exposure to high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03026. 2024.
- [38] Michalik, A.; Chyliński, F.; Bobrowicz, J.; Pichór, W. Effectiveness of Concrete Reinforcement with Recycled Tyre Steel Fibres. *Materials* 2022, 15.