

Analiza porównawcza badań LCA cementu z dodatkiem materiałów alternatywnych – waloryzacja odpadów i ich wykorzystanie na przykładzie projektu ValorWaste



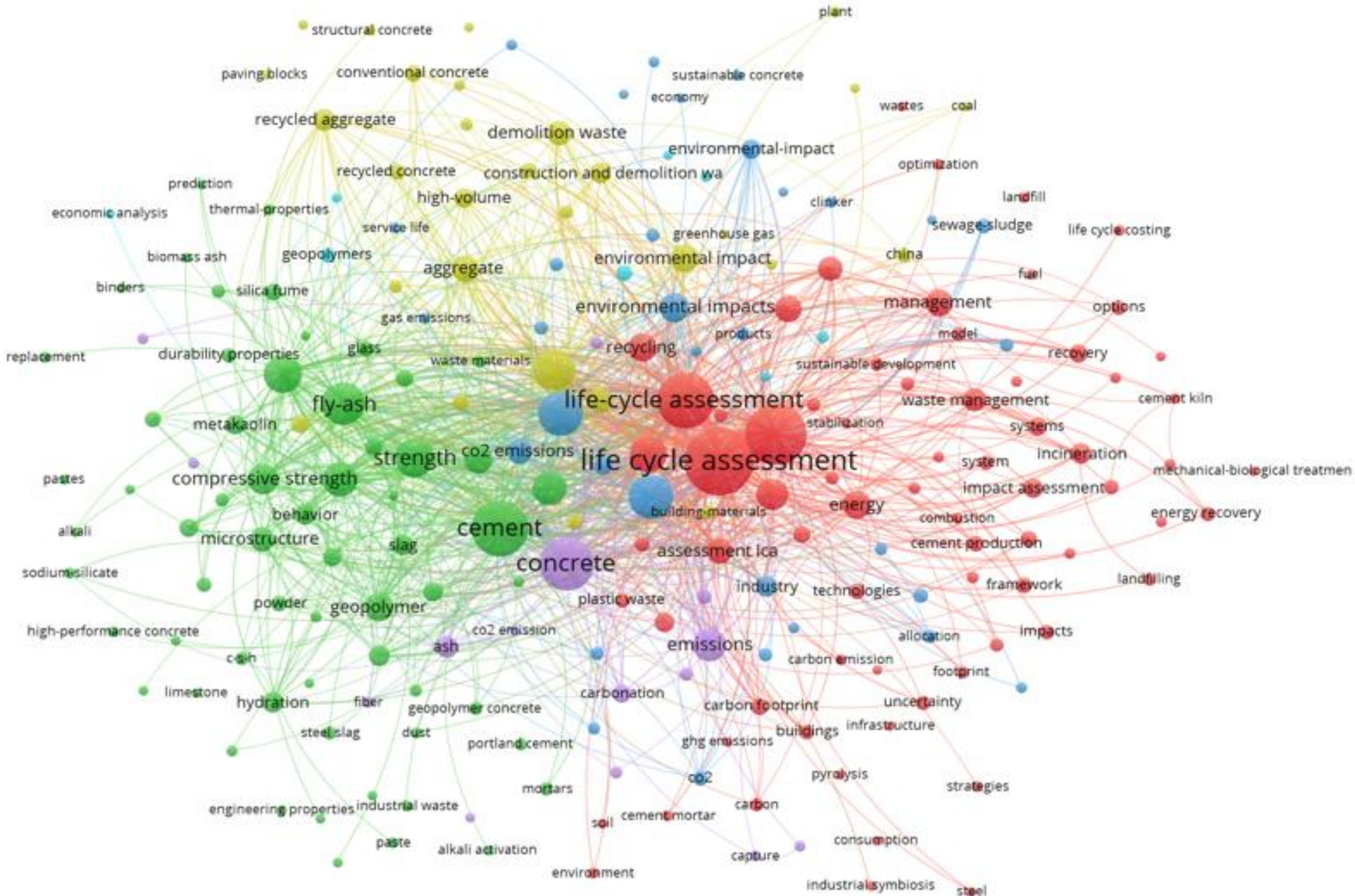
mgr inż. Natalia Generowicz-Caba, prof. Joanna Kulczycka

Wprowadzenie i kontekst

Przemysł cementowy odpowiada obecnie za około 7–8% globalnych emisji CO₂, co wiąże się przede wszystkim z energochłonną produkcją klinkieru. Jednym z najważniejszych kierunków ograniczania tego wpływu jest redukcja zawartości klinkieru w cemencie oraz zastępowanie go materiałami alternatywnymi (SCMs), takimi jak popiół lotny, żużel wielkopiecowy, pucolany naturalne czy wapień. Celem badań była porównawcza analiza wyników LCA dotyczących cementów z dodatkami mineralnymi oraz raportów EPD producentów, aby wskazać najbardziej korzystne rozwiązania dla zrównoważonej produkcji cementu.

Metodyka badań

W pracy zastosowano krytyczny przegląd literatury z lat 2020–2025, analizę baz danych naukowych oraz narzędzie VOSviewer do identyfikacji trendów i luk badawczych. Szczególną uwagę poświęcono wskaźnikom takim jak zużycie energii, ślad węglowy oraz granice systemu (cradle-to-gate A1–A3). Równolegle zestawiono dane z raportów EPD, które umożliwiły porównanie praktycznych wyników środowiskowych w różnych zakładach produkcyjnych.



Rysunek Graf współwystępowania słów kluczowych związanych z LCA cementu z wykorzystaniem materiałów alternatywnych i odpadów

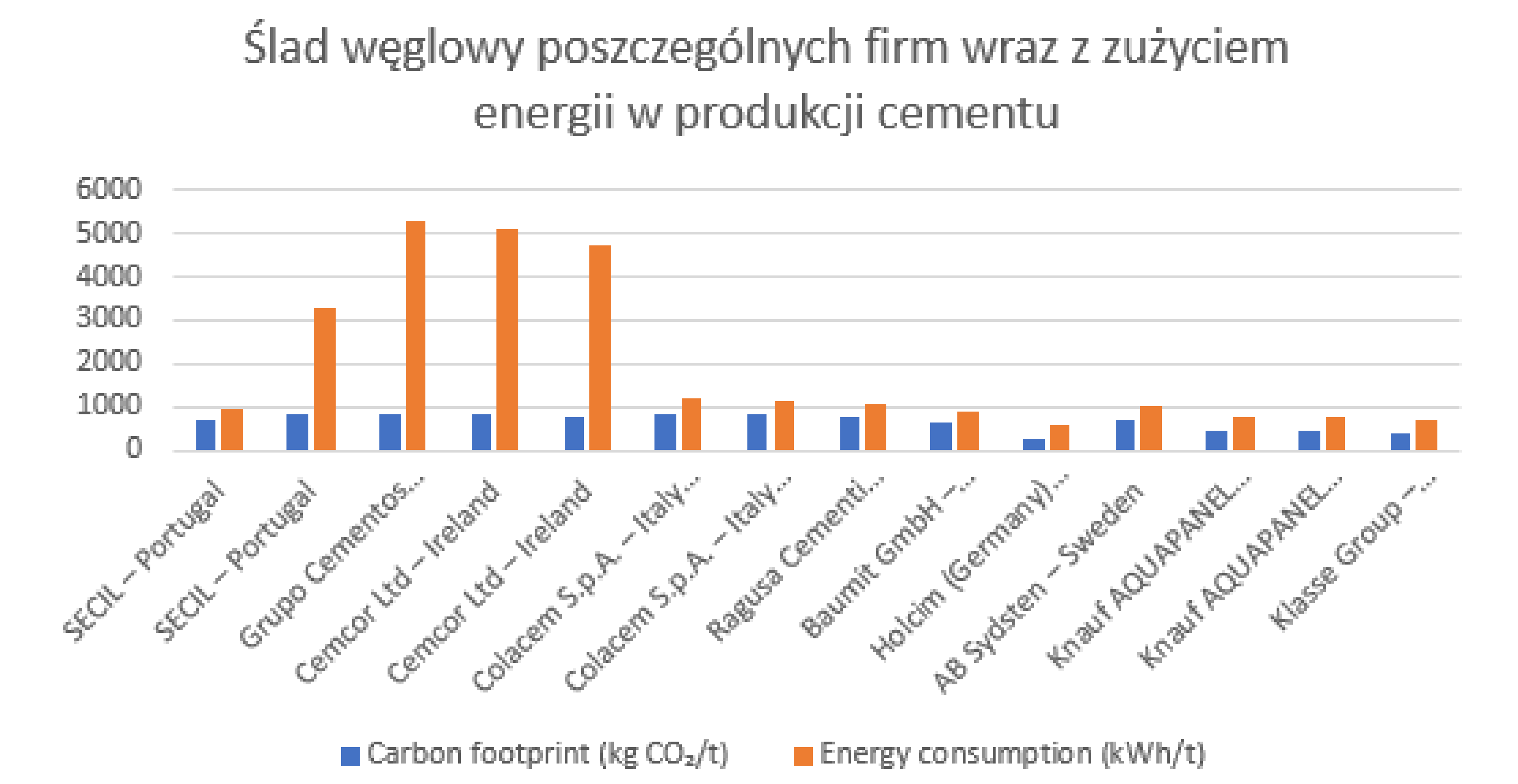
Graf obrazuje najczęściej wykorzystywane słowa kluczowe w literaturze naukowej dotyczącej cementu z dodatkiem odpadów. Widoczne są wyraźne klastry tematyczne – np. niebieski skupia się na właściwościach mechanicznych i trwałości betonu, czerwony na aspektach środowiskowych i gospodarce odpadami, a zielony na recyklingu i alternatywnych surowcach. Centralne pojęcia, takie jak „cement”, „concrete”, „fly ash” czy „waste”, wskazują na kluczowe kierunki badań i ich wzajemne powiązania.

Wyniki analiz

Analiza wykazała jednoznaczny trend w kierunku redukcji klinkieru i stosowania dodatków mineralnych. Najbardziej efektywne okazały się popiół lotny oraz żużel wielkopiecowy, które pozwalają na obniżenie emisji CO₂ nawet o 40–80%. Wyróżnia się mieszanka 30DE–25FA–5LS, która osiągnęła redukcję emisji dwutlenku węgla o 60% i zużycia energii o 50%, przy jednoczesnym zachowaniu wysokich parametrów mechanicznych. Badania nad wykorzystaniem odpadów przemysłowych, takich jak waste carbon black czy treated tailings, pokazały potencjalne korzyści środowiskowe, choć ich efektywność zależy od dodatkowej energii potrzebnej do przetwarzania. Dodatkowe oszczędności środowiskowe zapewnia również wdrożenie systemów odzysku ciepła i stosowanie paliw alternatywnych.

Analiza raportów EPD

Porównanie raportów EPD wykazało znaczne różnice pomiędzy producentami. Najniższy ślad węglowy na tonę cementu odnotowano w przypadku produktów Knauf AQUAPANEL (ok. 530–550 kg CO₂/t), podczas gdy najwyższy – u producenta Cemcor Ltd, gdzie emisje przekraczały 930 kg CO₂/t. Wskazuje to na ogromne zróżnicowanie technologiczne i efektywnościowe w skali międzynarodowej.



Analiza raportów EPD

Najbardziej zrównoważonym kierunkiem jest stosowanie cementów z dużym udziałem materiałów zastępczych przy minimalnym zużyciu energii. Kluczowe znaczenie ma lokalna dostępność SCM oraz wspieranie gospodarki o obiegu zamkniętym. Wdrażanie tych rozwiązań wymaga ujednolicenia metod LCA, zmian w normach i wsparcia politycznego (np. ceny emisji CO₂, zielone zamówienia publiczne). Niezbędne są także dalsze badania porównawcze i regionalne analizy LCA.