

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

Raport serii PRE nr 01/2026
Rozprawa doktorska
Eksperymentalna ocena podstawowych
właściwości betonu samozagęszczającego się
wykonanego z kruszywem grubym
pochodzącym z recyklingu systemowych
budynków wielkopłytowych

Seweryn Malazdrewicz

Słowa kluczowe:

Beton samozagęszczający się
Systemowe budynki wielkopłytowe
Kruszywo grube z recyklingu

Promotor: prof. dr hab. inż. Łukasz Sadowski, Politechnika Wrocławska

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Ostrowski, Politechnika Krakowska

Wrocław, luty 2026 r.

Autor:

mgr inż. Seweryn Malazdrewicz

.....

Politechnika Wrocławska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

e-mail: seweryn.malazdrewicz@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału
Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w
lutym 2026 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Promotor pomocniczy	1 egz.
Autor	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem 7 egz.

Podziękowania

Pragnę wyrazić głęboką wdzięczność Promotorowi, Panu prof. dr hab. inż. Łukaszowi Sadowskiemu za wprowadzenie mnie w świat nauki ukazanie ogromu możliwości z nią związanych, a także za cenne rady, wsparcie merytoryczne i motywowanie mnie na każdym etapie realizacji przewodu doktorskiego.

Szczególne podziękowania kieruję do Promotora pomocniczego, Pana dr inż. Krzysztofa Ostrowskiego, za przekazaną wiedzę, kreatywne i praktyczne podejście do prowadzonych badań w dwóch ośrodkach w Krakowie, a także za nieocenioną pomoc w realizacji całego przewodu.

Dziękuję Panu dr hab. inż. Tomaszowi Gawendzie oraz Pani dr inż. Agacie Stempkowskiej za wsparcie w wykonaniu badań na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Serdecznie dziękuję Panu dr hab. inż. Miguelowi Azenha za opiekę i merytoryczne wskazówki podczas stażu na Uniwersytecie Minho.

Dziękuję również współpracownikom Katedry Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych oraz pozostałych Katedr Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego za wartościowe uwagi do pracy.

Dziękuję Panu dr hab. inż. Andrzejowi Żakowi oraz Pani mgr inż. Agnieszce Chowaniec-Michalak za wsparcie w wykonaniu badań mikrostruktury kruszywa i betonu.

Wyrazy uznania i wdzięczności składam również opiekunom, laborantom i technikom Politechniki Wrocławskiej za udostępnienie zaplecza laboratoryjnego oraz pomoc w realizacji badań.

Najgłębsze i najbardziej osobiste podziękowania kieruję do mojej Żony Agaty oraz całej Rodziny – za ich zrozumienie, cierpliwość, empatię i poświęcenie, bez których ukończenie tej rozprawy nie byłoby możliwe.

Niniejsza rozprawa doktorska powstała na podstawie rezultatów projektu Eksperymentalna ocena podstawowych właściwości betonu samozagęszczającego się wykonanego z kruszywem pochodzącym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych (RECSCCUE), nr: 2020/39/O/ST8/01217, Preludium Bis 2, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Spis treści

1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY	12
2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY	16
2.1. Cele rozprawy	16
2.2. Hipoteza badawcza	16
2.3. Zakres rozprawy	17
2.4. Nowatorski charakter rozprawy	19
3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE	21
3.1. Systemowe budynki wielkopłytowe	21
3.1.1. Wprowadzenie	21
3.1.2. Analiza scientometryczna	27
3.1.3. Rys historyczny technologii wielkopłytowej	29
3.1.4. Wybrane cechy technologii systemów wielkopłytowych mające wpływ na trwałość konstrukcji	32
3.1.4.1. Odporność sejsmiczna	32
3.1.4.2. Integralność strukturalna i zawalenie progresywne	33
3.1.4.3. Niezawodność i bezpieczeństwo przeciwpożarowe	35
3.1.4.4. Wady na etapie projektowania, realizacji i eksploatacji	36
3.1.4.5. Betonowe elementy nośne	37
3.1.5. Możliwości recyklingu prefabrykowanych paneli betonowych	40
3.1.5.1. Elementy nośne z betonu – trwałość i perspektywa ponownego użycia	40
3.1.5.2. Skala odpadów i ich lokalizacja	42
3.1.6. Luki badawcze	44
3.2. Beton samozagęszczający się z kruszywem grubym z recyklingu	45
3.2.1. Wprowadzenie	45
3.2.2. Analiza scientometryczna	48
3.2.3. Projektowanie mieszanki betonu samozagęszczającego się	51
3.2.4. Projektowanie betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu	52
3.2.5. Wpływ źródła pochodzenia kruszywa grubego z recyklingu na wytrzymałość na ściskanie betonu	56
3.2.6. Właściwości betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu	58
3.2.6.1. Zapotrzebowanie na wodę przy zastosowaniu kruszywa grubego z recyklingu	58

3.2.6.2.	Wpływ kruszywa grubego z recyklingu na właściwości betonu.....	59
3.2.6.3.	Niejednorodność betonu samozagęszczającego się.....	61
3.3.	Strefa przejściowa ITZ	63
3.3.1.	Wprowadzenie	63
3.3.2.	Analiza bibliometryczna	65
3.3.3.	Główne parametry wpływające na ITZ betonu.....	71
3.3.3.1.	Mieszanie i dojrzewanie betonu	72
3.3.3.2.	Rodzaj kruszywa	73
3.3.3.3.	Dodatki mineralne.....	74
3.3.3.4.	Typy ITZ	74
3.3.3.5.	Inne czynniki.....	74
3.3.4.	Metody poprawy strefy przejściowej ITZ.....	75
3.3.4.1.	Metody mieszania	75
3.3.4.2.	Obróbka kruszywa grubego z recyklingu	75
3.3.4.3.	Obróbka karbonatyzacyjna	75
3.3.4.4.	Pochodzenie kruszywa grubego z recyklingu	76
3.3.4.5.	Dodatki mineralne.....	76
3.3.5.	Luki badawcze	77
3.4.	Ograniczenia technologii betonu z kruszywem grubym recyklingowym.....	84
3.4.1.	Trwałość długookresowa.....	84
3.4.2.	Mrozoodporność betonu	85
3.4.3.	Karbonatyzacja i korozja zbrojenia	85
3.4.4.	Reakcja alkalia-krzemionka.....	86
3.4.5.	Uzasadnienie wyłączenia z badań własnych	87
3.5.	Podsumowanie przeglądu literaturowego	88
4.	ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH, OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW I STOSOWANA W ROZPRAWIE METODYKA	91
4.1.	Zakres badań własnych.....	91
4.2.	Badania właściwości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego.....	93
4.2.1.	Kruszywo grube z recyklingu.....	93
4.2.1.1.	Przeróbka odpadu do grubego kruszywa z recyklingu	94
4.2.1.2.	Gęstość pozorną, gęstość w stanie nasyconym i suchym, nasiąkliwość	96
4.2.1.3.	Zawartość starej zaprawy.....	97

4.2.1.4.	Charakterystyka morfologiczna kruszywa grubego	98
4.2.1.5.	Analiza przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) ..	101
4.2.1.6.	Odporność na ścieranie.....	101
4.2.1.7.	Dyfraktometria rentgenowska (XRD)	102
4.2.2.	Wybór porównawczego kruszywa grubego naturalnego.....	103
4.3.	Optymalizacja składu mieszanki samozagęszczającej się i metody projektowania	106
4.3.1.	Składniki mieszanki samozagęszczającej się	106
4.3.2.	Metoda projektowania	107
4.3.3.	Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się	110
4.3.4.	Zaprojektowanie mieszanki samozagęszczalnej	111
4.4.	Badania właściwości mieszanki samozagęszczającej się	116
4.4.1.	Konsystencja i lepkość	116
4.4.2.	Czas początku wiązania	117
4.4.3.	Odsączanie wody z mieszanki	118
4.4.4.	Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)	120
4.5.	Badania właściwości stwardniałego betonu	122
4.5.1.	Jednorodność betonu	122
4.5.2.	Wytrzymałość na ściskanie.....	123
4.5.3.	Odporność na ścieranie.....	123
4.5.4.	Moduł sprężystości metodą normową	124
4.5.5.	Analiza mikrostruktury	125
4.6.	Statystyczna analiza wyników badań	126
5.	WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	128
5.1.	Właściwości kruszywa grubego pochodzącego z rozbiórki budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego	128
5.1.1.	Przygotowanie odpadu do kruszywa grubego z recyklingu	128
5.1.2.	Gęstość pozorna, gęstość w stanie nasyconym i suchym, nasiąkliwość i wodożądność	130
5.1.3.	Zawartość starej zaprawy.....	132
5.1.4.	Charakterystyka morfologiczna kruszywa grubego	132
5.1.5.	Analiza mikrostruktury	137

5.1.6.	Odporność na ścieranie.....	140
5.1.7.	Dyfraktometria rentgenowska (XRD)	141
5.2.	Optymalizacja.....	143
5.2.1.	Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się	143
5.3.	Badania właściwości mieszanki samozagęszczającej się	144
5.3.1.	Konsystencja i lepkość	144
5.3.2.	Czas początku wiązania	145
5.3.3.	Odsączanie wody z mieszanki	146
5.3.4.	Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)	147
5.4.	Badania właściwości stwardniałego betonu	148
5.4.1.	Jednorodność betonu	148
5.4.2.	Wytrzymałość na ściskanie.....	150
5.4.3.	Odporność na ścieranie.....	151
5.4.4.	Moduł sprężystości metodą normową	152
5.4.5.	Analiza mikrostruktury	153
5.5.	Analiza zależności między właściwościami mieszanek betonowych a cechami kruszywa	159
5.6.	Potencjalne praktyczne zastosowanie i ograniczenia technologii	162
5.6.1.	Analiza mechaniczno-ekonomiczna.....	162
5.6.2.	Potencjalny wpływ środowiskowy betonu z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 na przykładzie praktycznego zastosowania	165
5.6.3.	Proponowany schemat wdrożenia	166
5.6.4.	Ograniczenia praktycznego wdrożenia	167
5.6.5.	Ograniczenia przeprowadzonych badań.....	169
6.	PODSUMOWANIE, WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE	170
6.1.	Podsumowanie	170
6.2.	Wnioski.....	176
6.3.	Konkluzja końcowa.....	180
6.4.	Proponowane kierunki dalszych badań	180
6.5.	Zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej	182
6.6.	Literatura	183

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie

Wielkości fizyczne i materiałowe

ρ_a – gęstość pozorna [g/cm^3]

ρ_{rd} – gęstość w stanie suchym [g/cm^3]

ρ_{ssd} – gęstość w stanie nasyconym [g/cm^3]

WA_{24} – nasiąkliwość po 24 h [%]

M_{RCAb} – masa wysuszonego kruszywa grubego recyklingowego przez obróbką kwasem [g]

M_{RCAa} – masa wysuszonego kruszywa grubego recyklingowego po obróbce kwasem [g]

Wielkości geometryczne kruszywa

$V_{particle}$ – objętość pojedynczego ziarna kruszywa [m^3]

V_{sphere} – objętość kuli o tej samej objętości co ziarno kruszywa [m^3]

$D_{equivalent}$ – średnica równoważna ziarna kruszywa [m]

$D_{n\ equivalent}$ – średnia arytmetyczna średnicy równoważnej ziarna kruszywa [m]

$D_{v\ equivalent}$ – średnia średnicy równoważnej ziarna kruszywa mierzona objętością cząstek [m]

$D_{min\ equivalent}$ – najmniejsza średnica równoważna ziarna kruszywa [m]

$D_{max\ equivalent}$ – największa średnica równoważna ziarna kruszywa [m]

SF – współczynnik kształtu ziaren [-]

Ψ – sferyczność ziaren [-]

Parametry wytrzymałościowe i trwałościowe

M_{DE} – Współczynnik Micro-Deval odporności na ścieranie [-]

LA – Współczynnik Los Angeles odporności na ścieranie [-]

R – stosunek udziału kruszywa grubego naturalnego w betonie [-]

$\bar{E}$ – moduł sprężystości, wyznaczony po 5 dniach [GPa]

$\bar{I}$ – moment bezwładności przekroju poprzecznego belki kompozytowej [m^4]

$Y(t)$ – amplituda przemieszczenia pionowego w funkcji czasu akwizycji t [s], wyrażona względem postaci ugięcia $\emptyset(x)$

x – współrzędna wzdłuż rozpiętości belki podczas badania przyrostu modułu sprężystości [m]

$\bar{m}$ – równomiernie rozłożona masa wzdłuż belki [kg/m]

$f_{cm,1}$ - wytrzymałość na ściskanie po 1 dniu [MPa]

$f_{cm,7}$ - wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach [MPa]

$f_{cm,28}$ - wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]

Δ_m - ubytek masy na skutek ścierania po 28 dniach [%]

Objętości i masy w projektowaniu mieszanki

V_{NCA}^{RAC} – objętość kruszywa grubego naturalnego w betonie z kruszywem recyklingowym [m³]

V_{NCA}^{NAC} – objętość kruszywa grubego naturalnego w betonie z kruszywem naturalnym [m³]

V_{RM}^{RAC} – objętość starej zaprawy w betonie z kruszywem recyklingowym [m³]

V_{RCA}^{RAC} – objętość kruszywa grubego recyklingowego w betonie z kruszywem recyklingowym [m³]

V_{TM}^{RAC} – całkowita objętość zaprawy w betonie z kruszywem recyklingowym [m³]

V_M^{NAC} – całkowita objętość zaprawy w betonie z kruszywem naturalnym [m³]

V_{NM}^{RAC} – objętość świeżej zaprawy w betonie z kruszywem naturalnym [m³]

V_{TNA}^{RAC} – całkowita objętość kruszywa naturalnego w betonie z kruszywem recyklingowym [m³]

w_{OD-RCA}^{RAC} – masa kruszywa recyklingowego w betonie z kruszywem recyklingowym [g]

w_{OD-NCA}^{RAC} – masa kruszywa naturalnego w betonie z kruszywem recyklingowym [g]

w_w^{RAC} – masa wody w betonie z kruszywem recyklingowym [g]

w_c^{RAC} – masa cementu w betonie z kruszywem recyklingowym [g]

w_{FA}^{RAC} – masa kruszywa drobnego w betonie z kruszywem recyklingowym [g]

Wskaźniki technologiczne i reologiczne

ϕ_{max} – gęstość upakowania kruszywa [-]

B_r – miara odsączania wody z mieszanki [%]

V_1 – całkowita objętość zebranej wody w procesie odsączania [ml]

V_2 – objętość mieszanki betonowej użytej w badaniu [ml]

α – stopień hydratacji [%]

HP – zawartość produktów hydratacji [%]

AC – zawartość niezhydratyzowanego cementu [%]

H – wysokość cylindra w badaniu gęstości upakowania [m]

T – odległość od wierzchu kruszywa do górnej krawędzi cylindra w badaniu gęstości upakowania [m]

D – wewnętrzna średnica cylindra w badaniu gęstości upakowania [m]

$SF1$ do $SF3$ – klasa konsystencji [-]

$VS1$ do $VS2$ – klasa lepkości [-]

v_{UPV} – prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie [m/s]

t_{α} – kwantyl rozkładu rzędu α o k stopniach swobody [-]

n – liczba próbek [-]

ϑ – założona tolerancja wartości średniej [-]

ν – współczynnik zmienności [-]

MPR – współczynnik wydajności mechanicznej [-]

ECR – współczynnik wydajności ekonomicznej [-]

Wykaz ważniejszych definicji stosowanych w rozprawie

Beton samozagęszczający się (ang. *Self-Compacting Concrete*, SCC) – beton, który ma doskonałą płynność, utrzymaną stabilność (tj. brak segregacji składników), umożliwiając w ten sposób samozagęszczenie – czyli konsolidację materiału bez dodatku energii zewnętrznej.

Podstawowe właściwości betonu samozagęszczającego się – właściwości świeżej mieszanki – lepkość, konsystencja, czas początku wiązania betonu; właściwości twardego betonu – wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, odporność na ścieranie.

Kruszywo grube pochodzące z recyklingu (ang. *Recycled Coarse Aggregate*, RCA) – produkt pochodzenia mineralnego, uzyskany w wyniku przeróbki nieorganicznych materiałów zastosowanych poprzednio w budownictwie np. betonu. Kruszywo grube składa się z ziaren większych niż 4 mm. Kruszywo grube w betonie może stanowić nawet do 70% jego objętości.

Systemowe budynki wielkopłytowe (ang. *Large Panel System buildings*, LPS) – budynki, których sposób wznoszenia polega na montowaniu ich na miejscu budowy z wielkowymiarowych prefabrykowanych elementów betonowych lub żelbetowych.

1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY

Beton jest jednym z najważniejszych materiałów konstrukcyjnych, stosowanym na masową skalę od ponad wieku. Obecnie znajduje powszechne zastosowanie w budownictwie, a jego klasyfikacja może być prowadzona według różnych kryteriów [216] [369].

Ze względu na właściwości wytrzymałościowe wyróżnia się:

- beton zwykły – o klasach wytrzymałości do C50/60,
- beton wysokowytrzymałościowy (HSC) – o klasach od C55/67 do C80/95,
- beton ultra wysokowytrzymałościowy (UHPC) – o wytrzymałości powyżej C90/105.

Z kolei według dodatkowych cech i funkcjonalności wyróżnia się między innymi:

- tzw. betony specjalne, do których zalicza się m.in.: beton samozagęszczający się,
- beton lekki,
- beton szczelny,
- beton odporny na działanie wysokich temperatur,
- beton zbrojony włóknami,
- beton o podwyższonej odporności chemicznej
- beton o właściwościach dekoracyjnych.

Beton samozagęszczający się (ang. *Self-Compacting Concrete* – SCC), w literaturze polskiej nazywany też „samozagęszczalnym”, charakteryzuje się zdolnością do samoczynnego zagęszczania pod własnym ciężarem, możliwością wypełniania konstrukcji o dużym stopniu zbrojenia i skomplikowanych kształtach, uzyskiwaniem powierzchni o wysokiej gładkości wolnych od tzw. raków oraz dobrą przyczepnością do starego betonu [18]. Pomimo że beton samozagęszczający się stosowany jest w praktyce budowlanej od około 40 lat, wciąż prowadzone są intensywne prace nad jego udoskonaleniem. Dotyczą one m.in. modyfikacji składu mieszanki poprzez zastosowanie kruszyw odpadowych pochodzących z produkcji kruszyw łamanych [45] [263], surowców recyklingowych [426] [73] a nawet dodatków o bardzo drobnym uziarnieniu, w tym nanocząstek [90]. Potwierdzają to prace doktorskie prowadzone na Politechnice Wrocławskiej, m.in. dotyczące procesu niszczenia betonu samozagęszczającego się [117] czy wpływu dodatku wybranych nanocząstek na właściwości betonu samozagęszczającego się [239].

W tradycyjnych mieszankach betonowych stosowanych obecnie na rynku, kruszywem jest najczęściej mieszanina piasku (0–4 mm) oraz kruszywa grubego (2–8 mm lub 2–16 mm). Obecność frakcji powyżej 4 mm klasyfikuje materiał jako beton, a nie zaprawę. W literaturze od wielu lat obserwuje się rosnące zainteresowanie zastępowaniem kruszywa naturalnego kruszywem pochodzącym z recyklingu odpadów budowlanych. Tendencja ta przyczyniła się do opracowania nowych wytycznych i norm projektowych [57]. Ze względu na fakt, że kruszywo grube stanowi około 60 - 70% objętości mieszanki betonowej [253], jego ponowne wykorzystanie może w znacznym stopniu ograniczyć ilość odpadów budowlanych trafiających na składowiska.

Odpady budowlane i rozbiórkowe (ang. *Construction and Demolition Waste* – CDW) stanowią ponad 30% całkowitej ilości odpadów generowanych na terenie Unii Europejskiej (UE) [86]. Mimo iż niektóre frakcje odpadów budowlanych i rozbiórkowych wykazują wysoką wartość surowcową, a technologie ich segregacji i odzysku są rozwinięte, wskaźniki recyklingu materiałowego znacznie różnią się pomiędzy państwami członkowskimi UE. Beton stanowi

około 70% masy całkowitej odpadów budowlanych i rozbiórkowych [10], co czyni go kluczową frakcją mineralną. Beton, będący – po wodzie – najczęściej stosowanym materiałem na świecie, ma globalne zużycie szacowane na około 30 miliardów ton rocznie. Źródłami odpadów betonowych są m.in. nadwyżki z betonowozów, odpady produkcyjne zakładów prefabrykacji, a przede wszystkim pozostałości z budów i rozbiórek.

Recykling betonu pochodzącego z odpadów budowlanych i rozbiórkowych stanowi jeden z istotnych kierunków realizacji strategii zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Kluczowe znaczenie ma tu koncepcja *cradle-to-cradle*, zgodnie z którą wszystkie surowce powinny – po zakończeniu cyklu życia – powrócić do obiegu biologicznego lub technicznego w sposób umożliwiający ich nieskończone ponowne wykorzystanie. W Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady UE w sprawie wyrobów budowlanych wskazano konieczność promowania stosowania materiałów recyklingowych w miejsce materiałów konwencjonalnych [306]. Pomimo dostrzeganego potencjału surowców wtórnych, ich rzeczywiste wykorzystanie w budownictwie konstrukcyjnym pozostaje ograniczone [74]. Aktualnie większość recyklingowych materiałów mineralnych trafia do budownictwa drogowego oraz robót ziemnych, a nie do właściwego sektora budownictwa kubaturowego [314] [212].

Obserwujemy nieuchronne starzenie się budynków i wpływ sektora budownictwa na zużycie energii w UE. Budynki odpowiadają za około 36% całkowitego zużycia energii, z czego nawet 80% przeznaczane jest na ogrzewanie, chłodzenie i przygotowanie ciepłej wody użytkowej [40]. Według danych Eurostatu, ok. 35% budynków w UE powstało ponad 50 lat temu [67], a roczna stopa renowacji energetycznej wynosi zaledwie 1%. Szacuje się, że nawet 75% zasobów budowlanych nie spełnia aktualnych norm efektywności energetycznej [87]. Mimo tych przesłanek do ponownego wykorzystania surowców ze starszych konstrukcji, jedną z głównych barier szerszego wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu (ang. Recycled Concrete Aggregate – RCA) w elementach konstrukcyjnych o wysokich wymaganiach technicznych pozostaje duża zmienność jego właściwości. Znaczna część przedsiębiorstw zajmujących się recyklingiem nie dysponuje odpowiednią wiedzą technologiczną ani nie posiada wystarczającej motywacji do zapewnienia wysokiej i powtarzalnej jakości kruszywa grubego z recyklingu, co skutkuje niejednorodnymi właściwościami końcowymi [68].

Znaczną część zasobu budynków wymagających modernizacji stanowią obiekty wzniesione po 1945 roku w systemie wielkopłytyowym (ang. *Large Panel System* – LPS). Technologia ta była szczególnie rozpowszechniona w krajach Europy Wschodniej i Zachodniej, m.in. jako *Plattenbau* (Niemcy Wschodnie) czy *Panehalz* (Węgry). W Polsce funkcjonuje obecnie ponad 60 tys. budynków wzniesionych w technologii wielkopłytywowej, obejmujących około 4 milionów mieszkań, co odpowiada 30% zasobu mieszkaniowego [110]. Zgodnie z normami Eurokod oraz przepisami krajowymi, przewidywany okres użytkowania tych obiektów wynosi 50 lat. Choć wiele z nich podlega modernizacjom, najstarsze konstrukcje będą musiały zostać rozebrane, co znacząco zwiększy ilość generowanych odpadów betonowych. Warto podkreślić, że pomimo nieodpowiedniej jakości połączeń konstrukcyjnych, sam beton w tych obiektach zachował dobre właściwości techniczne [175].

Zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu może skutkować obniżeniem trwałości betonu, jednakże liczne publikacje dowodzą, że możliwe jest zastąpienie nawet kilkudziesięciu

procent kruszywa grubego naturalnego (ang. *Natural Coarse Aggregate* – NCA) przez kruszywo grube z recyklingu przy zachowaniu zadowalających parametrów wytrzymałościowych [394]. Dotyczy to szczególnie przypadków, gdy materiałem źródłowym jest beton wysokiej wytrzymałości lub prefabrykaty [426]. Według [315], w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój prefabrykowanych płytowych systemów stropowych. Zaletą tych rozwiązań jest znacząco lepsza jakość otrzymywanych wyrobów, a w połączeniu ze współczesnymi materiałami konstrukcyjnymi i termoizolacyjnymi uzyskuje się elementy stropowe o bardzo dobrej nośności oraz doskonałych parametrach izolacyjności termicznej i akustycznej. Według [318], przy konstrukcji wspomnianych płyt (m.in. płyt Hoffa) możliwe będzie wykorzystanie kruszyw z recyklingu. W niektórych krajach (np. Chiny, Japonia, Dania) dopuszcza się stosowanie do 100% kruszywa grubego z recyklingu w betonie, o ile spełnione są odpowiednie wymagania jakościowe [272]. W innych, np. w Hiszpanii czy Wielkiej Brytanii, udział ten ograniczony jest do 20% dla betonu klasy C40/50 [47].

Głównym problemem technologicznym pozostaje obecność starej zaprawy cementowej przylegającej do ziaren kruszywa grubego z recyklingu. Skutkuje to powstawaniem licznych stref przejściowych (ang. *Interfacial Transition Zones* – ITZ) w betonie z kruszywem recyklingowym (ang. *Recycled Aggregate Concrete* – RAC), m.in. pomiędzy: kruszywem grubym z recyklingu a nową zaprawą, kruszywem grubym z recyklingu a starą zaprawą, kruszywem grubym naturalnym a nową zaprawą oraz pomiędzy starą i nową zaprawą. ITZ wykazuje odmienne właściwości mikrostrukturalne i chemiczne względem matrycy cementowej, co wpływa na obniżenie trwałości i jednorodności betonu [196]. Mimo to, rozwój metod modyfikacji ITZ – takich jak karbonatyzacja, domieszki mineralne, techniki intensywnego mieszania czy separacja zaprawy przylegającej – przyczynia się do poprawy właściwości betonu z kruszywem recyklingowym [226].

W prezentowanym projekcie założono wykorzystanie betonu samozagęszczającego się, który cechuje się wysoką płynnością (zrównoważenie pomiędzy lepkością plastyczną a granicą płynięcia), stabilnością (brak segregacji składników) oraz zdolnością do otaczania zbrojenia. Zaletą betonu samozagęszczającego się jest brak konieczności zagęszczania mieszanki, co nie tylko znacząco ogranicza hałas na placu budowy – szczególnie istotny w warunkach zurbanizowanych – ale także może prowadzić do obniżenia kosztów realizacji. Ograniczenie stosowania wibratorów przekłada się bowiem na brak konieczności ich wynajmu lub zakupu, zmniejszenie zużycia energii oraz skrócenie czasu pracy personelu wykonującego proces zagęszczania. Wbrew częstemu przekonaniu, beton samozagęszczający nie wymaga zwiększonej ilości wody w stosunku do betonu zwykłego. Kluczowe jest zachowanie odpowiednich proporcji składników, w tym optymalnego stosunku woda/spoiwo (w/c), a urabialność uzyskuje się przede wszystkim poprzez właściwe uziarnienie, odpowiednią ilość zaczynu oraz zastosowanie domieszek upłynniających. Kruszywo grube z recyklingu charakteryzuje się podwyższoną absorpcją wody w porównaniu z kruszywem grubym naturalnym, co wpływa na właściwości mieszanki [319]. W przypadku betonu samozagęszczającego się obserwuje się zróżnicowanie wytrzymałości w kierunku pionowym, wynikające z opadania kruszywa oraz zjawiska odsączania wody z mieszanki. Różnice te mogą prowadzić do powstania stref o obniżonej wytrzymałości – nawet o 50% w stosunku do wartości średnich [360] [152]. Przytoczone badania opierają się jednak na założeniu

jednorodności materiału oraz prowadzone są dla betonu w stanie stwardniałym. Istnieje potrzeba szczegółowej analizy wpływu kruszywa grubego z recyklingu na właściwości betonu samozagęszczającego się – zarówno w stanie świeżym, jak i stwardniałym ze szczególnym uwzględnieniem jego właściwości w początkowej fazie dojrzewania a także zmian podczas etapu utwardzania, w którym mieszanka traci swoją plastyczność i staje się twarda, ale nie osiągnęła jeszcze pełnej wytrzymałości. Zbadanie wczesnych właściwości, struktury oraz parametrów mechanicznych betonu samozagęszczającego się z udziałem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych pozwoli wypełnić istotną lukę badawczą.

Z analizy literaturowej wynika, że nie istnieją obecnie publikacje naukowe dotyczące betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych ani w ogóle wykorzystania tego kruszywa, co czyni to zagadnienie szczególnie istotnym i nowatorskim w kontekście badań inżynierskich. Jednocześnie generuje to wiele luk badawczych, które należałoby zgłębić. Powyższe przemyślenia skłoniły autora do sformułowania celów rozprawy, w kwestii uzyskania na drodze badawczej odpowiedzi na pytania: jaki jest wpływ dodatku różnej ilości kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych zarówno na właściwości reologiczne mieszanki betonu samozagęszczającego się, jak i na jego makrostrukturę i mikrostrukturę oraz na podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne stwardniałego betonu samozagęszczającego się, a także jak przebiega proces niszczenia i przejście betonu od stanu płynnego do stałego.

2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY

2.1. Cele rozprawy

Ogólnym celem naukowym rozprawy jest charakterystyka kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych oraz ocena jego wpływu na wybrane właściwości betonu samozagęszczającego się. W szczególności celami są:

- **Charakterystyka kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do zastosowania w betonie samozagęszczającym się:**
 - identyfikacja potrzeby badawczej związanej z wykorzystaniem kruszywa grubego z systemowych budynków wielkopłytowych,
 - przygotowanie odpadu, dobór sposobu przekruszenia odpadu i obróbki wstępnej,
 - określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w betonie samozagęszczającym się,
 - porównanie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do stosowanych kruszyw z recyklingu odpadów betonowych.
- **Określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na właściwości betonu samozagęszczającego się, w szczególności:**
 - właściwości świeżej mieszanki i stwardniałego betonu samozagęszczającego się
 - międzyfazową strefę przejściową między kruszywem a zaprawą cementową,
 - przejście betonu od stanu płynnego do stałego w etapie utwardzania.

Celem praktycznym rozprawy jest ocena możliwości zastosowania betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w elementach konstrukcyjnych z uwagi na ich trwałość i bezpieczeństwo eksploatacyjne a także wyselekcjonowanie na drodze badawczej optymalnej ilości zamiennika kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe pod względem ich właściwości mechanicznych.

2.2. Hipoteza badawcza

Hipoteza badawcza niniejszej rozprawy zakłada, że częściowe zastąpienie kruszywa grubego naturalnego kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w betonie samozagęszczającym się umożliwi uzyskanie mieszanki i stwardniałego betonu o właściwościach mechanicznych i technologicznych zbliżonych do betonu referencyjnego, przy zachowaniu jednorodności struktury oraz możliwości praktycznego zastosowania w wybranych elementach konstrukcyjnych.

Założenie to opiera się na oczekiwaniu, że:

- Odpowiednie wybranie i przygotowanie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych (dobór przekruszenia i obróbki wstępnej) ograniczy negatywny wpływ starej zaprawy na właściwości mieszanki betonu samozagęszczającego się.
- Udział kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych nie pogorszy istotnie parametrów reologicznych i wczesnych właściwości mechanicznych betonu.

- Właściwości mikrostrukturalne oraz identyfikowane strefy przejściowe ITZ pozwolą na zachowanie wystarczającej jednorodności i spójności materiału dla wybranych zastosowań konstrukcyjnych.

2.3. Zakres rozprawy

Niniejsza rozprawa składa się z 6 rozdziałów.

W rozdziale 1 dokonano wprowadzenia w tematykę rozprawy.

W rozdziale 2 sformułowano cele naukowe i cel praktyczny, oraz zakres jaki obejmuje rozprawa.

W rozdziale 3 dokonano krytycznego rozpoznania literaturowego dotyczącego zagadnień związanych z tematem rozprawy. Rozpoczęto ten rozdział od analizy systemowych budynków wielkopłytowych, następnie opisano stan wiedzy na temat betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu oraz osobno mikrostruktury betonu z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu. Rozdział kończy się podsumowaniem rozpoznania i wyszczególnieniem luk badawczych.

W rozdziale 4 zawarto opis badanego materiału, zakres badań własnych i stosowaną w rozprawie metodykę.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań własnych zrealizowanych dla potrzeb rozprawy oraz ich liczne analizy a także zależności między nimi. W skład opisanych badań weszła charakterystyka użytych kruszyw pod kątem ich gęstości, nasiąkliwości, wodożądności, obecności starej zaprawy, ścieralności, charakterystyki morfologicznej i mikrostruktury oraz opis wpływu częściowej zamiany kruszywa grubego naturalnego na kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na takie właściwości mieszanki samozagęszczającej się jak jej konsystencja, lepkość, czasy wiązania, odsączanie wody z mieszanki czy przyrost modułu sprężystości. Następnie opisano wyniki badań właściwości wytrzymałościowych i funkcjonalnych dla stwardniałego betonu. W tej części pracy wykonano także analizę ekonomiczno – mechaniczną, która ma służyć porównaniu poszczególnych wyników z uwzględnieniem szerszego kontekstu niż tylko właściwości mechaniczne kompozytu oraz korzyści środowiskowe na przykładzie obliczenia stropu konstrukcyjnego.

W rozdziale 6 zamieszczono podsumowanie, wnioski oraz proponowane kierunki dalszych badań.

Rozprawę kończy zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej, wykaz literatury i streszczenie w języku polskim i angielskim. W wyniku prac nad tematyką rozprawy, opublikowano 5 prac naukowych (w tym 4 z Impact Factor) w których doktorant jest autorem lub współautorem.

Zakres jaki obejmuje rozprawa związany jest z celami pracy i można go zawrzeć w następujących punktach:

1. Dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego, który dotyczy przede wszystkim: analizy systemowych budynków wielkopłytowych i ich elementów konstrukcyjnych, identyfikacji luk badawczych związanych z właściwościami betonu samozagęszczającego się, analizy wpływu kruszywa grubego z recyklingu elementów betonowych na makroskopowe właściwości mieszanki samozagęszczającej się a także jego mikrostrukturę.

2. Opracowanie zakresu badań własnych i metodyki badań wraz z opisem stosowanych metod badawczych.
3. Wykonanie analizy właściwości zastosowanego kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych oraz porównawczego kruszywa grubego naturalnego (zawartość zaprawy w kruszywie, nasiąkliwość, krzywa uziarnienia, analiza skaningowej mikroskopii elektronowej, wodożądność, ścieralność, gęstość nasypowa, właściwości morfologiczne ziaren, gęstość upakowania, dyfraktometria rentgenowska).
4. Zaprojektowanie składu serii 13 mieszanek betonu samozagęszczającego się wykonanych na bazie częściowej zamiany kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe z systemowych budynków wielkopłytowych.
5. Wykonanie badań własnych 13 serii mieszanek betonu samozagęszczającego się, które na celu mają określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na takie właściwości jak: konsystencja, lepkość, początek czasu wiązania, odsączanie wody z mieszanki cementowej, przejście od stanu płynnego do stałego podczas utwardzania betonu i porównanie uzyskanych wyników z wynikami serii referencyjnej (niemodyfikowanej).
6. Badania próbek betonowych wykonanych zgodnie z założeniami badawczymi, których skład modyfikowany będzie częściowym zamiennikiem kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe z systemowych budynków wielkopłytowych, określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na takie właściwości jak: moduł sprężystości, wytrzymałość na ściskanie, odporność na ścieranie, jednorodność betonu w przekroju, mikrostruktura betonu, analiza uzyskanych wyników w oparciu o wcześniej zaobserwowane właściwości materiałów oraz mieszanek cementowych, porównanie uzyskanych wyników do serii referencyjnej.
7. Wykonanie analizy ekonomiczno-mechanicznej na podstawie, której wyselekcjonowane zostaną serie badawcze, które pozwalają na osiągnięcie najbardziej korzystnych wyników właściwości betonu samozagęszczającego się.
8. Wykonanie analizy korzyści środowiskowych na podstawie przykładowego zastosowania.
9. Podsumowanie, wyciągnięcie wniosków naukowych i praktycznych oraz podanie kierunków dalszych badań.

Ze względu na szeroki zakres tematyczny rozprawy, obejmujący kompleksową charakterystykę kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych, jego wpływ na właściwości świeżej mieszanki betonu samozagęszczającego się oraz stwardniałego betonu (w tym właściwości mechaniczne, mikrostrukturalne i reologiczne), podjęto świadomą decyzję o zawężeniu obszaru badań do właściwości krótkoterminowych i wczesnych faz dojrzewania betonu. Trwałość długoterminowa, obejmująca m.in. karbonatyzację, odporność na cykle zamrażania/rozmarzania czy podatność na reakcję alkalia–krzemionka (ASR), z pewnością stanowi istotny aspekt oceny pełnowartościowości betonu samozagęszczającego się z udziałem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych. Niemniej jednak, zagadnienia te wymagają odrębnego podejścia badawczego – w szczególności badań przyspieszonego starzenia oraz długookresowych testów

środowiskowych, które ze względu na swoją czasochłonność i zasobochłonność wykraczają poza ramy niniejszej rozprawy. W niniejszej pracy skupiono się na pierwotnej walidacji kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych oraz jego potencjałe aplikacyjnym w kontekście właściwości mechanicznych, mikrostrukturalnych i technologicznych, co uznano za niezbędny etap wstępny do dalszych, pogłębionych analiz trwałościowych. Mając na uwadze znaczenie zagadnienia trwałości długoterminowej, w rozdziale 6.4 wskazano potrzebę kontynuacji badań w tym zakresie jako jedno z kluczowych wyzwań badawczych. Dotyczyć one powinny w szczególności: wpływu procesów karbonatyzacji na strefę przejściową ITZ z udziałem starej zaprawy, odporności betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na mrozoodporność i cykle zamarzania/odmarzania, reakcji alkalia–krzemionka w kontekście zróżnicowanego pochodzenia kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych, przyspieszonego starzenia jako metody oceny trwałości konstrukcyjnej w warunkach eksploatacyjnych. W niniejszej rozprawie przeanalizowano kruszywo grube uzyskane z niemieckiego systemowego budynku wielkopłytowego *Plattenbau P1* pod kątem jego zastosowania w betonie samozagęszczającym się. Nie prowadzono odrębnych badań dla kruszywa z paneli pochodzących z innych, polskich typów systemów LPS, takich jak OWT, WUF czy Wk-70, co stanowi kierunek dalszych prac. Należy jednak podkreślić, że w praktyce prefabrykacji wielkopłytowej elementy konstrukcyjne były wytwarzane zgodnie z normatywnymi wymaganiami minimalnej klasy betonu (zwykle co najmniej B30/B35 w warunkach PRL), zapewniającymi wytrzymałość nie mniejszą niż uzyskana dla panelu analizowanego w niniejszej pracy. W związku z tym można oczekiwać, że panele konstrukcyjne z innych typów budownictwa wielkopłytowego, o porównywalnej lub wyższej klasie wytrzymałości, będą wykazywać podobny potencjał do wykorzystania jako źródło kruszywa recyklingowego do betonu samozagęszczającego się.

2.4. Nowatorski charakter rozprawy

Nowatorski charakter niniejszej rozprawy przejawia się w trzech kluczowych obszarach:

1. Pierwsze w literaturze kompleksowe badania kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych oraz jego zastosowania w betonie samozagęszczającym się – obejmujące opracowanie autorskiej metodyki przygotowania i charakterystyki kruszywa (dobór stopnia przekruszenia, analiza zawartości starej zaprawy, ocena morfologii i właściwości mikrostrukturalnych) oraz porównanie z kruszywami z innych źródeł.
2. Opracowanie innowacyjnego podejścia do projektowania mieszanek betonu samozagęszczającego się z częściowym zastąpieniem kruszywa grubego naturalnego kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych, uwzględniającego:
 - optymalizację zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na podstawie gęstości upakowania,
 - zastosowanie zmodyfikowanej metody równoważnej objętości zaprawy z uwzględnieniem wpływu starej zaprawy – po raz pierwszy w kontekście betonu samozagęszczającego się.

3. Pierwsze określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na kluczowe procesy wczesnej fazy dojrzewania betonu samozagęszczającego się, w tym przejście betonu od stanu płynnego do stałego podczas utwardzania (czas wiązania, odsączenie wody, przyrost modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie), połączone z analizą mechaniczno–ekonomiczną wskazującą optymalny udział kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych z punktu widzenia właściwości mechanicznych i ograniczenia odpadów budowlanych.

Otrzymane wyniki wypełniają istotną lukę badawczą dotyczącą wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w technologii betonu samozagęszczającego się i stanowią punkt wyjścia do dalszych badań nad jego długoterminową trwałością.

3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE

3.1. Systemowe budynki wielkopłytowe

3.1.1. Wprowadzenie

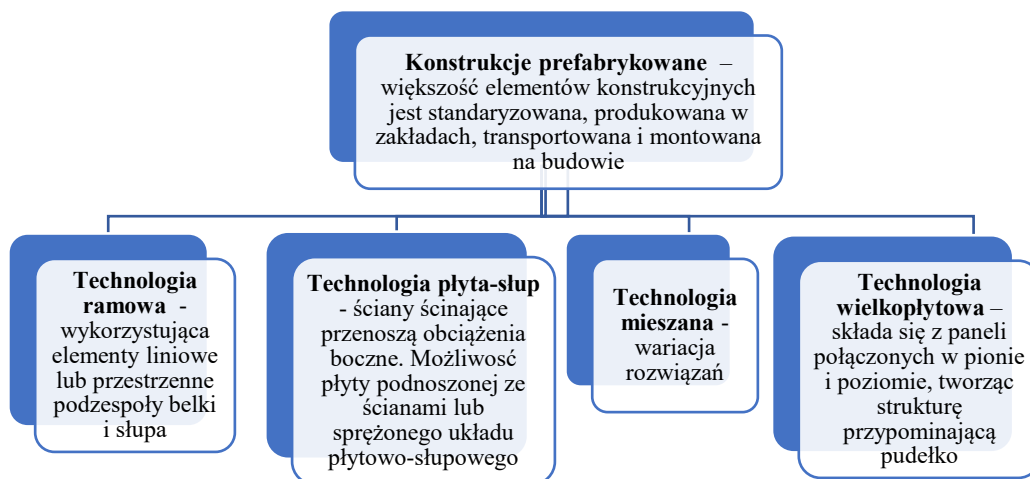
Prefabrykowane systemy budowlane można sklasyfikować na cztery podstawowe kategorie, w zależności od układu struktury nośnej, co przedstawiono na Rysunku 1. Poniżej przedstawiono charakterystykę poszczególnych technologii.

Technologia ramowa charakteryzuje się tym, że jego elementy liniowe (belki i słupy) są łatwe do formowania, transportu oraz montażu przestrzennego [13]. Podzespoły tego systemu mogą być rozmieszczane z dala od stref krytycznych ramy. Preferowane są połączenia belka–słup, w których belki osadzone są na wspornikach słupów w sposób zawiasowy, co umożliwia skuteczne przekazywanie sił ścinających. W przypadkach wymagających zachowania ciągłości zbrojenia stosuje się połączenia sztywne. Rysunek 2a i Rysunek 2b przedstawiają typowe elementy systemu ramowego [271] [173].

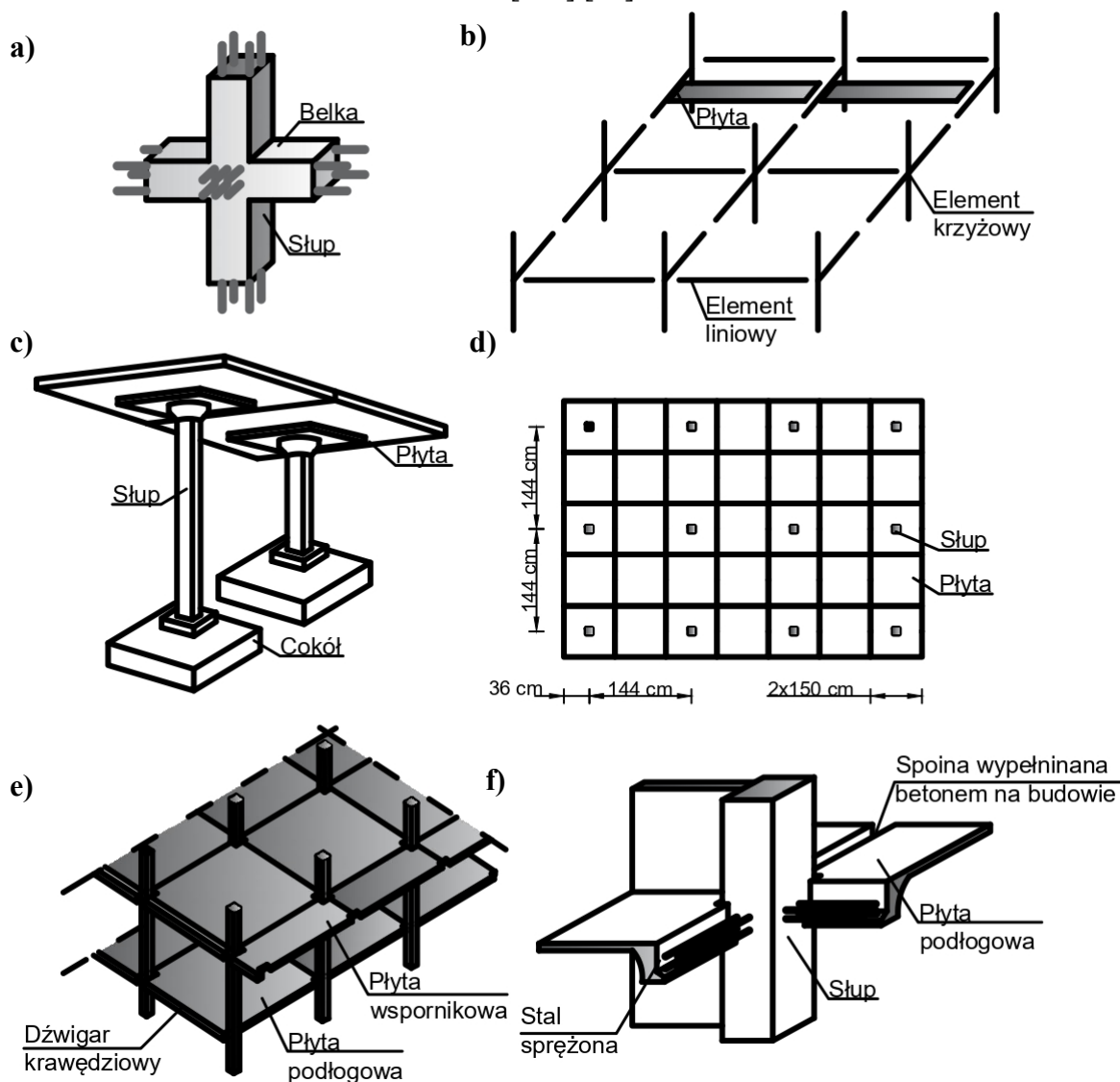
Technologia płyty podnoszonej (ang. *lift slab*) opiera się na zastosowaniu prefabrykowanych słupów żelbetowych – zwykle o wysokości dwóch kondygnacji – oraz prefabrykowanych płyt stropowych [403]. Płyty wylewane są na poziomie gruntu, a następnie podnoszone na docelową wysokość za pomocą dźwigów, jak przedstawiono na Rysunku 2c i Rysunku 2d [286] [27]. Wszystkie elementy łączone są za pomocą odpowiednich złączy montażowych.

Technologia płyta–słup to przestrzenna konstrukcja ramowa, złożona z prefabrykowanych płyt stropowych i słupów. Zarówno płyty, jak i słupy są sprężane w dwóch kierunkach, co zapewnia stabilność i ciągłość konstrukcji (Rysunek 2e i Rysunek 2f) [403]. System ten, projektowany pierwotnie z myślą o budynkach wysokościowych, znajduje również zastosowanie w obiektach użyteczności publicznej, takich jak szkoły, szpitale i biura, a także w zabudowie szeregowej jednorodzinnej [153] [242] [154] [14].

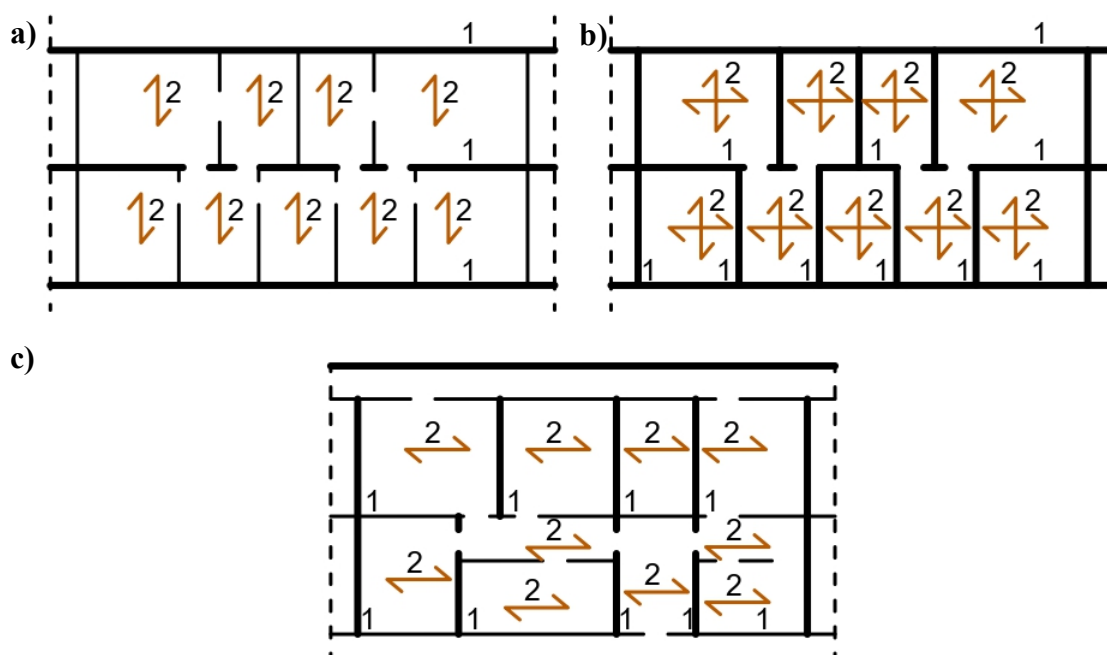
Technologia wielkopłytowa (ang. *Large Panel System*, LPS) obejmuje wielokondygnacyjne konstrukcje przestrzenne, składające się z prefabrykowanych paneli ściennych i stropowych, łączonych w kierunkach pionowym i poziomym w celu utworzenia sztywnej struktury skrzynkowej. Panele ścienne mają zwykle wysokość jednej kondygnacji, natomiast panele stropowe i dachowe działają jako płyty jedno- lub dwukierunkowe [345]. Wszystkie elementy konstrukcyjne – pionowe i poziome – pełnią funkcje nośne, przenosząc obciążenia pionowe oraz poziome. Zintegrowane panele poziome funkcjonują jako diafragmy, przekazując obciążenia poziome na ściany [54]. Typowe ściany prefabrykowane mają budowę warstwową – z dwóch warstw betonu rozdzielonych warstwą izolacyjną z polistyrenu ekspandowanego, której integralność zapewniają łączniki ze stali nierdzewnej. Systemy wielkopłytowe można klasyfikować według układu ścian nośnych na trzy podstawowe typy: podłużny, poprzeczny i krzyżowy, co przedstawiono na Rysunku 3. Kluczowe znaczenie dla niezawodności konstrukcji mają złącza pomiędzy panelami [31] [32], których klasyfikację – opartą na lokalizacji oraz zastosowanej technologii wykonania – zestawiono w Tabeli 1 [38].



Rysunek 1. Cztery typowe typy konstrukcji prefabrykowanych, opracowane na podstawie [155] [54]



Rysunek 2. Typowe elementy systemu ramowego: a) element krzyżowy, b) kluczowe elementy nośne w rzucie izometrycznym. Elementy płyty podnoszonej: c) kluczowe elementy nośne d) plan typowego budynku. Elementy systemu płyta-słup: e) widok izometryczny f) połączenie słup-płyta



Rysunek 3. Typowa konfiguracja paneli: a) podłużna, b) poprzeczno-ścienna, c) poprzeczna, gdzie 1 – ściany nośne i 2 – kierunek rozpiętości stropów

Tabela 1. Klasyfikacja złączy na podstawie ich lokalizacji i metody wykonania, na podstawie [54] [38]

Nazwa	Opis
Na podstawie lokalizacji w budynku	
Złącze pionowe	Łączą pionowe powierzchnie sąsiadujących paneli ściennych i przeciwstawiają się pionowym siłom ścinającym sejsmicznym.
Złącze poziome	Łączą poziome powierzchnie sąsiadujących ścian i paneli podłogowych, wytrzymują obciążenia grawitacyjne i sejsmiczne. Występują między płytami podłogowymi, między płytą podłogową a ścianą poprzeczną, między płytą podłogową a ścianą zewnętrzną.
Na podstawie metody wykonania	
Na mokro	Wystające pręty zbrojeniowe z paneli (kołki) są łączone w złączu. Następnie między panelami wylewany jest beton odlewany in-situ.
Na sucho	Powstają poprzez przykręcanie lub spawanie stalowych płyt na końcach prefabrykowanych paneli.

Ze względu na największy udział w strukturze zasobów mieszkaniowych w Europie – zwłaszcza w krajach Europy Wschodniej – niniejsze opracowanie koncentruje się na technologii wielkiej płyty. Przykładowo, według [384], aż 50% mieszkańców miast w Polsce zamieszkuje osiedla wzniesione w tej technologii. W pracy [327] dokonano oceny stanu technicznego zasobów mieszkaniowych w Federacji Rosyjskiej – całkowita powierzchnia budynków technologii wielkopłytowej wynosi tam 776,3 mln m², z czego 4,5 mln m² uznaje się za obiekty wysokiego ryzyka. W [378] porównano zasoby budownictwa wielkopłytowego

w różnych krajach, wskazując również trudności adaptacyjne tej technologii na rynku malezyjskim, takie jak: brak wykwalifikowanej siły roboczej, konieczność importu prefabrykatów oraz niska jakość przy wysokich kosztach budowy. Według [269], w byłych krajach socjalistycznych nawet 40% ludności zamieszkuje budynki masowego budownictwa, podczas gdy w Europie Zachodniej odsetek ten wynosi około 10%. W Rosji niemal połowa zasobów mieszkaniowych w dużych miastach to budynki wielkopłytkowe oraz obiekty z bloków i cegły, wzniesione w latach 1950–1970. Taki stan rzeczy prowadzi do szeregu problemów, m.in. jednoczesnego starzenia się zabudowy, konieczności synchronicznych remontów, nieatrakcyjnej estetyki modernistycznej oraz niespełniania współczesnych norm technicznych. Od lat 70. do 90. XX wieku, w zależności od kraju, technologia ta była stopniowo zarzucana ze względu na krytykę dotyczącą monotonii architektonicznej, niskich standardów technicznych oraz wysokich kosztów eksploatacyjnych. Od tego czasu toczą się nieprzerwane dyskusje na temat przyszłości budynków wielkopłytkowych, ich efektywności technicznej i zasadności ewentualnych rozbiórek z perspektywy użytkowników [160] [179].

W krajach Europy Zachodniej – m.in. w Wielkiej Brytanii, Niemczech, Francji i Niderlandach – prowadzone były lub są realizowane na dużą skalę rozbiórki zabudowy wielkopłytkowej. Są one odpowiedzią na postępujące zjawisko kurczenia się obszarów miejskich oraz próbą ograniczenia segregacji społecznej [70]. Przykładami są tereny wschodnich Niemiec, gdzie rozległy krajobraz miejski we wschodnich krajach związkowych został zabudowany przez „osiedla z wielkiej płyty”. W 1946 roku szacowano niedobór mieszkań w NRD (utworzonej trzy lata później) na poziomie od 1,2 do 1,4 miliona. Z tej liczby około 500 000 brakowało już przed wojną. Doprowadziło to do rozwoju osiedli w technologii wielkopłytkowej (niem. *Plattenbau*). Pierwsze eksperymenty z budownictwem wielkopłytkowym w NRD rozpoczęły się na początku lat 50. XX wieku. W 1953 roku wzniesiono w berlińskiej dzielnicy Johannisthal pilotażowy budynek z elementów prefabrykowanych, a dwa lata później kolejny obiekt testowy w Cottbus. W 1957 roku w Hoyerswerdzie zrealizowano już pierwszą niewielką serię budynków wielkopłytkowych, która stała się zapowiedzią szerszego programu mieszkaniowego. Na tej bazie, w 1960 roku, Katedra Projektowania Typów VEB (niem. *VEB-Typenprojektierung*) przygotowała pierwszy ustandaryzowany projekt budynku prefabrykowanego oznaczony symbolem P1 [301] [36]. P1 był jednym z pierwszych centralnych typów, który umożliwiał masową produkcję i powtarzalność prefabrykatów. Kolejnym rozwinięciem tego kierunku był system P2, opracowany na początku lat 60. w wyniku konkursu architektonicznego. Oba typy (P1 i P2) stały się fundamentem późniejszego programu mieszkaniowego NRD [246]. Został on oficjalnie ogłoszony w 1972 roku podczas VIII Zjazdu Socjalistycznej Partii Jedności Niemiec i zakładał budowę lub modernizację około trzech milionów mieszkań do 1990 roku. Priorytetem państwa stało się wówczas prefabrykowane budownictwo mieszkaniowe – realizowano całe dzielnice i miasta, jak Halle-Neustadt, oparte niemal wyłącznie na wielkowymiarowych elementach żelbetowych. W kolejnych latach opracowano nowy, bardziej elastyczny system WBS 70, który charakteryzował się dużą różnorodnością układów przestrzennych i większą uniwersalnością techniczną. Mimo to, system P1 pozostaje istotny w historii budownictwa NRD jako pierwsza próba stworzenia masowego, powtarzalnego prefabrykowanego typu mieszkaniowego. Z uwagi na swoją skalę i jednorodność technologii, P1 stanowi obecnie ważne źródło surowca

w postaci betonu rozbiórkowego wykorzystywanego w badaniach nad kruszywem recyklingowym. Obecne działania modernizacyjne w Niemczech prowadzone są kompleksowo. W proces ten zaangażowani są politycy, właściciele osiedli (spółdzielnie) oraz grupy naukowców i projektantów. W Niemczech w latach 1990–1999 wydano siedemdziesiąt miliardów marek na modernizację osiedli z wielkiej płyty. Dyskusje toczyły się w dwóch kierunkach. Jeden z nich zakładał całkowitą rozbiórkę istniejącej zabudowy i wprowadzenie nowych budynków, dostosowanych do współczesnych potrzeb mieszkańców, drugi natomiast skupiał się na modernizacji tych osiedli. Oczywiście najważniejszą kwestią pozostają aspekty ekonomiczne, które zawsze odgrywają decydującą rolę. W ramach eksperymentu modernizacyjnego zmodernizowano fragment osiedla przy *Stormstraße* w Cottbus, składający się z ośmiu długich, jedenastopiętrowych budynków ustawionych parami równolegle do siebie (Rysunek 4). Fundamenty budynków nie zostały zmienione, ale znacznie je skrócono. Elementy żelbetowe, które pozostały po rozbiórce fragmentów budynków, zostały ponownie wykorzystane. W sąsiedztwie powstało małe osiedle mieszkaniowe składające się z 5 budynków o interesującej, prostej, postmodernistycznej zabudowie o niskiej intensywności, obejmującej 13 mieszkań, tarasy dachowe, balkony, ogrody oraz wyraźnie przenikające się strefy publiczne i prywatne w przestrzeni bloków.

Migracja ze wschodu na zachód, która rozpoczęła się w Niemczech po zjednoczeniu w 1990 roku, spowodowała masowe pustostany w mieszkaniach *Plattenbau*. W niektórych miejscach, takich jak *Halle-Silberhöhe*, w 2002 roku około 22% mieszkań stało pustych. Architekci i urbaniści próbowali zwiększyć atrakcyjność tych mieszkań, jednak ostatecznie w niektórych lokalizacjach osiedla wielkopłytkowe były lub są poddawane rozbiórce.

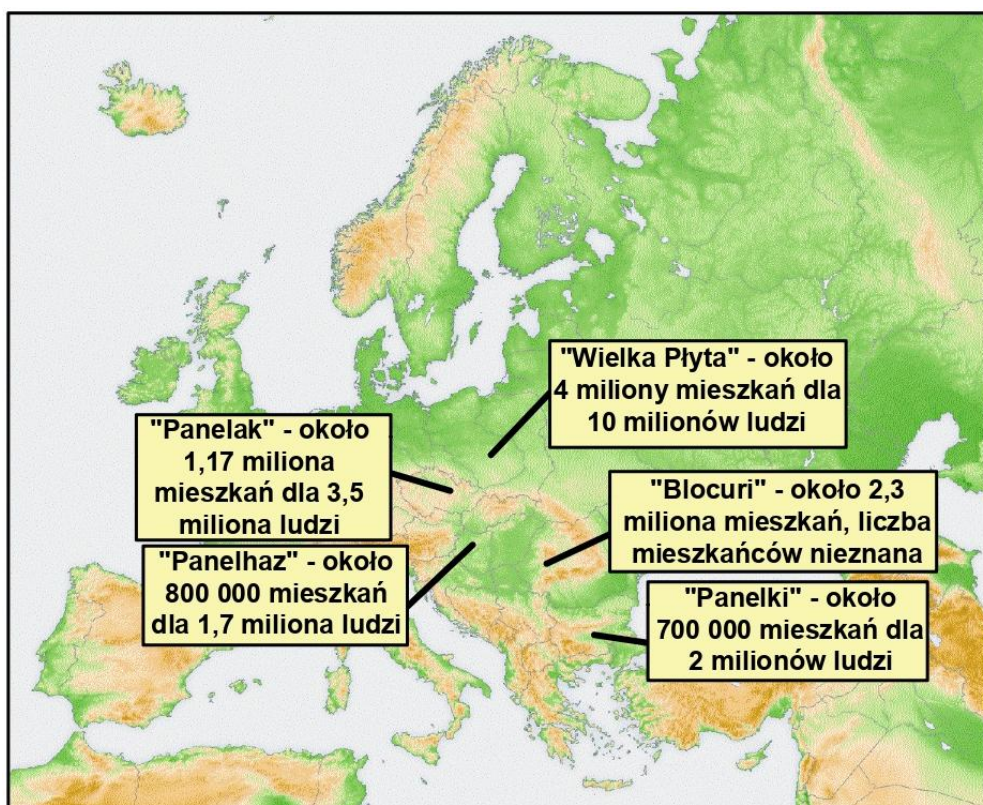


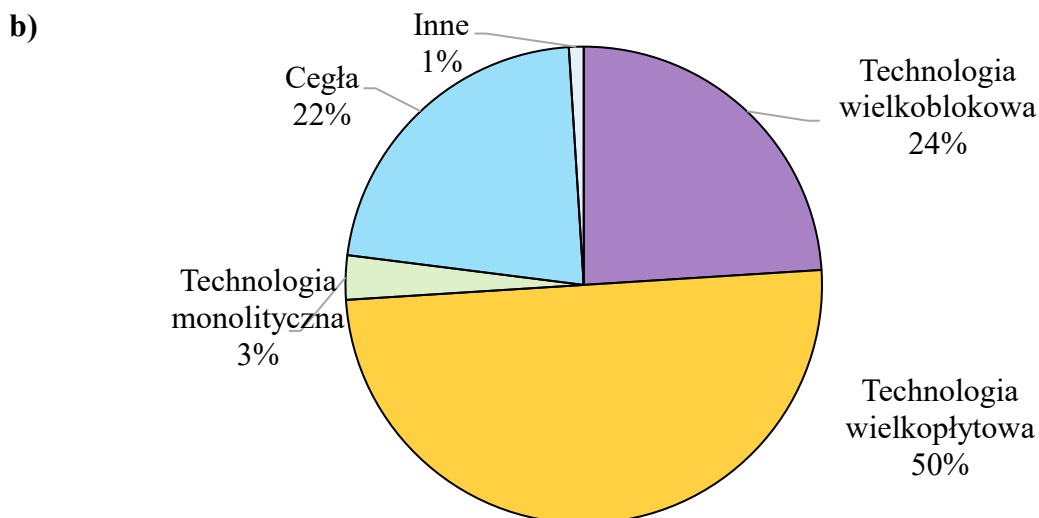
Rysunek 4. Widok nowych budynków wykonanych z materiałów pochodzących z rozbiórki, *Sachsendorf-Madlow*, położony na południu Cottbus

Zakłada się, że podobna tendencja może wystąpić również w krajach Europy Wschodniej. Udział budownictwa wielkopłytkowego w poszczególnych krajach, w tym w Polsce, zilustrowano na Rysunku 5. W kontekście rozwoju gospodarki o obiegu zamkniętym wskazuje się potencjał recyklingu odpadów pochodzących z rozbiórek budynków technologii wielkopłytkowej, szczególnie jako składnika nowych mieszanek betonowych. Niemniej jednak, jak wynika z analizy bazy danych Scopus (2022), brakuje dotychczas systematycznych badań

w tym zakresie. Część badaczy wskazuje, że stare budynki powinny być postrzegane jako potencjalne źródło materiałów budowlanych [3]. Jednakże dotychczasowe badania dotyczące recyklingu elementów technologii wielkopłytywowej koncentrują się głównie na możliwościach ponownego wykorzystania prefabrykowanych paneli betonowych. Huuhka i in. analizując fińskie zasoby mieszkaniowe wykazali, że z elementów stropowych i ściennych pochodzących z jednego przeciętnego budynku wielkopłytwowego można wznosić nawet dziewięć domów jednorodzinnych [138]. Należy jednak zauważyć, że większość systemów wielkopłytowych nie była projektowana z myślą o ich późniejszym demontażu i ponownym wykorzystaniu – wyjątek stanowią np. systemy holenderskie, takie jak DC-20 [167]. Dodatkowym ograniczeniem są uszkodzenia elementów wynikające z nieprzewidzianych zdarzeń losowych, np. eksplozji gazu, jak miało to miejsce w Magnitogorsku (Rosja) [157], które powodują pęknięcia, rozwarstwienia lub całkowite zniszczenie paneli. W pracy [238] zaproponowano koncepcje ekonomicznie opłacalnych renowacji budynków wielkopłytowych w warunkach klimatu zimnego w Finlandii. Wykazano, że w przypadku zaawansowanej karbonatyzacji zewnętrznych warstw betonu, elementy te – wraz z oryginalną termoizolacją – zazwyczaj podlegają rozbiórce. Proces wyburzenia budynków wielkopłytowych, zwłaszcza wysokich obiektów, jest złożony technologicznie i generuje znaczne ilości odpadów, które w obecnym stanie nie nadają się do ponownego wykorzystania jako kompletne elementy konstrukcyjne [211]. W celu identyfikacji możliwości recyklingu, niniejszy tekst stanowi przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat technologii wielkopłytywowej w budownictwie drugiej połowy XX wieku. Na podstawie literatury zidentyfikowano dominujące kierunki badań oraz omówiono wybrane cechy charakterystyczne budynków wielkopłytowych. Nowatorski wkład pracy stanowi identyfikacja luk badawczych w zakresie utrzymania technicznego, procesów rozbiórkowych oraz możliwości wtórnego wykorzystania elementów prefabrykowanych.

a)





Rysunek 5. Udział mieszkań w technologii wielkopłytkowej: a) w wybranych krajach UE [303] b) w Polsce w latach 1946-1992 [251]

3.1.2. Analiza scientometryczna

Aby zbadać aktualne kierunki badań dotyczących budynków w technologii wielkopłytkowej, przeprowadzono analizę scientometryczną danych bibliometrycznych. Tego typu analiza umożliwia tworzenie wizualizacji do analizy danych w różnorodnych celach badawczych, pozwalając na identyfikację powiązań pomiędzy źródłami, słowami kluczowymi, autorami, artykułami oraz krajami w obrębie wybranego obszaru tematycznego. Dzięki wykorzystaniu map i powiązań w obrębie danych bibliometrycznych możliwe jest stosunkowo łatwe wychwycenie najczęściej pojawiających się zagadnień, w których występują analizowane słowa kluczowe. Analiza scientometryczna znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach nauki [267] [435] [352] [108], w tym także w badaniach z zakresu budownictwa i technologii betonu [5].

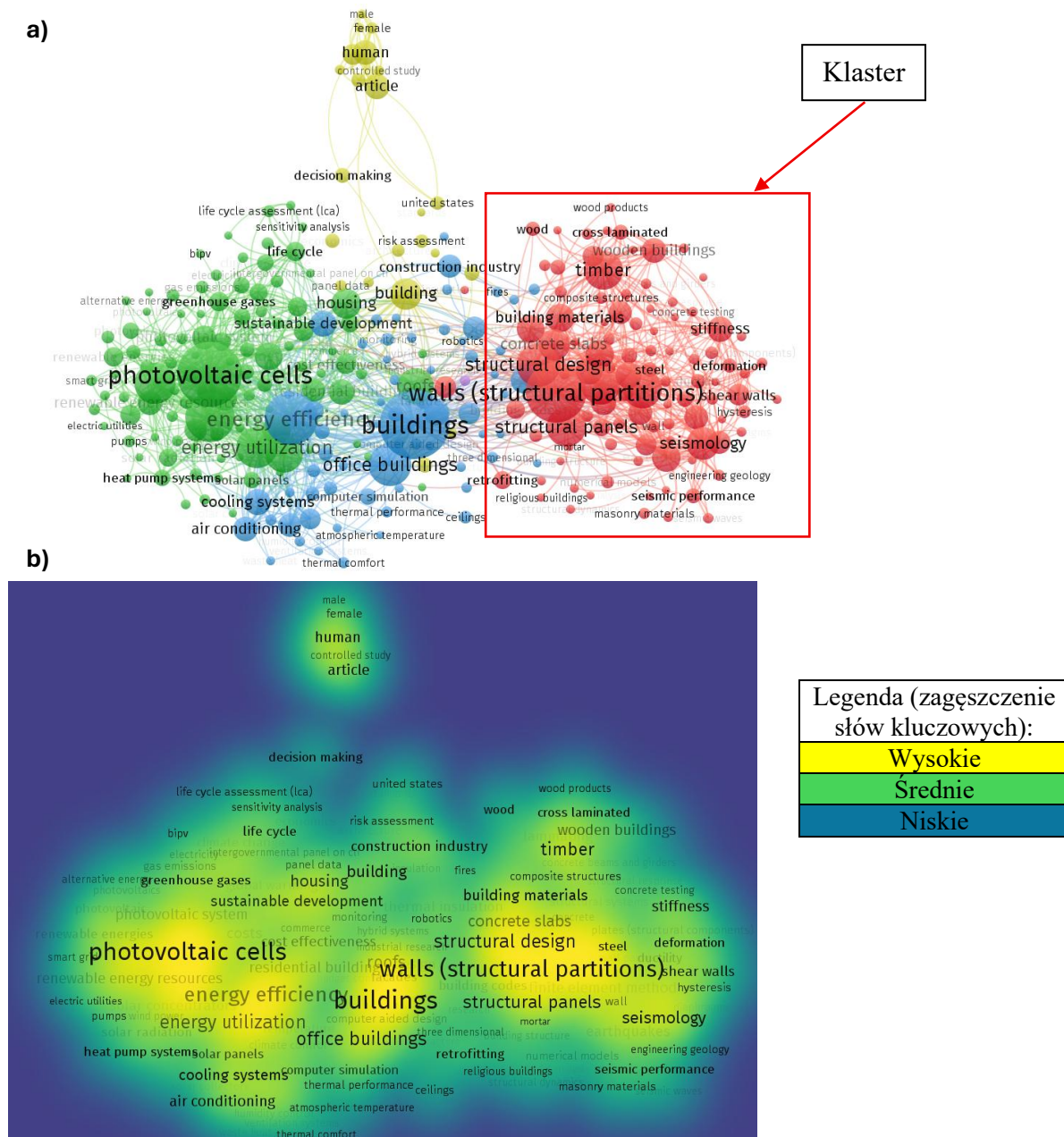
Dyskusja na temat technologii wielkopłytkowej prowadzona jest od wielu dekad, czego wynikiem jest szereg publikacji naukowych obejmujących różnorodne aspekty tego zagadnienia. Baza Scopus, ze względu na największy zakres indeksowania spośród wszystkich baz danych (o 20% większy niż Web of Science) oraz przy niższej dokładności wyników w Google Scholar, została wybrana do dalszej analizy cytowań [88] [393]. Baza ta obejmuje około 36 377 tytułów publikowanych przez około 11 678 wydawnictw [332] i została wykorzystana do opracowania danych bibliometrycznych dotyczących technologii wielkiej płyty w budownictwie ogólnym. Wyszukiwanie danych przeprowadzono w styczniu 2022 roku. W zapytaniu w bazie Scopus użyto słów kluczowych: *Large Panel System Building*. Zakres dziedzinowy obejmował: inżynierię, naukę o materiałach, nauki środowiskowe, informatykę oraz energetykę, co zaowocowało pozyskaniem 1446 dokumentów w języku angielskim. Dane z Scopus zostały wyeksportowane w formacie CSV (*Comma Separated Values*) celem dalszej analizy w specjalistycznym oprogramowaniu. Do opracowania mapowania nauki i wizualizacji wykorzystano program VOSviewer w wersji 1.6.17. Jest to narzędzie umożliwiające konstruowanie i wizualizację sieci bibliometrycznych na podstawie relacji cytowań, powiązań bibliograficznych, współcytowań lub współautorstwa [395]. Przeanalizowano mapy obrazujące

różne parametry, ich wzajemne relacje oraz współwystępowanie najczęściej pojawiających się słów kluczowych. Minimalna liczba wystąpień słowa kluczowego została ustalona na poziomie 10 – spośród 12 476 słów kluczowych, 292 spełniły ten warunek.

Wyniki – wizualizacja współwystępowania słów kluczowych, ich powiązań oraz zagęszczenia występowania – przedstawiono na Rysunku 6a. Wielkość węzła reprezentuje częstotliwość występowania danego słowa kluczowego, natomiast jego lokalizacja odzwierciedla współwystępowanie z innymi terminami w publikacjach naukowych. Dla wyróżnienia pięciu zidentyfikowanych klastrów użyto kolorów: czerwonego, zielonego, niebieskiego, żółtego i fioletowego. Klaster 1 (czerwony) obejmował 102 słowa kluczowe, klaster 2 (zielony) – 101, klaster 3 (niebieski) – 66, klaster 4 (żółty) – 22, natomiast klaster 5 (fioletowy) – 1 słowo kluczowe. Na Rysunku 6b przedstawiono mapę zagęszczenia słów kluczowych – kolory żółty, zielony i niebieski reprezentują odpowiednio wysokie, średnie i niskie zagęszczenie danych terminów. Wizualizacja ta nie tylko umożliwia identyfikację trendów badawczych w zakresie technologii wielkopłytywowej, ale może również stanowić pomoc dla przyszłych autorów w doborze słów kluczowych oraz w wyszukiwaniu literatury z konkretnego zakresu tematycznego.

Na podstawie wyników można zauważyć, że zagadnienia związane z technologią wielkiej płyty grupują się w czterech głównych klastrach tematycznych. Klaster czerwony odnosi się do aspektów konstrukcyjnych: projektowania budynków, materiałów budowlanych oraz trwałości konstrukcji (sztywność, sejsmologia, odkształcenia, wzmacnianie konstrukcji). Klaster zielony skupia się na zagadnieniach środowiskowych i zrównoważonym rozwoju – najczęściej występującym słowem kluczowym są ogniwa fotowoltaiczne. Klaster niebieski dotyczy efektywności energetycznej oraz sposobów jej wykorzystania. Ostatni duży klaster – żółty – koncentruje się na czynniku społecznym w kontekście technologii wielkopłytywowej.

Analizując wszystkie słowa kluczowe łącznie, zauważyć można wyraźny trend w kierunku szeroko rozumianej modernizacji budynków wielkopłytowych. Poprawa warunków mieszkaniowych, ograniczenie wpływu na środowisko oraz wydłużenie okresu użytkowania to tematy cieszące się dużym zainteresowaniem. Należy jednak zauważyć, że wśród zidentyfikowanych słów kluczowych nie występują terminy odnoszące się do ponownego użycia (*reusing*), recyklingu (*recycling*) czy wyburzeń (*demolition*), co wskazuje na bardzo ograniczoną lub wręcz brakującą liczbę badań poświęconych ponownemu wykorzystaniu paneli lub recyklingowi betonu pochodzącego z budynków wyburzanych – zarówno w sposób planowy, jak i w wyniku zdarzeń losowych.



Rysunek 6. Wyniki analizy scientometrycznej: a) wizualizacja sieci słów kluczowych b) wizualizacja gęstości słów kluczowych

3.1.3. Rys historyczny technologii wielkopłytywowej

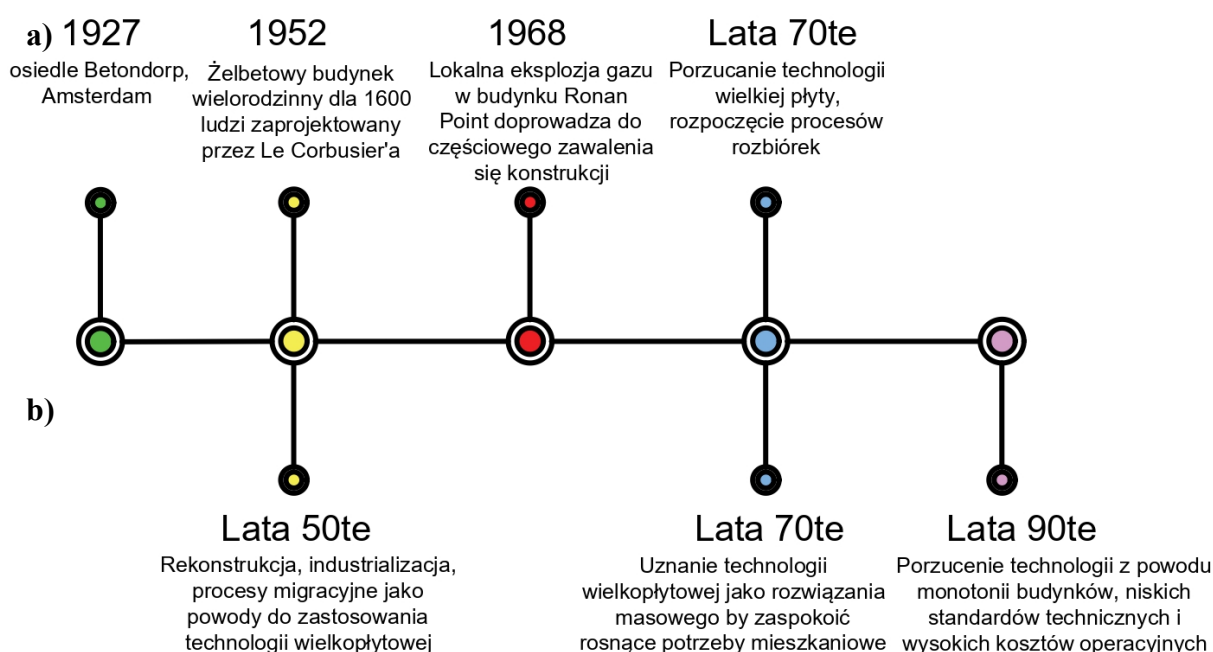
Z wielu powodów, w tym ze względu na rozwój gospodarczy oraz sytuację polityczną po II wojnie światowej, historia technologii wielkopłytywowej oraz jej zastosowanie przebiegały odmiennie w Europie Zachodniej i Wschodniej. Autor ma świadomość, że każde państwo posiada własną, specyficzną historię związaną z rozwojem tej technologii. Dla uproszczenia analizy można jednak zaobserwować wyraźne i powtarzalne trendy charakterystyczne osobno dla krajów zachodnich i wschodnich, co zaprezentowano na Rysunku 7.

Po raz pierwszy prefabrykowane elementy betonowe zastosowano w Holandii w latach 1923–1927 podczas budowy osiedla Betondorp na przedmieściach Amsterdamu [128]. W 1923 roku technologia wielkopłytywa została zastosowana w dwupiętrowych budynkach na osiedlu

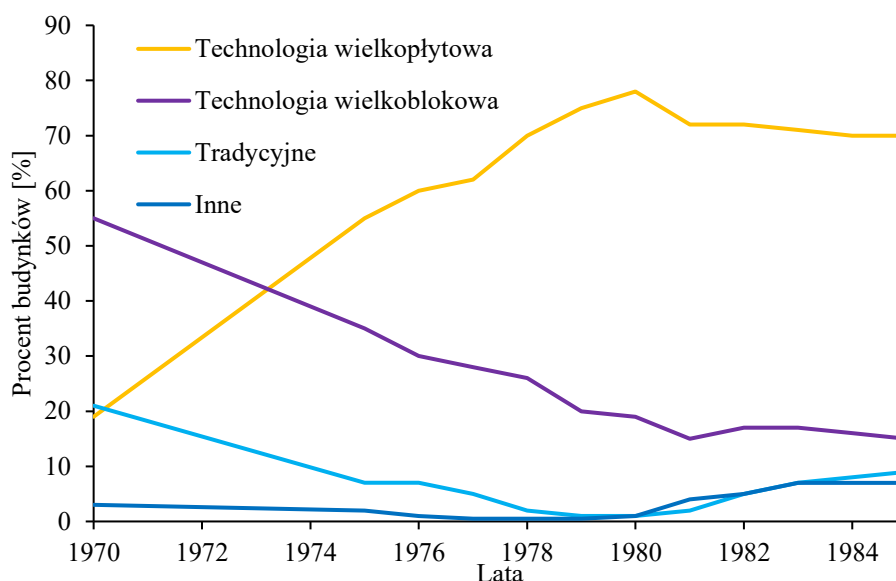
Splanemann w Berlinie-Lichtenbergu. We Francji, Szwecji i Finlandii wielopiętrowe bloki mieszkalne z wykorzystaniem tej technologii zaczęto budować pod koniec lat 30. XX wieku. Po zakończeniu II wojny światowej, w zniszczonej wojną Europie i przy znaczących migracjach ludności, pojawił się ogromny niedobór mieszkań. Technologia wielkopłytkowa trafiła na podatny grunt, ponieważ umożliwiała szybkie rozwiązanie tego problemu. Z entuzjazmem rozpoczęto budowę nowych miast, dzielnic, osiedli mieszkaniowych i kompleksów mieszkaniowych zgodnie z założeniami urbanistów. Poza zabudowę mieszkaniową, przewidywano w nich także szeroki zakres usług: dzielnicowe ośrodki kultury, obiekty usługowe, rekreacyjne, rozrywkowe, z określoną liczbą miejsc pracy, połączone dobrą komunikacją z centrum miasta i innymi dzielnicami. W 1968 roku nastąpiła zmiana postrzegania technologii wielkopłytkowej. Eksplozja gazu w londyńskim wieżowcu Ronan Point doprowadziła do częściowego zawalenia się konstrukcji, w wyniku czego zginęły cztery osoby, a siedemnaście zostało rannych. Przyczyną katastrofy była m.in. niemożność przekierowania obciążeń w przypadku zdarzenia losowego oraz słabe połączenia między prefabrykowanymi panelami [264]. W konsekwencji tej tragedii, wiele państw zaktualizowało swoje przepisy budowlane, wprowadzając zapisy dotyczące integralności strukturalnej oraz tzw. „odporności na uszkodzenia” (ang. *robustness*) [236] [308]. Budownictwo wielkopłytkowe było dość powszechne w całej Europie. Warto jednak zaznaczyć, że w żadnym z krajów zachodnich nie stało się ono dominującą metodą pozyskiwania mieszkań, a już w połowie lat 70. państwa te zrezygnowały z budowy kolejnych obiektów w tej technologii. Przyczyn takiego stanu rzeczy było wiele, ale jedną z najważniejszych były rosnące koszty transportu ciężkiego. Z czasem państwa Europy Zachodniej rozpoczęły stopniową rozbiórkę niektórych obiektów tego typu. W przeciwieństwie do tego trendu, kraje Europy Wschodniej rozpoczęły wdrażanie technologii wielkopłytkowej dopiero po zakończeniu II wojny światowej. Uzasadnieniem tego była skala zniszczeń – znaczna część dużych miast została zrujnowana, a infrastruktura przemysłowa uległa poważnym uszkodzeniom [64] [244]. W początkowym okresie wprowadzono technologię tzw. wielkich bloków (ang. *Large Block System* – LBS), opartą na prefabrykowanych płytach lub blokach betonowych o wysokości odpowiadającej całej kondygnacji i szerokości nieprzekraczającej 2,40 m. W kolejnych latach technologia wielkich bloków została zastąpiona przez wielką płytę, która dzięki większej elastyczności wymiarowej umożliwiała lepsze dostosowanie budynków do rosnących potrzeb mieszkaniowych. Różne warianty technologii wielkiej płyty bazowały na modularnych siatkach konstrukcyjnych, wysokości kondygnacji, rozpiętości i rozstawie elementów [121]. Od lat 60. do początku lat 90. technologia wielkopłytkowa była bardzo powszechna w budownictwie mieszkaniowym Europy Środkowej i Wschodniej. Okres największego rozwoju budownictwa mieszkaniowego opartego na technologii wielkiej płyty przypada na lata 70. Był to czas planowania i realizacji nowych, dużych osiedli mieszkaniowych. Wielką płytę traktowano jako przejaw nowoczesnych idei budowlanych, a dla wielu ludzi były one spełnieniem marzeń o własnym mieszkaniu. W Polsce pierwszy dom prefabrykowany oddano do użytku w 1957 roku w warszawskich Jelonkach. Technologia ta została zainportowana z Europy Zachodniej. Budownictwo z prefabrykowanych elementów betonowych rozpoczęło się na skalę przemysłową dopiero pod koniec lat 60., kiedy to jej rozwój był bardzo dynamiczny. Wówczas udział tej technologii w budownictwie wielorodzinnym wynosił 16%, natomiast w 1980 roku sięgał już niemal 83%

(Rysunek 8). W Polsce opracowano kilka systemów wielkopłytowych, w tym systemy zamknięte (elementy wielkopłytowe montowane w jednolity sposób, typizacja ograniczała się do powtarzalnego rozwiązania typu budynku, jego segmentu lub nawet tylko mieszkania) oraz systemy otwarte (możliwość tworzenia różnych konfiguracji w ograniczonej liczbie typów budynków stanowiących dowolny kompleks urbanistyczny). Technologia ta oznaczała unifikację – domy wyglądały podobnie, mieszkania miały bliźniacze układy. Z czasem jednak zaczęły ujawniać się jej wady, na przykład niedoskonałe wymiary prefabrykatów czy niestabilne połączenia konstrukcyjne.

Urbanizacja Europy Wschodniej po II wojnie światowej miała charakter dynamiczny, całkowicie przekształcając regiony z rolniczych w zurbanizowane. W Polsce udział ludności miejskiej w ogólnej populacji wzrósł z 42,5% w 1950 roku do 61,7% w 1997 roku [368]. Rysunek 8 potwierdza, że jednym z kluczowych czynników tej dynamicznej urbanizacji było zastosowanie technologii wielkopłyтовой w budownictwie mieszkaniowym. Łatwo zauważyć, że wraz z rozpowszechnieniem wielkiej płyty, technologie wielkich bloków i inne rozwiązania budowlane zaczęły stopniowo tracić na znaczeniu. Jednak już w latach 90. XX wieku technologię wielkopłytową zaczęto porzucać – przyczyną była krytyka powtarzalnej i monotematycznej architektury, niskich standardów technicznych wykonania oraz wysokich kosztów eksploatacyjnych. Niniejszy rozdział udowadnia, że wiele budynków w technologii wielkiej płyty w Europie Wschodniej, które wciąż są użytkowane, osiągnęły obecnie wiek porównywalny z tym, w jakim w Europie Zachodniej rozpoczęto ich rozbiórkę. Jeżeli obserwowany trend się utrzyma, może to skutkować powstaniem ogromnych ilości odpadów budowlanych, które – w miarę możliwości – powinny zostać poddane recyklingowi oraz ponownemu wykorzystaniu.



Rysunek 7. Najważniejsze daty z historii technologii wielkopłyтовой na przykładzie a) Europy Zachodniej b) Europy Wschodniej – przykład Polski. Na podstawie [134] [210] [128] [44] [228] [264]



Rysunek 8. Udział budynków w latach 1970-1985 w Polsce, na podstawie [251]

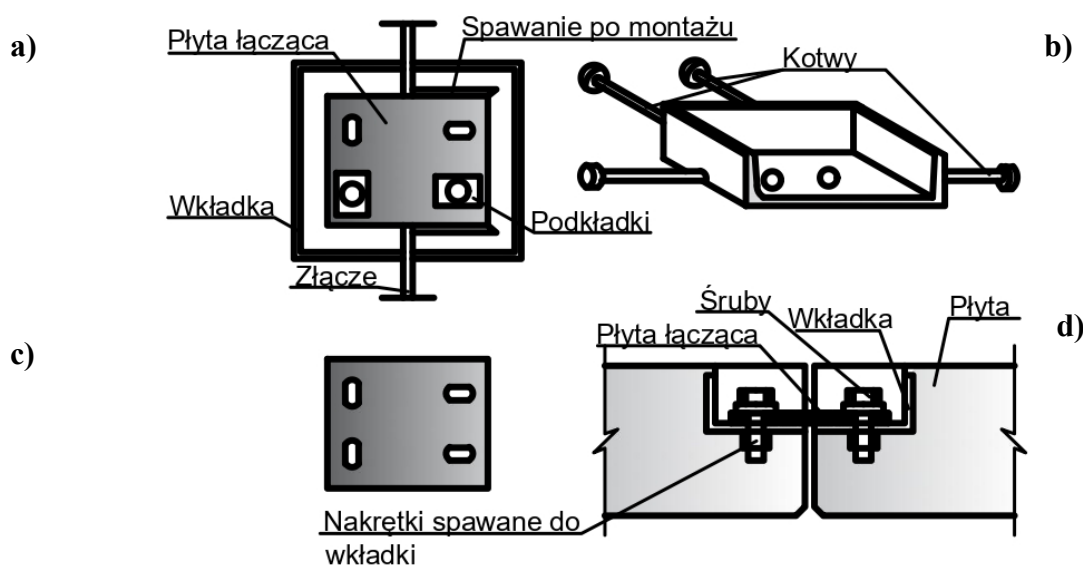
3.1.4. Wybrane cechy technologii systemów wielkopłytkowych mające wpływ na trwałość konstrukcji

Po okresie intensywnego rozwoju budownictwa wielkopłytkowego w latach 60. XX wieku, technologia ta napotkała szereg wyzwań, które ujawniły jej ograniczenia w zakresie trwałości konstrukcyjnej. Kluczowe znaczenie miały dwa tragiczne wydarzenia: trzęsienie ziemi w Skopje (Macedonia Północna) w 1963 roku, które doprowadziło do zniszczenia wielu obiektów zrealizowanych w technologii wielkopłytkowej, oraz częściowe zawalenie się budynku Ronan Point w Londynie w 1968 roku, spowodowane eksplozją gazu. Oba incydenty uwiarydliły podatność tych konstrukcji na nietypowe obciążenia i doprowadziły do wygenerowania znacznych ilości odpadów budowlanych. W konsekwencji wzrosło zainteresowanie potrzebą projektowania budynków z uwzględnieniem obciążeń ekstremalnych, w szczególności w zakresie wytrzymałości połączeń elementów prefabrykowanych – które okazały się najsłabszym ogniwem konstrukcji. Niestety, mimo upływu czasu, wciąż brakuje szczegółowych i jednoznacznych przepisów dotyczących takich sytuacji. W połączeniu z niską jakością wykonawstwa charakterystyczną dla wielu realizacji z tego okresu, technologia wielkopłytkowa zyskała opinię zawodnej, co doprowadziło do jej wycofania z praktyki budowlanej w Europie Zachodniej w latach 70. Niniejszy podrozdział omawia wybrane czynniki technologiczne wpływające na trwałość konstrukcji wielkopłytkowych, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych możliwości ponownego wykorzystania elementów nośnych – zwłaszcza paneli betonowych – które często pozostają w dobrym stanie technicznym nawet po wielu dekadach użytkowania.

3.1.4.1. Odporność sejsmiczna

Konstrukcje wykonane w technologii wielkopłytkowej wykazują ograniczoną odporność na obciążenia sejsmiczne. Wynika to głównie z braku ciągłości konstrukcyjnej oraz niskiej zdolności układów panelowych do wykazywania zginającej ciągłości – cechy typowej dla konstrukcji monolitycznych lub stalowych. W literaturze [258] wykazano, że w budynkach

zaprojektowanych pod kątem sejsmicznym, uszkodzenia powstają przede wszystkim w strefach połączeń, podczas gdy same panele betonowe zwykle pozostają w stanie sprężystym. W celu poprawy zachowania konstrukcji podczas trzęsień ziemi, postulowano zwiększenie zdolności odprowadzania energii właśnie w obrębie połączeń – z naciskiem na połączenia pionowe [259] które umożliwiają częściowy powrót elementów do pierwotnego położenia po zadziałaniu sił dynamicznych. Przykładem skutecznego rozwiązania jest połączenie śrubowe z kontrolowanym poślizgiem, charakteryzujące się elasto-plastycznym zachowaniem oraz stabilnymi właściwościami histerezy (Rysunek 9). Niestety, do początku lat 80. systemy połączeń stosowane w budynkach wielkiej płyty nie umożliwiały efektywnego rozpraszania energii przy jednoczesnym zapewnieniu nośności użytkowej i spełnieniu warunków sprężystości. Skutkiem tego była katastrofa w Skopje w 1963 roku, w wyniku której znaczna liczba budynków wielkopłytowych została całkowicie lub częściowo zniszczona [204]. Dopiero po tym wydarzeniu rozpoczęto modernizację istniejących budynków poprzez wprowadzenie dodatkowego zbrojenia oraz elementów żelbetowych, co znacząco poprawiło ich odporność na obciążenia dynamiczne [99] [136]. Pomimo poprawy jakości wykonania po 1963 roku, nadal brakuje dowodów na zorganizowany recykling elementów wielkopłytowych po katastrofach sejsmicznych. Z punktu widzenia gospodarki cyrkularnej i ochrony środowiska, potencjał ponownego wykorzystania nieuszkodzonych paneli pozostaje istotnym zagadnieniem badawczym.

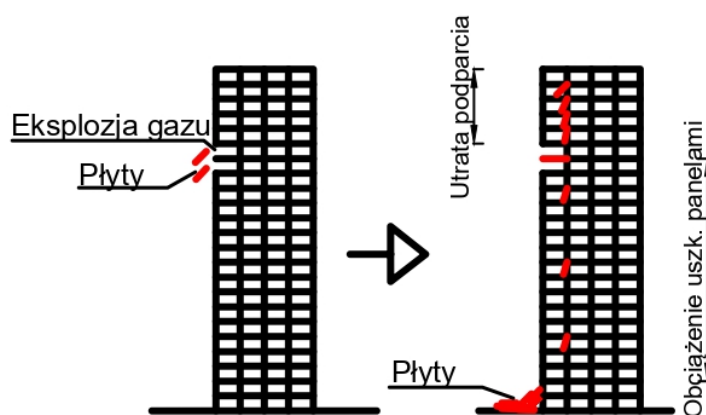


Rysunek 9. Szczegół połączenia ściana-ściana z ograniczonym poślizgiem: a) widok z góry, b) wkładka, c) płyta łącząca, d) przekrój

3.1.4.2. Integralność strukturalna i zawalenie progresywne

Katastrofa budynku Ronan Point w 1968 roku uwiaryściła problem tzw. zawalenia progresywnego – zjawiska polegającego na kaskadowym zniszczeniu konstrukcji w wyniku lokalnego uszkodzenia elementu nośnego. Budynki wielkopłytowe są szczególnie narażone na takie zdarzenia z uwagi na brak konstrukcyjnej redundancji oraz ograniczoną zdolność do alternatywnego przekazywania obciążeń [84] (Rysunek 10). Projektowanie odporne na zawalenie progresywne wymaga przyjęcia założenia o możliwości utraty elementu konstrukcyjnego i oceny czy struktura jest w stanie przenieść obciążenia alternatywną ścieżką

[62] [418]. Stosuje się tu dwa podejścia [96]: bezpośrednie (modelowe usunięcie elementu) oraz pośrednie (analiza potencjalnych alternatywnych dróg przekazywania sił). W przypadku systemów wielkopłytowych, podejście pośrednie uznawane jest za bardziej praktyczne i efektywne. Badania przeprowadzone w latach 70. przez Portland Cement Association (PCA), sponsorowane przez U.S. Department of Housing and Urban Development (HUD), wykazały, że możliwe jest zapewnienie alternatywnych ścieżek przekazywania obciążeń – m.in. poprzez mechanizmy wspornikowe oraz mechanizm zawieszenia stropu. Szczegółowe wyniki tych badań oraz zalecenia projektowe przedstawiono w Tabeli 2 i Tabeli 3.



Rysunek 10. Problemy z integralnością strukturalną w budynkach wielkopłytowych: lokalne uszkodzenie skutkujące progresywnym zawaleniem

Tabela 2. Wyniki testów alternatywnych ścieżek przekazywania obciążeń w budownictwie wielkopłytowym przeprowadzonych przez Portland Cement Association [131] [184] [95] [150] [51]

Analizowany element	Badanie	Wyniki
Zachowanie ścian jako wspornik przy usunięciu płyty	Model w skali przedstawiający sześciokondygnacyjny budynek, w którym pięć kondygnacji zachowywało się jak wspornik nad usuniętą ścianą. Obciążenie obejmowało ciężar własny stropu, ścian działowych i 1/3 obciążenia użytkowego dla sytuacji awaryjnej.	Zachowanie wspornikowe ścian było głównym mechanizmem umożliwiającym rozwój alternatywnych ścieżek obciążeń. Moment wspornikowy zależy od siły rozciągającej w połączeniach każdego piętra i siły ściskającej na najniższym poziomie.
Mechanizm zawieszenia stropu	Usunięcie podpory między dwoma pełnowymiarowymi płytami stropowymi (połączonymi centralnie).	Mechanizm zawieszenia dostarczał alternatywnej ścieżki przenoszenia obciążeń. Połączenia rozciągane nad uszkodzonym obszarem zapewniały częściowe podparcie.
Połączenia poziome – przenoszenie obciążeń pionowych i potencjał rozwarstwienia ścian	Połączenia poziome w układzie platformowym. Badane właściwości: wytrzymałość zaprawy, ilość zbrojenia poprzecznego ścian, wypełnienie pustaków stropowych, moment zginający i rotacja.	Wyniki pozwoliły opracować wytyczne projektowe dotyczące połączeń w oparciu o analizowane zmienne.

Tabela 3. Rekomendacje dotyczące połączeń poziomych i pionowych [260] [66] [123] [192] [56]

Nazwa złącza	Rola	Charakterystyka
Połączenie poprzeczne	Przeniesienie siły tnącej z uszkodzonych ścian na sąsiednie poprzez działanie wspornikowe i belkowe	Montowane w systemach stropów i dachów oraz nad podporami wewnętrznymi i między elementami a ścianami zewnętrznymi. Powinno zapewniać minimalną wytrzymałość 2,03 kNm (1500 lb*ft).
Połączenie podłużne	Kształtowanie działania membranowego stropu	Rozstaw połączeń równoległych do kierunku rozpiętości stropu nie powinien przekraczać 3 m. Należy zapewnić przenoszenie sił wokół otworów.
Połączenie pionowe	Kształtowanie mechanizmu zawieszenia dla nieskutecznych ścian	Montowane we wszystkich ścianach i na całej wysokości budynku. Minimalna siła rozciągająca: 4,07 kNm (3000 lb*ft). Każdy panel powinien mieć co najmniej dwa połączenia.

W pracy [65] zidentyfikowano typowe defekty połączeń w budynkach wielkopłytowych: brak lub słabo zagęszczony wypełniacz, niewłaściwe rozmieszczenie prętów zbrojeniowych i kotew, zbyt mała średnica prętów oraz różnorodne zakończenia, przerwanie zbrojenia lub jego zagięcie w elementach betonowych – wszystko to skutkuje słabymi połączeniami. Pomimo opracowania zaleceń, w praktyce budowlanej nadal występowały istotne błędy wykonawcze: źle rozmieszczone pręty zbrojeniowe, niewłaściwe kotwy, brak zagęszczania mieszanki betonowej czy nieodpowiednie zakończenia prętów. Wszystko to prowadziło do powstawania defektywnych połączeń, które istotnie obniżały bezpieczeństwo eksploatacyjne konstrukcji. [303]. W związku z tym istnieje nadal ryzyko, że w wyniku wypadku powstaną duże ilości odpadów, które będą wymagały utylizacji.

3.1.4.3. Niezawodność i bezpieczeństwo przeciwpożarowe

W kontekście trwałości użytkowej budynków wielkopłytowych, zagadnienie ochrony przeciwpożarowej pozostaje kluczowe. Przeprowadzona analiza [99] budynków w Bułgarii, Macedonii Północnej i Serbii wykazała, że zdecydowana większość obiektów wielkopłytowych nie spełnia współczesnych wymagań w zakresie ochrony przeciwpożarowej. Pomimo obowiązujących przepisów, ich wdrożenie w praktyce jest często niewystarczające, a modernizacje – fragmentaryczne i opóźnione. W Macedonii Północnej zaledwie 30% budynków wielkopłytowych poddawanych jest regularnej konserwacji i modernizacji [122] [62], mimo iż obowiązujące regulacje były wielokrotnie aktualizowane. W Serbii dopiero w 1984 roku wprowadzono szczegółowe przepisy pożarowe, mimo że budynki wielkopłytowe wznoszono tam od lat 60. Co istotne, nawet wówczas regulacje te często były marginalizowane, upraszczane i bezrefleksyjnie stosowane w odniesieniu do większych typów budynków [95]. Jednym z głównych problemów pozostaje zatem brak systematycznego utrzymania budynków w aspekcie bezpieczeństwa pożarowego, nawet w sytuacjach, gdy wymaga tego obowiązujące prawo [192].

Analiza trzech przykładowych obiektów z rejonu Bałkanów (Tabela 4) potwierdza, że ich stan ochrony przeciwpożarowej określany jest jako niezadowalający. Zatem, brak systematycznego utrzymania, pomimo formalnych wymogów, prowadzi do istotnego obniżenia trwałości eksploatacyjnej tych obiektów. W świetle doniesień literaturowych, zgodnie

z którymi wiele budynków wielkopłytowych jest nieodpowiednio utrzymywanych, można wnioskować, że z powodu ich licznych wad, mogą one nie osiągnąć zakładanej trwałości użytkowej.

Tabela 4. Analiza trzech wybranych budynków mieszkalnych technologii wielkopłytywowej pod kątem niezawodności, na podstawie [99]

Kraj	Miasto	Typ systemu	Wybudowany w [rok]	Stan ochrony przeciwpożarowej
Bułgaria	Sofia	<i>Mladost 3</i>	1980	Niezadawalający
Serbia	Novi Sad	<i>Detelinara</i>	1987	Niezadawalający
Północna Macedonia	Skopje	<i>Karpos</i>	1966	Niezadawalający

3.1.4.4. Wady na etapie projektowania, realizacji i eksploatacji

Technologia wielkopłykowa, mimo swojej innowacyjności i znaczenia w powojennym boomie budowlanym, obarczona była wieloma ograniczeniami na każdym etapie realizacji – od projektowania, przez produkcję, aż po eksploatację. Tabela 5 przedstawia typowe usterki identyfikowane w budynkach wielkopłytowych. Wśród najczęstszych błędów projektowych należy wymienić brak wiedzy dotyczącej właściwego doboru spoin, nieuwzględnianie warunków środowiskowych oraz nieodpowiednie rozpoznanie parametrów materiałów. W procesie prefabrykacji stosowano często mieszanki betonowe niespełniające normatywnych wymagań, co pogłębiało ryzyko uszkodzeń na etapie eksploatacji. Etap wykonawstwa charakteryzował się brakiem odpowiednio przeszkolonych ekip montażowych, niedokładnościami montażu oraz odchyłkami wymiarowymi. W trakcie eksploatacji ujawniały się natomiast defekty związane z brakiem okresowych przeglądów technicznych, nieefektywną wentylacją, czy też postępującą korozją i degradacją materiałów.

Tabela 5. Najczęstsze usterki na poszczególnych etapach realizacji budynku w technologii wielkiej płyty, na podstawie [56] [227]

Etap	Problem	Charakterystyka
Realizacja	Błędy projektowe	Niedostateczna znajomość wytycznych projektowych w technologii wielkopłytywowej. Dobór wymiarów spoin spawalniczych wyłącznie na podstawie założeń teoretycznych, często niemożliwych do realizacji na budowie. Brak wiedzy o parametrach materiałów oraz błędne rozwiązania sprzyjające wnikanii wody i korozji. Niewłaściwy dobór rozwiązań technicznych dla detali konstrukcyjnych i wykończeniowych. Niekompetentne projektowanie konstrukcji pod wpływem nietypowych obciążeń (np. wstrząsy sejsmiczne, deformacje gruntu, szkody górnicze).
	Niska jakość produkcji prefabrykatów	Wady materiałowe, słaba jakość elementów prefabrykowanych, stosowanie materiałów budowlanych bez potwierdzenia ich jakości. Uszkodzenia podczas składowania i transportu. Nieodpowiednie przygotowanie mieszanki betonowej: niska jakość kruszywa, stosowanie różnych frakcji, błędne receptury, dodatek wody poprawiający urabialność. Pomijanie lub niedokładne zagęszczanie betonu.
	Błędy wykonawcze	Brak kontroli jakości elementów na placu budowy, montaż części o odchyłkach wymiarowych i błędach kształtu. Zmiany projektowe bez konsultacji z projektantem. Błędne wykonanie złączy i zbyt duże tolerancje wymiarowe. Brak wykwalifikowanych ekip montażowych zdolnych do prawidłowego wykonania połączeń i spoin. Przemieszczenia pionowe

		i poziome ścian nośnych i stropów. Wykonanie obróbek blacharskich umożliwiających penetrację wody.
	Wady eksploatacyjne i konserwacyjne	Wpływ skurczu materiałowego i temperaturowego. Zagrzybienie i pleśń wynikające z zaniedbań w wentylacji. Brak okresowych przeglądów technicznych i ocen stanu technicznego. Niska jakość prac konserwacyjnych i naprawczych.
Eksploatacja	Starzenie materiałów, korozja	Niska trwałość ścian osłonowych spowodowana niewłaściwym doбором stali do połączeń między panelami. Dopuszczenie do powstawania zarysowań i pęknięć bez odpowiedniego zabezpieczenia przed korozją. Zmieniające się normy, standardy oraz oczekiwania użytkowników sprawiają, że budynki w technologii wielkopłytywowej nie spełniają współczesnych wymagań i wymagają modernizacji.

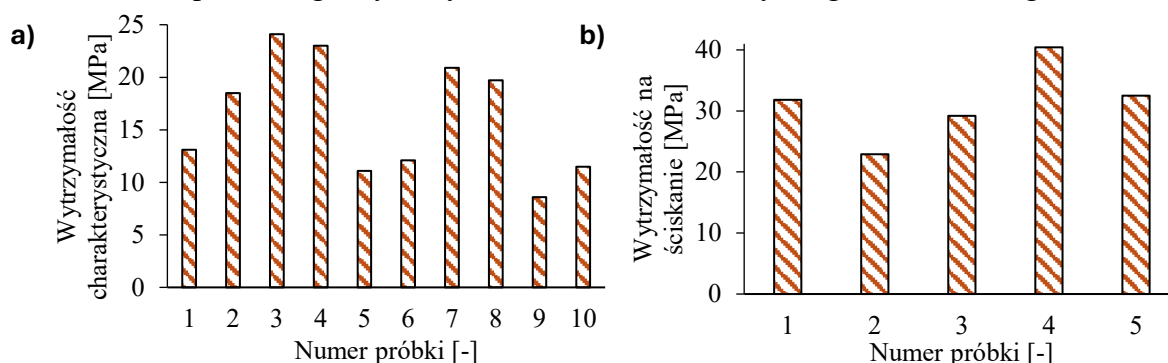
Choć początkowo budownictwo wielkopłytowe jawiło się jako innowacyjne i relatywnie tanie rozwiązanie mieszkaniowe dla klasy robotniczej, z czasem jego postrzeganie uległo znacznemu pogorszeniu. Prefabrykowane elementy były ciężkie i wymagały specjalistycznego transportu, dostosowanego do dużych gabarytów. Załadunek, rozładunek oraz montaż wymagały użycia dźwigu. Znaczącym problemem – zwłaszcza w realiach socjalistycznej Polski – była niska jakość wykonawstwa. Niskie wynagrodzenia oraz zła organizacja pracy w zakładach produkcyjnych i na budowach skutkowały wysokim odsetkiem elementów niespełniających norm wymiarowych, co dezorganizowało prace budowlane. Część usterek ujawniała się dopiero po zakończeniu budowy, co wymuszało działania naprawcze, jak np. dodatkowe kotwienie płyt czy uszczelnianie pęknięć smołowaną masą. Klasyczne płyty wielkowymiarowe miały jednolitą, płaską powierzchnię, a ich uszkodzenia brzegowe skutkowały powstawaniem trudnych do usunięcia szczelin. Osiedla wielkiej płyty cechuje zazwyczaj szarość i wykorzystanie materiałów szkodliwych dla zdrowia, np. azbestu. Mieszkania są małe i kosztowne w utrzymaniu – związane jest to z faktem, że nieocieplone ściany wielkopłytowe charakteryzują się wysokim współczynnikiem przenikania ciepła. Mimo wielu modernizacji [127], trudności w uszczelnianiu połączeń paneli pozostają. Standardy izolacyjności cieplnej ścian zewnętrznych były trzykrotnie niższe niż wymagane obecnie [285]. Prace dociepleniowe rozpoczęto w połowie lat 80., a ich intensyfikacja nastąpiła wraz z rosnącymi kosztami ogrzewania. W wielu osiedlach modernizuje się elewacje [200], jednakże kilka centymetrów izolacji, nowy tynk i kolor mogą całkowicie zmienić wygląd budynku. Takie renowacje bywają kontrowersyjne, gdyż prowadzą do utraty oryginalnej fasady, a zastosowana kolorystyka i wzory niekiedy nie przystają do modernistycznej architektury.

3.1.4.5. Betonowe elementy nośne

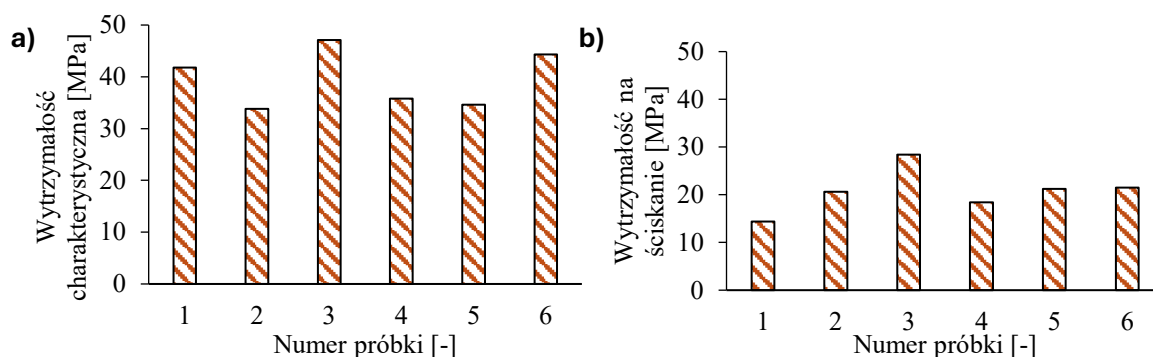
W literaturze przedmiotu dotyczącej budownictwa wielkopływowego stosunkowo niewiele miejsca poświęca się bezpośrednim badaniom jakości i trwałości betonu jako materiału konstrukcyjnego. Dominują zagadnienia związane z połączeniami międzyelementowymi, izolacyjnością cieplną oraz degradacją zewnętrznych warstw elewacyjnych. Niemniej jednak, wyniki dotychczasowych analiz wskazują jednoznacznie, że stan techniczny betonu w prefabrykowanych elementach nośnych oceniany jest zazwyczaj jako dobry lub zadowalający. Obserwowane zarysowania i spękania są w większości przypadków efektem nieprawidłowości w układzie zbrojenia bądź błędów wykonawczych, a nie degradacji samego betonu.

W [144] przeanalizowano warstwową konstrukcję ściany zewnętrznej budynku zrealizowanego w 1986 roku w systemie R-76 technologii wielkopłytywowej (wariant zamknięty – Rataje) w Poznaniu, liczącego 13 kondygnacji nadziemnych. Ściana osłonowa składała się z trzech warstw: 6 cm betonu z kruszywem keramzytowym (C12/15) lub betonu zwykłego (C16/20), 9 cm izolacji cieplnej oraz 21 cm betonu konstrukcyjnego (keramzytobeton C12/15 lub beton C16/20). Konstrukcja budynku miała układ poprzeczno-podłużny, z rozstawem ścian nośnych wynoszącym 4,8 m i 2,4 m. Oceny stanu betonu dokonano w oparciu o badania nieniszczące (młotek Schmidta) oraz niszczące (próbki rdzeniowe badane maszyną SATEC). Wyniki przedstawiono na Rysunku 11a i Rysunku 11b. Pomimo licznych usterek wykonawczych i wieloletniej eksploatacji [143], stan betonu uznano za zadowalający. Analogiczne badania przeprowadzono w [109] dla pięciokondygnacyjnego budynku z 1988 r. w systemie SL-85 (wariant zamknięty S-Sz). Grubości warstw ściany osłonowej wynosiły: 8 cm (beton C12/15 lub C16/20), 6 cm izolacji, 22 cm warstwy nośnej. Uzyskane wyniki – przedstawione na Rysunku 12a i Rysunku 12b – potwierdziły zgodność z założeniami projektowymi, mimo lokalnych różnic wynikających z segregacji kruszywa. W pracy [26] oceniono stan techniczny ścian loggii w systemie W-70/M-K w Kielcach. Beton klasy C12/15 w rzeczywistości osiągnął wytrzymałość odpowiadającą klasie C25/30, co wskazuje na przewymiarowanie. W szerszym badaniu [175] przeanalizowano stan techniczny 95 budynków mieszkalnych w Warszawie – 33 w technologii wielkoblokowej i 62 w technologii wielkopłytywowej. Choć odnotowano wiele usterek (niewystarczająca izolacyjność, zniszczone ramy okienne, złe odwodnienie, zużyte instalacje), elementy nośne z betonu oceniono jako w dobrym stanie (Rysunek 13). W innym opracowaniu [176] podkreślono, że rzeczywista grubość ścian z betonu często przekraczała projektowaną, co pogarszało izolacyjność, ale pozytywnie wpływało na trwałość konstrukcji. W [381] sporządzono listę typowych prac naprawczych w budynkach wielkiej płyty, obejmującą m.in.: wzmocnienie kotew paneli, modernizację izolacji termicznej i akustycznej, wymianę balustrad i instalacji. Autorzy podkreślają, że stan fundamentów i ścian nośnych jest kluczowy dla oceny przydatności technicznej, jednak nie wymieniają potrzeby naprawy prefabrykatów betonowych – ich stan oceniany jest jako dobry. W [183] analizowano stan ścian osłonowych w popularnym systemie z lat 80. XX w. w Polsce. Trwałość ścian zależała od jakości połączeń warstw. W badanych obiektach wykazano odpowiednią szczelność betonu – warunki pracy paneli były korzystne, gdyż warstwa konstrukcyjna była osłonięta i niewystawiona na działanie warunków atmosferycznych. W [382] przedstawiono wyniki badań nośności kotew łączących warstwę fakturową ze ścianą konstrukcyjną. Analogiczne wnioski sformułowano dla budynków wielkopłytytowych w Bułgarii, Serbii i Macedonii [99], gdzie pomimo licznych usterek elewacyjnych, stan betonowych elementów nośnych określono jako dobry. Często stwierdzano również przewymiarowanie grubości paneli. W [49] badano trzy rumuńskie systemy wielkiej płyty: T744R, 770 i 1340. Beton C16/20 zachował wytrzymałość, a grubości warstw mieściły się w zakresie 5–12 cm. W [232] badano typ 770 – panele wewnętrzne miały grubość 14 cm (C12/15), zaś zewnętrzne składały się z dwóch warstw betonu C16/20. Ściany zewnętrzne wykazywały wytrzymałość rzędu 17,5 MPa, a połączenia realizowano poprzez spawanie zbrojenia. Podsumowując, wyniki badań wskazują, że część budynków wielkopłytytowych z lat 1945–1990 osiąga lub przekracza zakładaną trwałość projektową. Stan prefabrykowanych

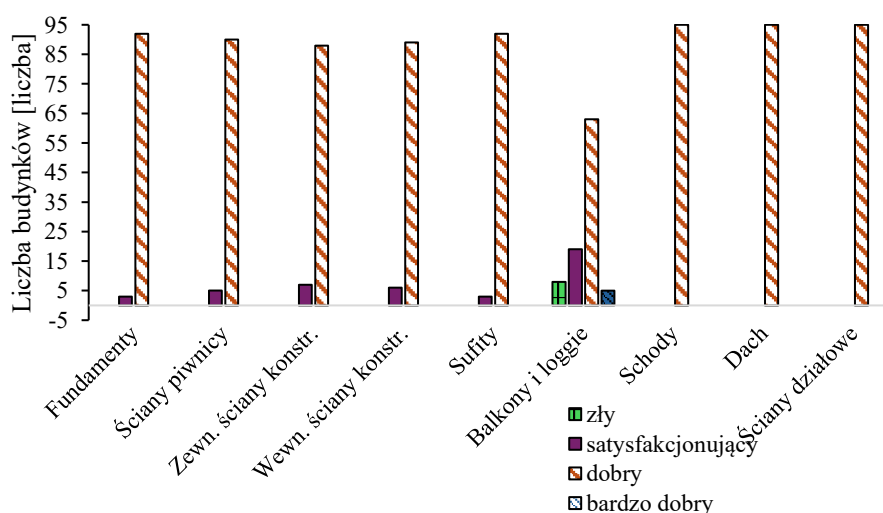
elementów betonowych oceniany jest jako dobry lub zadowalający, co stwarza realne możliwości ich ponownego wykorzystania w kontekście recyklingu materiałowego.



Rysunek 11. Wyniki parametrów wytrzymałościowych betonu: a) twardość za pomocą młotka Schmidta b) wytrzymałość na ściskanie za pomocą maszyny SATEC [144]



Rysunek 12. Wyniki badań parametrów wytrzymałości betonu: a) na ścianie loggii, przy użyciu młota Schmidta, na podstawie [183] b) na ścianie zewnętrznej, przy użyciu maszyny SATEC, na podstawie [109]



Rysunek 13. Stan techniczny elementów konstrukcyjnych 95 budynków mieszkalnych w Warszawie – 33 w technologii wielkoblokowej i 62 w technologii wielkopłytowej, na podstawie [175]

3.1.5. Możliwości recyklingu prefabrykowanych paneli betonowych

Budynki wzniesione w technologii wielkiej płyty w drugiej połowie XX wieku, pomimo wielu zalet funkcjonalnych i konstrukcyjnych, wymagają obecnie systematycznych działań konserwacyjnych i modernizacyjnych. Ich przewidywana trwałość techniczna wynosiła ok. 50 lat [207], a wiele z nich przekroczyło już ten okres eksploatacji. Od wielu lat toczy się debata na temat dalszego postępowania z tego typu zasobem budowlanym: czy należy je sukcesywnie wyburzać, czy przedłużać ich żywotność poprzez kompleksowe remonty. Problem ten należy rozpatrywać z uwzględnieniem aspektów urbanistycznych, społecznych, technicznych oraz ekonomicznych.

3.1.5.1. Elementy nośne z betonu – trwałość i perspektywa ponownego użycia

Potencjalne kierunki rewitalizacji zasobów technologii wielkopłytywowej są zróżnicowane geograficznie – zestawienie typowych działań w wybranych krajach europejskich przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Kierunki działań rewitalizacyjnych budynków w technologii wielkiej płyty w wybranych krajach Europy, na podstawie [381] [251]

Działanie	UK	Francja	Holandia	Niemcy	Polska	Dania	Szwecja	Norwegia	Finlandia
Całkowita rozbiórka			Tak						
Częściowa rozbiórka	Tak	Tak		Tak					
Naprawy ograniczające dalszą degradację	Tak			Tak					
Modernizacja funkcjonalna	Tak	Tak		Tak	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
Modernizacja obejmująca otoczenie	Tak	Tak		Tak	Tak	Tak	Tak		
Zachowanie struktury osiedla, uwzględnienie aspektów kulturowych	Tak			Tak					
Rewaloryzacja osiedla		Tak	Tak				Tak		

Pomimo stosowania różnorodnych technik modernizacyjnych (na przykład termomodernizacja – Rysunek 14a), autorzy wielu opracowań zwracają uwagę na niedobór wiedzy dotyczącej właściwego doboru technologii i organizacji prac remontowych. W [244] podkreślono konieczność opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, a także wskazano również na konieczność uwzględnienia aspektów środowiskowych – ograniczenie zużycia surowców oraz emisji związanych z cyklem życia budynków. W przeglądzie technik modernizacji budynków wielkopłytowych przedstawionym w pracy [303] podkreślono potrzebę dogłębnej analizy odporności tych obiektów na obciążenia ekstremalne. Jak wynika z pracy [99] modernizacje były często przeprowadzane w sposób przypadkowy, bez odpowiedniego nadzoru technicznego. W związku z tym działania planistyczne muszą uwzględniać nie tylko aspekty inżynierskie, ale również społeczne i kulturowe. W świetle postanowień Porozumienia Paryskiego, dekarbonizacja sektora budownictwa do 2050 r. wymaga wdrożenia strategii opartych na gospodarce o obiegu zamkniętym (ang. *Circular Economy*). Kluczowe jest ponowne wykorzystanie materiałów, w tym betonowych prefabrykatów, których stan – jak wykazano w rozdziale – nadal umożliwia ich wykorzystanie.

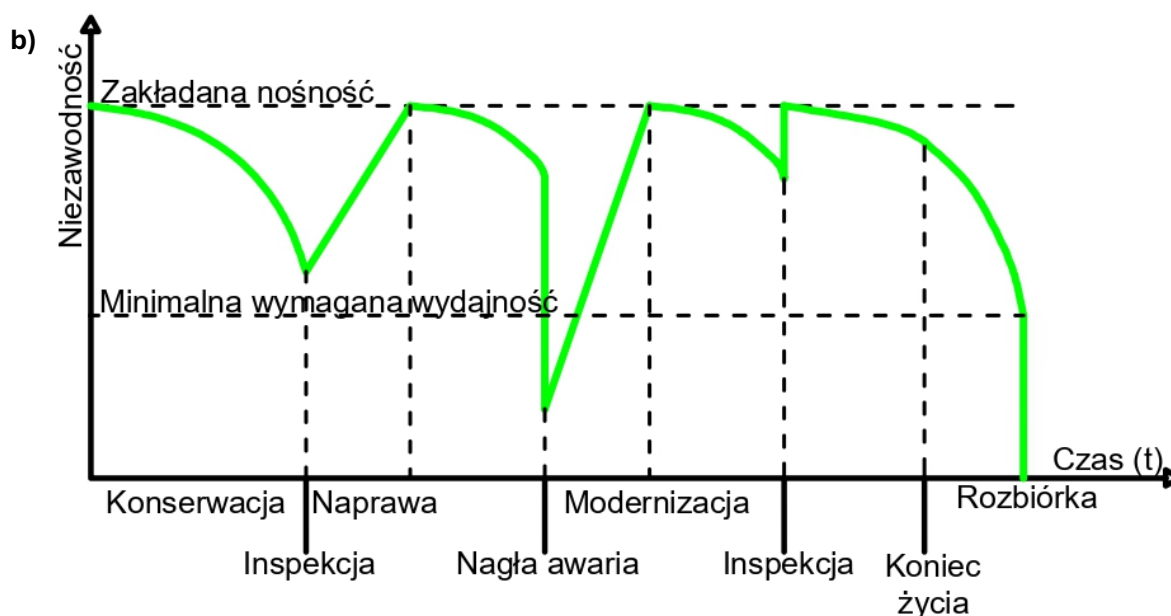
W pracy [21] wykazano, że cechy takie jak odwracalność i trwałość obiektów budowlanych mogą usprawnić przepływ zasobów w gospodarce cyrkularnej. Trwałość elementów nośnych zależy od osiągnięcia dwóch stanów granicznych: nośności (SGN) i użytkowości (SGU) [245]. Według [178], trwałość materiałów i ich elementów to czas, w którym produkt zachowuje zdolność do spełniania zamierzonej funkcji. Spadek tej zdolności poniżej określonego progu skutkuje utratą trwałości i koniecznością renowacji (Rysunek 14b). Stwierdzono, że istotnym problemem pozostaje brak oficjalnych wytycznych dotyczących recyklingu w różnych sektorach budownictwa. Dodatkowo:

- brak konserwacji prowadzi do szybkiej degradacji,
- koszty remontów rosną w czasie,
- tempo degradacji musi być rzetelnie oszacowane.

W praktyce, rzeczywiste tempo zużycia elementów w początkowym okresie eksploatacji jest większe niż teoretyczne, co skutkuje tzw. nadtrwałością. Z kolei z wiekiem obserwuje się stan odwrotny – infratrwałość. Jedynie obiekty pozbawione poważnych wad konstrukcyjnych umożliwiają jej poprawne określenie. Choć wyburzenia budynków w technologii wielkiej płyty nie są jeszcze powszechne, wzrastająca liczba awarii i naturalna degradacja skutkują coraz większą ilością odpadów budowlanych.

a)





Rysunek 14. Trwałość budynków: a) termomodernizacja osiedla b) zależność niezawodności konstrukcji od czasu eksploatacji

3.1.5.2. Skala odpadów i ich lokalizacja

Budownictwo mieszkaniowe odpowiada za ok. 1/3 zapotrzebowania na beton towarowy [110]. Beton wykorzystywany jest we wszystkich elementach budynku – od fundamentów po dach. W przypadku wyburzenia nawet niewielkiej części budynku wielkopłytkowego, powstaje olbrzymia ilość odpadów budowlanych. Według danych rządowych [110], w Polsce istnieje ok. 60 tys. budynków w technologii wielkopłytkowej, obejmujących łącznie około 4 mln mieszkań, co stanowi ok. 30% krajowego zasobu mieszkaniowego. Szczególnym problemem jest lokalizacja budynków wielkopłytkowych. W Polsce były one realizowane jako rozwiązanie masowe, często stanowiąc podstawę rozwoju całych miast – przykładem jest Tychy. Miasto to, przekształcone z gminy wiejskiej w nowoczesne osiedle mieszkaniowe, do dziś zdominowane jest przez zabudowę wielkopłytkową (Rysunek 15a i Rysunek 15b). Tychy, do 1954 roku gmina wiejska, miało pełnić rolę „miasta-sypialni” Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Pierwsze wybudowane osiedle oznaczono literą „A”. Kolejne osiedla nazwano według liter alfabetu i do 1990 wybudowano znaczną część miasta. Wyburzenie takich zasobów wiązałoby się z poważnymi wyzwaniami logistycznymi. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego z 31 grudnia 2020 r. obecnie miasto zamieszkuje 126 871 osób [110]. Problem lokalizacji budynków wielkopłytkowych w Tychach przedstawia Rysunek 15b. W przypadku rozbiórki wszystkie osiedla wielkiej płyty miasta Tychy znajdują się w centrum, co logistycznie komplikuje całą operację. Dodatkowo dwa osiedla znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie historycznego centrum miasta. To tylko jeden przykład spośród tysięcy miast w kraju. W [213] autor stwierdził, że intensywny wzrost gospodarczy wymusza znalezienie alternatywnego podejścia do rozwoju świata, z którego skorzystają kolejne pokolenia. Zdaniem autora ekomiasta są jedynym pewnym i bezpiecznym kierunkiem w kierunku zrównoważonego podejścia. Przedstawiony przykład Tychów (Rysunek 15c i Rysunek 15d) i tysiące innych miast z osiedlami wielkiej płyty niestety nie wpisuje się już w koncepcję ekomiast.



Rysunek 15. Zabudowa wielopłytowa w Tychach: a) osiedla z lat 1950–1990 [388] b) granice administracyjne miasta (2022) [106] c) oraz d) zabudowa na osiedlu O w Tychach

W 2015 roku, w Polsce składowano ponad 6,47 mln ton odpadów budowlanych, z czego tylko 1,25 mln ton zostało poddanych recyklingowi [110]. W związku z nieuchronną koniecznością rozbiórki budynków wielopłytowych w przyszłości, ilość odpadów tego typu znacząco wzrośnie. W trosce o środowisko, obserwuje się trend zastępowania kruszywa naturalnego w mieszance betonowej kruszywem wtórnym, uzyskanym z odpadów budowlanych. Ponieważ kruszywo stanowi ok. 70% objętości betonu [253], recykling tego składnika pozwala na realne ograniczenie eksploatacji surowców. W przypadku budynków wielopłytowych w Polsce z lat 70. i 80. XX w., beton charakteryzuje się dobrą jakością i wytrzymałością, co stwarza możliwość jego wykorzystania jako kruszywa wtórnego.

Pomimo szerokiego wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu, nadal brak jest badań oceniających potencjał recyklingu elementów wielkiej płyty jako źródła kruszywa wtórnego o wysokiej jakości. Recykling materiałów budowlanych – w szczególności wysokiej jakości prefabrykowanych paneli betonowych – może stanowić skuteczne narzędzie w realizacji strategii zrównoważonego rozwoju oraz celów klimatycznych UE. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że efektywność recyklingu prefabrykatów wielopłytowych jest ściśle uzależniona od wielu czynników, takich jak: jakość pierwotnego betonu, obecność zbrojenia,

sposób rozbiórki (mechaniczna, selektywna), dostępność infrastruktury recyklingowej czy lokalizacja względem potencjalnych miejsc ponownego wykorzystania. W krajach Europy Zachodniej prowadzi się już eksperymentalne projekty ponownego użycia całych paneli, bez ich rozdrabniania, co pozwala nie tylko ograniczyć zużycie energii i emisje, ale także zachować cenne właściwości mechaniczne i geometryczne prefabrykatów. W Polsce koncepcja ta znajduje się nadal na etapie badań, jednakże wyniki dotychczasowych analiz są obiecujące. W świetle powyższych danych, wyraźnie rysuje się konieczność opracowania krajowej strategii zarządzania odpadami budowlanymi z zasobów wielkopłytowych, w której szczególny nacisk zostanie położony na selektywną rozbiórkę, odzysk materiałowy oraz rozwój technologii wykorzystania kruszywa wtórnego w produkcji nowoczesnych, niskoemisyjnych materiałów budowlanych. Tylko takie podejście pozwoli ograniczyć negatywny wpływ przyszłych rozbiórek na środowisko, jednocześnie włączając budownictwo w nurt gospodarki cyrkularnej.

3.1.6. Luki badawcze

Pomimo znacznego rozwoju badań nad zastosowaniem kruszywa grubego z recyklingu w betonie, istnieje szereg otwartych zagadnień badawczych, które wymagają pogłębionej analizy. Dotyczą one zarówno właściwości samego kruszywa, jak i jego wpływu na mieszanki betonowe. Należy postawić następujące pytania:

- Czy morfologia kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych wpływa istotnie na trwałość betonu oraz właściwości mieszanki w stanie świeżym i stwardniałym?
- Jakie oddziaływania zachodzą między takim kruszywem a strefą przejściową (ITZ) oraz jaka jest jego rola w kształtowaniu jednorodności przekroju poprzecznego betonu?
- W jakim stopniu kruszywo grube z recyklingu wpływa na zjawisko odsączania wody w mieszankach betonowych?
- Czy kruszywo grube z recyklingu wykazuje istotnie wyższą nasiąkliwość w porównaniu z kruszywem grubym naturalnym, a jeśli tak – jakie są tego konsekwencje technologiczne?
- Jaki maksymalny udział procentowy kruszywa grubego naturalnego może zostać zastąpiony przez recyklingowe bez pogorszenia kluczowych parametrów użytkowych betonu?
- Jakie są główne bariery technologiczne w wykorzystaniu tego rodzaju kruszywa, w tym: niejednorodność materiałowa, obecność zanieczyszczeń, pozostałości zaprawy, a także ewentualna reaktywność alkaliczna?

Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy autora, na podstawie przeszukania bazy Scopus (stan na dzień 07.01.2022), nie odnotowano istotnej liczby publikacji naukowych bezpośrednio dotyczących grubego kruszywa z recyklingu pochodzącego z rozbiórek budynków wielkopłytowych (Tabela 7). Większość istniejących badań odnosi się do uogólnionych przypadków odpadów budowlanych i rozbiórkowych, bez szczegółowego wskazania systemów prefabrykowanych jako źródła surowca wtórnego.

Tabela 7. Liczba publikacji, które zostały wyszukane w tytułach, streszczeniach i słowach kluczowych w bazie Scopus (data wyszukiwania: 07.01.2022)

Liczba słów kluczowych	Słowo kluczowe	Liczba publikacji
1 słowo kluczowe	<i>Concrete</i>	364 206
	<i>Large Panel System Building</i>	1 333
	<i>Recycled Coarse Aggregate</i>	2 841
2 słowa kluczowe	<i>Concrete + Recycled Coarse Aggregate</i>	2 727
	<i>Large Panel System Building + Recycled Coarse Aggregate</i>	1
	<i>Large Panel System Building + Recycled Coarse Aggregate + Concrete</i>	1

Jedyna publikacja spełniająca kryteria wyszukiwania trzech powyższych słów kluczowych została opracowana przez I. Pečura, M. Bagaricia i B. Milovanovicia [29]. Badacze ci zaprojektowali prefabrykowany panel elewacyjny, w którym maksymalnie 50% kruszywa naturalnego zostało zastąpione kruszywem pochodzącym z odpadów budowlanych i rozbiórkowych. Uzyskano materiał o zadowalających właściwościach mechanicznych i higrotermicznych. Należy jednak podkreślić, że autorzy nie analizowali kruszywa pochodzącego bezpośrednio z rozbiórek budynków wznoszonych w systemie wielkopłytyowym w drugiej połowie XX wieku.

3.2. Beton samozagęszczający się z kruszywem grubym z recyklingu

3.2.1. Wprowadzenie

Wpływ betonu na rozwój architektury oraz kształtowanie przestrzeni zurbanizowanej jest trudny do przecenienia. Ze względu na sposób zagęszczania mieszanki betonowej, wyróżnia się beton zagęszczany mechanicznie oraz beton samozagęszczający się, będący głównym przedmiotem niniejszego opracowania. Jedną z najczęściej stosowanych metod zagęszczania betonu konwencjonalnego jest wibrowanie. Aby proces ten przebiegał prawidłowo, konieczne jest odpowiednie dobranie zespołu wibracyjnego – silnika, wału oraz głowicy – w zależności od rodzaju zagęszczanej konstrukcji. Na przykład płyta fundamentowa dla posadzki o niewielkiej grubości wymaga zastosowania głowicy o małej średnicy, natomiast ściany, słupy oraz elementy o ograniczonej dostępności – głowic dłuższych i szerszych. Alternatywne metody zagęszczania obejmują m.in. ręczne przemieszczanie prętem, zagęszczanie próżniowe oraz zagęszczanie wałkiem. Niezależnie od techniki, proces konsolidacji wymaga wykorzystania specjalistycznego sprzętu, wykwalifikowanej siły roboczej oraz znacznego nakładu czasu.

Od 1983 roku problem trwałości konstrukcji betonowych stał się w Japonii przedmiotem intensywnych badań. Po kilku latach prac, w 1988 roku zaprezentowano prototyp betonu samozagęszczającego się [247]. Od tego czasu beton samozagęszczający się znalazł szerokie zastosowanie w inżynierii lądowej na całym świecie [125]. Przykładowo, w Japonii wykorzystano go do realizacji dużych budynków biurowych oraz tuneli zbrojonych stalowymi włóknami, natomiast w Szwecji do budowy mostów autostradowych i płyt stropowych w budynkach mieszkalnych [268]. Praktyczne wdrożenia betonu samozagęszczającego się można również znaleźć w Kanadzie, USA, Holandii, Tajlandii i na Tajwanie [248] [255].

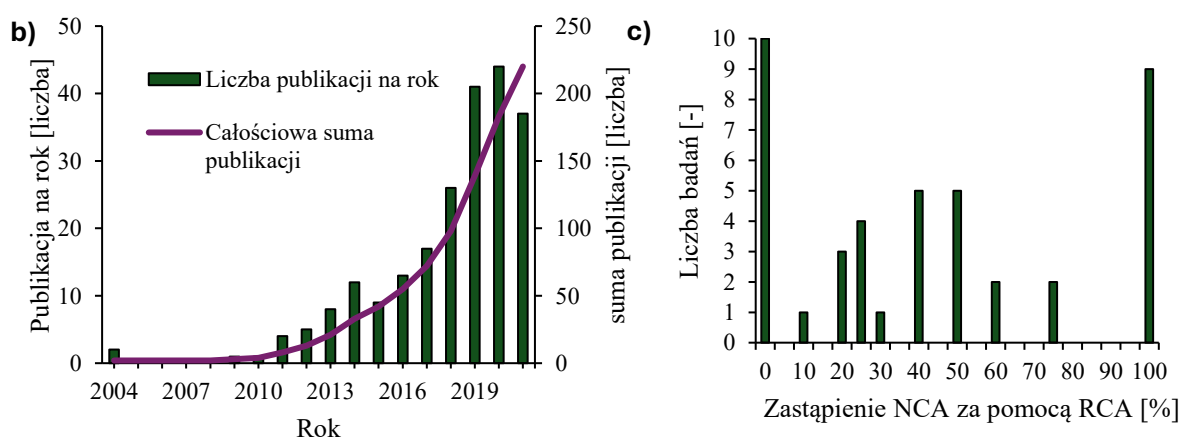
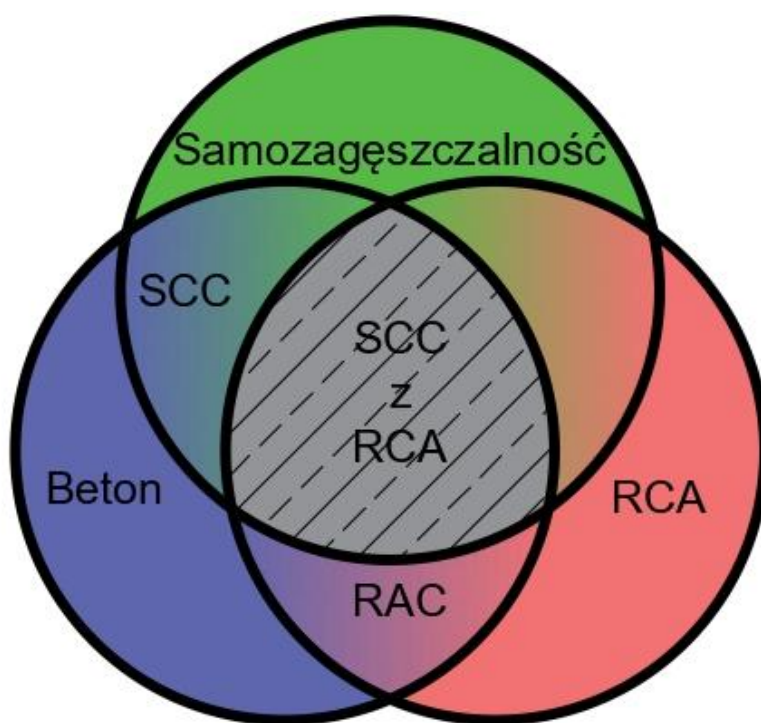
Pomimo stosunkowo krótkiej historii, beton samozagęszczający się jest przedmiotem intensywnych badań naukowych, które obejmują wpływ tego typu mieszanki na koszty realizacji inwestycji, harmonogramy robót, efektywność procesu budowlanego, warunki pracy, środowisko naturalne, dobór składników i proporcji mieszanki oraz właściwości uzyskanego betonu [78] [52] [116] [100]. Innowacyjne w tym zakresie są m.in. badania nad ciężkimi betonami samozagęszczającymi się [376] czy lekkimi [162]. Beton samozagęszczający się charakteryzuje się wysoką płynnością – istotna jest przy tym równowaga między lepkością plastyczną a granicą płynięcia – a także stabilnością, rozumianą jako brak segregacji składników, oraz zdolnością do samodzielnego przepływu wokół zbrojenia [71]. Technologia betonu samozagęszczającego się została opracowana w odpowiedzi na potrzebę zwiększenia trwałości konstrukcji, niezależnie od jakości wykonawstwa. W przeciwieństwie do betonu konwencjonalnego, którego właściwa trwałość zależy od jakości zagęszczania wykonanego przez doświadczonych pracowników, beton samozagęszczający się nie wymaga mechanicznego zagęszczania – przepływa pod własnym ciężarem i ulega konsolidacji bez konieczności stosowania wibracji. Umożliwia to wznoszenie konstrukcji o dużym stopniu zbrojenia oraz elementów o nietypowej geometrii, bez konieczności ingerencji w ich kształtowanie.

Wzrost świadomości ekologicznej oraz potrzeba redukcji odpadów w sektorze budowlanym przyczyniły się do rozwoju badań nad wykorzystaniem materiałów pochodzących z recyklingu, w tym w kontekście produkcji betonu samozagęszczającego się. Efektem tych działań są badania nad tym betonem z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu – łączące właściwości samozagęszczające z wykorzystaniem kruszywa wtórnego (Rysunek 16a). Rysunek 16b ilustruje rosnący trend liczby publikacji w tym zakresie. Wybrane słowa kluczowe obejmowały: *self-compacting concrete*, *self-consolidating concrete*, *recycled coarse aggregate*. Wyszukiwanie wykonano w maju 2022 r. w bazie Scopus. Z kolei Rysunek 16c ilustruje udziały procentowe kruszywa grubego z recyklingu w mieszankach betonu samozagęszczającego się, wyłonione na podstawie przeglądu literatury [266] [351] [125] [217] [297] [163] [265] [299] [328]. Najczęściej spotykane zastąpienia kruszywa grubego naturalnego przez recyklingowe to 25%, 40% oraz 50%. Wszystkie analizowane przypadki obejmowały również warianty ze 100% udziałem kruszywa grubego z recyklingu, co może wskazywać na potrzebę efektywnego zagospodarowania odpadów budowlanych oraz ograniczenia zużycia surowców naturalnych. W praktyce przemysłowej beton samozagęszczający się z kruszywem grubym z recyklingu znalazł zastosowanie w wielu projektach budowlanych, jak przedstawiono w Tabeli 8. Jak zauważono w pracy [329], jego zastosowanie w szerszej skali jest możliwe, jednak wymaga dostosowania cech użytkowych betonu do specyfiki materiału wtórnego.

Zgodnie z danymi Eurostatu, UE wytwarza rocznie około 895 400 ton odpadów, z wyłączeniem odpadów pochodzących z działalności górniczej [87]. Około jedna trzecia z nich pochodzi z sektora budownictwa [223], co znacząco wpływa na ogólny bilans środowiskowy. W Polsce w 2022 roku prognozowana ilość odpadów mineralnych wyniosła 64,3 mln ton [106], z czego odpadowe skały mogłyby zostać wykorzystane w procesach przetwórczych. W kontekście powyższego szczególne zainteresowanie budzi możliwość ponownego wykorzystania odpadów budowlanych, zwłaszcza betonu – najczęściej stosowanego materiału konstrukcyjnego na świecie. Wzrost liczby rozbiórek starych konstrukcji betonowych,

wynikający ze złego stanu technicznego, zakończenia cyklu życia użytkowego obiektów lub planów ich modernizacji, skutkuje zwiększoną ilością odpadów betonowych z rozbiórek [257]. Materiały te, jeśli nie zostaną poddane recyklingowi, trafiają na składowiska, generując dodatkowe obciążenie środowiskowe. Celem niniejszego opracowania jest identyfikacja aktualnego stanu wiedzy w zakresie wykorzystania betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu pozyskanego z odpadów budowlanych i rozbiórkowych oraz określenie luk badawczych. Przeprowadzono analizę bibliometryczną trendów badawczych oraz przegląd literatury w zakresie stosowania kruszyw wtórnych w omawianym betonie. Wskazano kierunki dalszych, pogłębionych badań niezbędnych dla rozwoju tej technologii.

a)



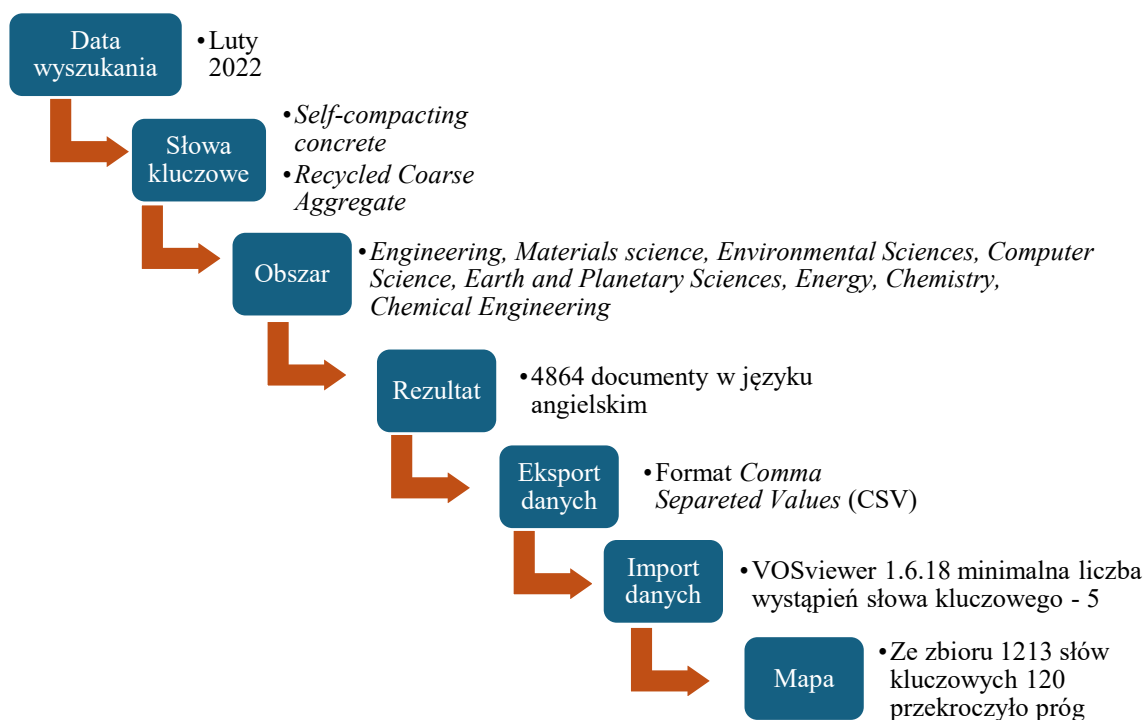
Rysunek 16. Beton samozagęszczający się: a) schematyczna klasyfikacja b) liczba publikacji w bazie Scopus c) zawartość kruszywa grubego z recyklingu w betonie samozagęszczającym się według przeglądu literatury

Tabela 8. Przykłady konstrukcji wykonanych z zastosowaniem betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu

Konstrukcja	Typ betonu	Kruszywo z recyklingu	Źródło
Przegrody garażu podziemnego	samozagęszczający się zbrojony włóknami stalowymi	Zaprawa, ceramika, drobne materiały typu szkło, tynk, drewno, materiały organiczne	[250]
Nawierzchnia	samozagęszczający się	Kruszywo z lokalnie rozebranych budynków	[291]
Fundamenty nawierzchni w tunelach drogowych	samozagęszczający się	Przetworzony asphalt I osady mineralne	[60]
Formy izolowane betonowe	samozagęszczający się z gumą recyklingową	Recyklingowa guma	[235]
Nawierzchnia lotniska wojskowego	samozagęszczający się	Beton z rozbiórki nawierzchni lotniska	[205]

3.2.2. Analiza scientometryczna

Od momentu opracowania betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu, w literaturze naukowej ukazało się wiele publikacji poświęconych różnym aspektom tego zagadnienia. W celu określenia kierunków i intensywności badań przeprowadzono analizę scientometryczną opartą na danych bibliometrycznych. Analiza ta umożliwia wizualizację danych wejściowych oraz tworzenie powiązań pomiędzy źródłami, słowami kluczowymi, autorami, publikacjami, a nawet państwami w ramach wybranego obszaru badawczego. Otrzymane mapy przedstawiają najczęściej powtarzające się słowa kluczowe oraz relacje między nimi. Narzędzie to znajduje szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach, w tym także w inżynierii lądowej [149] [137] [221] oraz w badaniach nad materiałami cementowymi [6] [414] [197]. Do analizy scientometrycznej wykorzystano oprogramowanie VOSviewer w wersji 1.6.18, które umożliwia tworzenie oraz wizualizację sieci bibliometrycznych opartych na czasopismach, autorach oraz poszczególnych publikacjach, z wykorzystaniem zależności cytowań, powiązań bibliograficznych, współcytowań i współautorstwa [395] [392]. W celu pozyskania danych bibliometrycznych przeanalizowano trzy bazy danych: Google Scholar, Scopus oraz Web of Science. Jak wskazują wcześniejsze badania, każda z tych baz wykazuje stały wzrost liczby publikacji oraz cytowań [132]. Oznacza to, że każda z tych baz jest wystarczająca pod względem możliwości eksportu danych i ich późniejszego przedstawienia w formie map. Jednakże, ze względu na większą liczbę indeksowanych publikacji w bazie Scopus w porównaniu do Web of Science oraz brak rygorystycznej kontroli jakości treści naukowych w Google Scholar [132], ostateczny wybór padł na bazę Scopus. Jak podaje oficjalna strona internetowa tej bazy, Scopus zapewnia bardziej globalne pokrycie zawartości (od 50% do 230% więcej, w zależności od regionu) niż najbliższy konkurent [332]. Proces oraz dobór elementów niezbędnych do przygotowania wizualizacji przedstawiono na Rysunku 17.



Rysunek 17. Proces tworzenia wizualizacji sieci słów kluczowych

Na podstawie zgromadzonych danych bibliometrycznych wygenerowano wizualizacje przedstawione na Rysunku 18. Wizualizacja sieciowa (Rysunek 18a) ukazuje częstość występowania oraz wzajemne powiązania między słowami kluczowymi. Wielkość węzła odpowiada liczbie wystąpień danego terminu w analizowanych publikacjach, natomiast linie łączące węzły wskazują na ich tematyczne współwystępowanie. Wyniki analizy pozwoliły na wyodrębnienie siedmiu klastrów grupujących publikacje o zbliżonej tematyce:

- klaster 1 – kolor czerwony, 26 elementów;
- klaster 2 – kolor zielony, 23 elementy;
- klaster 3 – kolor niebieski, 21 elementów;
- klaster 4 – kolor żółty, 21 elementów;
- klaster 5 – kolor fioletowy, 11 elementów;
- klaster 6 – kolor błękitny, 9 elementów;
- klaster 7 – kolor pomarańczowy, 9 elementów.

Wizualizacja gęstościowa (Rysunek 18b) przedstawia natężenie występowania słów kluczowych w trzech kategoriach:

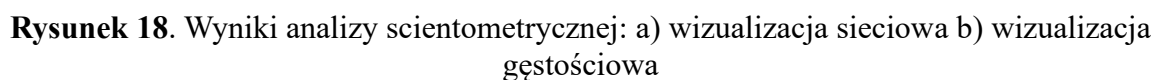
- kolor żółty oznacza największą gęstość,
- zielony – średnią,
- niebieski – najniższą.

Uzyskane mapy umożliwiają identyfikację tematów, na których koncentrują się badacze zajmujący się betonem samozagęszczającym się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu. Wśród najczęściej występujących terminów dominują te odnoszące się do właściwości betonu stwardniałego, takich jak wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie oraz

a)

b)

Klaster



3.2.3. Projektowanie mieszanki betonu samozagęszczającego się

Obecnie stosowanych jest wiele metod projektowania składu mieszanek betonu samozagęszczającego się, które można sklasyfikować jako: całkowicie eksperymentalne, eksperymentalno-analityczne oraz całkowicie analityczne. Baza wiedzy w tym zakresie jest systematycznie rozwijana poprzez wprowadzanie nowych koncepcji i algorytmów projektowych. Poniżej przedstawiono wybrane metody, które należą do najbardziej rozpowszechnionych w literaturze i praktyce inżynierskiej.

- Metoda japońska

Jest to metoda eksperymentalna, w której proces projektowania składu mieszanki prowadzony jest iteracyjnie. W pierwszej kolejności projektuje się zaczyn cementowy, określając stosunek wodno-cementowy (W/C), rodzaje i ilości dodatków mineralnych oraz domieszek chemicznych (najczęściej uplastyczniających). Następnie przygotowuje się zaprawę, przy czym udział piasku powinien wynosić 38–45 % jej objętości. Parametrami docelowymi są: rozlewność w zakresie 200–280 mm (stożek Abramsa) oraz czas wypływu wynoszący 5–10 s (V-lejek). Na tym etapie dopuszcza się korektę ilości zaczynu i domieszki w celu osiągnięcia optymalnej płynności. Kruszywo grube dodawane jest na końcu – jego objętość powinna stanowić 50–55% całkowitej objętości kruszywa w mieszance, a ilość wody nie powinna przekraczać 185 dm³/m³ mieszanki. Metoda ta pozwala na szybkie określenie proporcji składników [2] [247].

- Metoda szwedzka

W podejściu tym istotne jest zapewnienie jak najgęstszej krzywej uziarnienia, przy jednoczesnym zastosowaniu możliwie największej frakcji kruszywa, bez utraty zdolności przepływu mieszanki przez przestrzenie między prętami zbrojenia. Stosunek W/C oraz zawartość dodatków mineralnych powinny być określane z uwzględnieniem wymagań wytrzymałościowych i trwałościowych. Zawartość frakcji pyłowej mieści się zazwyczaj w zakresie 500–525 kg/m³ [41].

- Metoda Van Montgomeryego

To podejście eksperymentalno-analityczne rozwinięto na bazie metody szwedzkiej, wprowadzając dodatkowe zależności empiryczne. Analitycznie określa się maksymalną objętość kruszywa, która nie powoduje blokowania przepływu mieszanki przez zbrojenie, oraz minimalną objętość zaprawy. Kluczowym aspektem jest optymalizacja proporcji zaczynu i kruszywa w celu uzyskania odpowiedniego zagęszczenia mieszanki [69].

- Metoda Ferrarisa i de Larrarda

Jest to metoda eksperymentalno-analityczna oparta na parametrach reologicznych SCC: naprężeniu początkowym ścinającym (τ_0) oraz lepkości plastycznej (η_{pl}). Projektowanie obejmuje cztery kryteria samozagęszczania:

- kryterium płynięcia (τ_0) związane z właściwościami zaczynu,
- kryterium odpowietrzania (η_{pl}) zależne od objętości i zagęszczenia kruszywa,

- kryterium urabialności (K'cg),
- kryterium niesegregacji (K'p),

Kryteria urabialności i segregacji pozwalają ustalić współczynnik nasycenia K. Właściwości zaczynu uwzględnia się poprzez wyznaczenie dla mieszanki granicy płynięcia, która bierze pod uwagę wpływ rodzaju i ilości zastosowanego plastyfikatora oraz stosując kryterium braku segregacji, które uwzględnia zawartość ziaren o średnicy mniejszej niż 80 μm . Stopień segregacji określany jest na podstawie zagłębienia grubych ziaren poniżej powierzchni w próbce kontrolnej [337] [338]. Wyżej opisana metoda pozwala w sposób dokładny zaprojektować skład mieszanki betonu samozagęszczającego się, lecz z drugiej strony jest metodą pracochłonną, wymagającą przeprowadzenia rozbudowanych obliczeń. Dodatkowo wymaga posiadania w laboratorium specjalistycznych reometrów.

W literaturze naukowej dostępnych jest wiele innych metod projektowania betonu samozagęszczającego się, wśród których dominują podejścia analityczno-eksperymentalne, często oparte na algorytmie iteracyjnym. Wybrane metody zestawiono w Tabeli 9.

Tabela 9. Wybrane metody projektowania mieszanek betonu samozagęszczającego się na podstawie przeglądu literatury

Pochodzenie	Skrócona charakterystyka	Źródło
Laboratorium Central des Ponts et Chaussées	Projektowanie w oparciu o reometr BTRHEOM i oprogramowanie RENE-LCPC	[338]
Su i in.	Uwzględnienie współczynnika upakowania do korekty zawartości kruszywa i zaczynu	[364]
Hwang & Tsai	Teoria maksymalnej gęstości i nadmiaru zaczynu jako podstawa doboru składu	[139]
Saak i in.	Model reologiczny zaczynu do betonu zbrojonego włóknami	[313]
Kheder & Jadiri	Projektowanie betonu o określonej wytrzymałości na ściskanie	[166]
EN 206-1 + metoda chińska	Uwzględnienie optymalizacji uziarnienia i krajowych norm	[355]
Okamura & Ozawa	Eksperymentalny dobór kruszywa, korekta W/C i domieszki	[248]
Petersson i in.	Projektowanie w oparciu o zawartość porów i ryzyko blokowania przepływu	[270]
Khayat i in.	Model statystyczny opisujący zależności pomiędzy składem mieszanki a jej właściwościami	[165]
Bui i in.	Model reologiczny uwzględniający stosunek zaczynu do kruszywa oraz ich uziarnienie	[55]

3.2.4. Projektowanie betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu

Jak zauważono w [365], krótkie podsumowanie dotychczasowych badań wskazuje, że kruszywo grube z recyklingu mogą być z powodzeniem stosowane do produkcji betonu samozagęszczającego się. W literaturze dostępnych jest wiele prac naukowych zawierających odmienne podejścia i zalecenia w zakresie wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu. Jak wykazano w [181], zwiększający się udział kruszywa grubego z recyklingu w mieszance betonowej wpływa negatywnie na urabialność oraz właściwości mechaniczne SCC. W pracy [321] zasugerowano, że poprawa urabialności betonu samozagęszczającego się jest możliwa przy utrzymaniu stopnia zastąpienia kruszywa grubego z recyklingu poniżej 50%. Z kolei w [171] zwrócono uwagę, że przy wykorzystaniu krajowych normowych receptur betonu (CMD – ang. *Conventional Mix Design*), zawartość wody, cementu oraz piasku w mieszankach

z użyciem kruszywa grubego z recyklingu pozostaje niezmienną względem mieszanek z kruszywem grubym naturalnym. W efekcie, ze względu na obecność przylegającej do kruszywa grubego z recyklingu starej zaprawy, rzeczywista objętość całkowitej zaprawy w mieszance ulega zwiększeniu. W przytoczonym badaniu dokonano szczegółowego porównania modeli opisujących właściwości mechaniczne betonu. Na Rysunku 19 przedstawiono porównanie kilku metod projektowania mieszanek betonu samozagęszczającego się z wykorzystaniem kruszywa grubego z recyklingu. W konwencjonalnej metodzie CMD stosując kruszywo grube z recyklingu (Rysunek 19b) zakłada się, że stara zaprawa pozostająca na jego powierzchni stanowi integralną część kruszywa grubego. Takie założenie prowadzi do niekontrolowanego wzrostu objętości zaprawy (zarówno nowej, jak i starej) oraz redukcji udziału objętościowego właściwego kruszywa, co negatywnie wpływa na właściwości mechaniczne betonu.

Alternatywą jest metoda Równoważnej Objętości Zaprawy (EMV – ang. *Equivalent Mortar Volume*, Rysunek 19c) w której kruszywo grube z recyklingu traktowane jest jako materiał dwufazowy, składający się z pierwotnego kruszywa oraz przylegającej do niego starej zaprawy. W podejściu tym objętość starej zaprawy wlicza się do całkowitej objętości zaprawy w mieszance, a nie do objętości kruszywa grubego [91]. Dzięki temu całkowita objętość zaprawy w mieszance betonu z kruszywem recyklingowym odpowiada objętości zaprawy w betonie z kruszywem grubym naturalnym. Jedną z metod określenia zawartości starej zaprawy jest metoda zaproponowana w [1]. Zawartość starej zaprawy (ang. *Residual Mortar Content* – RMC, %) oblicza się według wzoru:

$$RMC = \left[\frac{W_{RCA} - W_{OVA}}{W_{RCA}} \right] * 100 \quad (1)$$

Gdzie:

W_{RCA} – masa próbki kruszywa grubego z recyklingu w stanie suchym przed badaniem [g]

W_{OVA} – masa pierwotnego kruszywa po całkowitym usunięciu zaprawy [g]

Pozorna gęstość pierwotnego kruszywa:

$$V_{OVA}^{RAC} = V_{RCA}^{RAC} * (1 - RMC) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \quad (2)$$

Gdzie:

SG_b^{RCA} – pozorna gęstość właściwa kruszywa grubego z recyklingu [kg/m³]

SG_b^{OVA} – pozorna gęstość właściwa pierwotnego kruszywa [kg/m³]

Jak wykazano w [4], wiedza o obecności i ilości starej zaprawy w mieszance betonowej ma zasadnicze znaczenie dla uzyskania pożądanych właściwości zarówno w stanie świeżym, jak i stwardniałym. Moduł sprężystości betonu jest funkcją udziału objętościowego oraz sprężystości składowych: zaprawy i kruszywa. Obecność starej zaprawy obniża ten moduł. Z kolei wytrzymałość na ściskanie jest determinowana głównie przez jakość zaprawy oraz

właściwości strefy przejściowej ITZ. W związku z tym opracowano metodę EMV, która pozwala utrzymać całkowitą objętość zaprawy (nowej i starej) na poziomie odpowiadającym betonowi z kruszywem grubym naturalnym. W cytowanym badaniu wykazano, że beton projektowany metodą EMV cechował się większym opadem stożka, wyższą gęstością (zarówno świeżą, jak i stwardniałą), większym modułem sprężystości oraz porównywalną wytrzymałością na ściskanie względem betonu CMD. Dodatkowo, metoda EMV pozwala na zmniejszenie ilości cementu i piasku, dzięki ograniczeniu udziału nowej zaprawy [172]. W niektórych przypadkach obserwowano jednak pogorszenie właściwości reologicznych, co przypisano traktowaniu starej zaprawy jako świeżej [421] [367] [174] [133]. Z tego względu zaproponowano Zmodyfikowaną Równoważną Objętość Zaprawy (MEMV – ang. *Modified Equivalent Mortar Volume*, Rysunek 19d). W metodzie tej zakłada się, że jedynie część starej zaprawy funkcjonuje jako zaprawa, a pozostała część jako składnik kruszywa grubego. W [172] wykazano, że takie podejście pozwala na osiągnięcie satysfakcjonujących właściwości mechanicznych betonu. W pracy [171] przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy, wskazując, że przy rosnącym udziale kruszywa grubego z recyklingu metoda CMD prowadzi do degradacji właściwości mechanicznych betonu. Natomiast w metodach EMV oraz MEMV możliwe jest uzyskanie właściwości porównywalnych do betonu z kruszywem naturalnym, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia cementu, piasku i wody – co ma istotne znaczenie środowiskowe. W [421] wprowadzono parametr skalujący S , który modyfikuje efektywną zawartość starej zaprawy w kruszywie grubym z recyklingu. W metodzie EMV parametr R określa stosunek objętości starej zaprawy do objętości RCA w mieszance. W MEMV przyjmuje się, że S może przyjmować wartości 1, 2 lub 3 – w zależności od zawartości starej zaprawy. Obecnie nie istnieje jednak jednolity standard pozwalający jednoznacznie określić, jaka część starej zaprawy zachowuje się jak zaprawa, a jaka jak kruszywo. W literaturze [169] opisano kilka metod umożliwiających separację starej zaprawy, takich jak: cykliczne zamrażanie i odmrażanie, działanie kwasami oraz stres termiczny. Na tej podstawie zaproponowano wzór umożliwiający obliczenie współczynnika R :

$$R = 1 - \frac{V_{RCA}^{RAC}}{V_{NCA}^{NAC}} * \left(1 - \frac{1}{S} * RMC\right) * \frac{SG_b^{RGA}}{SG_b^{NCA}} \quad (3)$$

Gdzie:

V_{RCA}^{RAC} - objętość kruszywa grubego z recyklingu w betonie [m³]

V_{NCA}^{NAC} - objętość kruszywa grubego naturalnego w betonie [m³]

SG_b^{RCA} - pozorna gęstość właściwa kruszywa grubego z recyklingu [kg/m³]

SG_b^{NCA} - pozorna gęstość właściwa kruszywa grubego naturalnego [kg/m³]

S – współczynnik skali regulujący efektywną zawartość starej zaprawy [-]

Autorzy [171] podkreślają, że dalsze badania są konieczne, szczególnie w kontekście właściwości betonu na wczesnym etapie dojrzewania, co jest szczególnie istotne w przypadku betonu samozagęszczającego się. Metoda EMV zakłada bowiem obecność zarówno stwardniałej, jak i świeżej zaprawy w jednej mieszance, co znacząco wpływa na procesy

reologiczne. W [22] najlepsze właściwości betonu samozagęszczającego się uzyskuje się przy niskim udziale kruszywa grubego z recyklingu (20–35%) w metodzie EMV. Brakuje jednak danych literaturowych dotyczących wpływu metody MEMV na właściwości betonu samozagęszczającego się. Istotnym zagadnieniem pozostaje również strefa przejściowa ITZ – obszar o odmiennych właściwościach mikrostrukturalnych względem uwodnionej pasty cementowej. Wokół ziaren kruszywa następuje lokalny wzrost porowatości, spowodowany koncentracją drobniejszych cząstek cementu. Wyższy współczynnik W/C nasila zjawisko dyfuzji podczas hydratacji, tworząc gradient porowatości i różnorodność faz uwodnionych. Zastosowanie mineralnych dodatków o bardzo drobnych cząstkach pozwala na zagęszczenie strefy ITZ, co korzystnie wpływa na trwałość betonu [334]. W betonach samozagęszczających się zawierających kruszywo grube z recyklingu mogą występować aż cztery typy stref ITZ [330] oraz dwa typy regularności ziarna:

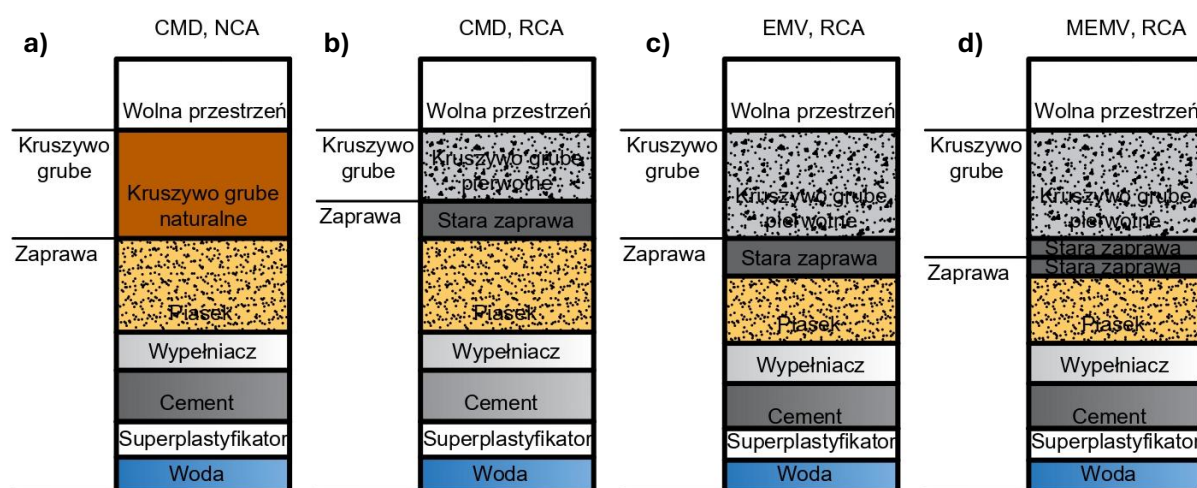
- 1) między kruszywem grubym naturalnym a nową zaprawą,
- 2) między kruszywem grubym z recyklingu a nową zaprawą,
- 3) między kruszywem grubym z recyklingu a starą zaprawą,
- 4) między starą zaprawą a nową zaprawą,

oraz dwie regularności ziarna:

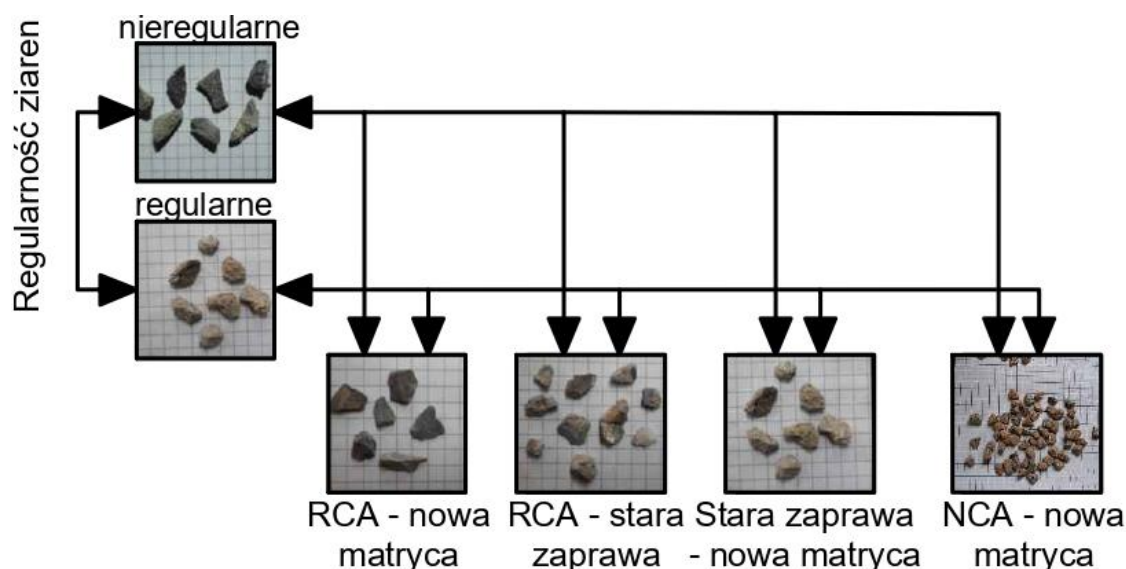
I) regularna,

II) nieregularna.

Potencjalne zależności pomiędzy stopniem zastąpienia kruszywa, regularnością ziaren oraz liczbą połączeń zostały zaprezentowane na Rysunku 20.



Rysunek 19. Schematyczny skład betonu samozagęszczającego się zaprojektowanego przy użyciu różnych metod projektowania



Możliwe strefy przejściowe kruszywo-matryca cementowa

Rysunek 20. Możliwe strefy ITZ w betonie samozagęszczającym się z kruszywem grubym z recyklingu i ich możliwe powiązania z regularnością ziarna

3.2.5. Wpływ źródła pochodzenia kruszywa grubego z recyklingu na wytrzymałość na ściskanie betonu

Większość badań dotyczących zastosowania kruszywa grubego z recyklingu w mieszankach betonowych przedstawia lakoniczny opis źródła jego pozyskania. Może to sugerować, że miejsce pochodzenia odpadów budowlanych i rozbiórkowych nie ma większego znaczenia, a każdy przypadek użycia kruszywa grubego z recyklingu powinien być rozpatrywany indywidualnie. W celu weryfikacji właściwości kruszywa grubego z recyklingu oraz betonu samozagęszczającego się przeprowadzono przegląd literatury, którego wyniki zestawiono w Tabeli 10. W dwóch przypadkach, w których recyklat pochodził z elementów prefabrykowanych, odnotowano wzrost wytrzymałości na ściskanie po zastosowaniu kruszywa grubego z recyklingu, w przeciwieństwie do pozostałych analizowanych przykładów. Elementy prefabrykowane zostały wykonane z betonu o dobrej jakości, co może sugerować, że takie odpady są korzystniejsze dla tzw. „eko-betonu”. Warto dodać, że według [316], ilość starej zaprawy otaczającej kruszywo wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wielkości kruszywa, co jest szczególnie istotna dla betonu samozagęszczającego się wykorzystującego relatywnie niewielkie frakcje kruszywa. W miarę kruszenia betonu na drobniejsze kruszywo, stara zaprawa gromadzi się w porach drobniejszego kruszywa. Problemy te można rozwiązać, stosując kruszywa o wysokiej wytrzymałości, co jest korzystniejsze dla betonu od kruszyw na bazie betonów zwykłych [317].

Tabela 10. Wybrane pozycje literaturowe dotyczące kruszywa grubego z recyklingu z odpadów budowlanych i rozbiórkowych stosowanego w betonie samozagęszczającym się i uzyskane wyniki (data przeszukania: luty 2022).

Źródło kruszywa grubego z recyklingu	Śr. wytrzym. betonu ref. po 28 dniach [MPa]	Zastąpienie kruszywa naturalnego [%]	Średnia wytrzymałość betonu po 28 dniach [MPa]	Uwagi	Źródło
Budynek z rozbiórki (~25 lat)	31	10	29.8	Próbki sześciennie 150×150×150 mm	[261]
		20	27.9		
		30	26.3		
		40	21.6		
Odpady z infrastruktury	42.91	25	40.49	Próbki 100×100×100 mm, dodatek pyłu z recyklingu	[79]
		50	36.45		
		100	34.64		
Z zakładu recyklingowego	59.4	25	63.7	Próbki sześciennie 150×150×150 mm	[373]
		50	65.3		
		75	60		
		100	53.80		
Lokalny zakład recyklingowy	54	20	54	Brak danych	[287]
		40	53		
		100	51		
Most ~40-letni (rozbiórka)	49.5	50	48.5	Brak danych	[126]
		100	46		
Beton z budownictwa mieszkaniowego	52	25	36.5	Próbki sześciennie 100×100×100 mm	[330]
		50	35.5		
		75	32		
		100	31		
Lokalny zakład recyklingowy	54.20	10	53.9	Próbki sześciennie 150×150×150 mm	[265]
		20	53.7		
		30	53.3		
		40	53		
Lokalny zakład recyklingowy	44.30	25	44.5	Próbki sześciennie 100×100×100 mm	[181]
		50	43.4		
		75	41.3		
		100	38.7		
Z lokalnego zakładu, mieszanina	52	16	52.5	Samozagęszczający się zbrojony	[231]

betonu, asfaltu, cegła itd.		włókna, próbki 100×100×100 mm			
		25	52		
Zgniecione betonowe próbki laboratoryjne	53	50	47	Częściowe zastąpienie kruszywa drobnego, próbki 100×150×1200 mm	[230]
		75	45		
		100	40.5		
Odpady budowlane i rozbiórkowe z konstrukcji około 40letniej	36	25	33	20% pyłu z mielenia murów jako częściowy zamiennik cementu	[351]
		50	33.5		
		75	34		
		100	32		
Odrzuty z elementów prefabrykowanych	46.90	100	50.7	Próbki 150×150×150 mm	[326]
		20	49.98		
		50	55.64		
Prefabrykaty (belki, słupy, płatwie) o wytrzymałości 30– 50 MPa	58.30	100	56.75	Brak danych	[98]
		20	60.25		
		50	58.52		
		100	70.56		
	63.36	20	64.13		
		50	66.82		
		100	72.81		

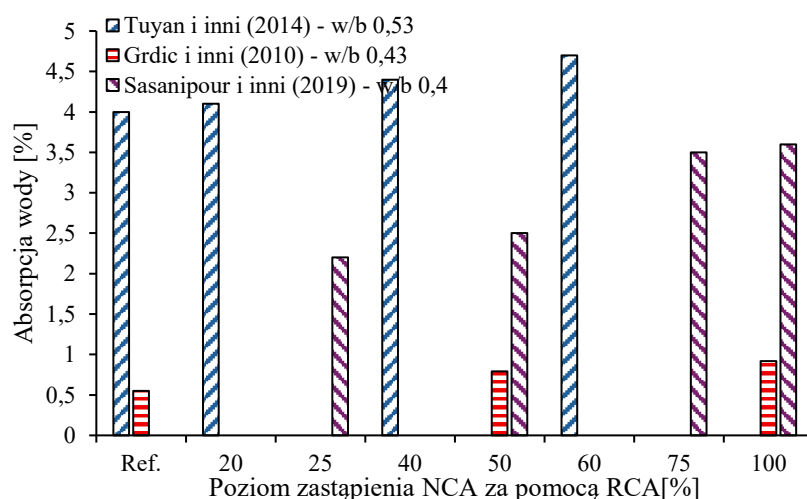
3.2.6. Właściwości betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu

Zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu odpadów budowlanych i rozbiórkowych w betonie samozagęszczającym się niewątpliwie niesie ze sobą korzyści środowiskowe, gdyż pozwala na zagospodarowanie znacznych ilości odpadów. Jednakże w przypadku betonu samozagęszczającego się istnieją istotne zagadnienia związane z wykorzystaniem kruszywa grubego z recyklingu, które wymagają szczególnego podkreślenia.

3.2.6.1. Zapotrzebowanie na wodę przy zastosowaniu kruszywa grubego z recyklingu

W celu uzyskania wysokiej urabialności – jednej z kluczowych właściwości betonu samozagęszczającego się – konieczne jest zastosowanie większej ilości drobnych frakcji oraz domieszek upłynniających [300], w porównaniu z betonem zwykłym [185]. Z kolei kruszywo

grube z recyklingu charakteryzuje się wyższą absorpcją wody w porównaniu do kruszywa grubego naturalnego [387] [385] [373] – szacunkowo wymaga około 10% więcej wody [357]. Wynika to z jego tekstury powierzchniowej – porowatej i chropowatej; takie właściwości zwiększają zapotrzebowanie na wodę i zmniejszają urabialność mieszanki. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem umożliwiającym utrzymanie równowagi wodnej jest dodatek superplastyfikatora [265] [324] [230], który pozwala na obniżenie współczynnika W/C poniżej wartości 0,4. Kruszywo grube z recyklingu można uznać za kruszywo o niższej jakości i gęstości w porównaniu do naturalnego [373] [98]. Jak pokazano na Rysunku 21, niezależnie od przyjętego stosunku woda/spoiwo (W/B), wraz ze wzrostem udziału kruszywa grubego z recyklingu rośnie także całkowita absorpcja wody [387] [331] [125]. W cytowanych pracach pominięto dokładne informacje o stanie wilgotnościowym kruszywa grubego z recyklingu przy formułowaniu mieszanki, choć ma to udowodniony, silny wpływ na reologię i właściwości świeżej mieszanki betonu samozagęszczającego się. W tym kontekście pojawiają się istotne pytania badawcze dotyczące zapotrzebowania na wodę. Czy kruszywo grube z recyklingu pochodzące z prefabrykowanych elementów wykazuje wyższą absorpcję wody niż kruszywo naturalne? Czy zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu pozwala na ograniczenie wysokiego zapotrzebowania na wodę charakterystycznego dla betonu samozagęszczającego się?



Rysunek 21. Absorpcja wody w zależności od zawartości kruszywa grubego z recyklingu i stosunku woda/spoiwo (W/B)

3.2.6.2. Wpływ kruszywa grubego z recyklingu na właściwości betonu

Kruszywo grube z recyklingu odpadów budowlanych i rozbiórkowych cechuje się znaczną niejednorodnością. Jak wskazano w pracy [189], ze względu na możliwość obecności zanieczyszczeń i materiałów niepożądanych, całkowite zastąpienie wysokiej jakości kruszywa grubego naturalnego za pomocą recyklingowego jest trudne i często ograniczone pod względem zastosowania, zwłaszcza w przypadku żelbetowych elementów konstrukcyjnych. Potwierdzenie tej tezy przedstawiono w Tabeli 11. Mimo to, literatura zawiera udokumentowane przypadki zastosowania RCA w elementach konstrukcyjnych, w tym również w budownictwie wysokościowym, przy wykorzystaniu betonu o ulepszonych właściwościach [412] [79].

Właściwości betonu, zarówno w stanie świeżym, jak i stwardniałym, w znacznym stopniu zależą od jakości betonu macierzystego, z którego pozyskano kruszywo grube z recyklingu [7] [35] [295] [420] [290]. Wpływ na te właściwości mają również cechy morfologiczne kruszywa, takie jak kształt, nieregularność, spłaszczenie, rozmiar ziaren, sposób kruszenia, stopień przylegania starej zaprawy oraz typ zastosowanego materiału źródłowego [8] [252]. W pracy [157] uzasadniono, że defekty mikrostrukturalne, takie jak pory czy nieregularności, istotnie obniżają wytrzymałość pianobetonu na ściskanie, co jest analogiczne do zjawisk obserwowanych w betonach z kruszywem recyklingowym, gdzie porowatość i strefa ITZ mogą ograniczać nośność. Parametry te oddziałują między innymi na moduł sprężystości [302], wytrzymałość na ściskanie [423] [141] oraz odporność na ścieranie [168] [353], także w przypadku zastosowania kruszywa grubego z recyklingu [322] [427] [253]. W literaturze rzadko rozdziela się efekty wynikające z modyfikacji składu mieszanki (np. poprzez dodatki mineralne) od zmian spowodowanych bezpośrednio zastosowaniem kruszywa grubego z recyklingu, takich jak zwiększona nasiąkliwość, spadek modułu sprężystości czy obniżenie gęstości betonu. Brak takiego rozróżnienia utrudnia identyfikację rzeczywistych źródeł obserwowanych zmian właściwości. W pracy [362] dokonano analizy wpływu kształtu kruszywa (regularnego i nieregularnego) pozyskanego w opatentowanym procesie technologicznym na właściwości wytrzymałościowe betonu, jego porowatość oraz przebieg hydratacji. W innym opracowaniu [104] wykazano, że jakość końcowego produktu kruszywowego można częściowo kontrolować poprzez odpowiedni dobór parametrów pracy kruszarki, przy zastosowaniu modeli matematycznych uwzględniających zarówno charakterystykę nadawy, jak i warunki eksploatacyjne urządzenia. Wyniki licznych badań wskazują jednoznacznie, że właściwości betonu są ściśle powiązane z charakterystyką kruszywa grubego z recyklingu [322] [39] [201]. Jednak w badaniach dotyczących betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu często nie rozpatrywano synergii lub kompromisów pomiędzy poprawą urabialności a potencjalnym pogorszeniem trwałości w długim okresie. Według [24], mechanizmy zniszczenia betonu zawierającego kruszywo grube z recyklingu są zbliżone do tych obserwowanych w betonach konwencjonalnych. Z kolei w pracy [118] zauważono, że zwiększenie udziału kruszywa grubego z recyklingu od 0% do 100% istotnie wpływa na wzrost pęcznienia. Nominalny rozmiar ziaren kruszywa grubego z recyklingu wpływa na ilość zaprawy przylegającej do kruszywa – im drobniejsze ziarna, tym większa powierzchnia kontaktu, co skutkuje większą ilością przylegającej zaprawy [295] [290]. Jednakże, jak pokazano w pracy [233] nie zawsze jest ona głównym czynnikiem determinującym jakość kruszywa grubego z recyklingu. W badaniach wykorzystano grube kruszywo z piaskowca, które zawierało pierwotne wady w postaci pustek i mikropęknięć. Proces dalszej obróbki kruszywa zmieniał jego mikrostrukturę, co potwierdzono analizami mikroskopowymi i skutkowało poprawą jego właściwości.

Podsumowując, proces recyklingu kruszywa grubego jest złożony, a jego wpływ na właściwości betonu zależy od wielu zmiennych. Niemniej jednak, analizując dostępne badania, można stwierdzić, że wykorzystanie prefabrykatów jako źródła kruszywa grubego może przyczynić się do zwiększenia wytrzymałości betonu na ściskanie. Należy jednak pamiętać, że odpady budowlane i rozbiórkowe mają charakter mieszaniny różnych materiałów [330] [42] [266], a same elementy betonowe często cechuje znaczna niejednorodność oraz wiek. Wymaga

to kontynuacji badań, w szczególności w celu odpowiedzi na pytania: Czy morfologia kruszywa grubego z betonowych odpadów budowlanych i rozbiórkowych wpływa na trwałość betonu samozagęszczającego się oraz właściwości mieszanki w stanie świeżym i stwardniałym? W jakim stopniu kruszywo grube z recyklingu może zastąpić kruszywo grube naturalne przy zachowaniu wymaganych parametrów technicznych?

Tabela 11. Wpływ kruszywa grubego z recyklingu na wybrane właściwości betonu przy tym samym stosunku w/c

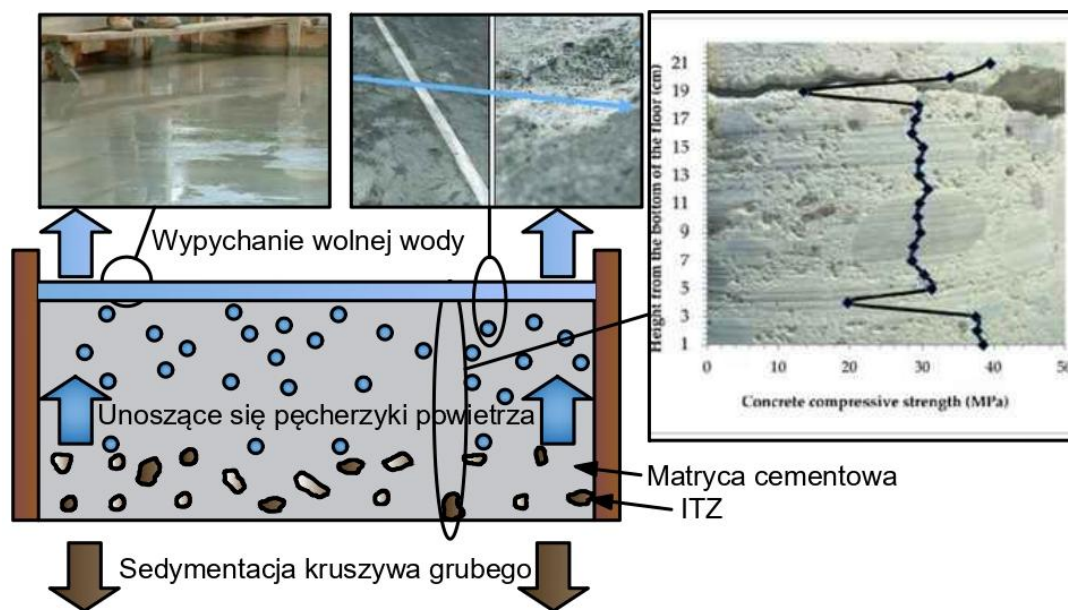
Właściwość	Wpływ kruszywa grubego z recyklingu (porównując do serii ref.)	Źródło
Wytrzymałość na ściskanie	Spadek o maks. 25 %	[7] [295] [420]
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	Spadek o maks. 10 %	[7] [222]
Moduł sprężystości	Spadek o maks. 45 %	[7] [35]
Skurcz przy wysychaniu	Spadek o maks. 50 %	[290] [375] [77]
Pelzanie	Wzrost o maks. 50 %	[290] [77] [325]
Absorcja wody	Wzrost o maks. 50 %	[410] [77]
Odporność na mróz i odtajanie	Spadek	[325] [428]
Głębokość karbonatyzacji	Bez zmian	[193] [254]
Przenikanie chlorków	Bez zmian	[254] [249]

3.2.6.3. Niejednorodność betonu samozagęszczającego się

Współczesne badania jednoznacznie wskazują na szereg zalet betonu samozagęszczającego się, spośród których szczególne znaczenie przypisuje się jego jednorodności [261][19][69]. Niemniej jednak, w praktyce obserwuje się istotne zjawiska prowadzące do zróżnicowania wytrzymałości betonu wzdłuż kierunku betonowania. Uzyskanie wysokiej urabialności betonu samozagęszczającego się wymaga zastosowania domieszek upłynniających [185] co w połączeniu z właściwościami kruszywa z recyklingu, zwłaszcza jego zwiększoną nasiąkliwością w porównaniu do kruszywa grubego naturalnego, generuje dodatkowe trudności technologiczne. Proces betonowania, nawet bez udziału wibracji, prowadzi do występowania zjawisk związanych z porowatością struktury, wynikającą między innymi z obecności pęcherzyków powietrza [360] a także z tendencji do opadania cięższych frakcji (sedymentacji) w obrębie mieszanki. W efekcie powstaje gradient właściwości mechanicznych i strukturalnych – strefa przypowierzchniowa może cechować się zwiększoną porowatością i niższą wytrzymałością [319] (Rysunek 22). Jednocześnie sedymentacja powoduje odsączanie wody z mieszanki, co – w zależności od intensywności – może znacząco pogarszać jakość gotowego betonu. Zjawisko nadmiernego odsączania wody z mieszanki prowadzi do wielu niekorzystnych efektów technologicznych i eksploatacyjnych, takich jak spękania skurczowe, łuszczenie się lub odpryskiwanie górnej warstwy posadzek i płyt betonowych. Z kolei zbyt mała ilość odparowanej wody może powodować delaminację powierzchni, zwiększenie porowatości lub występowanie mikropeknięć. Jak wskazuje literatura [152], intensywność odsączania wody z mieszanki zależy przede wszystkim od temperatury otoczenia oraz ilości i rodzaju zastosowanego cementu. Mimo że zjawisko to jest znane i było przedmiotem licznych badań [151] [288] [111], jego przebieg w obecności kruszywa z recyklingu pozostaje wciąż

słabo rozpoznany. Na podstawie przeglądu literatury (Tabela 12) można stwierdzić, że odsączenie wody z mieszanki betonu samozagęszczającego się jest zjawiskiem niejednorodnym, zależnym od wielu czynników – zarówno fizykochemicznych, jak i technologicznych. Dotychczasowe badania potwierdzają, że chociaż kontrola stosunku W/C oraz odpowiedni dobór rodzaju cementu mogą ograniczać intensywność odsączenia wody z mieszanki, nie ma wystarczających danych dotyczących wpływu kruszywa grubego z recyklingu na ten proces. Tymczasem jego zastosowanie może zaburzać bilans wodny mieszanki i prowadzić do lokalnych nieciągłości strukturalnych. W pracy [360] wykazano, że w przypadku płyt betonowych wykonanych z betonu samozagęszczającego się, wytrzymałość mechaniczna może być obniżona w górnej części elementów poziomo formowanych nawet o 50% w porównaniu do średniej wartości w przekroju. Inne badania [374] wskazują, że uszkodzenia i deformacje w betonie samozagęszczającym się mają charakter skomplikowany, obejmujący mechanizmy inicjacji, propagacji i łączenia się mikropęknięć, wynikających z niejednorodności struktury materiału. Autorzy cytowanego badania zaproponowali probabilistyczny model oparty na rozkładzie Weibulla, służący do opisu rozkładu właściwości mechanicznych w betonie samozagęszczającym się, który został zastosowany w analizach numerycznych przy użyciu siatki elementów skończonych w skali mezo (obejmującej matrycę zaprawy, kruszywa oraz strefy przejściowe międzyfazowe). Kolejna praca [23] potwierdziła, że niejednorodność strukturalna betonu samozagęszczającego się prowadzi do lokalnych koncentracji naprężeń, które pod wpływem obciążeń użytkowych i środowiskowych powodują powstawanie i propagację mikropęknięć, szczególnie w strefach styku między kruszywem a matrycą cementową. Propagacja tych pęknięć prowadzi do ich koalescencji, a w efekcie do zniszczenia struktury betonu. Z kolei w pracy [432] wykazano, że wielkość i kształt ziaren kruszywa mają istotny wpływ na właściwości reologiczne betonu samozagęszczającego się. W celu oceny tego wpływu przeprowadzono testy doświadczalne i symulacyjne (*slump-flow*, *L-box*) dla różnych wariantów mieszanek.

Stosując różne warstwy betonu samozagęszczającego się w praktyce budowlanej należy pamiętać również o istotnych różnicach w sposobie mieszania się warstw betonu, w zależności od zastosowanej technologii podawania mieszanki, jak udowodniono w [80] i [81]. Autorzy uzasadniają, że w przypadku betonowania od dołu przebieg styku warstw był nieregularny, występowało mieszanie się warstw wewnątrz przekroju elementu co wpływało na ograniczenie powstania ciągłego strukturalnego osłabienia konstrukcji. Z kolei w przypadku betonowania od góry przebieg styku warstw był liniowy co powodowało spadek nośności zespolenia warstw wraz ze wzrostem czasu opóźnienia podawania drugiej warstwy. Podsumowując, pomimo rosnącej świadomości problematyki niejednorodności betonu samozagęszczającego się, literatura wciąż nie dostarcza wyczerpujących danych na temat wpływu poszczególnych składników mieszanki na jednorodność w przekroju oraz sposobów kontroli tego zjawiska przed fazą przygotowania mieszanki. Szczególny brak danych dotyczy zastosowania kruszywa grubego z recyklingu w tym betonie. Zjawiska naprężeń wczesnodojrzewających, analizowane przez [145] ukazują konieczność szczegółowego uwzględnienia ITZ i kontroli mikrostruktury.



Rysunek 22. Problem niejednorodności w betonie samozagęszczającym się, na podstawie [360]

Tabela 12. Parametry wpływające na proces odsączania wody z mieszanki

Czynnik wpływający	Efekt	Źródło
Kruszywo z recyklingu i popiół lotny	Dodatek kruszywa grubego z recyklingu zwiększa odsączenie, natomiast popiół lotny go zmniejsza	[360]
Popiół krzemionkowy	Zmniejsza odsączenie	[111]
Różne typy cementów	Typ i ilość cementu wpływają na proces odsączania	[383]
Różne typy kruszyw	Rodzaj kruszywa ma istotny wpływ na odsączenie	[424]

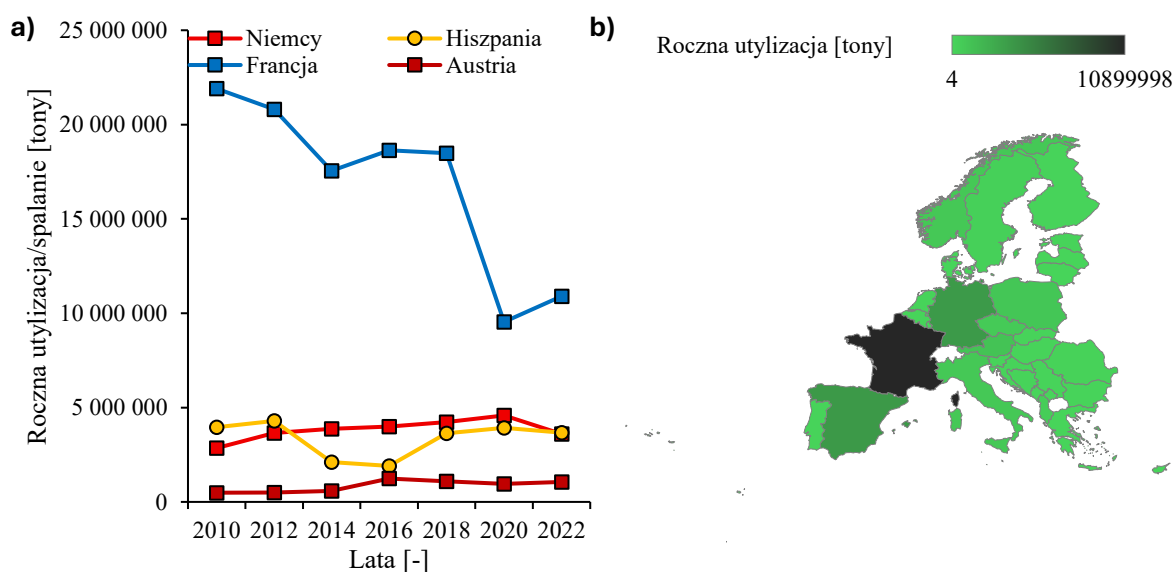
3.3. Strefa przejściowa ITZ

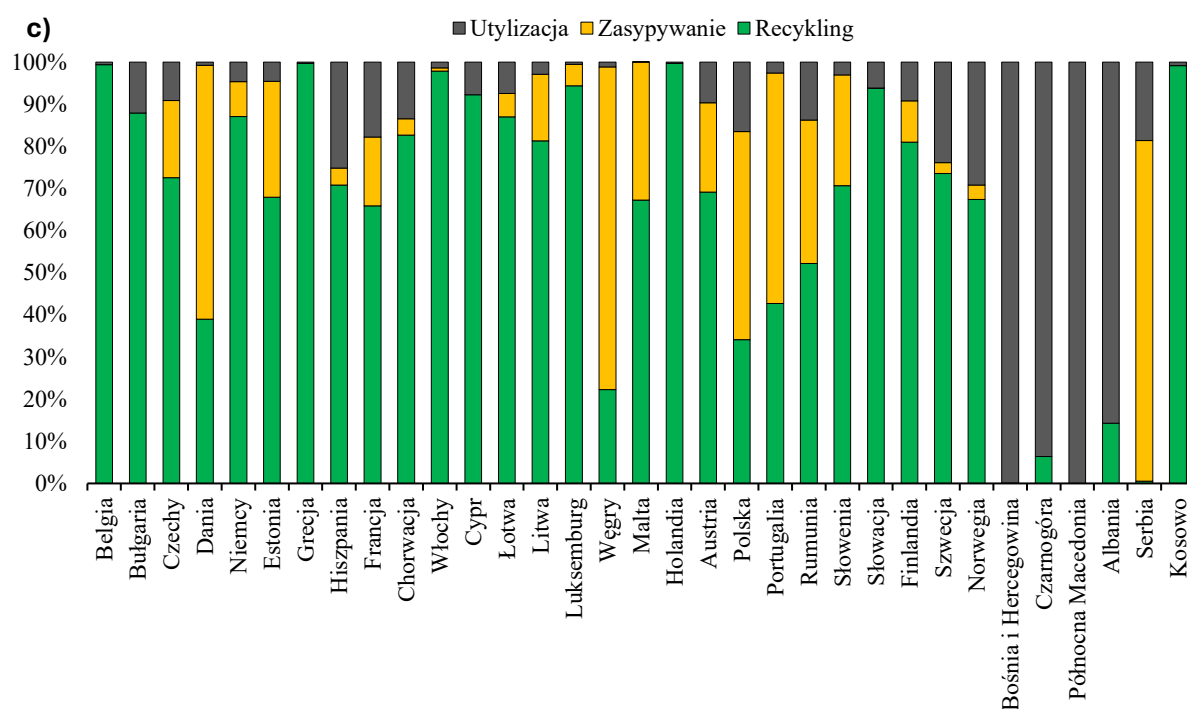
3.3.1. Wprowadzenie

Pomimo iż niektóre frakcje odpadów budowlanych i rozbiórkowych cechują się wysoką wartością surowcową, a technologie ich separacji i odzysku są obecnie dobrze rozwinięte, wskaźniki recyklingu i odzysku materiałowego w krajach członkowskich UE wykazują znaczną rozbieżność — od wartości poniżej 10% do przekraczających 90% (Rysunek 23). Mimo że kraje takie jak Francja, Austria, Niemcy i Hiszpania osiągnęły wysokie poziomy recyklingu, nadal składowane jest tam rocznie ponad milion ton frakcji mineralnej odpadów budowlanych i rozbiórkowych [86] – Rysunek 23a. Szczególnie Francja (Rysunek 23b) odnotowała znaczne postępy w ograniczaniu ilości składowanych odpadów w ciągu ostatnich 14 lat, podczas gdy tempo poprawy w innych krajach pozostaje umiarkowane.

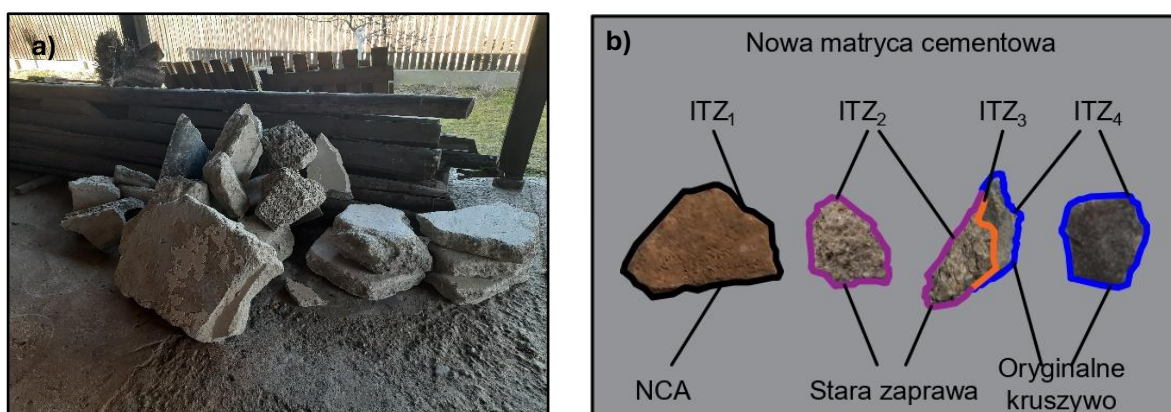
Jednym z największych wyzwań przy stosowaniu kruszywa grubego z recyklingu w konstrukcjach jest obecność przylegającej starej zaprawy cementowej, która prowadzi do powstania wielu stref przejściowych ITZ w betonie z kruszywem recyklingowym — między kruszywem z recyklingu a nowym zaczynem, kruszywem naturalnym a nowym zaczynem, kruszywem z recyklingu a starą zaprawą oraz starą zaprawą a nową zaprawą (zob. Rysunek 24). Jako że ITZ odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu właściwości mechanicznych betonu z kruszywem recyklingowym, nadal istnieją obawy dotyczące bezpieczeństwa strukturalnego oraz trwałości elementów wykonanych z takiego betonu [196]. Niemniej jednak niektóre normy

krajowe, jak np. obowiązujące w Chinach, Japonii czy Danii, dopuszczają zastosowanie 100% kruszywa grubego z recyklingu w produkcji betonu, pod warunkiem spełnienia określonych właściwości w stanie stwardniałym oraz odpowiedniej jakości kruszywa [272]. Niemniej jednak pełna zamiana kruszywa naturalnego na recyklingowe pozostaje zjawiskiem rzadkim [394]. Dla porównania, normy w Hiszpanii i Wielkiej Brytanii są bardziej restrykcyjne i ograniczają udział kruszywa grubego z recyklingu do maksymalnie 20% w betonie klasy wytrzymałości C40/50 [47]. Wraz ze wzrostem liczby badań poświęconych poprawie jakości ITZ — w tym poprzez karbonatyzację, stosowanie domieszek mineralnych, zaawansowane metody mieszania czy poprawę strefy przylegającej zaprawy — pojawia się coraz większy potencjał do udoskonalenia właściwości betonu z kruszywem grubym z recyklingu [226]. W świetle rozwoju technologicznego, istnieje potrzeba usystematyzowania aktualnego stanu wiedzy, identyfikacji luk badawczych oraz wyznaczenia perspektywicznych kierunków dalszych prac w zakresie poprawy jakości kruszywa grubego z recyklingu i efektywności ITZ. Zgodnie z europejskim rozporządzeniem dotyczącym wyrobów budowlanych, stosowanie materiałów z recyklingu powinno mieć pierwszeństwo przed konwencjonalnymi materiałami budowlanymi. Choć wykorzystanie kruszywa grubego z recyklingu z odpadów budowlanych i rozbiórkowych jest promowane, jego zastosowanie w elementach konstrukcyjnych pozostaje ograniczone w praktyce budowlanej. Główną obawą inwestorów i wykonawców jest niepewny wpływ mikrostruktury kruszywa grubego z recyklingu na właściwości użytkowe i trwałość betonu. Chociaż obserwuje się systematyczny wzrost liczby publikacji poświęconych ITZ, dotychczasowy rozwój wiedzy w tej dziedzinie nie został ujęty w formie kompleksowej analizy. Brakuje syntez naukowych skupionych na systematycznej identyfikacji luk poznawczych oraz kierunków przyszłych badań nad wpływem ITZ na właściwości betonu. Celem niniejszego przeglądu jest częściowe wypełnienie tej luki poprzez analizę bibliometryczną, mającą na celu: identyfikację aktualnych trendów badawczych, określenie głównych parametrów wpływających na ITZ, przegląd technik modyfikacji tej strefy oraz ocenę jej wpływu na trwałość betonu z kruszywem grubym z recyklingu. Rezultaty niniejszego przeglądu mogą przyczynić się do szerszego wdrożenia betonu z kruszywem grubym z recyklingu w budownictwie oraz wspierać transformację sektora w kierunku zrównoważonego rozwoju.





Rysunek 23. Roczna ilość składowanych/spalanych odpadów w wybranych krajach: a) w latach 2008-2022 b) w roku 2022 c) porównanie z potencjałem recyklingu poszczególnych państw UE



Rysunek 24. Charakterystyka RCA: a) odpady betonowe przed kruszeniem b) możliwe strefy ITZ w RAC

3.3.2. Analiza bibliometryczna

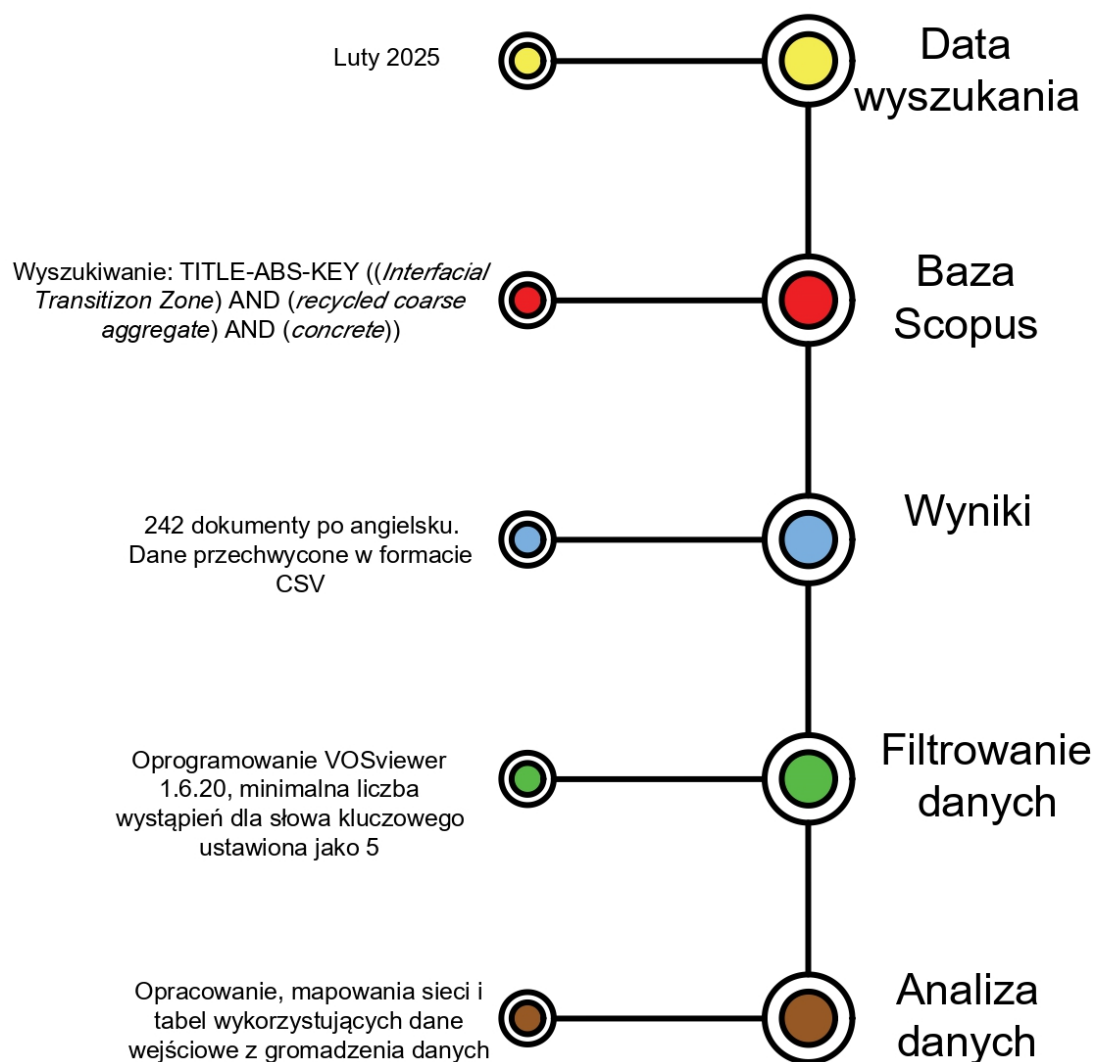
W związku z rosnącą liczbą publikacji dotyczących strefy ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu, przeprowadzono analizę scientometryczną danych bibliometrycznych, mającą na celu identyfikację aktualnych trendów badawczych w tym obszarze. Analiza ta wizualizuje dane wejściowe oraz ustanawia powiązania pomiędzy źródłami, słowami kluczowymi, autorami, artykułami i krajami w ramach badanego obszaru naukowego. Do analizy scientometrycznej wybrano oprogramowanie VOSviewer 1.6.20 ze względu na jego

zdolność do budowania i wizualizacji sieci bibliometrycznych opartych na czasopismach, badaczach oraz poszczególnych publikacjach [395]. Narzędzie to wykorzystuje różnorodne podejścia analityczne, takie jak analiza cytowań, powiązania bibliograficzne, współcytowania oraz współautorstwo. Wynikowe mapy odzwierciedlają kluczowe cechy, ich współwystępowania i wzajemne powiązania, oferując cenny wgląd w strukturę krajobrazu badawczego. W celu rozróżnienia poszczególnych kategorii przypisano określone kolory do elementów mapy [219]. Po przeprowadzeniu wyszukiwania w bazie Scopus uzyskano istotne wyniki, które następnie poddano filtracji w celu wyeliminowania materiałów nieistotnych. Proces selekcji oraz kryteria przygotowania wizualizacji przedstawiono na Rysunku 25.

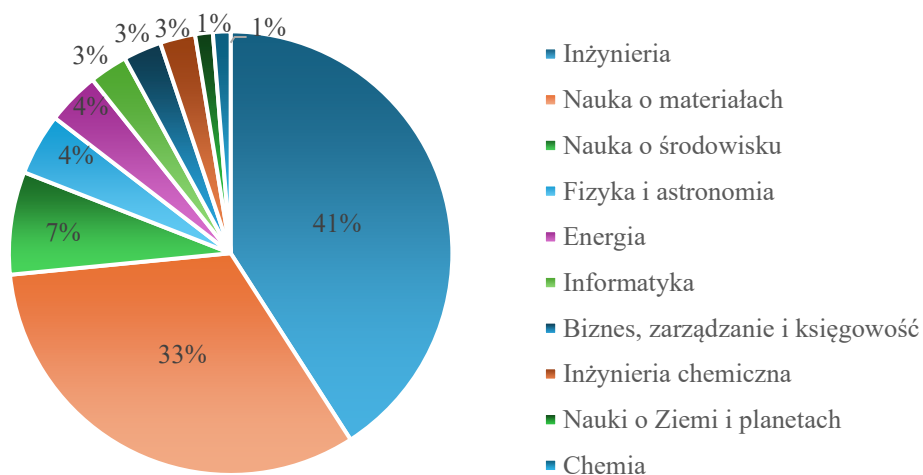
Rozkład publikacji według dziedzin tematycznych zaprezentowano na Rysunku 26, który ukazuje interdyscyplinarny charakter badań nad ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu. Inżynieria dominuje z udziałem 41% publikacji, co podkreśla koncentrację na właściwościach mechanicznych. Nauka o materiałach stanowi 33%, odzwierciedlając nacisk na innowacje technologiczne i materiałowe. Obecność nauk o środowisku (7%), fizyki i astronomii (4%) oraz energetyki (4%) podkreśla wagę aspektów środowiskowych, fizycznych i energetycznych w rozwoju betonu z kruszywem grubym z recyklingu. Z kolei udział takich dziedzin jak informatyka, zarządzanie, inżynieria chemiczna, nauki o Ziemi i chemia – mimo że procentowo niewielkie – wskazuje na szeroki potencjał oddziaływania ITZ w różnych obszarach wiedzy, podkreślając potrzebę wieloaspektowego podejścia do zrównoważonego rozwoju w budownictwie i naukach materiałowych. Analiza uwidacznia kluczowe przecięcia nauk środowiskowych, inżynieryjnych i materiałowych w kontekście badań nad ITZ oraz ich wpływu na beton z kruszywem grubym z recyklingu. Udział innych dziedzin stanowi jednocześnie dowód na istnienie potencjalnych kierunków badań, wspierających holistyczne podejście do wyzwań zrównoważonego budownictwa. Analiza typów dokumentów (Tabela 13) wskazuje na dominację artykułów naukowych, co potwierdza dynamiczny rozwój wiedzy i innowacyjność w obszarze ITZ i betonu z kruszywem grubym z recyklingu. Aż 44% całkowitej liczby publikacji opublikowano w pięciu renomowanych czasopismach o globalnym zasięgu (Tabela 14), co dowodzi wysokiego znaczenia tych badań oraz stanowi punkt odniesienia dla jakości i relewantności, ułatwiając badaczom nawigację w krajobrazie publikacyjnym. Artykuły konferencyjne stanowią ok. 8% wszystkich publikacji, co świadczy o aktywnej wymianie wiedzy i stymulacji współpracy w środowisku akademickim. Obecność dziewięciu artykułów przeglądowych wskazuje na podejmowane próby syntezy aktualnego stanu wiedzy. Jednakże, szczegółowa analiza tych przeglądów (Tabela 15) ukazuje, że ITZ nie stanowi ich głównego przedmiotu zainteresowania. Luka ta podkreśla potrzebę dalszych badań skupionych na identyfikacji luk poznawczych oraz kierunków przyszłych analiz dotyczących ITZ i jego wpływu na właściwości betonu. W analizie bibliometrycznej, w oprogramowaniu VOSviewer przyjęto próg minimalnej liczby wystąpień słowa kluczowego równy pięciu. Wizualizacja sieci słów kluczowych pogrupowała je w klastry, z których każdy oznaczony został innym kolorem. Klastry te odzwierciedlają współwystępowanie konkretnych haseł w różnych publikacjach – słowa (węzły) o tym samym kolorze należą do tematycznie spójnych grup. Ostatecznie, 143 spośród 1756 słów kluczowych spełniło kryterium selekcji. Piętnaście najczęściej występujących słów kluczowych, wraz z liczbą wystąpień oraz łączną siłą powiązań, przedstawiono w Tabeli 16. Słowa te mogą stanowić cenne źródło odniesienia dla

przyszłych autorów, umożliwiając poprawę widoczności i łatwiejsze wyszukiwanie ich publikacji. Dominująca tematyka słów kluczowych dotyczy właściwości mechanicznych, choć spośród nich tylko wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie znalazły się w pierwszej piętnastce. Sugeruje to potrzebę większego nacisku w przyszłych badaniach na analizę wpływu ITZ na inne właściwości betonu z kruszywem grubym z recyklingu, zwłaszcza trwałość, odporność na cykle zamrażania i odmrażania oraz degradację. Wyniki analizy słów kluczowych zaprezentowano na Rysunku 27. Wizualizacja sieciowa przedstawia gęstość występowania słów kluczowych oraz częstotliwość ich powiązań – wielkość węzła odpowiada liczbie wystąpień danego słowa, a linie między węzłami ilustrują ich korelacje. Identyfikowano siedem klastrów tematycznych, odpowiadających blisko powiązanym grupom publikacji:

- Klaster 1 (czerwony, 30 elementów) – obejmuje zagadnienia karbonatyzacji, mikrotwardości, pęknięć, penetracji chlorków i ich związków, metod numerycznych i symulacji komputerowych.
- Klaster 2 (zielony, 26 elementów) – dotyczy wydajności mechanicznej, przepuszczalności, gęstości, wapna hydratyzowanego i krzemionki.
- Klaster 3 (niebieski, 26 elementów) – zawiera tematykę betonu samozagęszczającego się, wytrzymałości na rozciąganie, zrównoważonego rozwoju, włókien oraz właściwości mechanicznych i trwałości.
- Klaster 4 (żółty, 24 elementy) – odnosi się do trwałości, porowatości, odporności na mróz oraz cykli zamrażania i odmrażania.
- Klaster 5 (fioletowy, 17 elementów) – koncentruje się na rozbiórkach, betonie wysokiej wytrzymałości, cemencie i mieszankach betonowych.
- Klaster 6 (błękitny, 13 elementów) – dotyczy recyklowanych kruszyw, popiołów lotnych oraz geopolimerów.
- Klaster 7 (pomarańczowy, 7 elementów) – obejmuje wytrzymałość na zginanie, rozmiar cząstek oraz skaningową mikroskopię elektronową.



Rysunek 25. Proces tworzenia wizualizacji sieci słów kluczowych



Rysunek 26. Rozkład publikacji według dziedzin tematycznych

Tabela 13. Kategorie dokumentów

Typ dokumentu	Liczba publikacji
Artykuł	210
Referat konferencyjny	19
Artykuł przeglądowy	9
Rozdział w książce	3
Recenzja konferencyjna	1

Tabela 14. Pięć najczęściej publikujących czasopism

Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	Łączna liczba cytowań
<i>Construction and Building Materials</i>	57	2797
<i>Journal of Building Engineering</i>	15	667
<i>Journal of Cleaner Production</i>	12	861
<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>	12	95
<i>Materials</i>	11	145

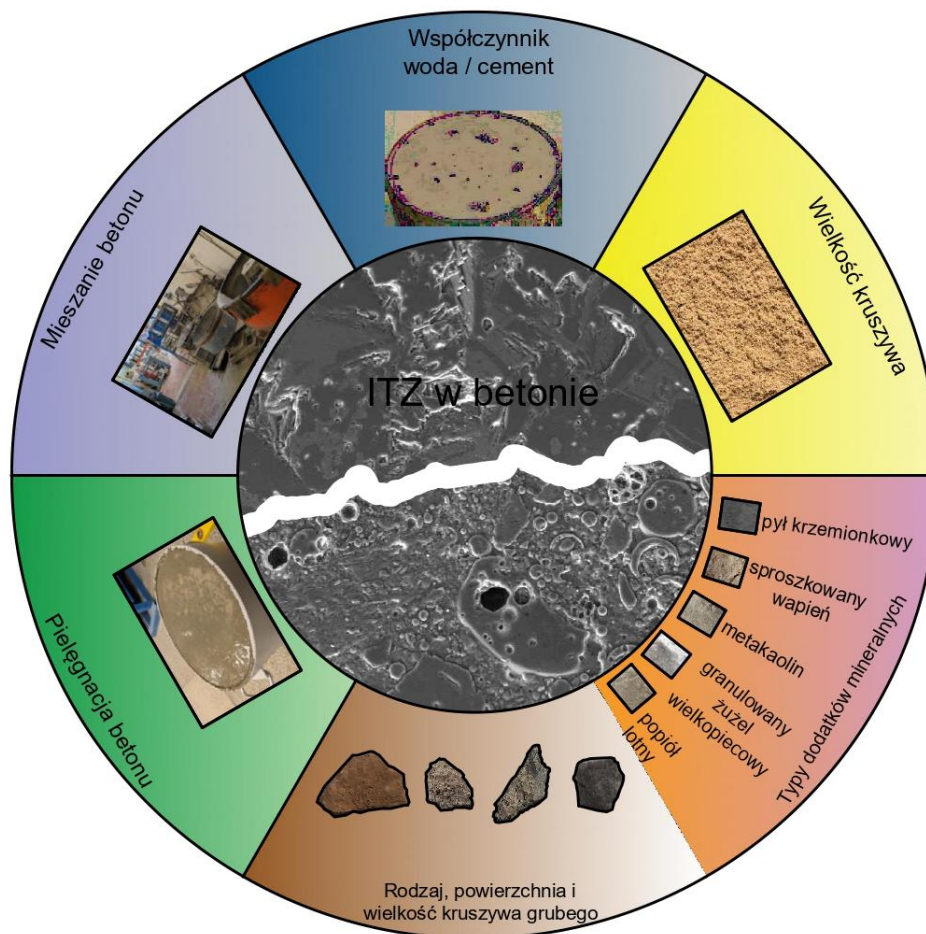
Tabela 15. Prace przeglądowe w analizowanym zbiorze bibliometrycznym (zestawienie tytułów, lat i czasopism – bez tłumaczenia nazw własnych)

Nazwa publikacji przeglądowej	Rok wydania	Czasopismo
<i>Progress in developing self-consolidating concrete (SCC) constituting recycled concrete aggregates: A review</i>	2021	<i>International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials</i>
<i>Enhancing the quality of recycled coarse aggregates by different treatment techniques—a review</i>	2021	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>
<i>Evaluation indexes of the frost resistance of recycled aggregate concrete and improvement mechanisms: A review</i>	2024	<i>Journal of Building Engineering</i>
<i>Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste – Current state-of-the art and perspectives</i>	2023	<i>Construction and Building Materials</i>
<i>Design and preparation methods for high-performance recycled aggregate concrete: a review</i>	2024	<i>Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management</i>
<i>The Impact of Fiber Reinforcement on Fresh and Physical Properties with Durability of Recycled Coarse Aggregate Concrete: A Review</i>	2023	<i>Journal of Engineering Science and Technology Review</i>
<i>Progress in the research of carbonation resistance of RAC</i>	2020	<i>Construction and Building Materials</i>
<i>Unraveling the Interplay of Physical-Chemical Factors Impacting the Carbonation Performance of Recycled Aggregate Concrete</i>	2023	<i>Materials</i>
<i>Effective recycling of surface modification aggregate using microwave heating</i>	2014	<i>Journal of Advanced Concrete Technology</i>

Tabela 16. Piętnaście najczęściej występujących słów kluczowych

Nr	Słowo kluczowe	Liczba wystąpień	Łączna siła powiązań
1	<i>concrete aggregates</i>	180	2074
2	<i>recycling</i>	166	1997
3	<i>interfacial transition zone</i>	136	1587
4	<i>compressive strength</i>	118	1435
5	<i>recycled coarse aggregate</i>	107	1216
6	<i>recycled aggregate concrete</i>	107	1103
7	<i>aggregates</i>	81	986
8	<i>concretes</i>	56	695
9	<i>scanning electron microscopy</i>	48	616
10	<i>microstructure</i>	48	614
11	<i>mortar</i>	52	598
12	<i>cements</i>	42	562
13	<i>mechanical properties</i>	46	558
14	<i>water absorption</i>	41	556
15	<i>tensile strength</i>	38	541

głównie pod wpływem efektu ściany (ang. *wall effect*), obserwowanego w pobliżu dużych ziaren kruszywa, oraz efektu narastania (ang. *accumulation effect*), wynikającego z gradientu koncentracji i dyfuzji produktów hydratacji względem odległości od powierzchni kruszywa. Zestawienie kluczowych czynników wpływających na ITZ przedstawiono na Rysunku 28.



Rysunek 28. Parametry bezpośrednio i pośrednio wpływające na ITZ w betonie

3.3.3.1. Mieszanie i dojrzewanie betonu

Proces mieszania i dojrzewania betonu odgrywa zasadniczą rolę w kształtowaniu właściwości ITZ. W początkowej fazie hydratacji, cząstki cementu stykające się z wodą rozpoczynają reakcję, prowadząc do powstania produktów hydratacji pierwszego rzędu. W wyniku nierównomiernego kontaktu cząstek cementu z powierzchnią kruszywa, w ITZ rozwija się mikrostruktura o podwyższonej porowatości. Odpowiedni dobór technik mieszania może istotnie wpłynąć na mikrostrukturę kruszywa grubego z recyklingu już podczas procesu mieszania. Techniki te klasyfikuje się na podstawie liczby etapów w stosunku do konwencjonalnego mieszania (ang. *Normal Mixing*, NM), przy czym najczęściej stosowane są metody dwuetapowa (ang. *Two-Step Mixing*, TSM) oraz trójetapowa (ang. *Triple Mixing*, TM). Celem ich stosowania jest uzyskanie cienkiej warstwy zaczynu cementowego wypełniającego pory i rysy, przy jednoczesnym zapewnieniu skutecznego mieszania. Przykład zastosowania metody TSM zaprezentowano w [297], gdzie autorzy najpierw mieszały drobne i grube kruszywo przez 60 sekund. Następnie dodawano połowę wody i domieszki uplastyczniającej, kontynuując mieszanie przez kolejne 60 sekund, po czym wprowadzano cement i popiół lotny

(30 s). Ostatecznie dodano pozostałą wodę oraz superplastyfikator, mieszając przez 120 sekund. Dodatkowo zastosowano pył krzemionkowy jako częściowy zamiennik popiołu lotnego w różnych proporcjach (2–8%). Zaobserwowano, że takie podejście umożliwiało efektywne wypełnienie rys i porów ITZ oraz aktywację wtórnych reakcji pucolanowych – zwłaszcza między portlandytem a SiO_2 – prowadzących do powstania dodatkowego żelu C–S–H. Zjawisko to wpływało korzystnie na parametry wytrzymałościowe i trwałościowe betonu z kruszywem grubym z recyklingu. Również inne badania [371] potwierdziły, że zastosowanie metody TSM sprzyja uzyskaniu bardziej jednorodnej i zagęszczonej mikrostruktury ITZ w porównaniu do betonu mieszanego konwencjonalnie. We wczesnych etapach hydratacji wyższy współczynnik W/C w pobliżu kruszywa skutkuje powstawaniem dużych skupisk kryształów o dużej porowatości [400]. W miarę postępu hydratacji (około 28 dni), produkty hydratacji wypełniają pory ITZ, prowadząc do zagęszczenia mikrostruktury. Ruchliwe jony, takie jak Ca^{2+} , migrują z matrycy cementowej i krystalizują w porach ITZ, dalej redukując porowatość. Mikrostruktura ITZ stopniowo upodabnia się do otaczającej matrycy cementowej [415]. Niemniej jednak, ITZ przez dłuższy czas pozostaje najbardziej podatnym na uszkodzenia obszarem betonu, wykazując relatywnie wyższą porowatość i przepuszczalność. Jak podkreślono w [135], właściwości mechaniczne i trwałość betonu, w szczególności wytrzymałość betonu na ściskanie i jego bezpieczeństwo eksploatacyjne zależą nie tylko od mikrostruktury, ale także od poziomów naprężeń inicjujących i krytycznych, które wyznaczają początek i rozwój destrukcji materiału. Zależności te są ściśle powiązane z czynnikami technologicznymi oraz właściwościami struktury betonu, w tym strefy przejściowej ITZ. Beton uzyskuje swoje końcowe właściwości w momencie, gdy stopień hydratacji osiągnie 100%, co jednak praktycznie nie jest możliwe [389]. Proces hydratacji jest rozłożony w czasie i choć po okresie najintensywniejszej hydratacji zmiany są już niewielkie, proces hydratacji może postępować latami, a w masywniejszych konstrukcjach nawet dziesiątkami lat. W praktyce przyjmuje się, że wiek 28 dni odpowiada dojrzałości betonu, na podstawie której norma PN-EN 1992-1-1 odnosi klasę betonu do jego wytrzymałości 28-dniowej.

3.3.3.2. Rodzaj kruszywa

Kolejnym kluczowym czynnikiem wpływającym na jakość ITZ jest powierzchnia kruszywa, w szczególności jego chropowatość i porowatość. W badaniu [429] wykazano, że większa chropowatość powierzchni kruszywa grubego z recyklingu sprzyja penetracji zaczynu cementowego, co wzmacnia mechaniczne i fizyczne wiązanie między kruszywem a zaczynem. Jednakże inne prace [206] wskazują, że strefa ITZ między starą zaprawą a nowym zaczynem charakteryzuje się największymi defektami porowatości, co jest jedną z głównych przyczyn obniżonej wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem grubym z recyklingu. W badaniach [72] stwierdzono, że ITZ w kruszywie grubym z recyklingu wykonanym z odpadu betonowego wykazuje wyższy moduł sprężystości niż ITZ zawierające materiały organiczne (np. drewno, asfalt, tworzywa sztuczne). Grubość ITZ wynosiła odpowiednio: dla betonu – 55 μm , drewna – 60 μm , asfaltu – 65 μm , natomiast w przypadku kruszywa grubego naturalnego mieściła się w zakresie 10–50 μm . Prace te podkreślają konieczność eliminacji frakcji organicznych z kruszywa grubego z recyklingu ze względu na ich niekorzystny wpływ na jakość wiązania w ITZ. W [89] wykazano również, że ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu z odpadów betonowych miała wyższy moduł sprężystości i twardość w porównaniu do betonu

z naturalnym kruszywem lub kruszoną cegłą. Zjawisko to tłumaczone jest dużym udziałem żelu C–S–H o korzystnych właściwościach mikromechanicznych oraz sprzyjającą geopolimeryzacji obecnością wapnia, krzemu i glinu. Badania [326] przeprowadzone z użyciem odpadów prefabrykowanych jako kruszywem grubym wykazały, że dodatkowy interfejs pomiędzy starym zaczynem a nowym spoiwem zapewnia lepsze wiązanie niż w przypadku naturalnego kruszywa.

3.3.3.3. Dodatki mineralne

Dodatki mineralne stanowią powszechnie stosowany środek modyfikujący mikrostrukturę betonu, w tym ITZ. W szczególności pył krzemionkowy, metakaolin, popiół lotny, żużel wielkopiecowy oraz sproszkowany wapień wpływają na poprawę upakowania ziaren, zmniejszenie współczynnika W/C oraz zagęszczenie strefy przejściowej. W cytowanym wcześniej badaniu [297] wykazano, że zastąpienie popiołu lotnego pyłem krzemionkowym do 8% prowadzi do wypełnienia porów ITZ oraz poprawy jej mikrostruktury. Badania [302] wskazują, że dodatek 10% pyłu krzemionkowego zmniejsza grubość ITZ z 50 μm do 10 μm , podwajając wytrzymałość na ścinanie i energię pękania. W innym badaniu [416] oszacowano optymalną zawartość pyłu na poziomie 9%, powyżej którego nie obserwowano dalszej poprawy właściwości ITZ. Dane te jednoznacznie wskazują, że dodatki mineralne umożliwiają formowanie bardziej zwartych i odpornościowych stref przejściowych, co przekłada się na wyższe parametry użytkowe betonu.

3.3.3.4. Typy ITZ

Istotnym aspektem jest również złożona struktura ITZ – występują tu strefy przejściowe pomiędzy pierwotnym kruszywem a starą matrycą, jak również pomiędzy nową matrycą a elementami kruszywa grubego z recyklingu. Według [206], dla kruszywa o rozmiarach 10–16 mm, szerokość ITZ₄ (między kruszywem a nową matrycą, Rysunek 20) wynosiła do 50 μm , a jej moduł sprężystości i mikrotwardość były wyraźnie obniżone. Ponadto, stare ITZ tj. ITZ₃ (kruszywo grube z recyklingu–stara zaprawa) i ITZ₂ (nowa zaprawa–stara zaprawa) – wykazywały jeszcze gorsze właściwości mechaniczne oraz większą podatność na koncentrację naprężeń i inicjację mikrorys. Badanie [411] wykazało, że grubość ITZ wzrasta z wiekiem dojrzewania betonu (do 55–65 μm po 90 dniach), a różnice w ich modułach sprężystości wpływają na rozwój rys i integralność strukturalną betonu. Dla omawianego badania średni moduł wciskania starego ITZ wynosi 70–80% modułu wciskania starej matrycy cementowej, podczas gdy średni moduł wciskania nowego ITZ wynosi 80–90% modułu wciskania nowej matrycy cementowej. W przypadku starego ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu, najniższy moduł występuje w odległości około 20–30 μm od powierzchni kruszywa. Natomiast w przypadku nowego ITZ najniższy moduł znajduje się w odległości 10–20 μm od powierzchni kruszywa.

3.3.3.5. Inne czynniki

Badania [76] dowodzą, że zmienność mikrostruktury ITZ pozostaje również pod wpływem parametrów projektowych mieszanki betonowej. dla betonów klasy C25, C35 i C45 z pełnym zastąpieniem kruszywa grubego naturalne przez recyklingowe zaobserwowano zwiększoną porowatość i niższą zawartość niezwiązanego cementu, co wiązano z oddziaływaniem wody

nasyconej z kruszywem grubym z recyklingu. Zmniejszenie W/C poprawiało mikrostrukturę. Inne prace [180] wskazują, że projektowanie mieszanki – w tym dobór W/C i wielkości kruszywa – ma istotny wpływ na ITZ. Przykładowo, zmniejszenie średnicy ziaren cementu skutkowało redukcją grubości ITZ o 30% i jednoczesnym wzrostem wytrzymałości o 20%. Inne prace [231] wykazały, że zastosowanie włókien polipropylenowych w SCC z RCA przyczyniło się do poprawy spójności ITZ i zmniejszenia mikropęknięć. W [201] zbadano wpływ stosunku piasek/kruszywo (S/A) – gdzie większy udział piasku sprzyjał adhezji, jednak zbyt wysoki S/A prowadził do wypierania zaczynu i osłabienia hydratacji. Zarówno nadmiar, jak i niedobór frakcji drobnych prowadziły do niekorzystnych zmian w strukturze ITZ.

3.3.4. Metody poprawy strefy przejściowej ITZ

Zgodnie z [97], dwa kluczowe czynniki decydują o trwałości betonu: porowatość oraz strefa ITZ. W związku z tym, niniejsza sekcja przedstawia wyniki badań dotyczących poprawy jakości ITZ oraz jej wpływu na właściwości betonu RAC. Szczególny nacisk położono na badania analizujące efektywność ITZ w kontekście zastosowania kruszywa grubego z recyklingu. Na podstawie przeglądu literatury, zidentyfikowane metody poprawy zostały sklasyfikowane w pięć grup, co zestawiono w Tabeli 17.

3.3.4.1. Metody mieszania

Jak wskazano w poprzedniej sekcji, wybór odpowiedniej techniki mieszania może istotnie wpływać na mikrostrukturę kruszywa grubego z recyklingu. Metody mieszania zwykle klasyfikuje się w zależności od liczby etapów w porównaniu z tradycyjnym mieszaniem (NM), przy czym wyróżnia się głównie mieszanie dwuetapowe (TSM) oraz mieszanie trzyetapowe (TM) – Rysunek 29. Metody te różnią się liczbą etapów, czasem mieszania, kolejnością dodawania składników oraz obecnością domieszek i dodatków. Idea stojąca za zwiększoną liczbą etapów polega na wstępnym pokryciu RCA cienką warstwą zaczynu cementowego, co pozwala na ograniczenie jego wysokiej nasiąkliwości oraz wypełnienie porów i mikropęknięć. Pozostała część wody dodawana jest w dalszym etapie w celu zakończenia procesu mieszania.

3.3.4.2. Obróbka kruszywa grubego z recyklingu

Kluczowym aspektem wzmocnienia kruszywa grubego z recyklingu jest obróbka starego zaczynu cementowego. Może on być usuwany mechanicznie (przez szlifowanie), czyszczony ultradźwiękami, poddawany obróbce termicznej lub chemicznej. Istnieją również metody wzmocniania starego zaczynu, takie jak zastosowanie zawiesiny metakrzemianu wapnia, techniki powlekania, obróbka cementowa, wykorzystanie asfaltu na ciepło, wapna hydratyzowanego, nanomateriałów, superplastyfikatorów, metody biologicznej depozycji, preparatów hydrofobizujących na bazie silanów czy roztworów polimerowych [298]. Każda z tych metod poprawia jakość kruszywa grubego z recyklingu oraz w różnym stopniu wpływa na jego właściwości mechaniczne i trwałość [293].

3.3.4.3. Obróbka karbonatyzacyjna

Zastosowanie utwardzania przy użyciu dwutlenku węgla (CO₂) stanowi realną alternatywę dla tradycyjnej obróbki kruszywa grubego z recyklingu. Choć proces ten wymaga relatywnie długiego czasu, zapewnia on skuteczniejsze polepszenie właściwości kruszywa grubego

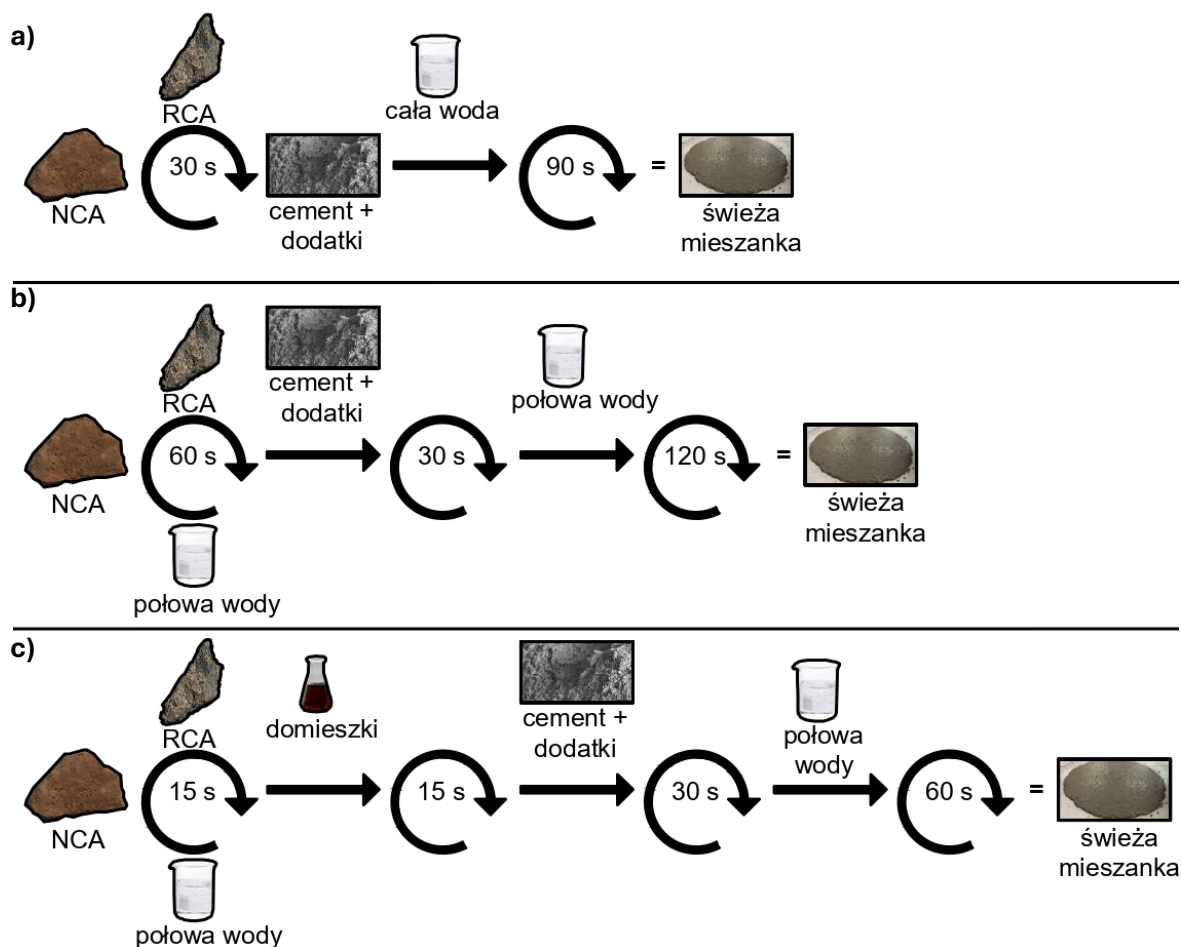
z recyklingu [396]. Podczas przyspieszonej karbonatyzacji, CO₂ przenika do porów starego zaczynu przylegającego do kruszywa grubego z recyklingu i reaguje chemicznie z wodorotlenkiem wapnia (Ca(OH)₂) oraz innymi produktami hydratacji cementu obecnymi w starym zaczynie. W wyniku tej reakcji powstają węglany wapnia (CaCO₃) oraz żele krzemianowo-wapniowe (C-S-H), które przyczyniają się do zagęszczenia struktury kruszywa poprzez zwiększenie objętości fazy stałej i wypełnienie istniejących porów oraz mikropęknięć [289]. W konsekwencji, karbonatyzacja skutecznie zmniejsza porowatość i nasiąkliwość kruszywa, a także poprawia jakość ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu bez wprowadzania zanieczyszczeń. Co więcej, metoda ta posiada wymiar ekologiczny, poprzez wychwytywanie CO₂ z przemysłu [20], co przyczynia się do redukcji emisji gazów cieplarnianych. Proces ten wykazuje znaczący potencjał w kontekście zrównoważonego rozwoju w inżynierii lądowej. Jednakże, dla optymalizacji mineralizacji konieczne jest uwzględnienie takich czynników jak: ciśnienie karbonatyzacji, czas trwania procesu oraz początkowa wilgotność kruszywa grubego z recyklingu.

3.3.4.4. Pochodzenie kruszywa grubego z recyklingu

Przegląd literatury [214] oraz badania własne [215] wykazują, że elementy prefabrykowane oraz odpady z obiektów budowanych z wysokiej jakości betonu charakteryzują się brakiem gwałtownego pogorszenia właściwości w kontekście zastosowania w ekobetonie. Otwiera to możliwość dla przemysłu prefabrykacji do ponownego wykorzystania własnych odpadów bez konieczności ich specjalistycznej obróbki oraz bez znaczącego pogorszenia parametrów betonu.

3.3.4.5. Dodatki mineralne

Dotychczasowe badania wykazały, że stosowanie dodatków pucolanowych oraz mineralnych dodatków do cementu (ang. *Supplementary Cementitious Materials*, SCM) może znacząco poprawić właściwości ITZ. Zarówno efekt fizyczny (efekt wypełnienia), jak i reakcje chemiczne (reakcje pucolanowe) prowadzą do uszlachetnienia mikrostruktury, co w konsekwencji przekłada się na poprawę właściwości betonu w skali makro [102]. Prowadzono szeroko zakrojone badania nad ITZ w betonie z kruszywem grubym z recyklingu z udziałem różnych SCM, takich jak: dym krzemionkowy, pył stalowy, spoiwa geopolimerowe oraz popiół lotny [93] [209]. Jednak większość badań koncentruje się na wpływie pojedynczego dodatku na wybraną cechę ITZ, przy ograniczonej liczbie analiz zbiorczego wpływu wielu ITZ na ogólne właściwości betonu z kruszywem grubym z recyklingu. Konieczne są dalsze badania w celu wyjaśnienia mechanizmów, poprzez które dodatki mineralne modyfikują wielokrotnie struktury ITZ, redukują porowatość oraz umożliwiają optymalizację kompozycji SCM w celu poprawy właściwości ITZ w różnych typach betonu z kruszywem grubym z recyklingu.



Rysunek 29. Metody mieszania: a) mieszanie konwencjonalne (NM), b) mieszanie dwuetapowe (TSM), c) mieszanie trzyetapowe (TM)

3.3.5. Luki badawcze

W ostatnich dekadach intensywne badania skupiały się na ograniczaniu przepuszczalności oraz zwiększaniu trwałości betonu z kruszywem grubym z recyklingu [193] [380] [417]. Jak wcześniej wspomniano, poprawa tych właściwości ściśle wiąże się z wzmocnieniem strefy ITZ. Niemniej jednak nie wszystkie badania eksponują znaczenie mikrostruktury kruszywa grubego z recyklingu i jej obórki, stąd zaproponowano podział metod modyfikacji kruszywa na cztery podstawowe strategie:

- 1) Usuwanie przylegającej zaprawy (np. szlifowanie mechaniczne, zanurzenie w kwasie). Skuteczne w poprawie jakości kruszywa grubego z recyklingu, jednak związane z wysokimi kosztami, stratami materiałowymi oraz problemami zrównoważonego rozwoju.
- 2) Udoskonalanie matrycy cementowej (np. materiały pucolanowe, środki hydrofobowe, nanomateriały). Materiały pucolanowe są ekonomiczne, lecz opóźniają przyrost wytrzymałości; środki hydrofobowe zmniejszają nasiąkliwość, ale mogą osłabiać wiązanie; nanomateriały oferują znakomite właściwości, lecz są kosztowne i trudne w aplikacji.

- 3) Optymalizacja procesu mieszania (np. mieszanie TCM i TM): Pomaga zniwelować wysoką porowatość kruszywa grubego z recyklingu.
- 4) Wzmacnianie kruszywa grubego z recyklingu (powłoki, nanomateriały, karbonatyzacja, bio-depozycja). Powlekanie jest najbardziej praktyczne w zastosowaniach wielkoskalowych. Karbonatyzacja i bio-depozycja są zrównoważone środowiskowo, podczas gdy nanomateriały dają najlepsze efekty, lecz kosztem wysokiej ceny.

Obecność przylegającej zaprawy negatywnie wpływa na mikrostrukturę betonu, ograniczając jego właściwości mechaniczne i trwałość. Dlatego też skuteczna modyfikacja ITZ jest kluczowa. Każda z metod ma swoje zalety (Tabela 18), a wybór zależy od priorytetów projektowych, takich jak równowaga między parametrami mechanicznymi a zrównoważonym rozwojem. Autor podkreśla również wagę doboru odpowiedniego źródła kruszywa grubego z recyklingu, szczególnie z rozbiórek prefabrykatów betonowych, które zapewniają jednorodność i przewidywalność właściwości kruszywa. W wielu badaniach brak jest uwzględnienia wpływu źródła kruszywa (różne prefabrykаты, różny wiek, różne systemy), co może istotnie różnicować wyniki; uogólnienia bez takiego rozróżnienia są słabo umocowane. Niektóre prace nie podają wystarczająco szczegółowej charakterystyki kruszywa grubego z recyklingu (np. zawartości starej zaprawy, stopnia degradacji, historii eksploatacyjnej), co utrudnia ocenę powtarzalności wyników oraz ich przydatności w innych badaniach i warunkach technologicznych.

Pomimo znacznego postępu, istnieje szereg istotnych luk w wiedzy:

1) Charakterystyka mikrostrukturalna i modelowanie

Mechanizmy na poziomie nanoskali, odpowiedzialne za formowanie ITZ, degradację produktów hydratacji oraz progresję uszkodzeń, pozostają słabo poznane [129]. Rola nanomateriałów (np. nano-krzemionki, tlenku grafenu) w modyfikacji ITZ wymaga dalszych badań [415] [240] [241]. Brakuje kompleksowych modeli umożliwiających dokładne prognozowanie zachowania ITZ w różnych warunkach środowiskowych i obciążeniowych, jak również zrozumienia mechanizmów progresji zniszczenia [366] [397]. Dotychczas nie opracowano wiarygodnej metody umożliwiającej jednoznaczne oddzielenie ITZ od matrycy cementowej oraz dokładne określenie jej grubości [386].

2) Trwałość długoterminowa i zachowanie mechaniczne

Konieczne są dane dotyczące ewolucji ITZ w czasie pod wpływem czynników środowiskowych, cykli zamarzania-odmarzania, ataków siarczanowych i chlorkowych [399]. Wciąż niejasne pozostaje, jak wskaźnik zastąpienia kruszywa naturalnego na recyklingowe wpływa na długoterminowe obciążenie oraz degradację betonu [59]. Ograniczeniem wielu cytowanych badań jest brak analizy ewolucji mikrostruktury ITZ w długim okresie dojrzewania; obserwacje ograniczają się do wczesnych stadiów, co osłabia wnioski o trwałości.

3) Standaryzacja metod badawczych

Brak jednolitych metod oceny ITZ (np. grubości, porowatości, właściwości mechanicznych) utrudnia porównywalność wyników między badaniami. Nie istnieją także znormalizowane procedury oceny efektywności metod modyfikacji kruszywa grubego z

recyklingu pochodzącego z różnych źródeł. Niezbędne jest opracowanie spójnej metodologii oceny cech ITZ.

4) Skalowanie do zastosowań praktycznych

Dotychczasowe badania prowadzone są głównie w warunkach laboratoryjnych. Wciąż nie wiadomo, jak beton z modyfikowaną ITZ sprawdzi się w rzeczywistych zastosowaniach budowlanych. Tym samym, opłacalność i wykonalność wdrażania strategii ulepszania ITZ w skali przemysłowej pozostaje niewystarczająco zbadana. W celu przewyższenia powyższych luk konieczne są: zaawansowane techniki obrazowania mikrostruktury, długoterminowe badania trwałości oraz standaryzowane metody testowe. Przyszłe badania powinny również wykorzystywać sztuczną inteligencję oraz uczenie maszynowe w celu prognozowania zachowania ITZ i optymalizacji składu mieszanek betonu z kruszywem grubym z recyklingu dla zrównoważonego i wysoce wydajnego betonu.

Jak zaprezentowano na Rysunku 27, coraz więcej badaczy wskazuje karbonatyzację jako obiecującą metodę modyfikacji kruszywa grubego z recyklingu, przy czym istotny postęp w tej dziedzinie obserwowany jest od około 2020 roku. Karbonatyzacja jest szczególnie skuteczna w zmniejszaniu przepuszczalności betonu z kruszywem grubym z recyklingu poprzez bezpośrednie ulepszanie właściwości ITZ. Jej efektywność zależy jednak od takich czynników jak pierwotny skład cementowy kruszywa grubego z recyklingu [224] oraz dostępność ciągłego źródła CO₂ [30]. Mimo potencjału karbonatyzacji, konieczne są dalsze badania nad optymalizacją tej metody w zależności od źródła kruszywa grubego z recyklingu i warunków budowy. Szczególnie istotne wydaje się pogłębione zrozumienie procesów karbonatyzacji przyspieszonej w kontekście wdrożenia przemysłowego [347]. Według [397], wzmacnianie kruszywa – zwłaszcza poprzez karbonatyzację oraz otuliny cementowe (ang. *slurry wrapping*) – ma najwyższy potencjał praktyczny, ze względu na prostotę operacyjną, łatwość kontroli oraz niskie koszty. Praktyczne wnioski dotyczące szacowania szerokości rys [146] mogą być użyteczne przy projektowaniu mieszanki SCC z RCA, by zmniejszyć ryzyko powstawania defektów powierzchniowych. W porównaniu do metody otulin cementowych, karbonatyzacja trwa dłużej, lecz zapewnia skuteczniejsze ulepszenie właściwości kruszywa z recyklingu. W świetle obecnych trendów można oczekiwać, że przyszłe badania będą skupiać się na doskonaleniu procesu karbonatyzacji i jego zastosowaniu w przemyśle.

Tabela 17. Ulepszenia strefy przejściowej ITZ i ich wpływ na właściwości mechaniczne betonu z kruszywem grubym z recyklingu

Ulepszenie ITZ	Podejście	Wyniki dla ITZ	Wpływ ITZ na beton	Źródło
Mieszanie betonu	TSM	Pęknięcia w kruszywie grubym z recyklingu zostają wypełnione po zastosowaniu TSM, co skutkuje silniejszą i gęstszą strefą ITZ.	Poprawa wytrzymałości na ściskanie o 21,19%, 20,64% i 13,94% po 28 dniach dla betonu z 20%, 25% i 30% zastąpieniem kruszywa grubego naturalnego.	[371]
	TSM z dodatkiem do 8% pyłu krzemionkowego jako zamiennik popiołu lotnego, dodanym w etapie wstępnego mieszania	Zaczyn cementowy z krzemionką pokrywa kruszywo grube z recyklingu, wypełniając pęknięcia i pory, co skutkuje silniejszym ITZ. Analiza mikrostruktury potwierdza poprawę ITZ dzięki TSM.	Dodanie 7% pyłu krzemionkowego przy TSM powoduje poprawę: wytrzymałości na zginanie (4,4%), ściskanie (13,8%), rozciąganie (6,3%) i modułu sprężystości (5,7%) w betonie z 100% zawartością kruszywa grubego z recyklingu w porównaniu do betonu z kruszywem naturalnym.	[297]
	TSM	TSM skutecznie zmniejsza wielkość i wpływ warstwy wodnej oraz kryształów CH wokół kruszywa grubego z recyklingu. Zmniejsza się porowatość, a uwodnienie wzmacnia tworzenie C–S–H. ITZ zawiera mniej porów i faz CH niż stare i nowe ITZ z kruszywem naturalnym. Występuje gęsta i silna strefa o wysokim module wglębiania (najprawdopodobniej kryształy CaCO_3 pokrywające kruszywo).	Mniejsza objętość porów i faz CH w ITZ dla TSM niż w starym ITZ oraz nowym ITZ przy klasycznym mieszaniu. Wytrzymałość na ściskanie betonu z TSM porównywalna z betonem zawierającym wyłącznie kruszywo grube naturalne.	[394]
	TM	Pokryte cząstki pucolanowe zużywają CH w porach i na powierzchni przylegającej zaprawy, tworząc nowe produkty hydratacji.	Wytrzymałość na ściskanie oraz odporność na przenikanie jonów chlorkowych została poprawiona dzięki TM.	[177]
Obróbka kruszywa grubego z recyklingu	Kwas octowy (5% roztwór, zanurzenie na 7 dni, następnie 10 min szorowania)	Twardość mikroskopowa ITZ (Vickers) była wyższa niż w przypadku betonu z nieobrobionym kruszywem grubym z recyklingu – poprawa o 32,9% ($\text{W/C} = 0,4$) i 9,8% ($\text{W/C} = 0,7$). Obecność jonów Ca i Si z roztworu odpadowego mogła pozytywnie wpłynąć na tworzenie C-S-H. Grubość ITZ była porównywalna z betonem z kruszywa grubego naturalnego.	Tylko 6,2% spadek wytrzymałości na ściskanie przy zastosowaniu 50% kruszywa grubego z recyklingu w porównaniu z betonem z kruszywem grubym naturalnym. Przy 25% zawartości kruszywa grubego z recyklingu i niskim W/C uzyskano o 4,2% większą rezystywność niż w przypadku betonu ref.	[379]
	Powlekanie zaczynem: 100% cement + 100% woda + 15% popiół lotny, 60 minut moczenia, 5 minut mieszania, suszenie 24h w pomieszczeniu, następnie 7 dni dojrzewania i suszenie w 50°C	Nowa strefa styku wypełniona produktami hydratacji, mikropęknięcia zanikły, a wytrzymałość ITZ wzrosła. Brak widocznego interfejsu między warstwą a nową zaprawą dowodzi zintegrowania obu.	Wytrzymałość na ściskanie wzrosła o 3,0–7,8%, współczynnik migracji chlorków spadł o 15,5–32,5% w porównaniu do betonu z nieobrobionym kruszywem grubym z recyklingu.	[396]

Ulepszenie ITZ	Podejście	Wyniki dla ITZ	Wpływ ITZ na beton	Źródło
	Wzmacnianie kruszywa i zaprawy przez zanurzenie go w roztworze nano-SiO ₂	Wzmocnienie zaprawy zwiększyło twardość i gęstość nowej zaprawy. Wzmocnienie kruszywa poprawiło jakość starej zaprawy, zmniejszając szerokość ITZ ₂ i ITZ ₃ .	Wytrzymałość na ściskanie wzrosła o 10,41–16,15% w porównaniu do betonu z nieobrobionym kruszywem. Rozciąganie przy rozłupywaniu wzrosło o 19,16%. Zmniejszyło się ryzyko uszkodzeń kruszywa.	[101]
	Obróbka bio-cementem (naniesienie bakterii, a potem cieczy cementacyjnej co 12h przez 8 dni)	Powstały kryształy CaCO ₃ głęboko w porach starej zaprawy. Obszar poddany bio-cementacji zawierał o 21% więcej jonów wapnia.	Znaczne zmniejszenie nasiąkliwości. Wytrzymałość przekroczyła tę osiąganą z kruszywem grubym naturalnym średnio o 7,32 MPa. Typ zarysowań podobny jak przy betonie ref.	[229]
Zapewnienie jakości betonu macierzystego w kruszywie grubym z recyklingu	Źródło kruszywa grubego z recyklingu – odrzucone w produkcji prefabrykaty	Dodatkowy interfejs między starą a nową zaprawą zapewniał lepsze wiązanie niż w przypadku kruszywa grubego naturalnego.	Obecność niezhidratyzowanego cementu na kruszywie grubym z recyklingu zwiększyła wytrzymałość. Wytrzymałość na ściskanie wzrosła po 28 dniach o 7,7–13,8% w porównaniu z kruszywem grubym naturalnym. Moduł dynamiczny zmalał z 13,8% do 4,3%.	[326]
	Źródło kruszywa grubego z recyklingu – belki, słupy i rygle prefabrykowane (30–50 MPa)	Podwójne kruszenie i suche kruszywo grube z recyklingu ułatwiły wiązanie kruszywa z nową zaprawą, poprawiając ITZ i sztywność.	100% zawartości kruszywa grubego z recyklingu zwiększyła wytrzymałość na ściskanie o 15–20%, ale zmniejszyło moduł sprężystości o 5–7% z powodu niższej sztywności kruszywa.	[98]
	Źródło kruszywa grubego z recyklingu – odrzucone komponenty betonowe	Więcej cementu = wyższa gęstość ITZ. Więcej kruszywa grubego z recyklingu = większa porowatość efektywna. Roczna karbonatyzacja naturalna – pomijalna.	Opóźniona hydratacja i większa elastyczność starej zaprawy wpłynęły pozytywnie. W środowisku SO ₂ niewielki wzrost masy i wytrzymałości.	[97]
Karbonatyzacja	Najlepsze warunki: wilgotność kruszywa grubego z recyklingu 1,81%, ciśnienie 1 bar, czas 3 h	Grubość ITZ ₂₋₄ zmniejszona o 14–17%, moduł sprężystości wzrósł o 18–41%. Moduły starej i nowej zaprawy wzrosły o 11,7% i 26,9%.	Zwiększona wytrzymałość na ściskanie i odporność na przenikanie chlorków. Wytrzymałość korelowała z modulem ITZ ₃ .	[407]
	Kruszywo grube z recyklingu moczone w nasyconej wodzie wapiennej i karbonatyzowane przez 24 h pod ciśnieniem 0,30 MPa	Im słabsza ITZ, tym większe korzyści z karbonatyzacji. Poprawa przez efekt zarodkowania, reakcje chemiczne kalcytu i efekt mikroseparacji.	Właściwości mechaniczne betonu kontrolowane przez ITZ ₂ . Poprawa wytrzymałości dla 70% zawartości kruszywa grubego z recyklingu: +3,14 MPa, dla 100%: +4,24 MPa.	[405]
	Nasączenie kruszywa grubego z recyklingu zaczynem cementowym, mieszanie 4 min (60 rpm), suszenie. Karbonatyzacja: T = 20±2°C, RH = 70±5%, CO ₂ = 20±2% aż do braku zmiany fenoloftaleiny	Obniżona nasiąkliwość i wskaźnik kruszenia, naprawa powierzchni, zmniejszenie kąta zwilżania o 17,03°. Powstanie CaCO ₃ z CO ₂ wzmacnia ITZ.	Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i rozłupywanie do 20% po 28 dniach w porównaniu z betonem nieobrobionym.	[92]

Ulepszenie ITZ	Podejście	Wyniki dla ITZ	Wpływ ITZ na beton	Źródło
Dodatki mineralne	Zastąpienie 10–20% cementu krzemionką lub popiołem poprawia ITZ i trwałość. Dla metakaolinu do 10%	Krzemionka: 10% redukcji grubości ITZ o 25%, 30% – o 65%. Popiół: 20% – redukcja o 37% i wzrost wytrzymałości o 22%. Metakaolin: 10% – redukcja ITZ o 48%, ale niewielki spadek wytrzymałości. 20% – redukcja ITZ o 15%, wzrost wytrzymałości o 8%.	15% spadek wytrzymałości przy zwiększeniu udziału popiołu z 20% do 30%. Przy 30% krzemionki – wytrzymałość niższa niż przy 20%. 10% metakaolinu – lekki spadek, 20% – wzrost wytrzymałości.	[237]

Tabela 18. Możliwe obróbki kruszywa grubego z recyklingu i ich wpływ na właściwości mechaniczne betonu

Główny cel obróbki	Metoda	Zalety	Wady	Źródło
Usuwanie przylegającej zaprawy z powierzchni kruszywa grubego z recyklingu	Szlifowanie	• Obie metody skutecznie usuwają przylegającą zaprawę. • Zmniejszają zapotrzebowanie na wodę. • kruszywo o mniejszej ilości zaprawy posiada szorstką, bardziej stabilną powierzchnię, poprawiającą przyczepność.	• Szlifowanie może prowadzić do nadmiernej utraty oryginalnego kruszywa, • Wymaga dużego zużycia energii i powoduje zużycie sprzętu. • Czasochłonne.	[422]
	Roztwór kwasu	• Kwas selektywnie rozpuszcza składniki cementowe bez uszkodzania kruszywa.	• Powstają odpady wymagające utylizacji. • Długotrwała ekspozycja może osłabić kruszywo. • Czasochłonne.	[422]
Poprawa matrycy cementowej w betonie z kruszywem grubym z recyklingu	Materiały pucolanowe	• Zmniejszają porowatość, zwiększają wytrzymałość i odporność na siarczany. • Poprawiają mikrostrukturę ITZ. • Zmniejszają przepuszczalność. • Pozwalają na wykorzystanie ubocznych produktów przemysłowych.	• Wolniejszy rozwój wytrzymałości – reakcje pucolanowe zachodzą wolno. • Różna skuteczność – zależna od rodzaju i jakości dodatku. • Większe zapotrzebowanie na wodę lub superplastyfikatory.	[341] [342]
	Środki hydrofobowe	• Ograniczają nasiąkliwość. • Zmniejszają ryzyko spękań mrozowych. • Poprawiają odporność na chlorki i siarczany.	• Możliwe osłabienie przyczepności do cementu. • Wyższe koszty niż tradycyjne domieszki. • Mogą pogorszyć urabialność.	[298]
	Nanomateriały	• Znacząco poprawiają wytrzymałość i trwałość dzięki tworzeniu zwartego żelu C–S–H. • Wypełniają mikropory w matrycy cementowej.	• Wysokie koszty ograniczają zastosowanie przemysłowe.	[16]

Główny cel obróbki	Metoda	Zalety	Wady	Źródło
		Niektóre (np. TiO_2) mają właściwości fotokatalityczne.	- Wymagają zaawansowanych metod dyspersji. - Możliwe ryzyko środowiskowe i zdrowotne.	
Optymalizacja sposobu mieszania betonu	Mieszanie dwuetapowe (TSM) i trzyetapowe (TM)	- Umożliwia wnikanie zaczynu cementowego do porów kruszywa. - Wstępna powłoka cementowa zmniejsza zapotrzebowanie kruszywa grubego z recyklingu na wodę. - Łatwe wdrożenie w praktyce.	- Wydłużenie czasu mieszania. - Wymaga modyfikacji zawartości wody.	[188] [431]
Wzmacnianie kruszywa grubego z recyklingu	Powlekanie	- Redukuje słabości związane z zaprawą. - Zatyka pory, zmniejszając nasiąkliwość. - Poprawia przyczepność do matrycy cementowej. - Proste i względnie tanie.	- Powłoki polimerowe mogą być kosztowne. - Mogą zmieniać reologię mieszanek.	[262]
	Nanomateriały	- Poprawiają właściwości mechaniczne kruszywa grubego z recyklingu na poziomie nano. - Wypełniają mikropory, zagęszczają kruszywo. - Wzmacniają wiązanie z nową zaprawą.	- Kosztowne. - Wymagana równomierna dyspersja. - Możliwe ryzyko zdrowotne.	[16]
	Karbonatyzacja	- Zagęszcza strukturę kruszywa. - Uszczelnia pory poprzez tworzenie CaCO_3. - Przyspiesza hydratację cementu. - Pochłania CO_2, zwiększając zrównoważenie procesu.	- Wymaga kontrolowanych warunków (wilgotność, stężenie CO_2). - Proces może trwać od kilku godzin do dni. - Efekt ograniczony do warstw powierzchniowych.	[198] [194]
	Bio-depozycja	- Uszczelnia pory i mikropęknięcia. - Opiera się na procesach biologicznych. - Poprawia przyczepność kruszywa do cementu.	- Czasochłonność (czas wzrostu bakterii, tworzenie kalcytu). - Wymaga specjalistycznych bakterii i roztworów odżywczych. - Ograniczone zastosowanie na skalę przemysłową.	[343] [404]

3.4. Ograniczenia technologii betonu z kruszywem grubym recyklingowym

Mimo licznych zalet środowiskowych i ekonomicznych wynikających ze stosowania kruszywa grubego z recyklingu, w literaturze podkreśla się istotne ograniczenia technologiczne, które mogą wpływać na trwałość i niezawodność konstrukcji w długim okresie eksploatacji. W szczególności dotyczy to zagadnień związanych z porowatością, nasiąkliwością oraz złożoną mikrostrukturą międzyfazowej strefy przejściowej (ITZ), która w przypadku kruszywa grubego z recyklingu obejmuje zarówno pierwotną ITZ starego betonu, jak i nową ITZ powstającą w świeżej mieszance [412]. Jak podkreślono we wcześniejszych rozdziałach, badania laboratoryjne wykazały, że dzięki zastosowaniu wysokiej jakości kruszywa grubego z recyklingu, można wyprodukować beton o właściwościach zbliżonych do betonu na bazie kruszyw naturalnych. Jednak ograniczone badania nad komercjalizacją kruszywa grubego z recyklingu i betonem z kruszywem grubym z recyklingu w skali przemysłowej, w połączeniu z brakiem pewności wynikającym z niespójnej jakości tego kruszywa, stwarzają wyzwania w osiąganiu powtarzalnych właściwości betonu [349]. Dostępne są już badania opisujące techniczną wykonalność włączenia kruszywa grubego z recyklingu do betonu na skalę przemysłową jak [391] (gdzie podkreślono osiągnięcie optymalnej wydajności przez dostosowania składu mieszanki, uwzględnienie efektywnego stosunku W/C i wpływ właściwości betonu macierzystego na jakość betonu) czy [33] (gdzie opisano wyższość kruszywa grubego z recyklingu nad naturalnym pod względem efektów środowiskowych, ekonomicznych i percepcji społeczeństwa mimo obniżonej jego jakości). Mimo to, kilka aspektów nadal wymaga dogłębnej analizy w celu zwiększenia zrównoważonego rozwoju w branży budowlanej. Te spostrzeżenia są kluczowe dla zwiększenia zaufania interesariuszy i dla ukierunkowania priorytetyzacji dalszych badań.

3.4.1. Trwałość długookresowa

Wyższa nasiąkliwość i otwarta porowatość kruszywa grubego z recyklingu powodują, że beton wykonany z jego udziałem może charakteryzować się zwiększoną przepuszczalnością dla gazów i cieczy. Zjawisko to sprzyja przyspieszonej penetracji wody, dwutlenku węgla, jonów chlorkowych i siarczanowych w głąb struktury betonu, co z kolei przyspiesza procesy degradacyjne. W przeglądzie obejmującym ponad 236 badań w latach 1977 do 2014 autorzy wykazali, że współczynnik przepuszczalności betonu z kruszywem grubym z recyklingu jest średnio o 20–50 % wyższy w porównaniu z betonem na bazie kruszywa grubego naturalnego, przy czym skala tego efektu zależy od udziału kruszywa grubego z recyklingu, jakości obróbki kruszywa oraz rodzaju użytego cementu [348]. Podobne wnioski przedstawiono w [401], gdzie stwierdzono, że przy zachowaniu W/C na poziomie 0.4, beton z 100% udziałem kruszywa grubego z recyklingu charakteryzował się 2x i 3x wyższym wskaźnikiem dyfuzji chlorków w porównaniu z betonem referencyjnym. Wyniki numeryczne z [425] wskazują, że na współczynnik dyfuzji betonu z kruszywem grubym z recyklingu w niewielkim stopniu wpływał kształt kruszywa lub stare ITZ. Współczynnik rósł wraz ze wzrostem stosunku W/C, ilością starej zaprawy, dyfuzyjnością nowej strefy ITZ, a także wraz ze zwiększającym się zastępowaniem kruszywa naturalnego na recyklingowe. Autorzy [425] podkreślili, że metoda EMV projektowania mieszanki może skutecznie zmniejszyć dyfuzyjność chlorków w materiale, szczególnie przy niskim stosunku W/C. Podsumowując, mechanizmem

pogorszenia trwałości jest przede wszystkim sieć porów kapilarnych w strefie starej zaprawy otaczającej ziarna kruszywa grubego z recyklingu oraz w ITZ, która tworzy drogi łatwej migracji cieczy i gazów. W monografii [112] wskazano, że popiół lotny krzemionkowy znacząco wpływa na opóźnienie inicjacji i progresji rys w strukturze betonu poprzez poprawę ciągłości mikrostruktury i ograniczenie porowatości ITZ.

3.4.2. Mrozoodporność betonu

Mrozoodporność betonu z kruszywem grubym z recyklingu jest w literaturze określana jako parametr krytyczny dla jego stosowania w klimacie umiarkowanym i chłodnym. Beton z większą mrozoodpornością lepiej sprawdzi się praktycznie w polskich warunkach. Większa nasiąkliwość kruszywa grubego z recyklingu oznacza, że w strukturze betonu znajduje się więcej wolnej wody, która podczas zamarzania zwiększa swoją objętość. Kruszywo o dużej zawartości starej zaprawy i mikro-rys może przyczynić się do słabej odporności betonu na cykle odmrażania-zamarzania [199]. Powtarzalne cykle zamarzania i rozmrażania powodują powstawanie naprężeń rozciągających w porach, co prowadzi do mikropęknięć i łuszczenia się powierzchni. Stopień zastąpienia kruszywa naturalnego na recyklingowe znacząco wpływa na mrozoodporność. Według przeglądu literatury, rekomendowany procent jego zastąpienia nie powinien przekraczać 50 %. Większe procentowo zamienniki prowadzą do ubytku masy nawet o 20% większego i spadku wytrzymałości na ściskanie o więcej niż 15% porównując do betonu z kruszywem naturalnym [156]. W pracy [408] stwierdzono, że uszkodzenia w betonie z kruszywem grubym z recyklingu na skutek mrozu były spowodowane głównie przez wady kruszywa. Stara zaprawa zawierała liczne drobne i luźne struktury porów o wysokiej absorpcji wody, co powodowało rozprzestrzenianie się mikropęknięć i powstawanie nowych w nowej zaprawie pod wpływem sił mrozowych. Poprawę odporności mrozowej można uzyskać poprzez [208]:

- selekcję kruszywa grubego z recyklingu o niskiej nasiąkliwości (<5%),
- nasycanie kruszywa grubego z recyklingu przed użyciem domieszkami hydrofobizującymi lub roztworami mineralizującymi,
- niski stosunek W/C,
- określenie optymalnego poziomu nasycenia wodą kruszywa grubego z recyklingu
- odpowiednią metodę usuwania starej zaprawy z powierzchni kruszywa grubego z recyklingu lub jej wzmocnienie.

Dodatkowo, zgodnie z badaniami [113], modyfikacja betonu popiołem lotnym krzemionkowym poprawia jego odporność na działanie niskich temperatur, co może stanowić wartościową strategię ograniczania negatywnych skutków podwyższonej nasiąkliwości kruszywa grubego z recyklingu w warunkach mrozu.

3.4.3. Karbonatyzacja i korozja zbrojenia

Karbonatyzacja betonu polega na reakcji dwutlenku węgla z wodorotlenkami wapnia w matrycy cementowej, czego skutkiem jest powstawanie węglanu wapnia i obniżenie pH do wartości poniżej 9. W betonie z kruszywem grubym z recyklingu proces ten może przebiegać szybciej ze względu na:

- większą porowatość ITZ i matrycy,
- obecność spękań i mikroporów w starej zaprawie,
- zwiększoną przepuszczalność betonu.

Dzięki przeprowadzonej analizie statystycznej względnej głębokości karbonatyzacji na podstawie 10 publikacji [350] odnotowano, że mieszanki wykonane ze 100% zawartością kruszywa grubego z recyklingu mają 95% prawdopodobieństwa wykazywania głębokości karbonatyzacji do prawie 2,5 razy większej niż mieszanka z kruszywem naturalnym. Stosując kruszywo recyklingowe jako drobne wartość ta wzrosła do 8,7 razy co wynika z większej absorpcji wody przez kruszywo drobne, a więc zwiększonej przepuszczalności powstałego betonu [359]. Przyspieszona karbonatyzacja jest istotnym czynnikiem ryzyka korozji stali zbrojeniowej, gdyż prowadzi do utraty warstwy pasywacyjnej co może być szczególnie istotne w konstrukcjach mostowych oraz w infrastrukturze narażonej na środki odladzające.

Jednakże w literaturze zaobserwowano też, że niektóre mieszanki z kruszywem grubym z recyklingu wykazywały podobną lub wyższą odporność na karbonatyzację niż te z kruszywem naturalnym [350]. Jest to nietypowe zjawisko, które może być spowodowane albo tym, że kruszywo grube z recyklingu wchłania część wody zarobowej, zmniejszając w ten sposób stosunek W/C lub zastosowaniem metody EMV przy projektowaniu [1]. W niektórych przypadkach, poprzez dostosowanie stosunku W/C ze wzrastającą zawartością kruszywa grubego z recyklingu w celu uzyskania takiej samej wytrzymałości docelowej jak beton referencyjny, stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie próbek o równoważnej głębokości karbonatyzacji. Badanie [409] sugeruje również, że ponieważ kruszywo grube z recyklingu zawiera starą zaprawę, całkowita zawartość cementu w betonie z nim jest większa niż w betonie z kruszywem naturalnym. Oznacza to, że dostępne są większe ilości materiałów do karbonatyzacji, co poprawia odporność betonu z kruszywem grubym z recyklingu na karbonatyzację.

3.4.4. Reakcja alkalia-krzemionka

Reakcja alkalia-krzemionka (ASR) jest procesem ekspansji powodowanej reakcją pomiędzy alkalicznymi składnikami zaczynu cementowego a reaktywną krzemionką zawartą w niektórych kruszywach. Powstający żel ASR ma zdolność pęcznienia po nasiąknięciu wodą, co prowadzi do powstawania spękań.

W przypadku kruszywa grubego z recyklingu ryzyko ASR może być podwójne:

- Jeśli kruszywo pierwotne było reaktywne, to w kruszywie z recyklingu zachowują się jego reaktywne ziarna.
- W pierwotnym betonie mogły już zajść procesy ASR, a produkty reakcji mogą wpływać na nowy beton.

W badaniu [344] wykazano, że w betonie z kruszywem grubym z recyklingu pochodzącym z konstrukcji zainfekowanych ASR, ekspansja w teście przyspieszonym była o 60% większa niż w betonie z kruszywem z materiałów bez reaktywności alkalicznej. Ponieważ kruszywo grube z recyklingu zazwyczaj nie pochodzi tylko z jednego rodzaju betonu lub z jednego elementu konstrukcyjnego, w przeciwieństwie do betonu kontrolowanego, trudno jest mierzyć i kontrolować ilość obecnych alkaliów lub zawartość reaktywnej krzemionki. Wyniki badań

literaturowych często są sprzeczne w kwestii wpływu kruszywa grubego z recyklingu na występowanie ASR [34]. Zapobieganie ASR w betonie obejmuje [243]:

- stosowanie cementów o niskiej zawartości alkaliów,
- użycie dodatków mineralnych wiążących alkalia (popiół lotny, żużel, pył krzemionkowy),
- kontrolę źródła kruszywa z recyklingu i badania reaktywności kruszywa pierwotnego.

3.4.5. Uzasadnienie wyłączenia z badań własnych

W niniejszej pracy zagadnienia trwałości długoterminowej, odporności na cykle zamrażania–odmrażania, karbonatyzacji oraz korozji zbrojenia nie były przedmiotem badań. Celem głównym było określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na właściwości świeżej mieszanki, mechaniczne i mikrostrukturalne betonu samozagęszczającego się w początkowym okresie dojrzewania. Wyłączenie tych aspektów podyktowane było ograniczeniami czasowymi i materiałowymi, a także koniecznością skupienia się na zjawiskach zachodzących w pierwszej fazie eksploatacji betonu. Przedstawiony przegląd literatury pokazuje, że zagadnienia te są kluczowe dla pełnej oceny przydatności kruszywa grubego z recyklingu w budownictwie konstrukcyjnym i powinny być uwzględniane w dalszych badaniach. Niemniej, dobierając skład i metodykę, podjęto działania mające skutkować ograniczeniem negatywnych czynników na trwałość długoterminową jak odpowiedni dobór kruszywa grubego naturalnego na podstawie możliwej reakcji ASR, stosowanie metody projektowania mEMV, stosowanie kruszywa grubego z recyklingu o nasiąkliwości <5%, niski stosunek W/C i stosowanie jednorodnego odpadu betonowego.

Należy zaznaczyć, że dynamiczny rozwój technologii betonu i chemii domieszek w ostatnich dwóch dekadach stwarza nowe perspektywy dla wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu w betonach o wysokich parametrach jakościowych. Nowoczesne superplastyfikatory na bazie eterów polikarboksylianowych umożliwiają projektowanie mieszanek o niskim stosunku W/C (<0,30) przy zachowaniu wysokiej urabialności, co prowadzi do uzyskania gęstej mikrostruktury i ograniczenia porowatości strefy przejściowej ITZ [377]. Zastosowanie cementów wieloskładnikowych (CEM III, CEM V) o zoptymalizowanej reaktywności [202] oraz dodatków mineralnych, takich jak pył krzemionkowy, metakaolin czy wysokiej jakości popiół lotny, pozwala dodatkowo uszczelnić strukturę betonu z kruszywem grubym z recyklingu [11]. W warunkach kontrolowanej produkcji prefabrykatów – np. w technologii betonu wirowanego, sprężonego czy autoklawizowanego – możliwe jest uzyskanie elementów o właściwościach przewyższających beton towarowy, nawet przy znacznym udziale kruszywa z recyklingu [50] [398]. Właściwe połączenie nowoczesnych materiałów i procesów technologicznych może zatem istotnie ograniczyć negatywny wpływ kruszywa grubego z recyklingu na parametry betonu, a w niektórych przypadkach umożliwić wytwarzanie betonów konstrukcyjnych spełniających lub przewyższających wymagania normowe w zakresie wytrzymałości, trwałości oraz estetyki powierzchni.

3.5. Podsumowanie przeglądu literaturowego

W krajach Europy Środkowo-Wschodniej system wielkopłytowy, rozwijany intensywnie w drugiej połowie XX wieku, stanowił — i w wielu przypadkach nadal stanowi — istotny element zasobu mieszkaniowego. Analiza literatury przedmiotu pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- Budynki wznoszone w technologii wielkopłytovej projektowano na 50-letni okres użytkowania. Przyjmuje się jednak, że właściwie prowadzona konserwacja i modernizacja mogą wydłużyć ten czas o kolejne 50 lat. Niemniej jednak, nieuchronne procesy starzeniowe konstrukcji prowadzą do zbliżającego się końca ich cyklu życia.
- W literaturze podkreśla się niedostateczny poziom wiedzy dotyczącej technologii renowacyjnych, co przyczyniło się do licznych niefachowych modernizacji tych obiektów.
- Główne zagrożenia konstrukcyjne wiążą się z niewystarczającą skutecznością połączeń prefabrykowanych paneli żelbetowych.

W związku z powyższym przeanalizowano potencjał wykorzystania elementów konstrukcyjnych pochodzących z rozbiórek budynków wielkopłytowych, zarówno w scenariuszach planowanych, jak i awaryjnych. Wyniki analizy wskazują, że:

- Beton zastosowany w prefabrykowanych panelach technologii wielkopłytovej często wykazuje zadowalający stan techniczny, co umożliwia jego ponowne wykorzystanie jako kruszywa grubego z recyklingu w nowych konstrukcjach betonowych.
- Pomimo dominującego udziału budynków wielkopłytowych w strukturze zasobów mieszkaniowych Europy Środkowo-Wschodniej, brak jest badań naukowych poświęconych wyłącznie betonom zawierającym kruszywo z recyklingu pochodzące z tego typu obiektów.

W optymalnym scenariuszu, przy odpowiednio zaprojektowanych procesach rozbiórki i przetwarzania, możliwe jest znaczące ograniczenie ilości odpadów kierowanych na składowiska, zmniejszenie śladu węglowego transportu materiałów oraz efektywne wykorzystanie pozyskanego kruszywa w budownictwie miejskim. Efektywne zarządzanie odzyskiem prefabrykatów może zatem stać się istotnym elementem strategii zrównoważonego rozwoju miast. Przeanalizowano aktualny stan wiedzy dotyczący zastosowania kruszywa grubego z recyklingu z odpadów budowlanych i rozbiórkowych w betonie samozagęszczającym się. Jednocześnie zaproponowano technologię wielkiej płyty jako innowacyjne i dotąd nieeksplorowane źródło pozyskiwania kruszywa wtórnego. Wyniki analizy literatury wskazują, że:

- Większość badań koncentruje się na właściwościach mieszanki betonowej w stanie świeżym i stwardniałym, natomiast kwestia pochodzenia kruszywa wtórnego jest często pomijana.
- Zidentyfikowane przypadki użycia kruszywa pochodzącego z prefabrykatów wykazały zwiększoną wytrzymałość na ściskanie, co sugeruje wysoką jakość betonu pierwotnego.

Wskazuje to na potencjalny, pozytywny wpływ tego typu kruszywa na właściwości betonu ekologicznego.

- Zauważalny jest wzrost zainteresowania wykorzystaniem kruszywa grubego z recyklingu w betonie samozagęszczającym się, jednak wciąż istnieją liczne luki badawcze, szczególnie w odniesieniu do wpływu morfologii kruszywa na właściwości betonu oraz jego mikrostrukturę.

Pomimo rosnącego zainteresowania tematyką recyklingu, mikrostruktura strefy przejściowej (ITZ) w betonie z kruszywem grubym z recyklingu pozostaje niedostatecznie zbadana. Przeprowadzony przegląd literatury wykazał, że:

- Odpady betonowe są najczęściej przetwarzane na produkty niskiej jakości z uwagi na niejednorodność materiału. Zastąpienie kruszywa naturalnego w całości stanowi wciąż rzadkość, a wiele norm krajowych (np. dla betonu klasy C40/50) dopuszcza maksymalnie 20% zamiennika.
- Szczególne znaczenie przypisuje się pozyskiwaniu kruszywa grubego z recyklingu z prefabrykowanych konstrukcji, które cechują się większą jednorodnością i jakością.
- Kluczowe parametry wpływające na właściwości ITZ obejmują: sposób mieszania mieszanki, stosunek woda/cement, frakcję i typ dodatków mineralnych, typ i chropowatość kruszywa oraz warunki dojrzewania betonu.
- Główne luki w wiedzy dotyczą: modelowania mikrostruktury ITZ, oceny długoterminowej trwałości, standaryzacji metod badawczych oraz wdrożeń w skali przemysłowej.

Zwraca się także uwagę na rosnące zainteresowanie metodami poprawy właściwości kruszywa grubego z recyklingu. Badania wskazują, że odpowiednio przeprowadzony proces może znacząco poprawić jakość kruszywa, co stanowi kierunek przyszłych badań ukierunkowanych na optymalizację technologii dla różnych źródeł kruszywa.

Podsumowując, badania nad kruszywem grubym z recyklingu w ujęciu ogólnym są dobrze rozpoznane i obejmują publikacje dotyczące kruszywa pochodzącego z różnych źródeł: rozbiórek budynków żelbetowych, konstrukcji inżynieryjnych, nawierzchni drogowych czy prefabrykatów o niejednorodnym pochodzeniu. W literaturze szeroko opisano wpływ jakości kruszywa grubego z recyklingu na właściwości betonu w stanie świeżym i stwardniałym. Wskazuje się, że jego wysoka nasiąkliwość i większa porowatość w porównaniu do kruszywa naturalnego wpływają na wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości oraz trwałość betonu. Badania nad kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych nie zostały zidentyfikowane podczas przeglądu literatury, jednak autor wskazuje na potencjał takiego kruszywa w porównaniu z recyklatami pochodzącym z materiałów o zróżnicowanym pochodzeniu. Betonowe elementy konstrukcyjne systemów wielkopłytowych były produkowane w warunkach przemysłowych z kontrolą jakości, co pozwala uzyskać recyklat o bardziej jednorodnych właściwościach fizycznych i mechanicznych. W literaturze wskazuje się, że nawet po kilkudziesięciu latach eksploatacji beton konstrukcyjnych paneli z wielkiej płyty zachowuje wysoką wytrzymałość, co umożliwia jego ponowne zastosowanie jako pełnowartościowego kruszywa. Z kolei badania nad betonem samozagęszczającym się z kruszywem grubym z recyklingu wskazują, że przy odpowiednim doborze proporcji, obróbce

kruszywa i modyfikacji mieszanki (np. dodatki mineralne, domieszki uplastyczniające) możliwe jest uzyskanie mieszanki o parametrach zbliżonych do mieszanek z kruszywem naturalnym. Kluczowe jest kontrolowanie właściwości reologicznych oraz minimalizacja segregacji składników.

Analiza literatury wskazuje na istnienie trzech wyraźnych grup badań:

- Badania nad kruszywem grubym z recyklingu ogółem – szeroko reprezentowane w literaturze, dotyczące kruszywa z różnych źródeł.
- Badania nad betonem samozagęszczającym się z kruszywem grubym z recyklingu – zwykle bez analizowania źródła kruszywa.
- Badania nad kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych – brak, ale analiza pozwala przypuszczać przewidywalność właściwości recyklatu dzięki typizacji prefabrykatów.

W obszarze badań łączących trzy powyższe punkty występuje istotny niedobór opracowań. Niniejsza rozprawa wpisuje się w tę niszę badawczą, koncentrując się na ocenie przydatności kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do produkcji betonu samozagęszczającego się. Pomimo ograniczeń konstrukcyjnych, prefabrykowane panele żelbetowe często zachowują odpowiednie właściwości techniczne, umożliwiające ich ponowne użycie. Zastosowanie betonu samozagęszczającego się może ograniczyć hałas i czas realizacji prac, co czyni go szczególnie atrakcyjnym materiałem do wykorzystania w zurbanizowanych obszarach miejskich — tam budynki wielkopłytowe występują najczęściej. Rozwiązanie to umożliwia jednocześnie zmniejszenie objętości odpadów i ograniczenie transportu materiałów. Główną luką badawczą jest więc brak wiedzy o wpływie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na reologię, strukturę, fazę przejściową ITZ i właściwości mechaniczne betonu samozagęszczającego się.

Na podstawie przeglądu sformułowano następujące pytania badawcze:

- Czy kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych znacząco różni się właściwościami od kruszyw naturalnych i dostępnych kruszyw z recyklingu?
- W jaki sposób jego morfologia wpływa na właściwości betonu samozagęszczającego się w stanie świeżym i stwardniałym oraz przejście od stanu płynnego do stałego?
- Czy kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych wymaga obróbki wstępnej do użycia w betonie?
- Jaką ilość kruszywa grubego naturalnego można zastąpić recyklingowym by beton spełnił wymogi stawiane betonom samozagęszczającym się?
- Jaki jest wpływ kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na mikrostrukturę strefy ITZ?
- Czy obecność kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych zaburza jednorodność strukturalną betonu?

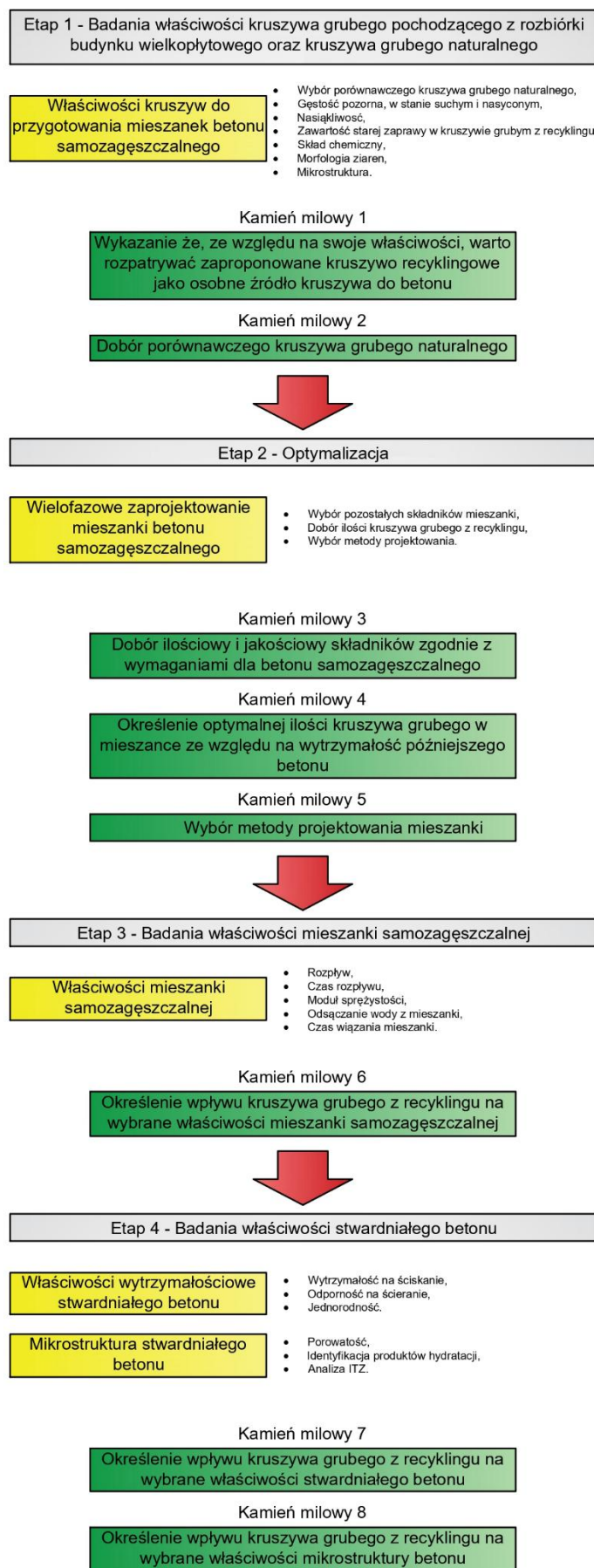
Tylko w Polsce znajduje się około 60 tysięcy budynków wielkopłytowych z 4 milionami mieszkań (około 30% krajowego zasobu mieszkaniowego). Wobec zbliżającego się końca ich prognozowanego cyklu życia oraz w kontekście wyzwań związanych ze zrównoważonym budownictwem, badania nad recyklingiem prefabrykatów z budynków wielkopłytowych mogą przynieść wymierne korzyści środowiskowe, ekonomiczne i społeczne dla przyszłych pokoleń.

4. ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH, OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW I STOSOWANA W ROZPRAWIE METODYKA

4.1. Zakres badań własnych

Badania prowadzone w ramach rozprawy zostały wykonane dla wykorzystanych kruszyw grubych (kruszywo grube naturalne, kruszywo grube z recyklingu), świeżych mieszanek oraz stwardniałych betonów. Istotnym elementem badań wstępnych jest określenie właściwości składników wykorzystanych w badaniach – kruszywa grubego naturalnego oraz kruszywa grubego z recyklingu, dobór składników by spełnione były wymogi dla betonu samozagęszczającego się a także ustalenie metody przygotowania mieszanki. Badania wykonane dla betonu samozagęszczającego się modyfikowanego dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych mają za zadanie zdefiniować lub potwierdzić wpływ tego dodatku na podstawowe właściwości betonu samozagęszczającego się. Dodatkowo, badania betonu samozagęszczającego się mają za zadanie zdefiniować potencjał aplikacyjny wykorzystania badanych kompozycji materiałowych.

Zakres prac do wykonania został podzielony na cztery etapy badawcze: I – Badania właściwości kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych oraz kruszywa grubego naturalnego, II – Optymalizacja, III – Badania właściwości mieszanki samozagęszczającej się, IV – Badania właściwości stwardniałego betonu. Każdy etap kończy się kamieniem lub kamieniami milowymi, które powinny zostać spełnione by prace uznać za satysfakcjonujące. Ogólny plan badań przedstawia Rysunek 30.



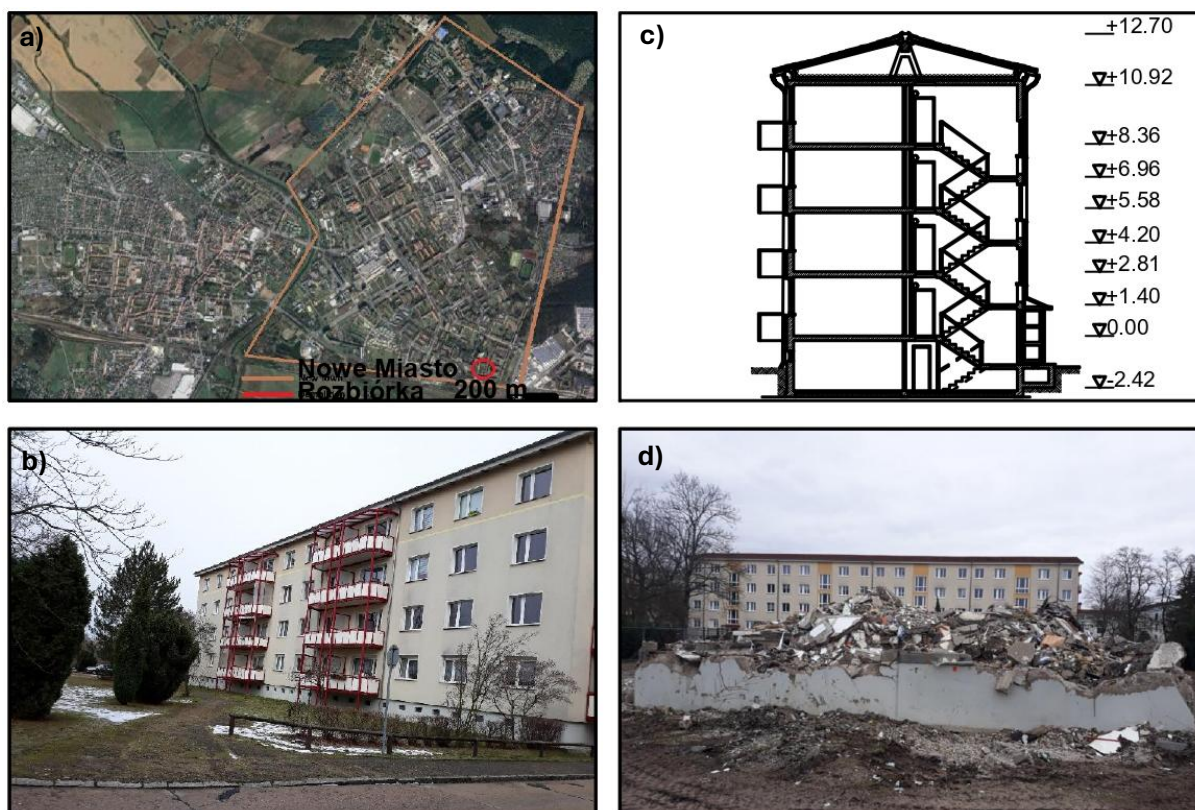
Rysunek 30. Ogólny plan badań własnych – etapy, badania i kamienie milowe

4.2. Badania właściwości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego

4.2.1. Kruszywo grube z recyklingu

W celu zapewnienia przejrzystości i poprawności prowadzonych badań, w pierwszym etapie projektowania niezbędnych prac pozyskano kruszywo grube z rozbiórki systemowego budynku wielkopłytkowego i zbadano jego wybrane właściwości i wybrano porównawcze kruszywo grube naturalne.

Źródłem kruszywa grubego z recyklingu były fragmenty prefabrykowanych paneli betonowych pochodzące z rozbiórki czterokondygnacyjnego budynku mieszkalnego wykonanego w technologii wielkopłytkowej, wzniesionego około 1960 roku (Rysunek 31). Obiekt ten znajdował się w dzielnicy Neustadt w Hoyerswerdzie, na terenie dawnej Niemieckiej Republiki Demokratycznej (NRD). Opisywany budynek wzniesiono w technologii Plattenbau z wykorzystaniem systemu P1 – pierwszego opublikowanego systemu centralnej prefabrykacji panelowej w NRD, co czyni go jednym z najstarszych typów wielkiej płyty w tym kraju. Miasto Hoyerswerda było prekursorem stosowania Plattenbau w Niemczech, tam też była zlokalizowana wytwórnia prefabrykatów. Zgodnie z dokumentacją techniczną, pozyskane panele wykonano z betonu klasy C16/20. W 2022 roku budynek, pomimo zadowalającego stanu technicznego, został wyburzony z powodu braku przestrzeni pod nowe inwestycje miejskie. Odpady betonowe przetransportowano i zdeponowano na składowisku (Rysunek 32).



Rysunek 31. Szczegóły dotyczące pochodzenia kruszywa grubego z recyklingu: a) lokalizacja w Hoyerswerdzie b) schemat przekroju budynku c) budynek w 2021 r. d) rozbiórka na początku 2022 r.



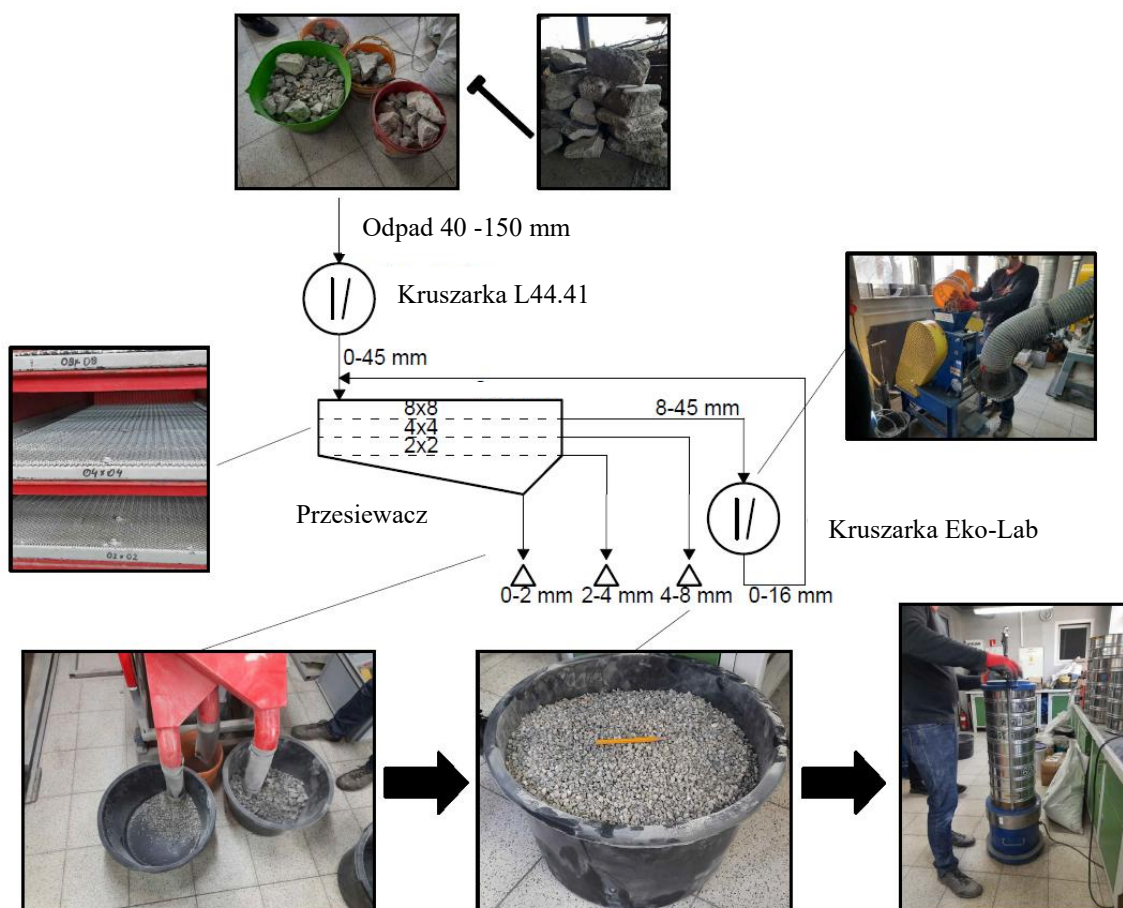
Rysunek 32. Proces pozyskiwania kruszywa w pracy w porównaniu do prawdopodobnej przyszłości odpadu na podstawie wywiadu środowiskowego z firmą wykonawczą przeprowadzającą rozbiórkę: kolor czerwony – podejście nieoptymalne, kolor żółty – podejście optymalne pod kątem utylizacji, ale niewykorzystujące potencjału odpadu, kolor zielony- zakres pracy doktorskiej

4.2.1.1. Przeróbka odpadu do grubego kruszywa z recyklingu

Panele zostały wstępnie rozdrobnione na mniejsze fragmenty o wymiarach 40–150 mm, a następnie poddane procesowi rozdrabniania w dwustopniowym układzie technologicznym pierwszej klasyfikacji. W pierwszym etapie materiał wsadowy był kruszony w kruszarce szczękowej typu L44.41 Makrum, pracującej z otworem wylotowym o szerokości 20 mm. Uzyskany materiał o uziarnieniu 0–45 mm poddano przesiewaniu na trójpokładowym przesiewaczu wibracyjnym, który rozdzielił kruszywo na cztery frakcje ziarnowe: 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm oraz 8–45 mm. Następnie frakcja nadziarna 8–45 mm została poddana dalszemu rozdrabnianiu w drugim etapie w kruszarce szczękowej typu Eko-Lab (z otworem wylotowym 6 mm), pracującej w układzie z recyrkulacją materiału z przesiewaczem. Zastosowany dwustopniowy układ rozdrabniania z recyrkulacją materiału został wybrany w oparciu o zalecenia technologiczne dotyczące uzysku kruszywa o możliwie regularnym kształcie i kontrolowanym uziarnieniu. W porównaniu z rozdrabnianiem jednostopniowym, konfiguracja wieloetapowa pozwala na ograniczenie nadmiernego kruszenia, co zmniejsza udział frakcji pylastych i ziaren o niekorzystnej kształtowości, a także minimalizuje zużycie energii w procesie produkcji [37]. Dzięki zastosowaniu dwustopniowego układu technologicznego, możliwa była selektywna produkcja kruszywa w frakcji 4–8 mm, pozwalając na uniknięcie nadmiernego rozdrabniania materiału, maksymalizację uzysku pożądanej frakcji oraz zwiększenie kształtowości ziaren. Wieloetapowe układy rozdrabniania i przesiewania, w połączeniu z recyrkulacją materiału oraz niskimi stopniami rozdrabniania, sprzyjają zwiększeniu udziału ziaren o regularnym kształcie w końcowym produkcie. Ostateczna frakcja

4–8 mm została poddana analizie sitowej w celu określenia rozkładu uziarnienia oraz zawartości ziaren o nieregularnych kształtach. Zawartość ziaren nieforemnych została oznaczona przy użyciu sit szczelinowych zgodnie z normą PN-EN 1097-6 (wskaźnik płaskości – FI). Proces produkcji kruszywa przedstawiono na Rysunku 33. W przeprowadzonych badaniach zdecydowano się na analizę kruszywa grubego o maksymalnym wymiarze ziaren do 8 mm. Wynikało to z przyjętej metody projektowania mieszanek betonu samozagęszczającego się, w której kluczowe znaczenie ma odpowiednia urabialność oraz zdolność do wypełniania szczelnych przestrzeni między prętami zbrojeniowymi. Zgodnie z zaleceniami wytycznych EFNARC (2005) [63] oraz norm europejskich dotyczących betonu samozagęszczającego się, stosowanie kruszywa grubego o maksymalnym wymiarze do 8–12 mm jest najbardziej uzasadnione technologicznie – szczególnie w przypadku mieszanek wysokopłynnych i elementów o dużym stopniu zbrojenia. Większe frakcje (np. 8–16 mm) mogą negatywnie wpływać na stabilność mieszanki, powodować segregację oraz lokalne różnice w mikrostrukturze ITZ. W związku z powyższym, w niniejszej pracy nie prowadzono odrębnej analizy kruszywa powyżej 8 mm. Oceniając jakość surowca, szczególną uwagę zwrócono na jednorodność kruszywa grubego z recyklingu. W wyniku starannej selekcji materiału i zastosowanego procesu rozdrabniania uzyskano recyklat o powtarzalnych cechach morfologicznych, pozbawiony domieszek innych materiałów, takich jak cegła czy ceramika.

Zawartość obcych składników w przygotowanym kruszywie była niższa niż 1% objętości, co oznacza poziom istotnie poniżej granicy dopuszczalnej w wymaganiach normowych wielu krajów europejskich (np. DIN 4226 w Niemczech dopuszcza maksymalnie 5% udziału zanieczyszczeń ceramicznych [75]). Oznacza to, że analizowane kruszywo można traktować jako jednorodne i reprezentatywne dla betonowych elementów systemów wielkopłytowych. Zostało to potwierdzone analizą XRD, przedstawioną w sekcji 5.1.7. Dzięki temu możliwe było precyzyjne powiązanie uzyskanych właściwości betonu z cechami kruszywa grubego z recyklingu Plattenabu P1, bez zakłóceń wynikających z obecności materiałów heterogenicznych.



Rysunek 33. Schemat technologiczny realizowanej produkcji kruszywa

4.2.1.2. Gęstość pozorna, gęstość w stanie nasyconym i suchym, nasiąkliwość

Gęstość oznaczono według normy PN-EN 1097-6, podobnie jak nasiąkliwość. Zastosowanie metody opisanej w PN-EN 1097-6:2013 wynika z jej powszechnej akceptacji w badaniach laboratoryjnych kruszyw przeznaczonych do betonu oraz zgodności z wymaganiami normy PN-EN 12620 dotyczącej kruszyw do betonu. Metoda piknometryczna pozwala na oznaczenie zarówno gęstości pozornej, gęstości w stanie suchym, gęstości w stanie nasyconym i osuszonym powierzchniowo, jak i nasiąkliwości w jednym ciągu pomiarowym, przy zachowaniu wysokiej powtarzalności wyników. Norma PN-EN 1097-6 dodatkowo precyzuje warunki nasycania próbki (24 h w wodzie) oraz procedurę osuszania powierzchniowego, co ogranicza ryzyko błędów systematycznych i umożliwia porównywanie wyników z innymi badaniami w literaturze. Schemat procesu przedstawiono na Rysunku 34. Gęstość pozorna ziaren:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4)$$

Gęstość ziaren w stanie suchym:

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5)$$

Gęstość ziaren w stanie nasyconym i osuszonym powierzchniowo:

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (6)$$

Nasiąkliwość po 24 h:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad (7)$$

Gdzie:

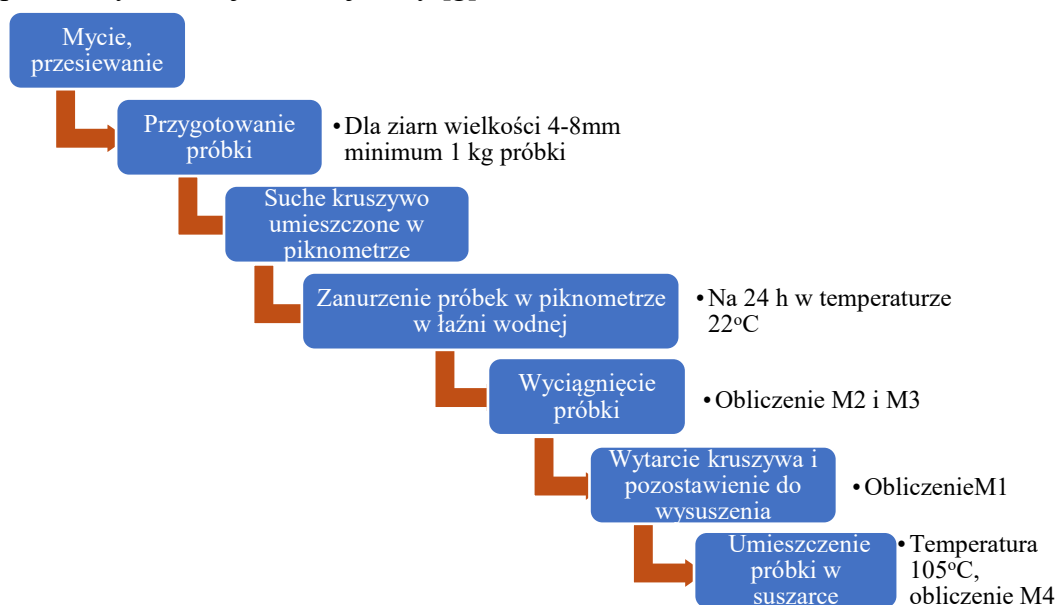
ρ_w - gęstość wody w temperaturze badania [Mg/m^3]

M_1 - masa nasyconego i osuszonego powierzchniowo kruszywa na powietrzu [g]

M_2 - masa piknometr z próbką nasyconego kruszywa i wodą [g]

M_3 - masa piknometr wypełnionego samą wodą [g]

M_4 - masa próbki wysuszonej do stałej masy [g]



Rysunek 34. Proces metody piknometrycznej do określania właściwości kruszywa

4.2.1.3. Zawartość starej zaprawy

Pomimo że liczne badania koncentrują się na szacowaniu zawartości starej zaprawy przyczepionej do kruszywa, w pracy zauważono brak ustandaryzowanych regulacji w tym zakresie [171]. W cytowanym badaniu wskazano trzy główne podejścia technologiczne: obróbkę chemiczną (kwasową), mechaniczną oraz termiczną [298]. Spośród nich w niniejszej pracy wybrano metodę obróbki chemicznej z użyciem kwasu solnego (HCl) o molarności 0,1 M przedstawionej na Rysunku 35. Wybór ten podyktowany był kilkoma względami:

- Powtarzalność i prostota procedury – metoda kwasowa umożliwia stosunkowo precyzyjne i powtarzalne oddzielenie zaprawy od naturalnego kruszywa przy minimalnym nakładzie pracy ręcznej.
- Ograniczona ingerencja w strukturę kruszywa – zastosowanie roztworu o stężeniu 0,1 M, zgodnie z zaleceniami [140], pozwala na usunięcie znacznej części zaprawy bez istotnej erozji powierzchni naturalnego kruszywa. Wyższe stężenia (0,5–0,8 M)

prowadziły do zwiększonej porowatości i mikrorys w strukturze kruszywa, co mogłoby zaburzać późniejsze analizy mikrostrukturalne.

- Brak potrzeby stosowania wysokotemperaturowych procesów – obróbka termiczna wymaga nagrzewania kruszywa do 300–500 °C w celu spęczenia i odspojenia zaprawy, co może zmieniać właściwości mineralogiczne oryginalnego kruszywa (np. dehydroksylacja minerałów ilastych, częściowa dekarbonatyzacja kalcytu) i wprowadzać artefakty w dalszych analizach dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) czy skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) [304].
- Dostępność sprzętowa – metoda kwasowa może być przeprowadzona w standardowym laboratorium materiałów budowlanych, bez konieczności stosowania specjalistycznych urządzeń do obróbki mechanicznej lub termicznej, co zwiększa jej powtarzalność i dostępność w praktyce badawczej.

Ze względu na brak normy Unii Europejskiej regulującej obróbkę kruszywa grubego z recyklingu z wykorzystaniem kwasów, autor zastosował metodę opisaną w [169]. Proces badania pokazano na Rysunku 36.

Ubytek starej zaprawy:

$$\% \text{ ubytek zaprawy} = \frac{M_{RCAb} - M_{RCAa}}{M_{RCAb}} \times 100 \quad (8)$$

Gdzie:

M_{RCAb} - masa suchej próbki kruszywa grubego z recyklingu przed obróbką [g]

M_{RCAa} - masa suchej próbki kruszywa grubego z recyklingu po obróbce [g]



Rysunek 35. Obróbka kwasem kruszywa



Rysunek 36. Proces obróbki kruszywa za pomocą kwasu

4.2.1.4. Charakterystyka morfologiczna kruszywa grubego

Analiza morfologiczna kruszywa grubego z recyklingu została przeprowadzona z wykorzystaniem urządzenia optyczno-elektronicznego Elsieve, które umożliwia trójwymiarowy pomiar wymiarów ziarna (X, Y, Z) oraz obliczenie średnicy równoważnej

w sposób zautomatyzowany i powtarzalny. W porównaniu z tradycyjnymi metodami manualnymi (np. pomiar suwmiarką lub analizą fotograficzną 2D), system Elsieve zapewnia:

- Pełny pomiar w trzech wymiarach – pozwala na ocenę parametrów takich jak współczynnik kształtu (SF) i sferyczność (Ψ) z uwzględnieniem wszystkich osi cząstki, co eliminuje ograniczenia metod dwuosiowych, w których pomijany jest wymiar grubości.
- Wysoką powtarzalność i obiektywność – pomiary są realizowane według zautomatyzowanego algorytmu, minimalizując subiektywny wpływ operatora.
- Szybkość i efektywność – możliwa jest analiza dużej liczby ziaren w krótkim czasie, co zwiększa reprezentatywność próby w porównaniu z tradycyjnymi metodami.

Metoda pomiaru oparta na modelu elipsoidy obrotowej i obliczeniu średnicy równoważnej jest szeroko stosowana w badaniach morfologii kruszyw i osadów, ponieważ pozwala na łatwe przeliczenie parametrów geometrycznych na objętość cząstki, a następnie porównanie ich z objętością kuli [419]. Zastosowanie klasyfikacji Zingga umożliwia jednoznaczny podział ziaren na kategorie geometryczne, co ma istotne znaczenie przy ocenie ich wpływu na właściwości reologiczne i mechaniczne betonu [296]. Alternatywne techniki, takie jak analiza obrazowania SEM czy mikrotomografia komputerowa oferują wyższą rozdzielczość pomiarów, lecz są znacznie bardziej czasochłonne, kosztowne i wymagają specjalistycznej aparatury. W kontekście badania dużych prób kruszywa grubego z recyklingu do zastosowań inżynierskich, metoda optyczno-elektroniczna stanowi kompromis pomiędzy dokładnością pomiaru a efektywnością czasową i kosztową.

Każde ziarno było mierzone w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: X, Y oraz Z. Najbardziej reprezentatywną wartością przy prezentacji wyników jest średnica równoważna. W celu jej wyznaczenia, przyjęto założenie, że mierzone ziarno ma kształt elipsoidy obrotowej o osiach równych wymiarom X, Y oraz Z. Na podstawie tych wymiarów obliczano objętość pojedynczego ziarna według wzoru:

$$V_{particle} = \frac{4}{3}\pi \frac{X}{2} \frac{Y}{2} \frac{Z}{2} = \frac{1}{6}\pi XYZ \quad (9)$$

W kolejnym kroku wyznaczano średnicę równoważną, czyli średnicę kuli o tej samej objętości, co mierzone ziarno. Ponieważ:

$$V_{sphere} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{1}{6}\pi D_{equivalent}^3 \quad (10)$$

$$V_{particle} = V_{sphere} \quad (11)$$

Więc:

$$D_{equivalent} = \sqrt[3]{\frac{6V_{particle}}{\pi}} \quad (12)$$

Średnica równoważna stanowi podstawowy parametr opisujący każde ziarno. Średnie wartości takie jak średnia ilościowa czy objętościowa odnoszą się właśnie do tej wielkości. Wyznaczono następujące średnie parametry wymiarów ziaren:

- Mean D_n (*quantitative*) – średnia równoważnej średnicy
- Average D_v (*volume*) – średnia równoważnej średnicy przyrównana do objętości
- Minimum D - minimalna równoważna średnica
- Maximum D – maksymalna równoważna średnica

Wzory użyte do obliczeń:

$$D_n = \frac{\sum_1^n D_{equivalent}}{n} \quad (13)$$

$$D_v = \frac{\sum_1^n (y_v * D_{equivalent})}{n} \quad (14)$$

Kształt ziaren oceniano również zgodnie z klasyfikacją Zingga, opartą na stosunku trzech wymiarów ziarna, uporządkowanych od największego do najmniejszego. Obliczano dwa stosunki:

- stosunek najmniejszego do średniego wymiaru: a/b
- stosunek średniego do największego wymiaru: b/c .

Przyjęto wartość graniczną 0,667 (tj. 2/3) jako punkt podziału między poszczególne klasy. Na tej podstawie cząstki klasyfikowano jako:

- kule – wszystkie trzy wymiary zbliżone; $a/b > 0.667$ oraz $b/c > 0.667$,
- dyski – dwa większe wymiary zbliżone, trzeci znacznie mniejszy; $a/b > 0.667$, $b/c < 0.667$
- walce – jeden wymiar znacząco większy od pozostałych; $a/b < 0.667$, $b/c > 0.667$,
- płyty – pozostałe przypadki; $a/b < 0.667$, $b/c < 0.667$.

Dodatkowo oceniono kształt na podstawie współczynnika kształtu (SF) oraz sferyczności (Ψ), które znajdują szerokie zastosowanie w analizach morfologicznych [430] [195]. Ich zaletą jest uwzględnianie wszystkich trzech wymiarów cząstki, w przeciwieństwie do dwuosiowych analiz takich jak kulistość, które pomijają grubość ziaren. Interpretacja współczynnika SF:

- $SF \approx 1$ – cząstki sferyczne lub sześciennie,
- $SF < 1$ – cząstki wydłużone,
- $SF > 1$ – cząstki spłaszczone.

Wskaźnik sferyczności Ψ pozwala na ocenę stopnia zbliżenia kształtu cząstki do idealnej kuli. Wzory:

$$SF = \frac{T_D L_D}{W_D^2} \quad (13)$$

$$\psi = \left(\frac{W_D T_D}{L_D^2} \right)^{1/3} \quad (14)$$

Gdzie:

W_D - najmniejszy wymiar cząstki,

W_D – średni (pośredni) wymiar cząstki,

D_D – największy wymiar cząstki.

4.2.1.5. Analiza przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM)

Zastosowanie SEM w trybie detekcji elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) zostało podyktowane potrzebą uzyskania szczegółowej charakterystyki mikrostrukturalnej zarówno naturalnego kruszywa, jak i przyczepionej starej zaprawy. W porównaniu z optyczną mikroskopią świetlną, metoda SEM oferuje:

- Znacznie wyższą rozdzielczość – umożliwia obserwację mikro- i nanostrukturalnych cech materiału, w tym porów kapilarnych, mikropęknięć i produktów hydratacji cementu [9].
- Kontrast Z (BSE) – pozwala na różnicowanie faz o odmiennych liczbach atomowych, co umożliwia odróżnienie naturalnego kruszywa (minerały bogate w krzem i glin) od produktów hydratacji bogatych w wapń w strefie ITZ [182].
- Analizę relacji międzyfazowych – możliwość badania tekstury i struktury strefy przejściowej ITZ z zachowaniem jej kontekstu w materiale.

W porównaniu, analiza mikrostruktury przy użyciu μ CT, która zapewnia trójwymiarową rekonstrukcję porowatości, ale kosztem niższej rozdzielczości dla małych cech mikrostrukturalnych ($<1 \mu\text{m}$) i brakiem bezpośredniej informacji o składzie fazowym.

Próbki przygotowano do mikrostrukturalnej charakterystyki materiału. Odpowiednie kruszywa, o objętości około 2 cm^3 , zatapiano w niskolepkościowej żywicy epoksydowej Buehler EpoThin™ 2. W celu nasycenia wewnętrznych porów zastosowano metodę impregnacji próżniowej, prowadzonej przy ciśnieniu około 1 Pa. Po utwardzeniu żywicy z próbek wykonano przekroje poprzeczne poprzez szlifowanie na mokro oraz polerowanie z wykorzystaniem past diamentowych o ziarnistości sięgającej $1 \mu\text{m}$. Następnie na próbki naniesiono ścieżki przewodzące za pomocą taśmy miedzianej, a obszar obserwacji pokryto warstwą węgla o grubości 30 nm przy użyciu napylarki próżniowej Leica EM ACE 200. Przygotowane próbki obrazowano w skaningowym mikroskopie elektronowym JEOL JSM-6610LV, pracującym w warunkach wysokiej próżni. Zastosowano przyspieszające napięcie 20 kV, odległość roboczą około 20 mm oraz detektor elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) w trybie materiałowym, w celu uzyskania tzw. kontrastu Z (*Z-contrast*), umożliwiającego różnicowanie materiałów o różnych liczbach atomowych.

4.2.1.6. Odporność na ścieranie

Jednym z najbardziej znaczących zastosowań betonu samozagęszczającego się jest jego wykorzystanie w warstwach posadzkowych lub wyrównujących [105]. W przypadku betonu narażonego na ścieranie zaleca się stosowanie kruszywa o wysokiej odporności na zużycie. Wskaźnik odporności na ścieranie oznaczano zgodnie z normą PN-EN 1097-1, poprzez wyznaczenie współczynnika Micro-Deval. Procedura ta polega na określeniu stopnia zużycia

kruszywa w wyniku tarcia pomiędzy jego ziarnami a materiałem ściernym, umieszczonymi wspólnie w obracającym się bębnie.

Wybór metody Micro-Deval zgodnej z normą PN-EN 1097-1 wynika z jej uznanej skuteczności w ocenie odporności kruszyw na ścieranie w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych, a także z jej szerokiego zastosowania w badaniach laboratoryjnych i ocenie jakości kruszyw do betonów konstrukcyjnych. W porównaniu z alternatywnymi metodami, takimi jak test Los Angeles (LA), metoda Micro-Deval charakteryzuje się [363]:

- lepszym odzwierciedleniem warunków rzeczywistej eksploatacji – tarcie w środowisku wodnym, odwzorowujące warunki wilgotne, typowe dla wielu elementów betonowych.
- Większą powtarzalnością wyników – badania porównawcze wykazały niższy współczynnik zmienności dla Micro-Deval niż dla testu LA, szczególnie w przypadku kruszyw o większej zawartości ziaren o nieregularnym kształcie.

Metoda Micro-Deval jest rekomendowana w wielu normach i wytycznych europejskich dla kruszyw przeznaczonych do betonów wysokowytrzymałych i samozagęszczalnych, gdzie utrzymanie wysokiej odporności na ścieranie jest kluczowe dla długotrwałej trwałości elementów eksploatowanych w warunkach intensywnego ruchu i obciążenia mechanicznego [12].

Współczynnik Micro-Deval:

$$M_{DE} = \frac{500 - m}{50} \quad (15)$$

Gdzie:

m - masa pozostała na sicie o oczkach 1,6 mm [g] dla ziarn 4-8 mm.

4.2.1.7. Dyfraktometria rentgenowska (XRD)

Do identyfikacji składu fazowego zastosowano dyfraktometrię rentgenowską (XRD), która jest powszechnie uznawana za metodę referencyjną w analizie faz krystalicznych w materiałach budowlanych, w tym w kruszywach i produktach hydratacji cementu [28]. Wybór XRD zamiast alternatywnych technik, takich jak fluorescencja rentgenowska (XRF) czy analiza termiczna (TG/DTA), wynika z kilku kluczowych powodów [336]:

- Identyfikacja faz krystalicznych – XRD umożliwia jednoznaczne określenie rodzaju i udziału jakościowego faz mineralnych, w tym kwarcu, kalcytu, dolomitu czy produktów hydratacji, na podstawie charakterystycznych refleksów dyfrakcyjnych. XRF dostarcza jedynie informacji o składzie pierwiastkowym, bez możliwości rozróżnienia odmian polimorficznych czy określenia stopnia krystaliczności.
- Brak wpływu amorficznej matrycy – choć XRD ma ograniczoną czułość na fazy amorficzne, to w przypadku RCA analizowanego w tej pracy większość składników mineralnych występuje w formie dobrze ukształtowanych kryształów, co czyni metodę szczególnie przydatną do ich identyfikacji.

Alternatywne techniki, takie jak XRF, są komplementarne, lecz służą przede wszystkim do określania składu tlenkowego materiału, a nie jego struktury krystalicznej. XRD umożliwiła jednoznaczną identyfikację głównych składników mineralnych kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1, co jest kluczowe dla oceny przydatności tego surowca w nowych mieszankach

betonowych. Skład fazowy został określony przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego PANalytical Empyrean. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem promieniowania monochromatycznego o długości fali odpowiadającej linii emisyjnej $K(\alpha_1)$ miedzi ($1,54178 \text{ \AA}$), w zakresie kątowym od 5° do 90° w skali 2θ , przy kroku goniometru wynoszącym $0,008$ stopnia. Jakościowa analiza składu fazowego została wykonana przy użyciu oprogramowania komputerowego X'Pert HighScore Plus opracowanego przez firmę PANalytical. W analizie wykorzystano bazy danych referencyjnych: PDF-2 (2004) oraz ICSD Database FIZ Karlsruhe (2012).

4.2.2. Wybór porównawczego kruszywa grubego naturalnego

W zależności od zakładanej wytrzymałości betonu, można zastosować różne rodzaje porównawczych kruszyw naturalnych. Klasyfikacja kruszyw grubych według wytrzymałości przedstawia się następująco:

- Kruszywa grube pochodzące ze skał o wysokiej wytrzymałości (np. granit, bazalt, porfir): stosowane do produkcji betonu o wysokiej wytrzymałości na ściskanie i odporności na ścieranie, a także do konstrukcji narażonych na wysokie obciążenia (np. beton mostowy) oraz do podbudów drogowych.
- Kruszywa grube ze skał o niższej wytrzymałości (np. wapień, dolomit): wykorzystywane do produkcji wyrobów betonowych nieprzenoszących dużych obciążeń, do produkcji lastriko i tynków.
- Specjalne kruszywa grube o dużej gęstości nasypowej (powyżej 2600 kg/m^3): stosowane do produkcji ciężkiego betonu ochronnego. Wykorzystywane skały to m.in.: baryt, limonit, goethyt, hematyt, magnetyt.

Skały magmowe (granit, bazalt, melafir) oraz metamorficzne (gnejs, marmur, kwarcyt) charakteryzują się wysoką wytrzymałością, natomiast kruszywo grube z recyklingu wpływa negatywnie na właściwości mechaniczne betonu (Tabela 19). Skały łamane są korzystniejszym wyborem z punktu widzenia właściwości kruszywa grubego z recyklingu. Na podstawie Tabeli 20 można wnioskować, że dolomit wykazuje lepsze parametry fizykochemiczne niż wapień i żwir i większą odporność na rozdrabnianie. Wszystkie analizowane surowce zawierają potencjalnie reaktywne składniki, które mogą powodować reakcje alkaliczne, choć mieszczą się w granicach normowych. Wytrzymałość na ściskanie dla wapnia, żwiru i dolomitu według przeglądu literaturowego przedstawia się podobnie, z najmniejszą wytrzymałością dla żwiru (Tabela 21). Uwzględniając opisy wybranych kruszyw naturalnych oraz ich właściwości, a także dążąc do doboru materiału najbardziej zbliżonego pod względem parametrów do kruszywa z recyklingu, do dalszych analiz wybrano kruszywo dolomitowe. Dolomit był już z powodzeniem stosowany w betonie SCC [390] [320] [15].

Tabela 19. Porównanie właściwości naturalnego kruszywa grubego na podstawie [25] [187] [234]

Kruszywo	Reaktywność alkaliczna	Cechy	Struktura, tekstura
Łamane			
Granit	Składniki potencjalnie reaktywne	- Możliwość zastosowania jako kruszywo naturalne lub bloki odpadowe - wysoka wytrzymałość na ściskanie, - niska ścieralność, - mała nasiąkliwość, - duża odporność na mróz.	Skała magmowa głębinowa o strukturze krystalicznej, teksturze bezładnej, zbitej
Bazalt	Niereaktywny, ew. bazalty oliwinowe mają składniki potencjalnie reaktywne	- Mniej odporny od granitu i aglomarmuru, - nadaje się do najbardziej obciążonych elementów betonowych	Skała magmowa wylewna o strukturze skrytokrystalicznej, drobnokrystalicznej lub porfirowej, teksturze bezładnej, zbitej.
Melafir	Krytyczne ilości potencjalnie reaktywnych form krzemionkowych	- Duża trwałość, - duża twardość, - Wysoka odporność na ścieranie	Skała magmowa wylewna o strukturze porfirowej, teksturze bezładnej, zbitej, gąbczastej lub migdałowcowej.
Gnejs		- Niska nasiąkliwość i ścieralność, - wysoka mrozoodporność, - duża wytrzymałość.	Skała metamorficzna o strukturze krystalicznej, średnio lub gruboziarnistej, i teksturze wybitnie kierunkowej, masywnej.
Marmur	Brak danych	Duża wytrzymałość mechaniczna oraz termiczna.	Skała metamorficzna powstała z przeobrażenia wapieni, rzadziej dolomitów o strukturze krystaloblastycznej, teksturze bezładnej.
Kwarcyt	Składniki potencjalnie reaktywne nie występują	Duża twardość i spoistość	Pochodzenia metamorficznego lub osadowego.
Wapień		- Niska mrozoodporność, - słabe właściwości fizykomechaniczne, - wysoka nasiąkliwość i porowatość, - obecność rozproszonych minerałów ilastych.	Struktura drobno- i równoziarnista. Tekstura zwykle bezładna.
Dolomit	Składniki potencjalnie reaktywne	- Niska mrozoodporność, - słabe właściwości fizykomechaniczne, - wysoka nasiąkliwość i porowatość, - obecność rozproszonych minerałów ilastych, - dobrze, w stosunku do wapieni, parametry fizykomechaniczne, - nasiąkliwość betonów na kruszywie o wysokiej porowatości może być nieco wyższa niż dla pozostałych	Pierwotny drobnoziarnisty i równoziarnisty, wtórny jest gruboziarnisty i nierównoziarnisty.

Kruszywo	Reaktywność alkaliczna	Cechy	Struktura, tekstura
Żwirowe			
Żwiry	Składniki potencjalnie reaktywne	• Używany do zwykłego betonu • używany przy wylewaniu stropów, fundamentów, • istotny składnik betonu architektonicznego, posadzkowego	Skała osadowa pochodzenia morskiego, rzeczno-jeziornego. charakterystyczny, okrągły kształt.
Sztuczne			
Żużel wielkopiecowy	Brak danych	• Wysoka wytrzymałość termiczna, • odporność na ogień, • niewielka w porównaniu do kruszyw naturalnych waga • absorpcja wody jest wyższa niż dla materiałów naturalnych	Produkt uboczny wytopienia rudy żelaza na surowce do produkcji stali, szorstka skała o chropowatej fakturze i szarej barwie.
Keramzyt	Brak danych	• Wysoka izolacyjność cieplna, • niska gęstość, • niepalność • mrozoodporność	Porowata struktura

Tabela 20. Właściwości wybranych kruszyw na podstawie [83] [120]

Właściwość	Dolomit	Wapień	Żwir	Granit	Bazalt
Gęstość objętościowa [kg/dm ³]	2.48	2.52	2.59	2.67	3.04
Nasiąkliwość [%]	3.9	3.7	2.4	1.7	1.1
Zawartość ziaren nieregularnych [%]	9	8	11	6	2.6
Zawartość pyłów mineralnych [%]	2.7	0.8	0.3	0.2	1.0
Mrozoodporność – ubytek masy [%]	0.5	0.7	0.9	0.7	1.5
Reaktywność alkaliczno-krzemionkowa (ubytek masy) [%]	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1
Odporność na rozdrabnianie LA [%]	33	38	36	31	6.5

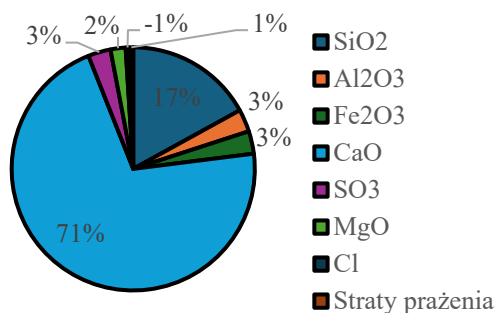
Tabela 21. Wytrzymałość betonu używając wybranych kruszyw i cementu na podstawie [120] [43]

		Wytrzymałość na ściskanie betonu [MPa]		
		Dolomit	Wapień	Żwir
CEM I 42.5R	Po 7 dniach	31.5	35.0	27.5
	Po 28 dniach	42.5	45.0	37.5
CEM II/A-S 42.5R	Po 7 dniach	28.5	28.5	23.5
	Po 28 dniach	44.0	41.5	37.0
CEM II/B-S 32.5R	Po 7 dniach	16.5	18.5	16.0
	Po 28 dniach	31.0	33.0	30.5
CEM III/A-S 32.5NA	Po 7 dniach	13.0	13.0	13.5
	Po 28 dniach	30.0	30.5	29.5

4.3. Optymalizacja składu mieszanki samozagęszczającej się i metody projektowania

4.3.1. Składniki mieszanki samozagęszczającej się

Do zaprojektowania mieszanki betonowej jako kruszywo drobne wybrano piasek kwarcowy Axton, Polska. W celu określenia rozkładu uziarnienia przeprowadzono analizę sitową, obejmującą ziarna o wielkości od 0,25 do 2 mm. Dobór sit został dokonany w oparciu o założenie, że wielkość oczka powinna stanowić połowę maksymalnego rozmiaru ziarna danej frakcji ($d_{max}/2$). We wszystkich badaniach wykorzystano wodę pochodzącą z wodociągu. W pracy [406] wykazano, że wpływ rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość betonu jest bardziej znaczący w przypadku betonów niskowytrzymałościowych. W betonach o projektowanej wytrzymałości rzędu 30 MPa różnice wytrzymałości pomiędzy betonami wykonanymi z różnych kruszyw grubych ulegają zwiększeniu. W związku z powyższym, do realizacji niniejszego badania wybrano cement portlandzki CEM I 52.5R (Heidelberg Materials Poland). Jego skład chemiczny przedstawiono na Rysunku 37. Popiół lotny dodawano do każdej serii mieszanki betonowej. Surowiec ten pochodził z elektrowni w Jaworznie, eksploatowanej przez firmę Tauron – polskie przedsiębiorstwo sektora energetycznego. Zawartość domieszki uplastyczniającej została ograniczona do 4% masy cementu (Sika Viscocrete 2030HE). Na podstawie wcześniejszych doświadczeń autora związanych z projektowaniem mieszanki betonu samozagęszczającego się, zaproponowano następujący skład mieszanki referencyjnej (tylko z kruszywem grubym naturalnym). Składniki mieszanki porównano z wytycznymi dotyczącymi projektowania betonu samozagęszczającego się, które zestawiono w Tabeli 22.



Rysunek 37. Skład chemiczny cementu na podstawie karty producenta Heidelberg Materials Poland

Tabela 22. Proponowany skład mieszanki w porównaniu z wytycznymi dla betonu samozagęszczającego się według [63] [186]

Składnik	Ilość dla mieszanki referencyjnej [kg/m ³]	Ogólne zasady projektowania
CEM I 52.5R	475	300 ÷ 550 kg/m ³
Kruszywo drobne	850	40 ÷ 50 % całkowitej masy kruszywa
Kruszywo grube o uziarnieniu 4–8 mm	1000	Maksymalny rozmiar ziaren - 20 mm
Woda	176	160 ÷ 200 kg/m ³
Popiół lotny	125	15 ÷ 40 % masy cementu
Superplastyfikator	19.25	maksymalnie 5% masy cementu

4.3.2. Metoda projektowania

W pracy [171] przeprowadzono obszerny przegląd literatury dotyczącej różnych metod projektowania opartych na objętości efektywnej kruszywa recyklingowego (EMV). Interesującą koncepcję projektowania składu mieszanki, która mogłaby być teoretycznie zastosowana w betonie samozagęszczającym się, przedstawiono w [421]. W omawianym badaniu wprowadzono współczynnik S, który umożliwia podział zawartości starej zaprawy przyczepionej do kruszywa (ang. *residual mortar*, RM) na fazę kruszywa oraz fazę zaprawy. Zmodyfikowana przez nich metoda EMV (mEMV) pozwoliła na uzyskanie wzrostu wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 6,7% do 8,8% po 7 dniach, a modułu sprężystości w zakresie od 2% do 8,7%. Główna różnica pomiędzy metodą mEMV a klasyczną metodą EMV polega na modyfikacji stosunku udziału kruszywa grubego naturalnego oraz wprowadzeniu współczynnika S.

Stosunek udziału kruszywa grubego naturalnego:

$$R = \frac{V_{NCA}^{RAC}}{V_{NCA}^{NAC}} = \frac{V_{RM}^{RAC}}{V_{RA}^{NAC}} \quad (16)$$

Gdzie:

V_{NCA}^{RAC} – objętość NCA w RAC

V_{NCA}^{NAC} – objętość NCA w NAC

V_{RM}^{RAC} – objętość RM w RAC

V_{RCA}^{RAC} – objętość RCA in RAC

$$R = 1 - \frac{V_{RCA}^{RAC}}{V_{NCA}^{NAC}} * \left(1 - \frac{1}{S} * RMC\right) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}} \quad (17)$$

Dla 50% zastąpienia kruszywa naturalnego zastosowano współczynnik S=2, natomiast dla 75% zastąpienia S=3.

Całkowita objętość zaprawy w RAC:

$$V_{TM}^{RAC} = V_M^{NAC} = \frac{1}{S} V_{RM}^{RAC} + V_{NM}^{RAC} \quad (18)$$

Całkowita objętość kruszywa naturalnego w RAC:

$$V_{TNA}^{RAC} = V_{OVA}^{RAC} + V_{NCA}^{RAC} + \frac{S-1}{S} V_{RM}^{RAC} \quad (19)$$

Objętość RCA i NCA w RAC:

$$V_{RCA}^{RAC} = \left[\frac{V_{NCA}^{NAC} * (1-R)}{(1-RMC) * \frac{SG_b^{RCA}}{SG_b^{OVA}}} \right] \quad (20)$$

$$V_{NCA}^{RAC} = V_{NCA}^{NAC} * R \quad (21)$$

Po zastosowaniu współczynnika R (równanie 17) i całkowitej objętości kruszywa naturalnego w RAC (równanie 19) do obliczeń objętości RCA (równanie 20), uzyskano:

$$V_{RCA}^{RAC} = V_{NCA}^{NAC} = \frac{w_{OD-NCA}^{NAC}}{SG_b^{NA} * 1000} \quad (22)$$

Gdzie:

w_{OD-NCA}^{NAC} – masa kruszywa naturalnego wysuszonego w NAC

SG_b^{NA} – gęstość nasypowa NCA

Masa RCA wysuszonego w RAC:

$$w_{OD-RA}^{RAC} = V_{RA}^{RAC} * SG_b^{RA} * 1000 \quad (23)$$

Masa NCA wysuszonego w RAC:

$$w_{OD-NCA}^{RAC} = V_{NCA}^{RAC} * SG_b^{NCA} * 1000 \quad (24)$$

Objętość nowej zaprawy w RAC:

$$V_{NM}^{RAC} = V_M^{NAC} - V_{RM}^{RAC} \quad (25)$$

Masa wody w RAC:

$$w_w^{RAC} = w_w^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RAC}}{V_M^{NAC}} \quad (26)$$

Masa cementu w RAC:

$$w_c^{RAC} = w_c^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RAC}}{V_M^{NAC}} \quad (27)$$

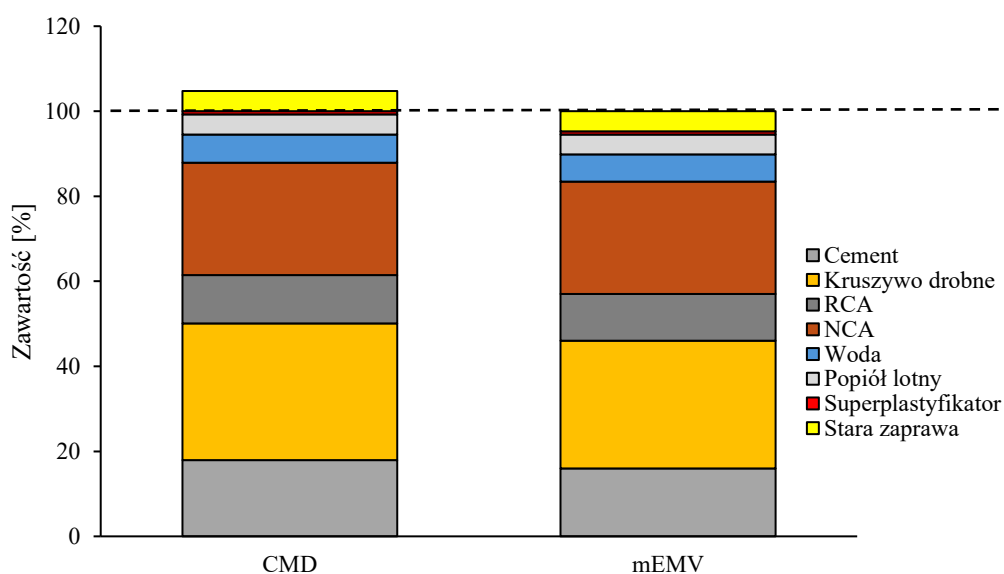
Masa kruszywa drobnego w RAC:

$$w_{OD-FA}^{RAC} = w_{FA}^{NAC} * \frac{V_{NM}^{RAC}}{V_M^{NAC}} \quad (28)$$

Kolejność obliczeń:

- Zaprojektowanie składu mieszanki referencyjnej (NAC) według wybranego standardu i kryteriów;
- Wyznaczenie masy wody, cementu i kruszywa naturalnego w NAC;
- Zastosowanie współczynnika S do obliczenia RMC oraz obliczenie współczynnika R (równanie 17);
- Obliczenie objętości NCA i RCA w mieszance RAC na podstawie równań 20 i 21;
- Obliczenie objętości RCA i NCA w NAC z równania 22;
- Obliczenie masy wysuszonego RCA w mieszance RAC z równania 23;
- Obliczenie masy wysuszonego NCA w mieszance RAC z równania 24;
- Obliczenie ilości nowej zaprawy w mieszance RAC z równania 25;
- Obliczenie masy wody, cementu i kruszywa drobnego w mieszance RAC z równań 26, 27 i 28.

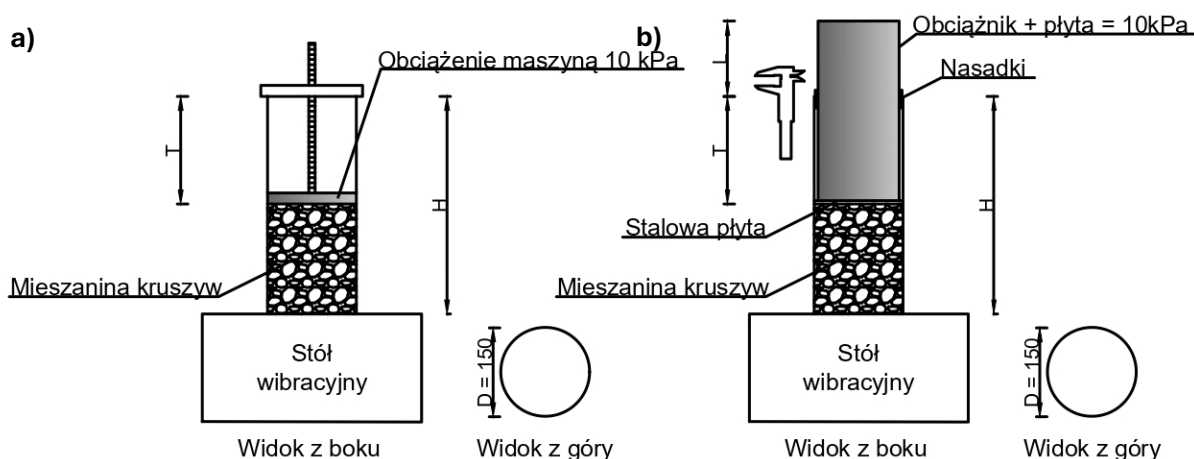
Metoda mEMV rozróżnia starą zaprawę i oryginalne kruszywo grube, stosując określone współczynniki korekcyjne. Rezultatem jest redukcja cementu, piasku i wody, aby uwzględnić obecność starej zaprawy, co czyni to podejście bardziej przyjaznym dla środowiska. Na Rysunku 38 zobrazowano porównanie ilości poszczególnych składników betonu z 30% zawartością kruszywa grubego z recyklingu dla metody mEMV i projektowania opartego na zwykłej zamianie kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe (ang. *conventional mix design*, CMD). Biorąc pod uwagę studium literaturowe, które wykazywało potencjał metody mEMV oraz zważywszy, że metoda ta nie była stosowana dla betonu samozagęszczającego się, wybrano ją jako metodę projektowania i porównano z metodą CMD.



Rysunek 38. Porównanie ilości składników betonu z 30% zawartością kruszywa grubego z recyklingu w oparciu o metodę projektowania

4.3.3. Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się

Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 wykonano na podstawie badania gęstości upakowania kruszywa naturalnego z recyklingowym. Badanie przeprowadzono na podstawie metody opracowanej w [61]. Nowatorski charakter niniejszego opracowania polega na analizie gęstości upakowania mieszaniny kruszywa naturalnego z kruszywem recyklingowym. Dotychczas w literaturze testy gęstości upakowania dotyczyły jednego rodzaju kruszywa o zróżnicowanej frakcji ziarnowej. Przyjęto ilość kruszywa równą 3 kg. Wysokość cylindra została dostosowana w taki sposób, aby umożliwić swobodne usunięcie obciążenia oraz kruszywa. W związku z tym, w badaniu mierzono, o ile obciążnik wystaje ponad krawędź cylindra, znając całkowitą wysokość cylindra oraz masę kruszywa. Porównanie pomiędzy zmodyfikowaną autorską metodą a metodą oryginalną z [61] przedstawiono na Rysunku 39. Badanie przedstawiono na Rysunku 40. Do wykonania testu wykorzystano: stalową rurę zaślepioną z jednej strony, kruszywo umieszczone wewnątrz rury, cienką stalową płytę pełniącą rolę poziomej podstawy dla obciążenia, obciążnik w formie cylindra, nasadki na ścianach rury ograniczające przemieszczanie się obciążenia oraz stół wibracyjny. Dla każdego przypadku wykonano pięć testów. Odległości mierzono za pomocą suwmiarki. Kruszywo przygotowywano zgodnie z proporcjami wynikającymi z rozkładu uziarnienia, dokładnie mieszano przez 2 minuty, umieszczano w urządzeniu badawczym, a następnie ponownie mieszano poprzez ułożenie rury w pozycji poziomej i jej toczenie przez 30 sekund. Celem badania było określenie wysokości wystającej części obciążenia (czyli osiadania kruszywa), przy założeniu różnicy pomiędzy kolejnymi pomiarami mniejszej niż 0,5 mm, przy minimum trzech pomiarach spełniających to kryterium. Dla każdego pomiaru rejestrowano wysokość wystającej części cylindra przed zagęszczeniem na stole wibracyjnym oraz po jego zakończeniu. Proces zagęszczania przy użyciu wibracji trwał 2 minuty.



Rysunek 39. Porównanie badania gęstości kruszywa: a) oryginalna metoda [61] b) autorskie badanie



Rysunek 40. Badanie gęstości upakowania: a) cylinder z obciążnikiem b) stan przed badaniem dla próbki z 60 % NCA i 40 % RCA c) stan po badaniu dla próbki 100 % RCA

Gęstość upakowania obliczano zgodnie z poniższym wzorem:

$$\phi_{max} = \frac{\sum \frac{M_i}{\rho_{di}}}{(H - T) \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (29)$$

Gdzie:

H - wysokość cylindra [mm]

T - odległość od wierzchu kruszywa do górnej krawędzi cylindra [mm]

D - wewnętrzna średnica cylindra [mm]

ρ - gęstość kruszywa [kg/m^3]

M - masa kruszywa [kg]

4.3.4. Zaprojektowanie mieszanki samozagęszczającej się

Na podstawie analiz przedstawionych w punkcie 4.3 wybrano ostateczne składniki serii jak przedstawiono w Tabeli 23. Ilości poszczególnych składników zmieniają się wraz z rosnącą zawartością kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 w mieszance, zgodnie z projektowaniem mEMV. Na podstawie wyników badania gęstości upakowania kruszywa zdecydowano się wykorzystać analizowany materiał (kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1) jako częściowy zamiennik kruszywa grubego naturalnego w mieszance w maksymalnej części – 30%. Stopień zastąpienia został podyktowany względami praktycznymi. Powyżej 50% zawartości kruszywa grubego z recyklingu odnotowano wyraźne pogorszenie właściwości mechanicznych oraz gęstości upakowania kruszywa. Zastosowanie takich mieszanek może być ograniczone do zastosowań nienośnych lub elementów tymczasowych. Jak podkreślono w sekcji 1, w krajach europejskich z reguły udział kruszywa grubego z recyklingu jest ograniczony do 20 % kruszywa. W badaniach wykorzystano 3 rodzaje metod projektowania (CMD dla serii referencyjnej, CMD i mEMV dla serii z kruszywem grubym z recyklingu), które stworzyło 7 serii badawczych. W badaniach wykorzystano materiały bez dodatkowej funkcjonalizacji oprócz podstawowej (kruszenie i przesiewanie odpadu do odpowiednich frakcji), aby uniknąć wynikającego z nich dodatkowego śladu środowiskowego. Wyniki badań

właściwości kruszywa grubego również nie sugerowały konieczności obróbki wstępnej czy funkcjonalizacji. Ze względu na cel pracy, jakim była ocena właściwości betonu samozagęszczającego się z wykorzystaniem kruszywa grubego pochodzącego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w stanie rzeczywistym, zdecydowano się nie stosować żadnych dodatkowych zabiegów modyfikacyjnych (np. obróbki powierzchniowej, separacji starej zaprawy, impregnacji czy karbonatyzacji) na etapie przygotowania kruszywa. Pozwoliło to na ocenę potencjału materiałowego kruszywa w stanie najbardziej zbliżonym do warunków praktyki inżynierskiej, w której często brak jest możliwości technologicznych lub ekonomicznych do przeprowadzenia zaawansowanej obróbki wtórnej. Tym samym uzyskane wyniki odnoszą się do realnych warunków recyklingu i stanowią wiarygodną podstawę do dalszych analiz – również tych obejmujących ewentualne metody poprawy właściwości kruszywa grubego z recyklingu w przysłych badaniach.

Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 przed użyciem do przygotowania mieszanek betonowych zostało wysuszone w temperaturze laboratoryjnej do stanu suchego, a następnie schłodzone do temperatury otoczenia. Zabieg ten miał na celu wyeliminowanie zmienności wynikającej z niekontrolowanej wilgotności oraz umożliwienie precyzyjnego dozowania wody zarobowej, zgodnie z założonym stosunkiem w/c. Stan nasycenia powierzchniowego nie był stosowany, aby móc jednoznacznie odnieść się do wpływu właściwości samego kruszywa, z pominięciem efektu absorpcji wody przed rozpoczęciem procesu mieszania. Zdecydowano się przeprowadzić wszystkie badania serii materiałowych bez dodatku żadnego dodatkowego związku chemicznego (napowietrzacz itp.), gdyż prowadzone w ramach rozprawy badania mają przede wszystkim charakter naukowy i poznawczy, a jak wspomniano w literaturze – [164] związki chemiczne wpływające na konsystencje mieszanki wpływają także na zmiany strukturalne kompozytów cementowych zaburzając przy tym wyniki uzyskane w takich badaniach. Jednym użytym związkiem chemicznym był plastifikator o stałej masie dla wszystkich serii ze względu na wymóg jego użycia w betonie samozagęszczającym się. Zdecydowano, że w badaniach wykorzystane zostanie maksymalne zastąpienie cementu (masowo) w mieszance do 20% popiołem lotnym. Taką decyzję podjęto na podstawie analizy literatury, która wskazuje, że zastąpienie cementu popiołem lotnym do 25 % jest rekomendowane, a wyższe zastąpienie cementu dodatkiem materiałów sypkich nie pozwala na uzyskanie zbliżonych właściwości kompozytów cementowych, co seria niemodyfikowana [312] [310]. Stosunek W/C utrzymywano jako 0.29 z drobnym odchyleniem dla serii mEMV z powodu metody projektowania. Próbkę kompozytów cementowych pielęgnowano odpowiednio 1, 7 lub 28 dni (w zależności od badania do przeprowadzenia). Próbkę były umieszczone w miejscu pielęgnacji od czasu ich rozformowania (po 24 godzinach od zaformowania) do czasu badania. Badania próbek betonowych przeprowadzono po 1, 7, 28 w zależności od badania, co opisano w Tabeli 24 gdzie przedstawiono szczegółowy plan badań wraz z określeniem metodologii, aparatury badawczej oraz rodzaju i liczby próbek badawczych.

Założenia:

- 3 rodzaje kompozycji betonu samozagęszczającego się:
 - CMD referencyjna - bez kruszywa grubego z recyklingu, niemodyfikowana,

- CMD modyfikowana –z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 do maksymalnie 30 % masy kruszywa,
- mEMV modyfikowana –z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 do maksymalnie 30 % masy kruszywa,
- 7 serii badawczych,
- Zastąpienie maksymalnie 30 % masy kruszywa grubego naturalnego w mieszance,
- Zastąpienie 20 % masy cementu popiołem lotnym,
- W/C dla serii referencyjnej oraz pozostałych CMD = 0.29 [-]
- Brak dodatkowej funkcjonalizacji kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 przed jego wykorzystaniem,
- Stosowanie plastyfikatora jako jedynego dodatku chemicznego,
- Wprowadzenie dla wszystkich badań jednego sposobu pielęgnacji próbek

Tabela 23. Skład betonu samozagęszczającego się ze względu na wybraną metodę projektowania i procentową zamianę kruszywa

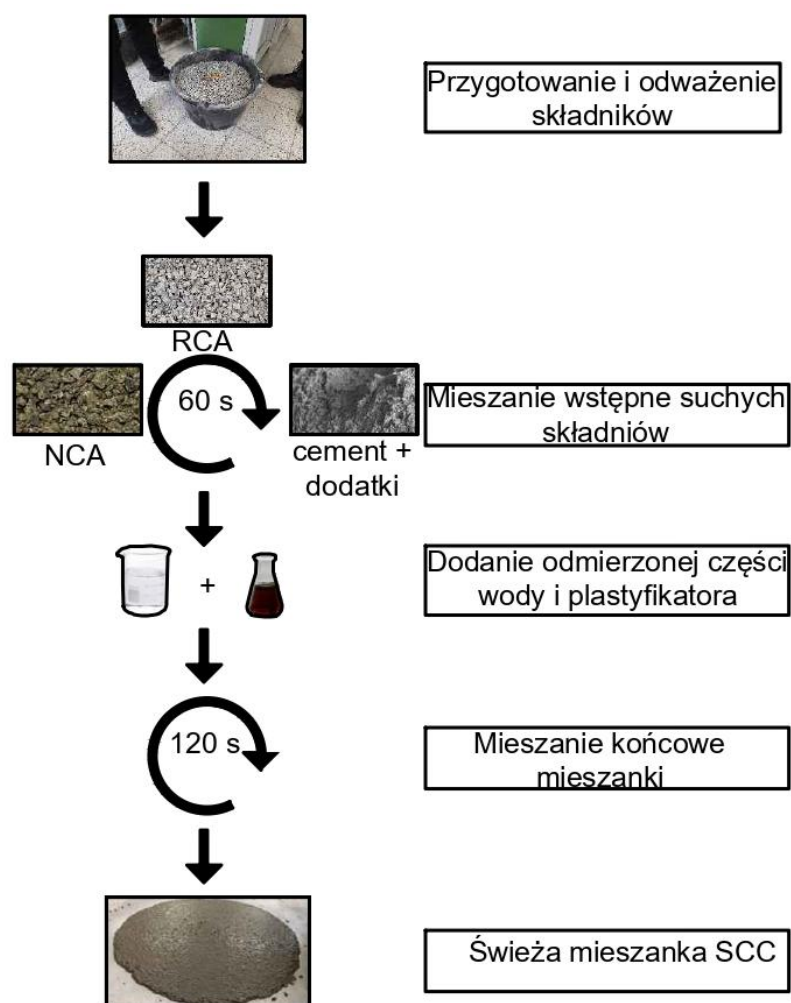
Seria	Skład [kg / m ³]						Superplastyfikator
	CEM I 52.5R	Kruszywo drobne	RCA	NCA	Woda	Popiół lotny	
Referencyjna	475	850	0	1000	176	125	19.25
mEMV 10 %	467.74	837.01	107.39	900	173.31	125	19.25
CMD 10 %	475	850	100	900	176	125	19.25
mEMV 20 %	460.48	824.02	214.78	800	170.62	125	19.25
CMD 20 %	475	850	200	800	176	125	19.25
mEMV 30 %	453.22	811.03	322.16	700	167.93	125	19.25
CMD 30 %	475	850	300	700	176	125	19.25

Składy mieszanki ustalono na podstawie analizy literatury w taki sposób, aby przyjęta kompozycja wpisywała się w wymogi stawiane mieszankom betonom samozagęszczającym się oraz zwykle stosowane mieszanki przez badaczy zajmujących się tematyką modyfikacji tych betonów za pomocą kruszywa grubego z recyklingu [114] [115]. Przygotowanie mieszanek rozpoczęto od odmierzenia składników mieszanek zgodnie ze wskazaniem kompozycji materiałowych mieszanek. Następnie rozpoczynano procedurę mieszania. Rysunek 41 przedstawia procedurę mieszania ze sobą składników. Po wymieszaniu składników mieszanek i kontroli rezultatu mieszania (w przypadku niejednorodności mieszanki decydowano się powtórzyć etap mieszania końcowego mieszanki), bezzwłocznie przechodzono do badań mieszanek betonu samozagęszczającego się. Po wykonaniu badań mieszanki były jeszcze raz mieszane w mieszalniku przez 60 sekund, a po tym rozpoczynano układanie ich w przygotowanych wcześniej formach (wymiarzy zgodne z wymiarami próbek opisanymi w Tabeli 24). Po zaformowaniu mieszanki odstawiano w miejsce przeznaczone do ich pielęgnacji do czasu przeprowadzenia badań kompozytów cementowych. Miejsca pielęgnacji zapewniały wilgotne warunki pielęgnacji (z dostępem do wody z każdej strony) w temperaturze 20 ± 2 °C. Próbkę po podziale na poszczególne rodzaje i serie oznaczano flamastrem w zależności od rodzaju metody projektowania i zawartości kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 i opisywano datą wyprodukowania.

Tabela 24. Szczegółowy plan badań i metodyka prowadzenia badań

Badana właściwość	Norma / Metoda	Aparatura badawcza	Rodzaj próbek / liczba
Etap I - Badania właściwości kruszywa grubego pochodzącego z rozbiórki budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego			
Przygotowanie odpadu do użycia jako kruszywo grube	PN-EN 12620:2013-08 [282] oraz [103]	Kruszarka szczękowa L44.41 Makrum z otworem wylotowym 20 mm, trójpokładowy przesiewacz wibracyjny o siatkach 2x2 mm, 4x4mm, 8x8 mm, kruszarka szczękowa Eko-Lab z otworem wylotowym 6 mm	400 kg RCA oraz 400 kg NCA
Zawartość ziaren nieforemnych	PN-EN 933-3:2012 [276]	Sita szczelinowe	Próbka materiału 2000 g, oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy statystycznej
Krzywa uziarnienia	PN-EN 933-1:2000 [275]	Zestaw sit normowych, wytrząsarka, waga	Próbka materiału (1000g) oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy statystycznej
Gęstość pozorna, gęstość w stanie nasyconym i suchym, nasiąkliwość	PN-EN 1097-6:2022 [279]	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna, piknometr o pojemności 1000 ml, suszarka	
Zawartość starej zaprawy	[169]	Misa pomiarowa, waga laboratoryjna, suszarka laboratoryjna, roztwór 0.1M HCL	
Morfologia ziaren	PN-EN 933-4:2008 [277]	Urządzenie optyczno-elektroniczne Elsieve	
Analiza mikrostruktury	[436] [437]	Skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-6610LV	Próbka objętości 2 cm ³ , zatapiona w niskolepkościowej żywicy epoksydowej. Szlifowanie próbki na mokro oraz polerowanie z wykorzystaniem past diamentowych o ziarnistości sięgającej 1 µm. Naniesienie ścieżki przewodzącej za pomocą taśmy miedzianej, obszar obserwacji pokryty warstwą węgla o grubości 30 nm przy użyciu napylarki próżniowej Leica EM ACE 200.
Odporność na ścieranie	PN-EN 1097-1:2024 [278]	Bęben Mikro-Devala	Próbka materiału 5g, oznaczenie min 3 krotnie w celu analizy stat.
Skład chemiczny	Badanie dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego	Dyfraktometr rentgenowski PANalytical Empyrean, oprogramowanie X'Pert HighScore Plus	Próbka materiału 5g, oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy stat.

Badana właściwość	Norma / Metoda	Aparatura badawcza	Rodzaj próbek / liczba
Etap II – Optymalizacja			
Metoda projektowania mieszanki samozagęszczającej się	Modified Equivalent Mortar Volume [421]	-	-
Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się	Zmodyfikowana wersja z [61]	Stół wibracyjny, stalowa płyta, cylinder i obciążenie	Próbka materiału 3000g, oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy stat.
Etap III - Badania właściwości mieszanki samozagęszczalnej			
Konsystencja	PN-EN 206:2014 [273]	Stolik rozplywu, stożek Abramsa, miarka	Wykonano min. 3 krotnie dla każdej serii
Lepkość			
Czas początku wiązania	Zmodyfikowana wersja z [107]	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna z przyczepionym stalowym prętem	Próbka 5 l, wykonano min. 3 krotnie dla każdej serii
Odsączanie wody z mieszanki	PN-EN 480-4:2008 [274]	Pojemnik cylindryczny, waga laboratoryjna, biureta	Próbka 16.5 l, wykonano min. 3 krotnie dla każdej serii
Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)	[309]	Cylindryczna rura oparta na stalowych podporach, akcelerometr, siłownik elektromagnetyczny	Próbka 1 l, wykonano min. 2 krotnie dla każdej serii
Etap IV – Badania właściwości stwardniałego betonu			
Jednorodność betonu	[360] [361]	Aparatura do ultradźwiękowego badanie prędkości impulsów	21 próbek sześciennych 10x10x10 cm. Badanie wykonano 3krotnie dla każdej serii dla 1, 7 i 28 dnia dojrzewania.
Wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 12390-3:2019-07 [280]	Maszyna wytrzymałościowa ZD100	35 próbek sześciennych 10x10x10 cm. Badanie wykonano 5krotnie dla każdej serii dla 28 dnia dojrzewania.
Odporność na ścieranie	PN-EN 14157:2017 [284]	waga laboratoryjna, tarcza Boehmgo	28 próbek prostopadłościennych 7,1x7,1x4 cm. Badanie wykonano 4krotnie dla każdej serii dla 28 dnia dojrzewania.
Moduł sprężystości metodą normową	PN-EN 12390-13:2021-12 [281]	Maszyna wytrzymałościowa do prób ściskania, tensometry, do pomiaru odkształceń betonu	6 próbek cylindrycznych o średnicy przekroju 5.5 cm i wysokości 19 cm. Badanie wykonano 3krotnie dla dwóch wybranych serii dla 5 dnia dojrzewania.
Analiza mikrostruktury	[436] [437]	Skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-6610LV	Szlifowanie próbki papierami ściernymi o gradacjach od 320 do 1200, polerowanie pastami diamentowymi o ziarnistości 6 µm oraz 1 µm, naniesienie ścieżki miedzianej, pokrycie przewodzącą warstwą węgla.



Rysunek 41. Schemat przedstawiający procedurę mieszania składników mieszanki betonu samozagęszczającego się

4.4. Badania właściwości mieszanki samozagęszczającej się

4.4.1. Konsystencja i lepkość

Konsystencja z definicji to zdolność mieszanki do płynięcia określana jako stopień ciekłości mieszanki betonowej według metody rozplywu stożka. Równolegle w tej metodzie można wyznaczyć czas t_{500} , mierzony od momentu podniesienia stożka, do momentu rozplywu mieszanki do średnicy 500 mm (patrz lepkość mieszanki betonowej). Lepkość to opór stawiany przez rozplywającą się mieszankę betonową. Pomiar lepkości mieszanki betonowej samozagęszczającej się wykonano na podstawie oznaczenia czasu t_{500} przy pomiarze rozplywu swobodnego stożka. Klasy konsystencji mieszanki samozagęszczającej się ze względu na konsystencję oraz lepkość przedstawiono w Tabeli 25. Przykładowy rozplyw w dwóch kierunkach został przedstawiony na Rysunku 42. Wybór tej metody podyktowany był łącznym pomiarem dwóch parametrów, co umożliwia kompleksową ocenę mieszanki przy minimalnym nakładzie pomiarowym oraz odzwierciedleniem warunków rzeczywistego betonowania przez podniesienie stożka, zbliżonych do tych występujących w praktyce budowlanej.

Tabela 25. Klasy betonu samozagęszczającego się ze względu na wyniki badań konsystencji i lepkości

Metoda pomiaru rozplywu stożka	
Konsystencja	
Klasa	Wartości graniczne [mm]
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850
Lepkość (przy pomiarze rozplywu stożka) [s]	
VS1	< 2.0
VS2	≥ 2.0



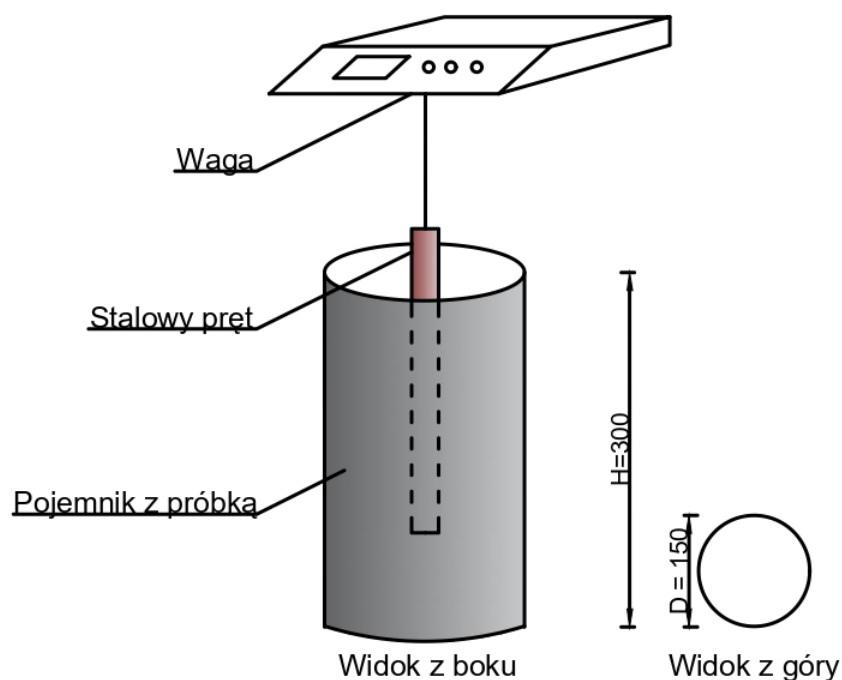
Rysunek 42. Świeża mieszanka bez segregacji ziaren i z równomiernym rozplywem

4.4.2. Czas początku wiązania

Badanie rozpoczęto bezpośrednio po zakończeniu procesu mieszania. Mieszkę betonową ostrożnie umieszczono w cylindrycznym pojemniku o wewnętrznych wymiarach $\varnothing$ 15 cm oraz wysokości 30 cm. Procedurę badawczą przeprowadzono zgodnie z metodą opisaną w teście płytowym [107]. Mieszanka była wlewana jednorazowo, umożliwiając jej swobodne rozplywanie się pod własnym ciężarem i dbając o zachowanie ciągłości. Po wypełnieniu pojemnika powierzchnię mieszanki wyrównywano z zastosowaniem minimalnych ruchów wygładzających, w celu uzyskania jednolitej, gładkiej powierzchni. Do dolnej części wagi przymocowano sztywno stalowy pręt o chropowatej powierzchni i średnicy 16 mm, który następnie zanurzano w świeżo ułożonej mieszance betonowej znajdującej się w cylindrze (patrz Rysunek 43). W miarę upływu czasu siła ścinająca powodowała stopniowy wzrost odczytu masy na wadze. Czas początku wiązania określano jako moment, w którym odnotowano maksymalną różnicę pomiędzy kolejnymi pomiarami masy, rejestrowanymi w odstępach 5-minutowych. Wybór tej metody był podyktowany

możliwością zweryfikowania wpływu kruszywa na mieszankę betonową, co jest niemożliwe w przypadku aparatu Vicata a także prostotą stanowiska.

a)



b)



Rysunek 43. Czas wiązania betonu: a) schemat b) stanowisko badawcze

4.4.3. Odsączanie wody z mieszanki

Badanie rozpoczęto bezpośrednio po przygotowaniu mieszanki. Mieszanka betonowa została starannie umieszczona w cylindrycznym pojemniku o wewnętrznych wymiarach $\varnothing 17$ cm oraz wysokości 29 cm. Procedurę badawczą przeprowadzono zgodnie z normą europejską PN-EN 480-4. Wybór tej metody wynikał ze standaryzacji i porównywalności wyników – procedura zgodna z PN-EN 480-4 umożliwia bezpośrednio zestawienie uzyskanych wyników z danymi literaturowymi oraz wymaganiami normowymi. Mieszanka została stopniowo wprowadzona do pojemnika. Ze względu na samozgęszczalność mieszanki, nie było potrzeby zewnętrznego zagęszczania i układania wielu warstw. Po ułożeniu powierzchnia betonu została wyrównana przy użyciu minimalnych ruchów wygładzających, mających na celu uzyskanie

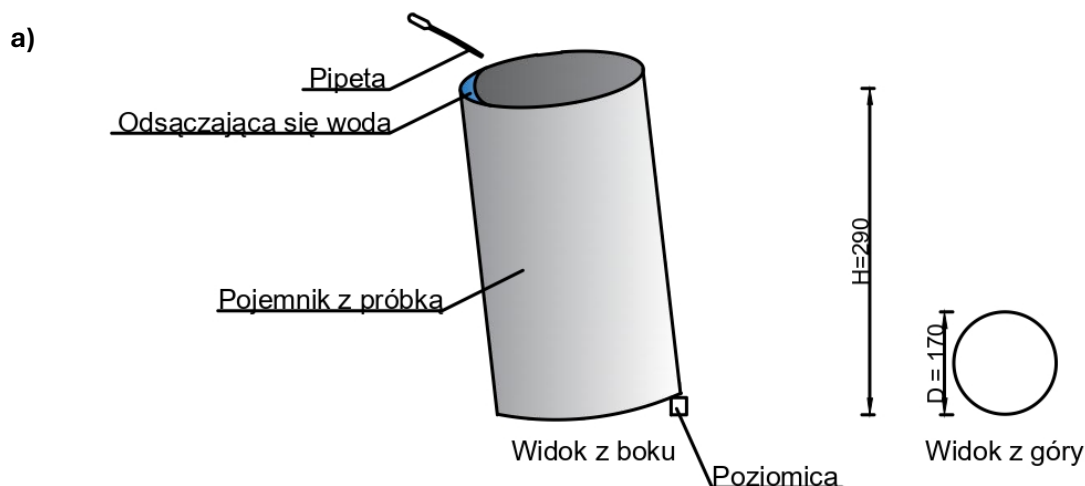
równej i gładkiej powierzchni. Pojemnik umieszczono na powierzchni wolnej od drgań i przykryto pokrywą. W trakcie badania temperatura w pomieszczeniu była utrzymywana na poziomie $20 \pm 2^\circ\text{C}$, przy względnej wilgotności powietrza wynoszącej $65\% \pm 5\%$. Wodę odsączającą się na powierzchni betonu zbierano w odstępach 10-minutowych przez pierwsze 40 minut, a następnie co 30 minut aż do momentu, w którym nie zaobserwowano dalszego wzrostu objętości wydzielonej wody. W celu zapewnienia dokładności pomiaru, zgodnie z podejściem stosowanym w [58], pod krawędź pojemnika podłożono poziomice o szerokości 2 cm (zob. Rysunek 44). Norma dopuszcza stosowanie podkładek o maksymalnym rozmiarze do 5 cm. Na całym etapie badania cylinder pozostawał przykryty pokrywą. Przefiltrowany płyn zbierano do plastikowych kubków o masie własnej 2,00 g, a następnie ważono go z dokładnością do 0,01 g przy wagi laboratoryjnej. Wodę pobierano za pomocą pipety. Miarę odsączania obliczano według następującego wzoru:

$$B_r = \frac{V_1}{V_2} * 100 [\%] \quad (30)$$

Gdzie:

V_1 - całkowita objętość zebranej wody w procesie odsączania (ml)

V_2 - objętość mieszanki betonowej użytej w badaniu (ml)



b)



Rysunek 44. Odsączanie wody z mieszanki: a) schemat b) stanowisko badawcze

4.4.4. Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)

Badanie wykonano metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (ang. *Elastic Modulus Measurement through Ambient Response Method*, EMM-ARM). Zastosowanie tej metody pozwoliło na ciągły pomiar przyrostu modułu sprężystości od momentu wykonania mieszanki. Ponieważ praca doktorska skupia się na m.in. na świeżych właściwościach betonu, możliwość obserwacji przyrostu modułu sprężystości od razu po przygotowaniu próbki jest niezwykle istotna.

W porównaniu z innymi technikami pomiaru modułu sprężystości:

- Metody dynamiczne rezonansowe (np. ASTM C215) umożliwiają wyznaczenie modułu sprężystości w sposób nieniszczący, jednak wymagają każdorazowego przerwania procesu dojrzewania próbki, co uniemożliwia ciągły zapis zmian od chwili zarobienia mieszanki.
- Metody statyczne wg PN-EN pozwalają uzyskać wartość modułu sprężystości w określonym momencie, lecz są badaniami niszczącymi i punktowymi, przez co nie odzwierciedlają przebiegu procesu usztywniania w czasie rzeczywistym.
- Metody ultradźwiękowe (UPV) oferują ciągły pomiar, ale silnie zależą od wilgotności i temperatury próbki, a interpretacja wyników wymaga kalibracji względem metod mechanicznych.

Zaletą metody EMM-ARM jest to, że umożliwia ona rejestrację ewolucji modułu sprężystości w trybie in-situ, bez ingerencji w próbkę, co pozwala uchwycić dynamiczne zmiany zachodzące w pierwszych godzinach i dniach dojrzewania betonu. Unikalny ekwipunek oraz *know-how* zostało opracowane w Uniwersytecie Minho w Portugalii przez prof. Miguela Azenha. Metoda ta jest już w użyciu około 15 lat, jej dokładność została potwierdzona licznymi badaniami i wciąż jest ona udoskonalana [309]. Ze względu na unikalność ekwipunku, badanie modułu sprężystości metodą EMM-ARM zostało przeprowadzone podczas stażu na Uniwersytecie Minho. Wyniki badania zostały porównane z klasyczną metodą badania modułu sprężystości (opisaną w 4.5.4).

Łącznie przebadano 14 próbek, przy czym badania rozpoczynano niezwłocznie po zakończeniu procesu mieszania. Każdy test trwał 5 dni ze względu na największe zmiany zachodzące w przyroście modułu sprężystości podczas pierwszych dni dojrzewania betonu. Podczas całego okresu badawczego temperatura w pomieszczeniu była utrzymywana na poziomie $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, a wilgotność względna powietrza kontrolowana na poziomie $65\% \pm 5\%$. Konfiguracja stanowiska badawczego w metodzie EMM-ARM została dostosowana do rodzaju badanego materiału (zaprawa, zaczyn cementowy lub beton). Ze względu na stosunkowo niewielki maksymalny wymiar ziaren kruszywa grubego (8 mm), zastosowano konfigurację opracowaną dla zaczynu cementowego [124]. Konfiguracja stanowiska badawczego, przedstawiona na Rysunku 45, wykorzystuje cylindryczną rurę PVC o długości 0,55 m, pełniącą rolę formy. Średnica zewnętrzna i wewnętrzna rury wynoszą odpowiednio 50 mm i 44 mm. Forma jest ustawiona poziomo, podparta dwoma poziomymi prętami, które przechodzą bocznie przez środek przekroju poprzecznego belki kompozytowej. Belka ta opiera się na dwóch specjalnie zaprojektowanych stalowych podporach: jednej stałej i jednej przegubowej, co umożliwia precyzyjne dostosowanie nachylenia poprzecznego układu i kompensację

ewentualnych nieosiowości podpór. Taka konfiguracja zapewnia zachowanie się układu jako swobodnie podpartej belki wolnoopręślowej. Drgania konstrukcji są rejestrowane za pomocą wysokoprecyzyjnego akcelerometru przymocowanego w środku rozpiętości belki. Niewielka siła dynamiczna przykładana jest do belki za pośrednictwem siłownika elektromagnetycznego, działającego bezkontaktowo. Autor metody zaleca prowadzenie badań z udziałem co najmniej dwóch belek jednocześnie co pozwala zapewnić powtarzalność wyników w obrębie jednej serii pomiarowej [339], co zostało wykonane podczas badań własnych. Ewolucję modułu sprężystości wyznacza się na podstawie zmian częstotliwości rezonansowej belki kompozytowej, obliczanej na podstawie równania ruchu swobodnie podpartej belki z masą skupioną w środku rozpiętości:

$$\bar{E}\bar{I} = \frac{\partial^4[\varphi(x) * Y(t)]}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2[\varphi(x) * Y(t)]}{\partial t^2} = 0 \quad (31)$$

Gdzie:

$Y(t)$ - amplituda przemieszczenia pionowego w funkcji czasu akwizycji t [s], wyrażona względem postaci ugięcia $\varphi(x)$,

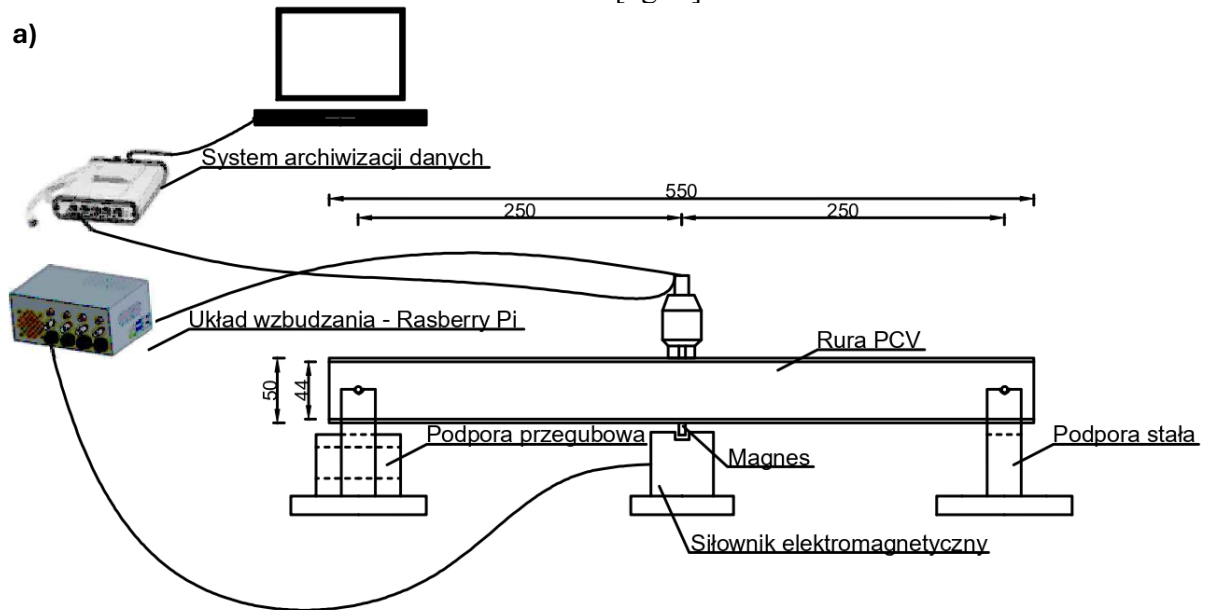
x – współrzędna wzdłuż rozpiętości belki [m],

$\bar{E}$ - uśredniony (homogenizowany) moduł sprężystości [Pa],

$\bar{I}$ - moment bezwładności przekroju poprzecznego belki kompozytowej [m⁴],

$\bar{m}$ - równomiernie rozłożona masa wzdłuż belki [kg/m].

a)



b)

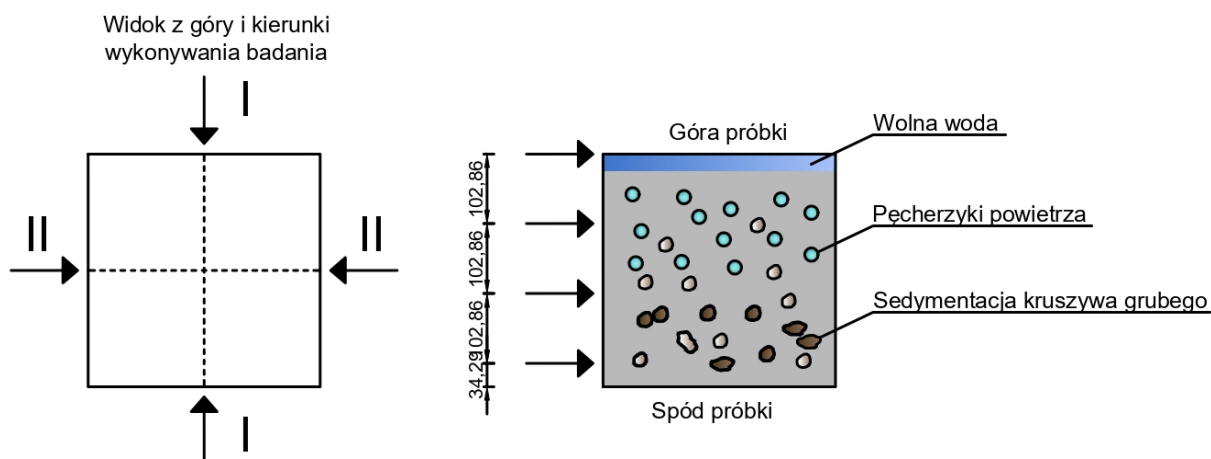


Rysunek 45. Badanie modułu sprężystości metodą EMM-ARM według [309]: a) schemat
b) stanowisko badawcze

4.5. Badania właściwości stwardniałego betonu

4.5.1. Jednorodność betonu

Badanie jednorodności betonu przeprowadzono używając metody pomiarów prędkości fali ultradźwiękowej (ang. *ultrasonic pulse velocity*, UPV). Badania realizowano by uzupełnić luki badawcze w [360] oraz [361], tak więc zdecydowano się podążać tą samą metodologią co opisane badania w celu późniejszego porównania wyników. Przebadano łącznie 21 próbek, wykonując pomiary co 2 cm wzdłuż przekroju poprzecznego każdej kostki o wymiarach 10×10×10 cm. Każda próbka została poddana badaniu w 1., 7. oraz 28. dniu dojrzewania. Podczas prowadzenia pomiarów temperatura w pomieszczeniu była utrzymywana na poziomie $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, przy względnej wilgotności powietrza wynoszącej $65\% \pm 5\%$. Test UPV przeprowadzono na próbkach betonowych przygotowanych do badań wytrzymałości na ściskanie (patrz Sekcja 4.5.2). Pomiar UPV miał na celu ocenę rozkładu prędkości rozchodzenia się fal wzdłuż przekroju elementów betonowych. Miejsca pomiarowe oznaczano co 3 cm w układzie pionowym, a następnie dokonywano pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w tych punktach. Uzyskane dane umożliwiły oszacowanie zmian jednorodności w wysokości próbki. Rysunek 46 przedstawia metodę badawczą oraz wizualizację spodziewanych wyników w przekroju poprzecznym próbki na różnych wysokościach.



Rysunek 46. Schemat badania jednorodności betonu w przekroju i spodziewany przekrój

4.5.2. Wytrzymałość na ściskanie

Próbki do badań wytrzymałości na ściskanie zostały wykonane w formach o wymiarach $10 \times 10 \times 10$ cm. Po 24 godzinach kostki zostały rozformowane i zanurzone w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, w celu zapewnienia optymalnych warunków dojrzewania. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3, która stanowi aktualny standard europejski dla oceny wytrzymałości betonów konstrukcyjnych, w tym samozagęszczającego się. Zastosowanie kostek sześciennych $10 \times 10 \times 10$ cm wynika z częstego stosowania tego formatu w badaniach betonu z recyklingu w literaturze (Tabela 10). Testy wykonano po 28 dniach, przy utrzymaniu temperatury w pomieszczeniu na poziomie $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz wilgotności względnej $65\% \pm 5\%$. Próbki zostały wysuszone do stałej masy, ich wymiary i masa zanotowane zgodnie z PN-EN 206+A1:2016-12. Badanie zostało przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej ZD100. Schemat badania został przedstawiony na Rysunku 47.



Rysunek 47. Badanie wytrzymałości na ściskanie: a) próbka przed badaniem b) próbka po badaniu

4.5.3. Odporność na ścieranie

Próbki do badań odporności na ścieranie zostały wykonane w formach o wymiarach $7,1 \times 7,1 \times 4$ cm. Po 24 godzinach próbki zostały rozformowane i zanurzone w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, w celu zapewnienia optymalnych warunków dojrzewania. Badania

odporności na ścieranie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 14157:2017. Badania przeprowadzono metodą tarczową Böhme, polegającą na mieleniu próbek za pomocą 22 obrotów tarczy, odwracaniu próbek, a następnie ponownym mieleniu przez maksymalnie 16 cykli (Rysunek 48). Metoda tarczowa Böhme jest najczęściej stosowaną techniką laboratoryjną w Polsce pozwalającą na ocenę podatności materiałów na degradację pod wpływem intensywnego tarcia, typowego dla powierzchni narażonych na eksploatację (np. posadzki przemysłowe, chodniki, nawierzchnie drogowe).



Rysunek 48. Badanie odporności na ścieranie: a) tarcza Böhme b) próbka przed badaniem c) próbka po badaniu

4.5.4. Moduł sprężystości metodą normową

Próbki zostały wykonane w cylindrycznych formach o wymiarach $\varnothing 5,5$ cm oraz wysokości 19 cm. Po 24 godzinach walce zostały rozformowane i zanurzone w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, w celu zapewnienia optymalnych warunków dojrzewania. Pomiar modułu sprężystości przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-13, która stanowi europejski standard w zakresie oznaczania statycznego modułu sprężystości przy ściskaniu. Metoda ta została wybrana ze względu na jej referencyjny charakter, co umożliwia jednoznaczne i powtarzalne

oznaczenie modułu sprężystości, co jest kluczowe przy porównaniach wyników z innymi badaniami, a także w walidacji użytej w badaniach metody EMM-ARM. Podczas badań temperatura w pomieszczeniu była utrzymywana na poziomie $20 \pm 2^\circ\text{C}$, a wilgotność względna powietrza wynosiła $65\% \pm 5\%$. Badania wykonano po 5 dniach dojrzewania próbek (Rysunek 49) by wyniki móc porównać z metodą EMM-ARM (sekcja 4.4.4).



Rysunek 49. Badanie modułu sprężystości metodą normową

4.5.5. Analiza mikrostruktury

Przygotowanie próbek do analizy SEM obejmowało: szlifowanie papierami ściernymi o gradacjach od 320 do 1200, polerowanie pastami diamentowymi o ziarnistości $6\text{ }\mu\text{m}$ oraz $1\text{ }\mu\text{m}$, naniesienie ścieżki miedzianej (w celu zapobieżenia naładowaniu powierzchni próbki oraz zapewnienia jej przewodnictwa elektrycznego), a następnie pokrycie powierzchni przewodzącą warstwą węgla. Warstwa węglowa o grubości $30\text{--}40\text{ nm}$ została naniesiona w warunkach wysokiej próżni ($2 \times 10^{-5}\text{ Pa}$) metodą natrysku termicznego z użyciem elektrod grafitowych. Obrazowanie mikrostrukturalne przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego JEOL JSM-6610A wyposażonego w klasyczny żarnik wolframowy, w trybie kontrastu materiałowego z detektorem elektronów wstecznie rozproszonych. Zastosowano napięcie przyspieszające 20 kV oraz prąd wiązki 39 nA . Obrazy rejestrowano przy powiększeniu $200\times$ w reprezentatywnych obszarach każdej próbki oraz w strefie ITZ. Zakres analizy mikrostrukturalnej obejmował:

- Analizę porowatości i faz hydratacyjnych matryc S1–S3.
- Analizę strefy przejściowej ITZ w odległości do $50\text{ }\mu\text{m}$ od granicy kruszywo–matryca.

Analiza obrazów została przeprowadzona wieloetapowo zgodnie z metodologią opisaną w [402] [335]. W pierwszym etapie obrazy SEM zostały zaimportowane do oprogramowania ImageJ (National Institutes of Health, USA), gdzie dokonano analizy histogramu w skali szarości. Następnie wygenerowano histogram skumulowany, na podstawie którego wyznaczono wartości progowe, przyjmując punkty przecięcia dwóch stycznych do krzywej w jej punktach przegięcia. Wszystkie piksele o wartościach od 0 do pierwszego progu zostały zaklasyfikowane jako pory, natomiast kolejne przedziały przypisano produktom hydratacji, w tym żelowi C-S-H (HP), portlandytowi (CH) oraz niezhydratyzowanym ziarnom cementu

(AC). Portlandyt nie zawsze był możliwy do jednoznacznego wyróżnienia jako osobny zakres histogramu. Na tej podstawie oprogramowanie ImageJ generowało obrazy poszczególnych składników fazowych, oznaczonych jako piksele czarne (wartość 0). Następnie, z wykorzystaniem oprogramowania Wolfram Mathematica, dokonano obliczenia liczby pikseli w każdej analizowanej fazie, co umożliwiło określenie porowatości próbki oraz udziału poszczególnych faz. Uzyskane obrazy zostały połączone z nałożonymi kolorystycznymi maskami.

4.6. Statystyczna analiza wyników badań

Analiza statystyczna wyników badań uzyskanych w pracy badawczej pozwala na ocenę rozbieżności wyników, dopasowania liczby prób badawczych czy analizę błędów względnych. W ramach rozprawy, autor korzystał z wyznaczania i analizy błędów względnych pomiarów oraz sprawdzania w sposób matematyczny niezbędnej liczby prób badawczych. Błędy względne wyników badań przeprowadzonych w rozprawie określono zgodnie z literaturą [130]. W ramach analizy statystycznej wyników zastosowano następujące techniki:

- Błąd względny (ang. *relative error*) – stosowany do oceny rozrzutu wartości pomiarowych względem wartości średniej, w celu identyfikacji potencjalnych anomalii i oceny powtarzalności pomiarów.
- Współczynnik zmienności (ang. *coefficient of variation* - CV) – obliczany jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej. Stosowany do porównania zmienności różnych właściwości materiałowych, niezależnie od ich jednostek miary.
- Analiza regresji liniowej (R^2) – stosowana w przypadkach, gdzie zachodziło podejrzenie zależności liniowej między zmiennymi (np. między gęstością a wytrzymałością, czasem a sztywnością itd.). Pozwalała na ilościową ocenę siły zależności i dopasowania modelu.
- Jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) – zastosowana do porównania wyników pomiarów różnych typów mieszanek (np. referencyjnych i zawierających kruszywo grube z recyklingu) w celu określenia czy różnice między średnimi są statystycznie istotne. Weryfikacja przeprowadzana była przy założonym poziomie istotności $\alpha = 0.05$

Matematyczne sprawdzenie niezbędnej liczby prób badawczych w celu zapewnienia odpowiedniej reprezentatywności wyników przy określonej tolerancji i poziomie zmienności określono na podstawie literatury [53], za pomocą rozkładu t-Studenta, według Wzoru 32.

$$\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} \leq \frac{\vartheta}{v} \quad (32)$$

Gdzie:

t_{α} - kwantyl rozkładu rzędu α o k stopniach swobody (-),

n – liczba próbek (-),

ϑ - założona tolerancja wartości średniej (-),

v - współczynnik zmienności (-).

We wszystkich testach statystycznych przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$, co odpowiada 95% poziomowi ufności – najczęściej stosowanemu w badaniach materiałowych. Odrzucenie hipotezy zerowej następowało wtedy, gdy wartość p (p -value) była niższa niż 0.05, co

oznaczało statystycznie istotne różnice pomiędzy porównywanymi grupami. W przypadku regresji, interpretowano wartość współczynnika determinacji R^2 , gdzie:

- $R^2 > 0.8$ – bardzo silna zależność
- $0.5 < R^2 < 0.8$ – umiarkowana zależność
- $R^2 < 0.5$ – słaba zależność.

Analizy statystyczne przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzi takich jak: Microsoft Excel i Statistica.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

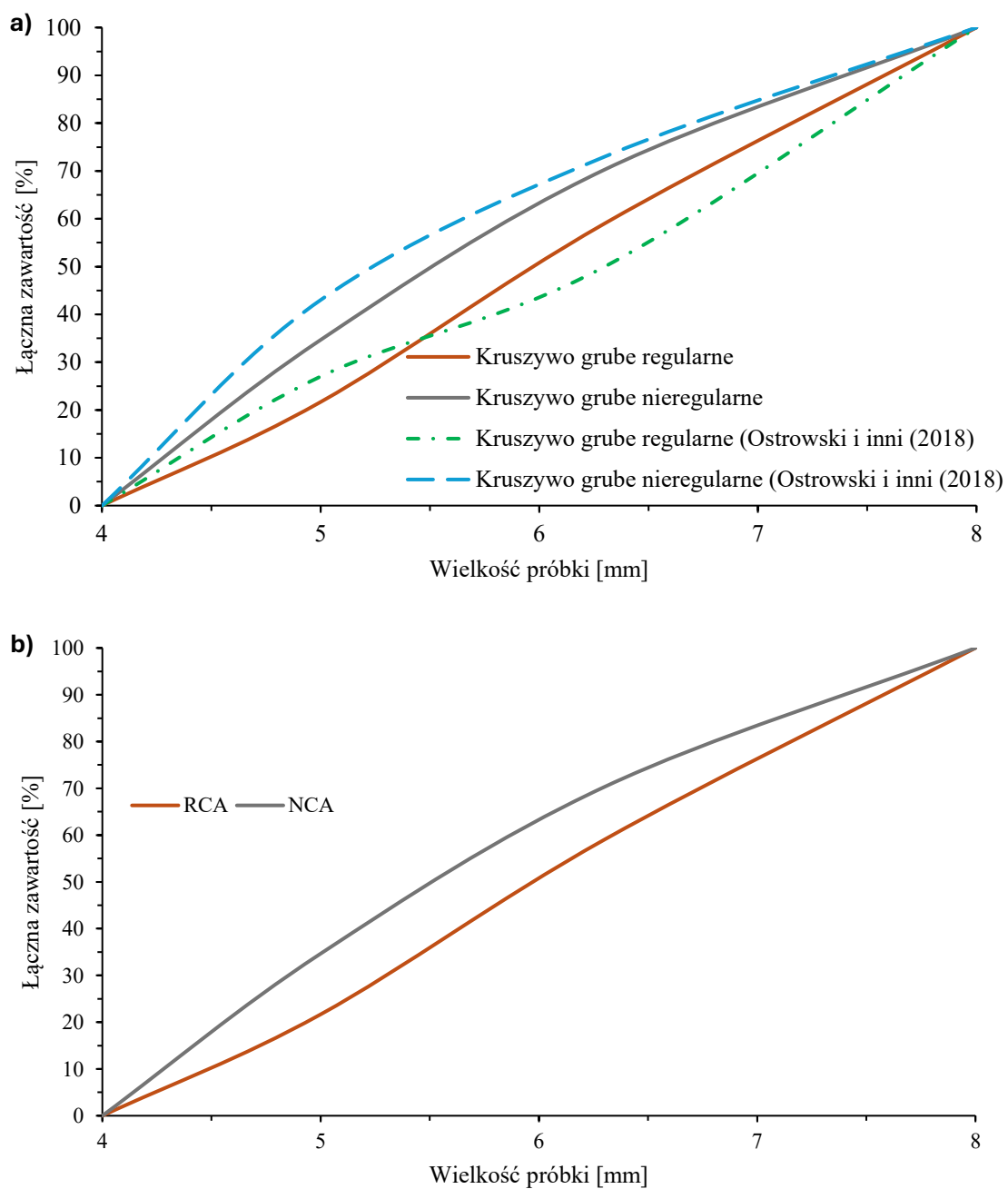
5.1. Właściwości kruszywa grubego pochodzącego z rozbiórki budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego

5.1.1. Przygotowanie odpadu do kruszywa grubego z recyklingu

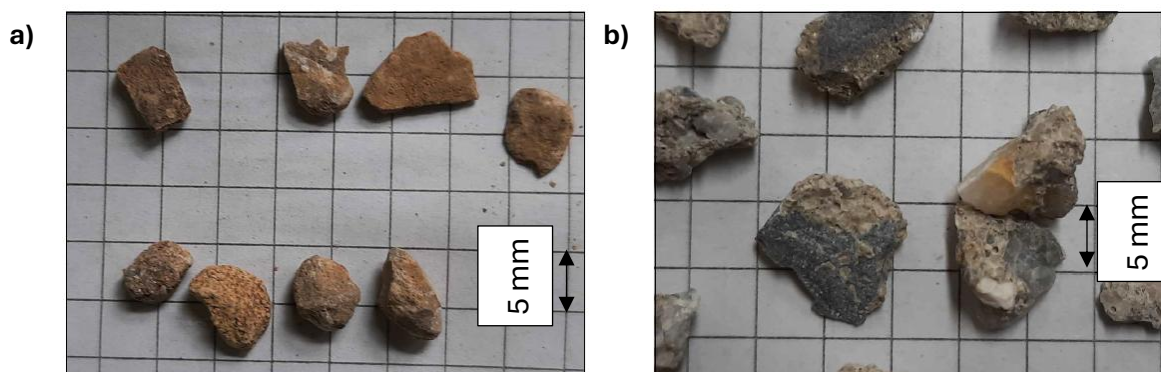
Na podstawie przeprowadzonych analiz uzyskano 41% końcowej frakcji 4–8 mm oraz 59% pozostałych frakcji, które zostały przeznaczone do dalszych badań wykraczających poza zakres niniejszej pracy. Wyniki analizy sitowej pozwoliły na wyodrębnienie udziału ziaren o nieregularnym kształcie (Tabela 26). Warto zaznaczyć, że udział ziaren nieregularnych w badanym materiale wyniósł 5,9%, co należy uznać za wartość stosunkowo niską w porównaniu do kruszyw łamanych pochodzących z naturalnych surowców skalnych. Jak wskazano w [103], w typowych układach technologicznych udział ziaren nieregularnych w produktach rozdrabniania o frakcji 4–8 mm może osiągać nawet 20%. Jest to o tyle istotne, że warunkiem otrzymania betonu o wysokich parametrach wytrzymałościowych jest nie tylko odpowiedni dobór rodzaju kruszywa, ale też ograniczenie jego maksymalnej wielkości i dobór odpowiedniej procedury ich wykonania, która obejmuje wstępną preparację kruszywa oraz sposób dozowania i mieszania jego składników [162]. Uzyskana zawartość ziaren foremnych wyeliminowała konieczność dalszej obróbki materiału. Rozkład wielkości cząstek przedstawiono na Rysunku 50. Wyniki regularności ziaren przygotowanego kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 przedstawiono na Rysunku 50a. Regularność kształtu ziaren wynika z relacji pomiędzy wąskim zakresem frakcji ziaren a rozmiarem szczeliny w sicie. Dobór konkretnego sita został oparty na założeniu, iż jego rozmiar stanowi połowę maksymalnego wymiaru ziarna danej frakcji ($d_{\max}/2$). Uzyskane wyniki porównano z badaniami dotyczącymi kruszywa granitowego stosowanego w mieszankach betonu samozagęszczającego się. Porównanie uśrednionych wartości dolomitu i kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 przedstawiono na Rysunku 50b. Analizując krzywe uziarnienia można stwierdzić, że przygotowane kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 nadaje się (pod względem granulometrycznym) do zastąpienia kruszywa grubego naturalnego w mieszance samozagęszczającej. Określone w tym badaniu krzywe uziarnienia wpisują się w doniesienia literaturowe co przedstawiono na wykresie. Ponadto stosując opisany wcześniej sposób kruszenia uzyskano wysoką regularność ziaren, co jest wskazane dla betonu samozagęszczającego się ze względu na uzyskanie jak najmniejszej segregacji. Pod względem składu ziarnowego, oba kruszywa wykazują bardzo zbliżony rozkład frakcji i zostały przygotowane przy użyciu tego samego zestawu urządzeń (Rysunek 51).

Tabela 26. Analiza sitowa reprezentatywnej próbki

Klasa ziaren [mm]	Masa ziaren [g]	Rozmiar szczeliny sita [mm]	Masa ziaren nieregularnych [g]	Udział ziaren nieregularnych [%]
4 – 5	383	2,50	35	9,10
5 – 6,3	636	3,15	36	5,70
6,3 – 8	688	4,00	30	4,40
Suma	1707			Średnia: 5,90



Rysunek 50. Rozkład wielkości cząstek: a) przygotowanego kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 i jego regularności w porównaniu do kruszywa grubego z literatury b) uśrednione wartości przygotowanych kruszyw



Rysunek 51. Kruszywo grube użyte w pracy doktorskiej: a) dolomit – kruszywo grube naturalne b) odpad z betonowych paneli budynku Plattenabu P1 - kruszywo grube z recyklingu

5.1.2. Gęstość pozorna, gęstość w stanie nasyconym i suchym, nasiąkliwość i wodoządnosć

Na podstawie wyników przedstawionych w Tabeli 27 można stwierdzić, że wybrane porównawcze kruszywo grube naturalne charakteryzuje się wysoką jakością (na podstawie klasyfikacji w [170]), co potwierdzają jego właściwości: gęstość pozorna, w stanie nasyconym i w stanie suchym powyżej $2,5 \text{ g/cm}^3$ oraz nasiąkliwość wodą poniżej $3,0\%$. Z kolei kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 klasyfikuje się jako kruszywo średniej jakości – jego gęstość pozorna, w stanie nasyconym i w stanie suchym mieści się w przedziale poniżej $2,5 \text{ g/cm}^3$, lecz powyżej $2,3 \text{ g/cm}^3$, a nasiąkliwość przekracza $3,0\%$, ale pozostaje poniżej $5,0\%$. Podwyższona nasiąkliwość kruszywa grubego z recyklingu wynika z porowatości ziaren spowodowanej obecnością przylegającego zaczynu cementowego. Wysoka porowatość może negatywnie wpływać na właściwości mechaniczne przyszłego betonu. W związku z tym zastępowanie kruszywa grubego naturalnego przez recyklingowe powinno być każdorazowo poprzedzone analizą, czy spełnione zostaną założone wymagania wytrzymałościowe mieszanki betonowej. Zgodnie z przeglądem literaturowym i badaniami własnymi, ustalono maksymalną zawartość kruszywa grubego z recyklingu jako 30% całkowitej masy kruszywa. Warto podkreślić, że mimo jego zwiększonej nasiąkliwości, według przeglądu literaturowego, kruszywo grube z recyklingu z nasiąkliwością poniżej 4% ma potencjał do wykorzystania w produkcji betonu bez znaczących modyfikacji istniejących konfiguracji i metod produkcji, pozostając w dopuszczalnych standardach dotyczących właściwości świeżego, mechanicznego i trwałości [391].

W pracy [356] wskazano, że zapotrzebowanie na wodę dla kruszywa grubego może zależeć od morfologii ziaren, chropowatości powierzchni, ich rozmiaru, wzajemnych proporcji oraz wymaganej konsystencji mieszanki betonowej. W niniejszym badaniu zastosowano zapotrzebowanie na wodę określone według Jamrożego (2015), który zaproponował wskaźniki wodne dla kruszyw na podstawie metod opracowanych przez Sterna [358] oraz Bolomeya [186] [142]. Zapotrzebowanie na wodę dla cementu i kruszywa powinno być określane łącznie, tj. w powiązaniu obu składników w jednej relacji. Znajac pozorną gęstość ziaren danego kruszywa, można wyznaczyć jego zapotrzebowanie na wodę poprzez podzielenie standardowej gęstości $2,65 \text{ g/cm}^3$ przez gęstość właściwą analizowanego kruszywa, a następnie

przemnożenie przez odpowiedni wskaźnik wodny. Wyniki dotyczące zapotrzebowania na wodę przedstawiono w Tabeli 28.

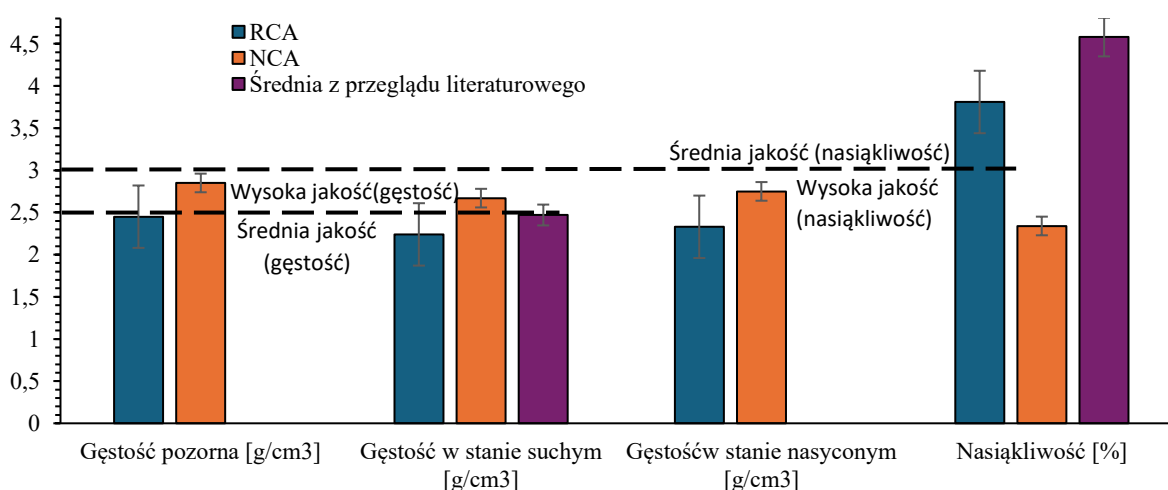
Tabela 27. Uśrednione wyniki gęstości i nasiąkliwości wody dla kruszyw grubych

Właściwość	RCA [g/cm ³]	NCA [g/cm ³]	Jakość kruszywa na podstawie [171]
Gęstość pozorna ρ_a [g/cm ³]	2.45	2.85	Dla ≥ 2.5 – wysoka jakość, dla ≥ 2.3 – średnia jakość
Gęstość w stanie suchym ρ_{rd} [g/cm ³]	2.24	2.67	Dla ≥ 2.5 – wysoka jakość, dla ≥ 2.3 – średnia jakość
Gęstość w stanie nasyconym ρ_{ssd} [g/cm ³]	2.33	2.75	Dla ≥ 2.5 – wysoka jakość, dla ≥ 2.3 – średnia jakość
Nasiąkliwość wodą [%]	3.81	2.34	Dla ≥ 2.5 – wysoka jakość, dla ≥ 2.3 – średnia jakość

Tabela 28. Uśrednione wyniki wodożądności dla kruszyw grubych na podstawie [142]

Rodzaj kruszywa	Uziarnienie [mm]	Wskaźnik wodny	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Wodożądność [kg/kg kruszywa]
NCA	4 – 8	0,026	2,45	0,0281
RCA	4 – 8	0,026	2,85	0,0242

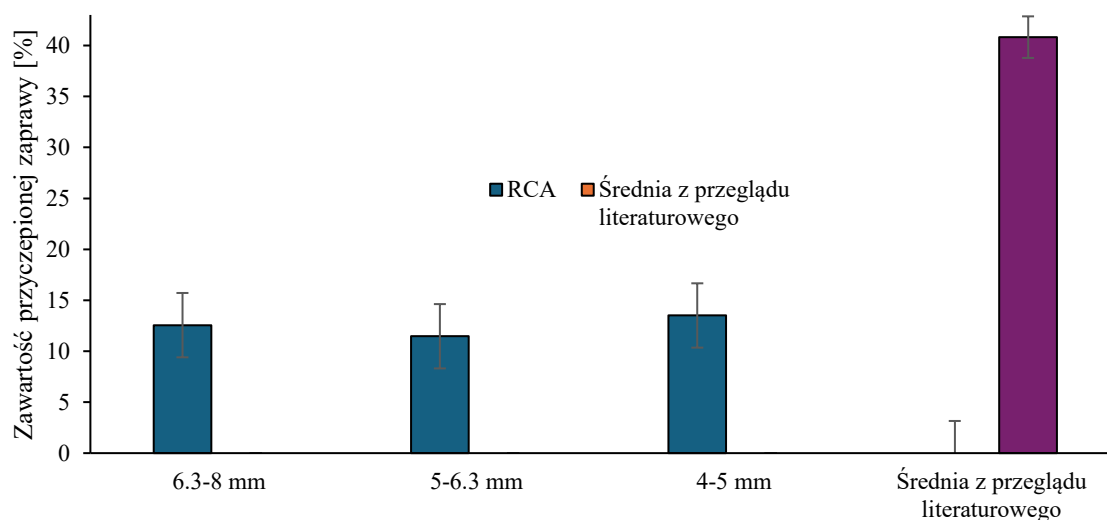
Porównując wyniki z badaniami z literatury (Rysunek 52), analizowane kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 charakteryzuje się najniższą gęstością, co wskazuje na jego dużą porowatość. Jednocześnie jego nasiąkliwość jest niższa niż średnia z literatury, aczkolwiek nadal wyższa niż w przypadku dolomitu. Może to sugerować, że kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 zatrzymuje wodę, ale w ilości, która nie powinna istotnie zakłócać procesu hydratacji cementu. W przypadku betonów o wysokim zapotrzebowaniu na wodę, zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 może przyczynić się do redukcji ogólnej ilości potrzebnej wody zarobowej oraz ograniczenia negatywnych zjawisk w świeżej mieszance, takich jak odsączanie wody.



Rysunek 52. Wyniki gęstości i absorpcji wody w porównaniu do uśrednionych wartości z przeglądu literatury

5.1.3. Zawartość starej zaprawy

Z Rysunku 53 wynika, że zawartość starej zaprawy przylegającej do kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 jest równomiernie rozłożona we wszystkich trzech frakcjach ziaren i wynosi od 11,5 do 13,5% masy całkowitej kruszywa grubego. Ogólnie przyjmuje się, że kruszywa wtórne uzyskiwane z recyklingu betonu zawierają od 65 do 70% objętości naturalnego kruszywa grubego oraz od 30 do 35% objętości starej zaprawy cementowej [266]. Ilość tej zaprawy ma kluczowe znaczenie dla właściwości kruszywa dodawanego do betonu. Dlatego też, przy projektowaniu nowej mieszanki betonowej, należy uwzględnić zawartość starej zaprawy. Wyniki badań zawartości starej zaprawy na kruszywie grubym z recyklingu Plattenbau P1 sugerują, że zawartość starej zaprawy jest niższa niż w innych badaniach z przeglądu literatury. Należy jednak pamiętać, że kwas o niskim stężeniu usuwa jedynie luźne cząstki zaprawy, natomiast zwięzła zaprawa cementowa pozostaje związana z kruszywem po badaniu. Zastosowanie roztworu kwasu o wyższym stężeniu lub intensywnego szczotkowania może prowadzić do erozji ziaren i nadania ich powierzchni ostrych krawędzi, co z kolei może wpływać negatywnie na ITZ między kruszywem a zaczynem cementowym [140]. Niska zawartość starej zaprawy w porównaniu do przeglądu literaturowego świadczy z korzyścią o kruszywie grubym z recyklingu Plattenbau P1 i niskim poziomem zaburzenia ilości faktycznej zaprawy (starej i nowej) w mieszance samozagęszczającej się.



Rysunek 53. Wyniki zawartości starej zaprawy przyczepionej do kruszywa w porównaniu do średnich wartości na podstawie przeglądu literatury

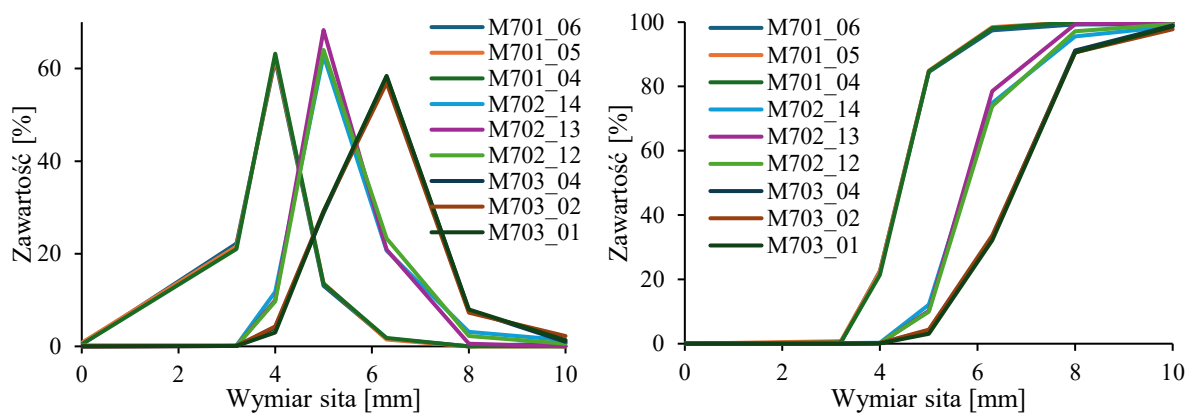
5.1.4. Charakterystyka morfologiczna kruszywa grubego

Próbki zostały przygotowane w trzech grupach frakcyjnych: 4–5 mm, 5–6,3 mm oraz 6,3–8 mm, a następnie poddane analizie sitowej (Rysunek 54), analizie rozkładu ilościowego (Rysunek 55), objętościowego (Rysunek 56) oraz ocenie kształtu ziaren zgodnie z klasyfikacją Zingga (Tabela 29, Rysunek 57, Tabela 30). Analiza sitowa oraz rozkład ilościowy próbek potwierdziły, że podział ziaren na wąskie klasy frakcyjne przy zastosowaniu dwustopniowego procesu rozdrabniania pozwolił na precyzyjne rozdzielanie materiału. Rysunek 54a i Rysunek 54b wykazują wyraźną granicę między frakcjami odpowiadającymi założonym zakresom: 4–5 mm, 5–6,3 mm oraz 6,3–8 mm. Zgodnie z danymi przedstawionymi na Rysunku 55 i Rysunku

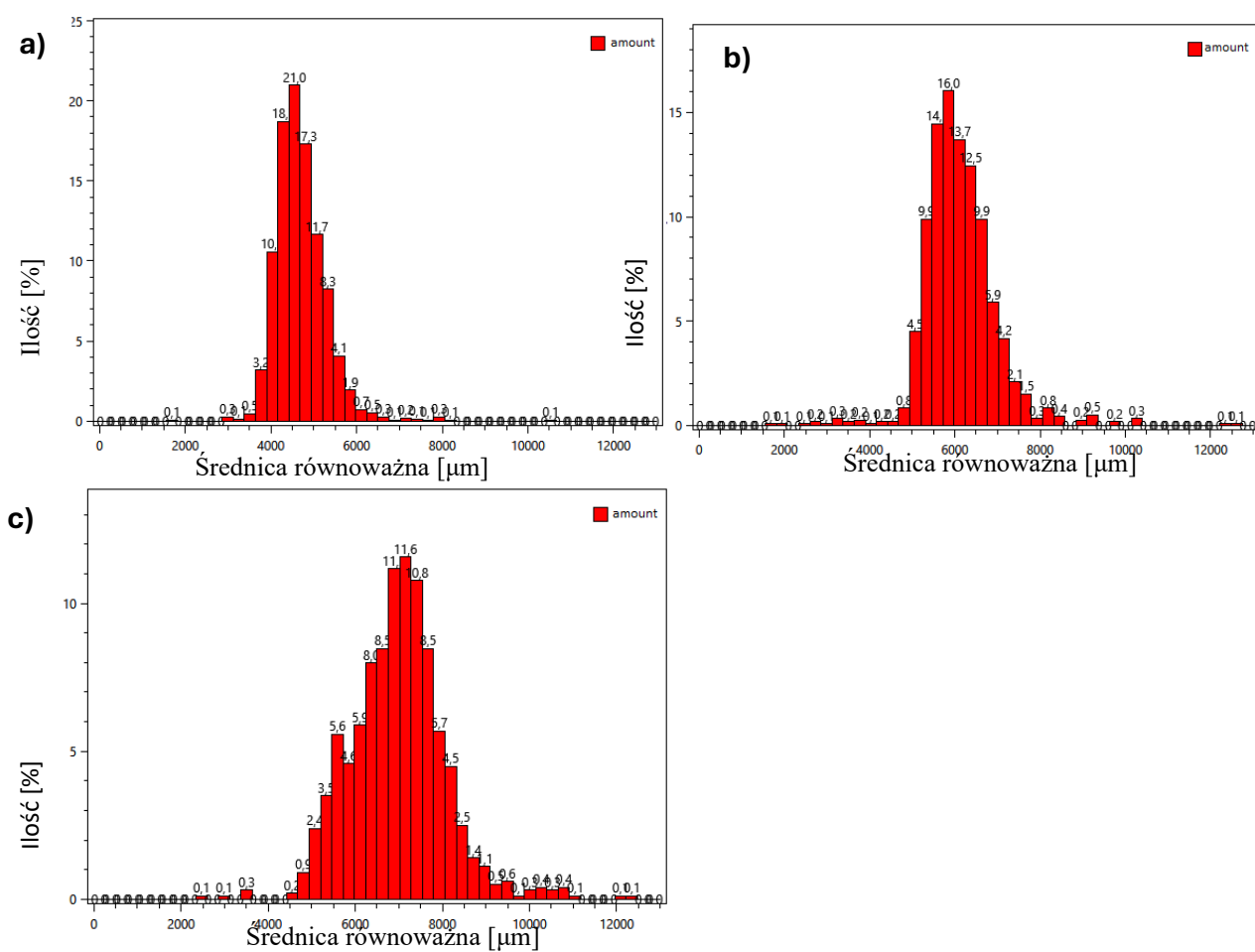
56, udział ziaren niespełniających założonego rozmiaru w rozkładzie ilościowym oraz objętościowym wynosił w każdej z frakcji poniżej 10%. Prawidłowy rozkład ziarnowy ma istotne znaczenie dla właściwości betonu – wpływa na ilość użytego kruszywa, zapotrzebowanie na cement i wodę, urabialność oraz trwałość betonu. Przegląd literatury wskazuje, że wytrzymałość na ścislenie betonu pozostaje w ścisłym związku z rozkładem uziarnienia kruszywa grubego [225] [217].

Analiza kształtu ziaren według klasyfikacji Zingga (Tabela 29) potwierdziła wcześniejsze wyniki dotyczące morfologii kruszywa z pkt. 5.1.1 gdzie wykazano, że udział ziaren nieregularnych w próbce reprezentatywnej wynosił 5,9%. Analiza wartości średnich z Tabeli 29 wykazała, że większość ziaren we wszystkich frakcjach posiada kształt kulisty (prawie 40%), z trzema wymiarami o zbliżonej długości. Około 25% ziaren charakteryzuje się dwoma podobnymi wymiarami i jednym znacząco mniejszym lub większym. Ziarna, które nie są kuliste, dyskowe ani cylindryczne, stanowią 11,1% ogółu, co koresponduje z udziałem ziaren nieregularnych (5,9%) uzyskanym w analizie sitowej. Szczegółową analizę dla każdej frakcji przedstawiono na Rysunku 57. Wyniki zostały pogrupowane w cztery prostokąty odpowiadające klasyfikacji kształtu ziaren, opisanej na Rysunku 57d. Dla każdej frakcji ziarna kuliste wykazują największy udział objętościowy, przy zachowaniu relacji wymiarów $a/b > 0,667$ oraz $b/c > 0,667$. Wszystkie wykresy wskazują na wysoką regularność kształtu ziaren; nawet cząstki o innych kształtach znajdują się blisko granicy klasy kulistej. Wyniki te mają kluczowe znaczenie dla właściwości betonu, ponieważ morfologia ziaren kruszywa grubego znacząco wpływa na wytrzymałość na ścislenie oraz sztywność betonu [433]. Obecność ostrych krawędzi w nieregularnych ziarnach może powodować lokalne koncentracje naprężeń. Z kolei ziarna o regularnych kształtach zapewniają bardziej jednorodne rozłożenie w strukturze mieszanki betonowej [252]. Tabela 30 potwierdza wyniki analizy morfologicznej. 68% próbek reprezentatywnych sklasyfikowano jako formy kubiczne, a 32% jako spłaszczone, według wskaźnika SF. Zgodnie z analizą kulistości, 67% próbek przyjęło formę sub-kostek lub kostek, a 33% zaklasyfikowano jako wydłużone. Porównując uzyskane wartości ze średnimi z przeglądu literaturowego, można zauważyć, że kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 wykazuje znacznie bardziej sześcienny charakter niż kruszywa wtórne z innych źródeł. Należy podkreślić, że proces kruszenia stosowany przy uzyskiwaniu kruszyw z rozbiórki konstrukcji betonowych powoduje uszkodzenia mechaniczne materiału, prowadząc do powstawania licznych mikropęknięć oraz ostrych krawędzi ziaren. Na powierzchni kruszyw pozostaje także stara matryca cementowa, co zwiększa powierzchnię właściwą i porowatość powierzchniową. Sposób kruszenia odgrywa zatem kluczową rolę w kształtowaniu morfologii kruszywa grubego. Zastosowany w niniejszym badaniu proces dwustopniowego rozdrabniania przyczynił się do uzyskania ziaren o przeważnie kubicznym kształcie.

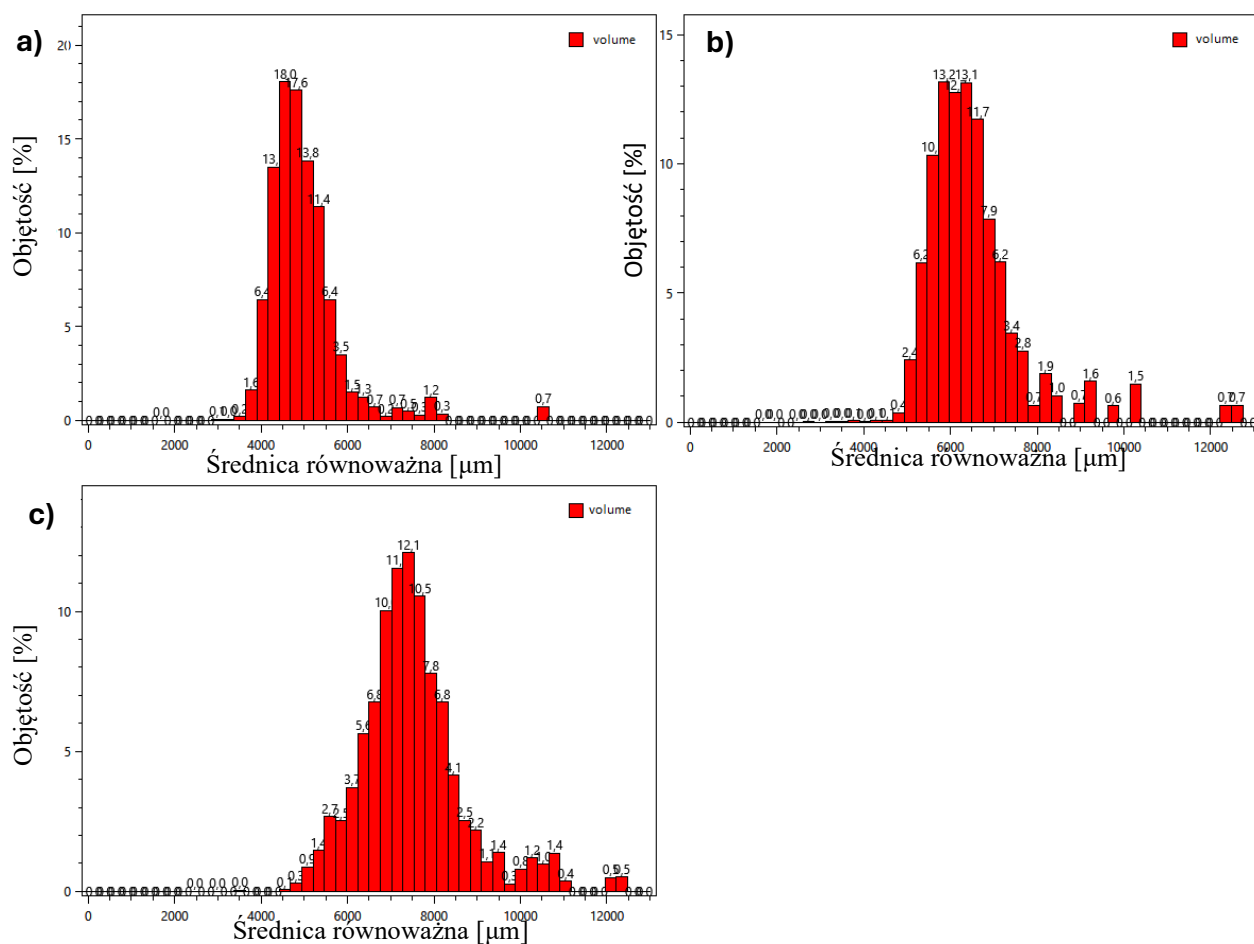
Zgodnie z [252], morfologia ziaren kruszywa grubego wpływa na właściwości mechaniczne betonu, jego reologię oraz rozkład porów powietrznych. Metoda kruszenia zastosowana w niniejszym badaniu wydaje się szczególnie odpowiednia w kontekście betonów, dla których kluczowe są właściwości reologiczne oraz cechy wczesnego dojrzewania.



Rysunek 54. Analiza sitowa próbek: a) objętość materiału zatrzymanego na sicie; b) objętość materiału przechodzącego przez sita



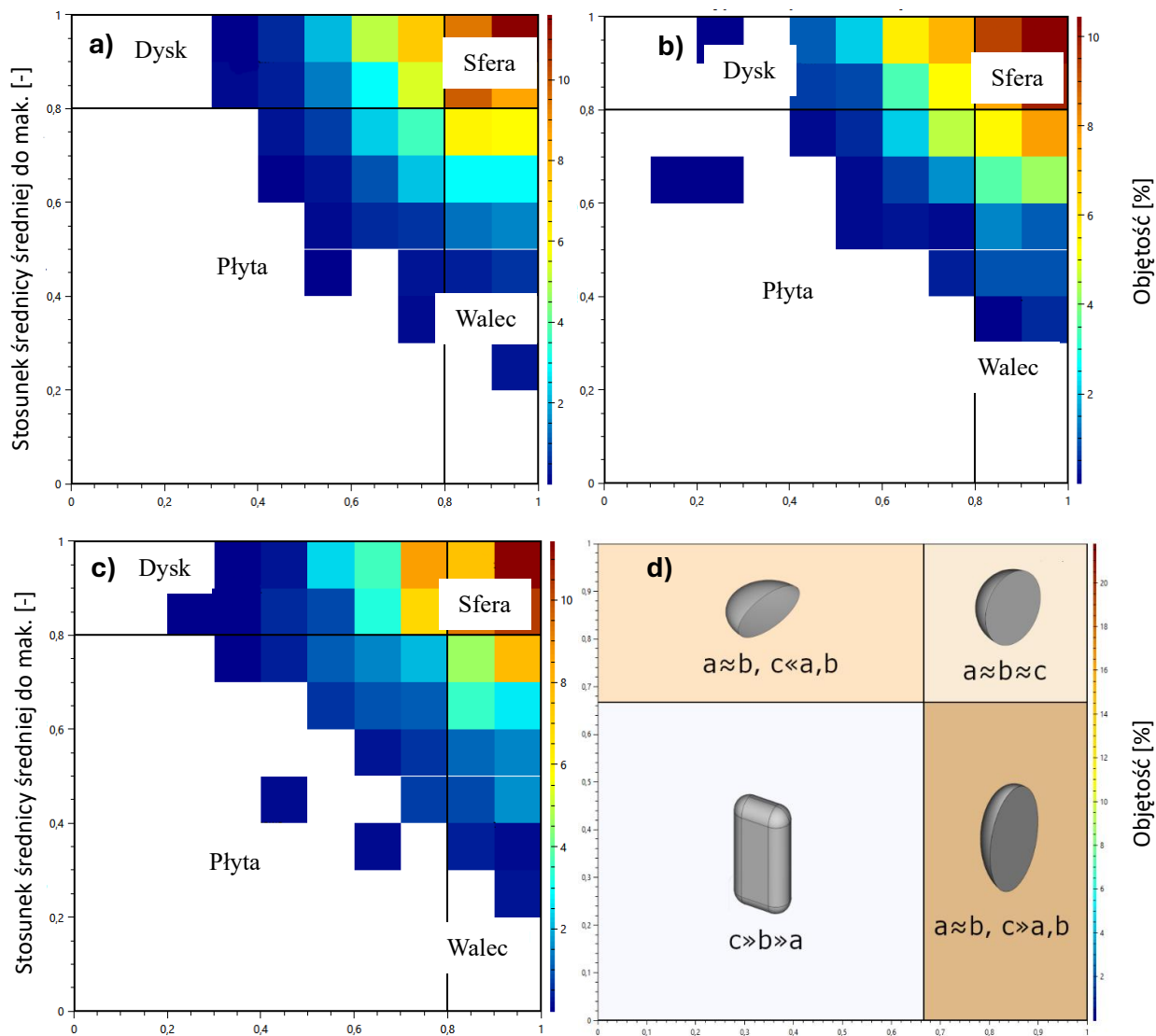
Rysunek 55. Rozkład ilościowy próbek: a) 4–5 mm; b) 5–6,3 mm; c) 6,3–8 mm



Rysunek 56. Rozkład objętościowy próbek: a) 4–5 mm; b) 5–6,3 mm; c) 6,3–8 mm

Tabela 29. Analiza kształtu ziaren według klasyfikacji Zingg

Frakcja	Kuliste [%]	Dyskowe [%]	Cylindryczne [%]	Płytkowe [%]
4 – 5 mm	39,5	25,6	22,1	12,7
5 – 6,3 mm	37,2	26,4	25,7	10,7
6,3 – 8 mm	38,5	26,7	24,8	10,0
Średnio	38,4	26,3	24,2	11,1



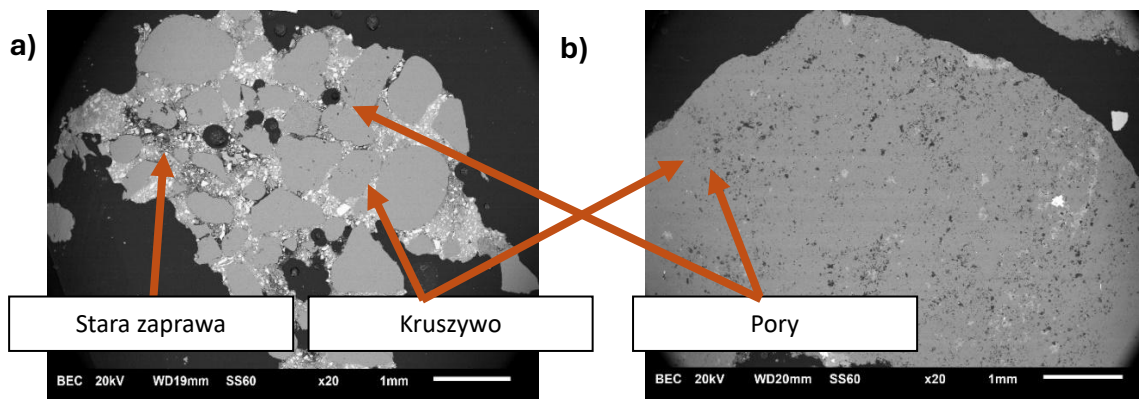
Rysunek 57. Szczegółowa analiza kształtu ziaren według Zingga: a) 4–5 mm; b) 5–6,3 mm; c) 6,3–8 mm; d) wizualizacja klasyfikacji kształtu

Tabela 30. Wskaźnik SF i kulistość dla RCA

Frakcja	Liczba próbek	Wydłużone (SF<0.75)	Kubiczne (0.75<SF<1.5)	Płaskie (SF>1.5)	Smukłe (Kulistość<0.8)	Subkostki (0.8<K<0.9)	Kostki (K>0.9)
4 – 5 mm	1502	0	1020	482	500	660	342
5 – 6,3 mm	1204	0	773	431	383	551	270
6,3 – 8 mm	1003	0	659	344	337	438	228
Średnio	—	—	—	—	—	1,22 (SF)	0,83 (K)
Średnio z literatury	—	—	—	—	—	2,25 (SF)	—

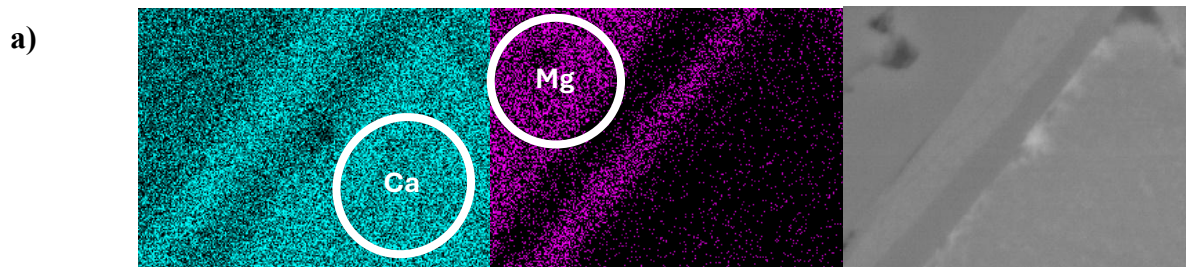
5.1.5. Analiza mikrostruktury

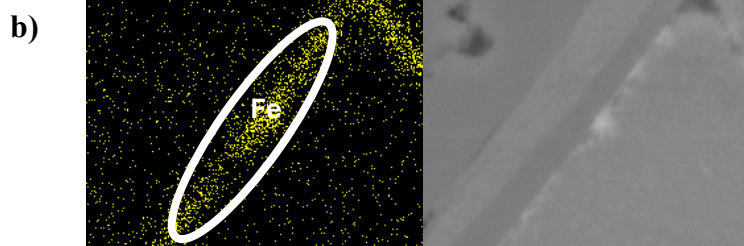
Rysunek 58 przedstawia różnice pomiędzy dolomitem a kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 na podstawie analizy SEM. Dolomit charakteryzuje się dość porowatą strukturą (widoczne jako ciemniejsze obszary wewnątrz ziarna kruszywa), a jego faza składa się z dwóch do trzech wyraźnie zróżnicowanych stref – reprezentowanych przez różne odcienie szarości, z dominacją najciemniejszej fazy. W jego strukturze widoczne są wyłącznie ziarna kruszywa pierwotnego. W przypadku kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1, widoczna jest struktura złożona ze starych fragmentów kruszywa oraz przylegającego do nich zaczynu, które są trwale połączone. Oryginalne kruszywo (zawierające SiO_2) znajduje się wewnątrz jednolodnie szarej strefy. Pomiedzy ziarnami oryginalnego kruszywa można zaobserwować pozostałości starego zaczynu oraz fragmenty porowate. Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 zawiera znacznie większe pory niż dolomit, co potwierdza wysoką nasiąkliwość wody z punktu 5.1.2. Można przypuszczać, że w odpowiednio wykonanym kompozycie z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1, na obrazie SEM kruszywo to może być niewidoczne, ponieważ stary i świeży zaczyn będą się wzajemnie przenikać. Bardziej porowata struktura kruszywa może zatrzymywać wodę, co wpływa na proces hydratacji cementu. W przypadku betonów o wysokim zapotrzebowaniu na wodę, zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu może przyczynić się do częściowej redukcji tego zapotrzebowania.



Rysunek 58. Wyniki analizy SEM, powiększenie 20×: a) kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1; b) dolomit. Ciemne obszary wokół ziaren kruszywa i wewnątrz porów to miejsca zaimpregnowane żywicą

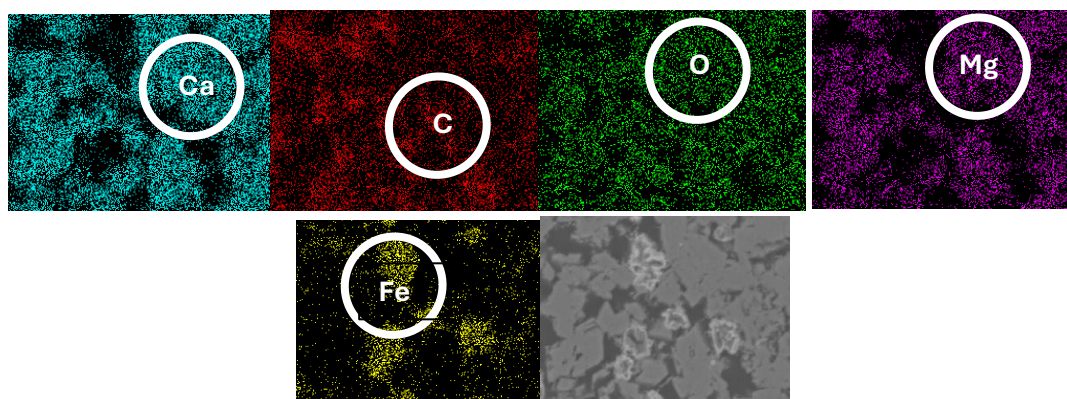
Dolomit składa się z dwóch głównych faz – jednej bogatej w Mg z domieszką Ca oraz drugiej bogatej w Ca, ale bez obecności Mn, co przedstawiono na Rysunku 59a. Przy większym powiększeniu (Rysunek 59b) można zaobserwować, że na granicach między fazami występuje faza wzbogacona w Fe.





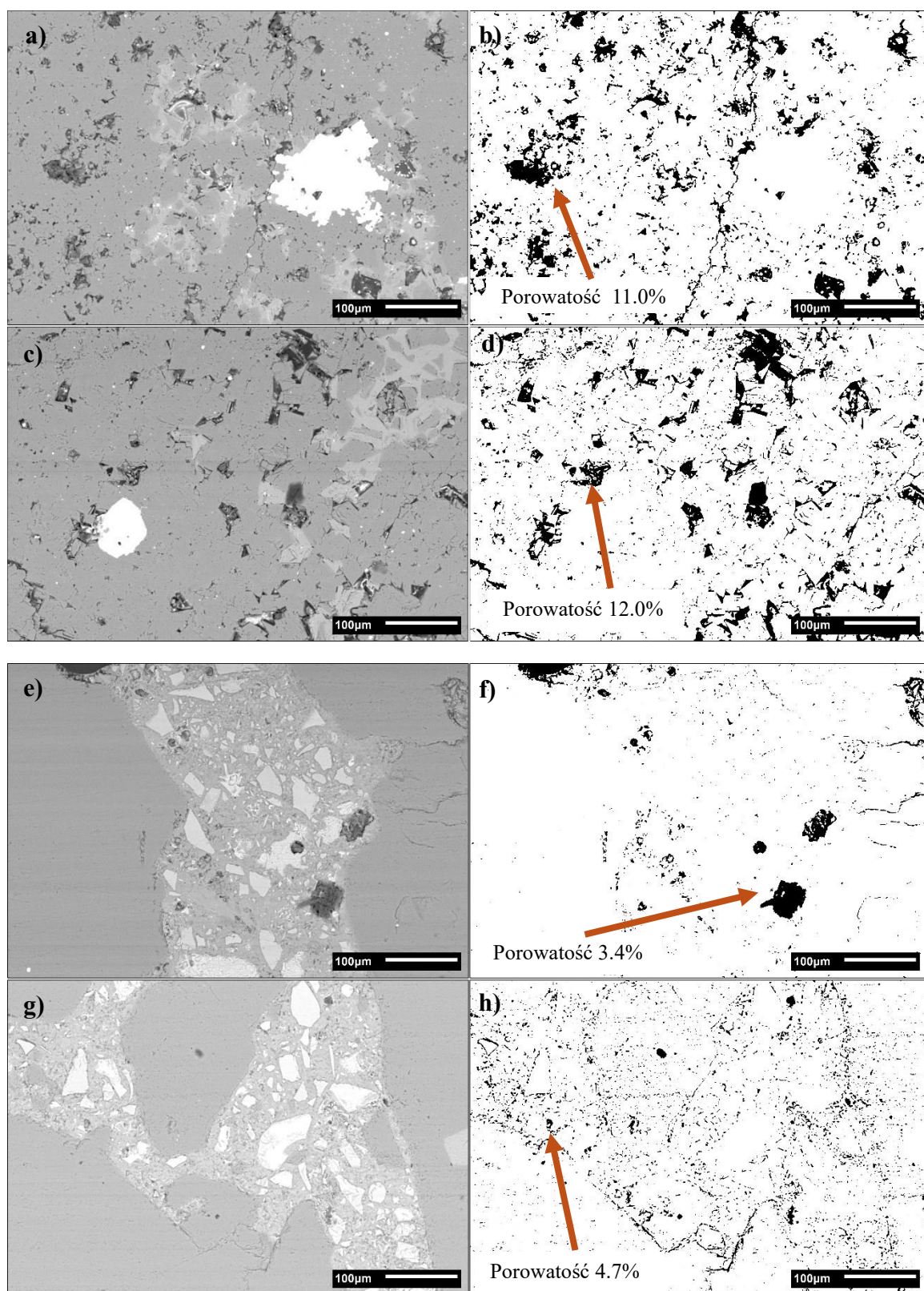
Rysunek 59. Wyniki analizy SEM dolomitu: a) różne fazy chemiczne; b) faza wzbogacona w Fe

Z kolei kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 składa się z bardziej rozdrobnionych, a jednocześnie bardziej zróżnicowanych chemicznie faz – fazy bogatej w Mg oraz fazy bogatej w Ca (Rysunek 60). Pomiędzy nimi można zaobserwować pojedyncze fazy krystaliczne bogate w Fe. Tym samym, oba typy kruszywa są zasadniczo podobne pod względem składu chemicznego, lecz różnią się budową strukturalną.



Rysunek 60. Wyniki analizy SEM kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1

Na Rysunku 61a-d przedstawiono porowatość dolomitu, natomiast na Rysunku 61e-h – porowatość kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1. Analizę przeprowadzono na podstawie obrazów SEM wykonanych przy powiększeniu 200×, dla reprezentatywnych fragmentów ziaren kruszywa. Pory zidentyfikowano jako piksele o wartości 0 (czarne) na obrazach próbek uprzednio przekształconych do postaci binarnej. Dla dolomitu porowatość wynosiła odpowiednio 11,0% i 12,0%, przy czym w obu przypadkach widoczne były mikropory równomiernie rozmieszczone w całym przekroju ziarna. W przypadku kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1, wartości porowatości wynosiły odpowiednio 3,4% i 4,7%. Zaobserwowano wyraźne granice pomiędzy pozostałościami zaczynu cementowego a pierwotnym kruszywem, które stanowiło jądro kruszywa. W pierwotnym kruszywie (wchodzącym w skład kruszywa recyklingowego) liczba porów była wyraźnie mniejsza niż na Rysunku 61b oraz Rysunku 61d. W kruszywie grubym z recyklingu widoczne były pojedyncze pustki powietrzne oraz jamy, jednak ich udział objętościowy był niewielki. Średnia różnica porowatości pomiędzy kruszywem naturalnym a recyklingowym przekraczała 7 punktów procentowych, co wskazuje na wyraźnie niższą porowatość kruszywa z recyklingu w analizowanych próbkach.

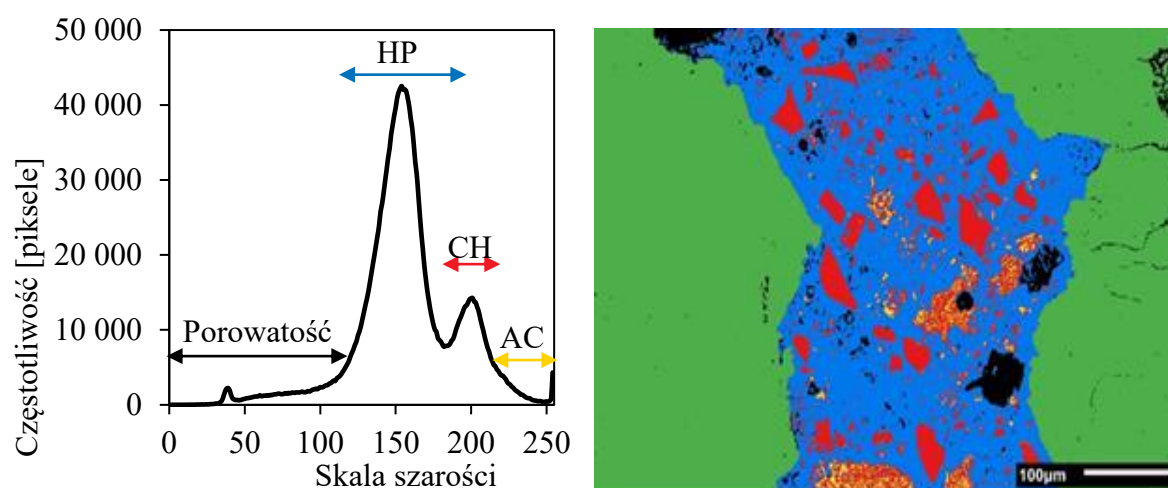


Rysunek 61. Obrazy SEM i obrazy porowatości w powiększeniu 200x: a) b) c) d) – dolomit;
e) f) g) h) – kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1

Na Rysunku 62a przedstawiono histogram w skali szarości uzyskany na podstawie obrazu z Rysunku 61e po cyfrowym usunięciu pierwotnego kruszywa, co umożliwiło izolację obszaru matrycy cementowej. Wyraźne piki na histogramie potwierdzają obecność dobrze zróżnicowanych faz w analizowanym obszarze. Na podstawie analizy histogramu i histogramu skumulowanego wyznaczono zakresy tonalne odpowiadające poszczególnym fazom: porowatość (3,4%), produkty hydratacji, w tym żel C-S-H (HP, 32,7%), portlandyt (CH, 8,7%) oraz niezrehydratyzowane ziarna cementu (AC, 1,2%). Stopień hydratacji (α) oszacowano na podstawie modelu Powersa i Brownyarda [292], wykorzystując równanie (33), w którym F_{hp} oznacza produkty hydratacji (HP + CH), natomiast F_{up} – niezrehydratyzowane ziarna cementu (AC):

$$\alpha = (F_{hp} / 2,1) / [(F_{hp} / 2,1) + F_{up}] \quad (33)$$

Uzyskany wynik zobrazowany na Rysunku 62b potwierdza, iż struktura matrycy kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 składa się z dobrze rozwiniętych produktów hydratacji, przy wysokim stopniu hydratacji ($\alpha \approx 94\%$), co może pozytywnie wpływać na właściwości betonu z udziałem tego kruszywa z recyklingu. Tak wysoki stopień hydratacji jest najprawdopodobniej wynikiem wieku analizowanego materiału, pochodzącego z lat 60. XX wieku, a więc poddawanego dojrzewaniu matrycy cementowej przez ponad sześć dekad.



Legenda:

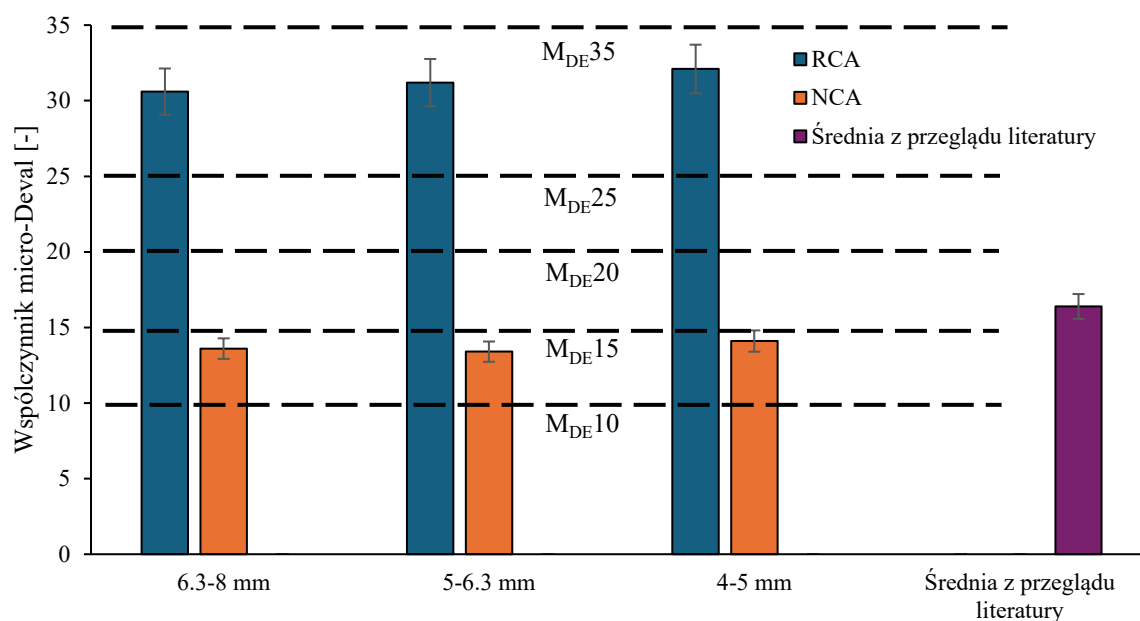
Dolomit	Kruszywo z Plattenbau P1	Produkty hydratacji (HP)	Portlandyt	Niezhydratyzowany cement (AC)	Pory
---------	--------------------------	--------------------------	------------	-------------------------------	------

Rysunek 62. (a) Histogram w skali szarości; (b) Obraz SEM z zaznaczonymi fazami: kruszywo naturalne, porowatość, produkty hydratacji (HP), portlandyt (CH), niezrehydratyzowane ziarna cementu (AC)

5.1.6. Odporność na ścieranie

Wyniki badań odporności na ścieranie zostały porównane z kategoriami odporności opartymi na współczynniku mikro-Deval (Rysunek 63). Dolomit w porównaniu do kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 cechuje się niższym współczynnikiem mikro-Deval i mieści się w granicach między M_{DE10} a M_{DE15} . Kruszywo z recyklingu jest wyraźnie słabsze i jego odporność na ścieranie zawiera się między M_{DE25} a M_{DE35}). Porównując wyniki z przeglądem literatury, kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 należy do najsłabszych pod

względem odporności na ścieranie. Może to oznaczać, że jego zastosowanie obniży parametry mechaniczne przyszłego betonu w porównaniu do betonu wykonanego wyłącznie na kruszywie naturalnym, co jest szczególnie istotne przy projektowaniu posadzek (gdzie często wykorzystywany jest beton samozagęszczający się). W związku z tym zaleca się obróbkę wstępną kruszywa grubego z recyklingu lub zastosowanie cementu wyższej klasy. Wyniki przeglądu literaturowego, w którym stosowano współczynnik Los Angeles, zostały przeliczone na współczynnik mikro-Deval z wykorzystaniem odpowiedniej korelacji [370].

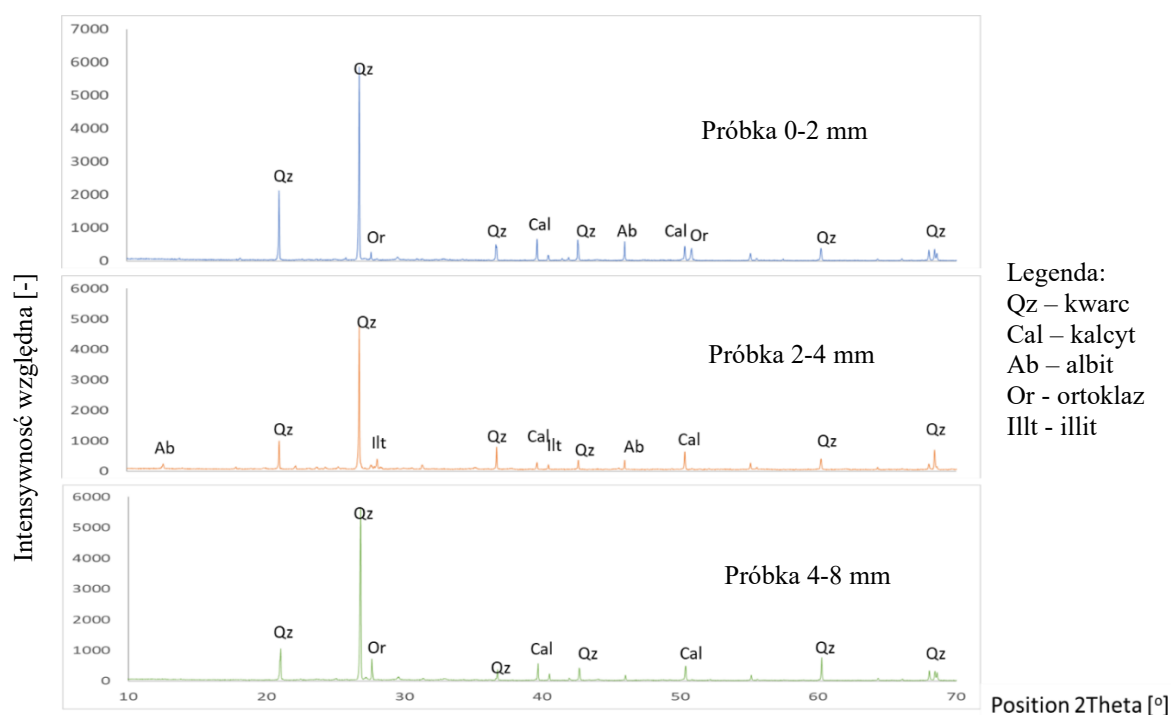


Rysunek 63. Wyniki zawartości odporności na ścieranie w porównaniu do średnich wartości na podstawie przeglądu literatury

5.1.7. Dyfraktometria rentgenowska (XRD)

Skład mineralny kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 został przeanalizowany przy użyciu metody dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Rentgenogram (dyfraktogram) przedstawiono w formie wykresu. Wynikiem pomiaru jest intensywność promieniowania odchylanego w funkcji kąta odchylenia. Próbkę została podzielona na trzy frakcje: 0–2 mm, 2–4 mm oraz 4–8 mm. Wyniki przedstawiono na Rysunku 64. Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 wykazuje charakter materiału krystalicznego (na podstawie kształtu wykresu), z wyraźnie zdefiniowanym i powtarzalnym układem łańcuchów molekularnych. Kruszywo to nie charakteryzuje się złożoną mineralogią (w porównaniu do innych badań nad kruszywem z recyklingu np. [294] [220]). Wyniki półilościowej analizy składu fazowego przedstawiono w Tabeli 31. Głównym związkem krystalicznym we wszystkich analizowanych frakcjach jest niskotemperaturowy kwarc (SiO_2), stanowiący odpowiednio 80,3 % w próbce 0–2 mm, 63,0 % w próbce 2–4 mm oraz 81,3 % w próbce 4–8 mm. Inne rozpoznane fazy krystaliczne, występujące w ilościach poniżej 10 %, to kalcyt/wateryt (CaCO_3) oraz mikroklin/ortoklaz (KAlSi_3O_8). W próbce 2–4 mm odnotowano jednak odmienny skład – oprócz dominującego kwarcu, stwierdzono wysoką zawartość albitu ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) na poziomie 19,2 %, w porównaniu do 1,2 % w próbce 0–2 mm i braku tego składnika w próbce 4–8 mm. Dodatkowym składnikiem próbki 2–4 mm jest illit w ilości 16,1 %, reprezentujący minerały ilaste.

Różnice w składzie mineralnym próbek mogą wynikać z obecności różnych rodzajów kruszyw pierwotnych zastosowanych w betonach źródłowych. Prawdopodobnie były to mieszaniny skał magmowych i osadowych. Obecność kalcytu wskazuje na zastosowanie wapieni, natomiast albityt lub ortoklaz są typowymi składnikami granitoidów. Illit z kolei jest minerałem pochodzenia wtórnego, powstającym w wyniku wietrzenia mik, ale również może być składnikiem skał wapiennych. Pomimo wspomnianych różnic, ogólny charakter dyfraktogramów XRD nie wykazuje obecności licznych drobnych, nieregularnych pików, co sugeruje, że RCA nie zawiera istotnych ilości materiału amorficznego lub szklatego [305].



Rysunek 64. Analiza dyfrakcyjna XRD kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 dla poszczególnych frakcji

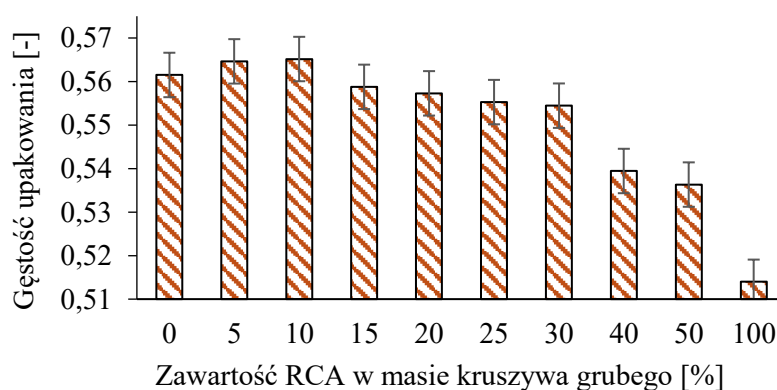
Tabela 31. Średni udział faz w poszczególnych próbkach materiału

Mineral	Wzór chemiczny	Próbka 0–2 mm [% wag.]	Próbka 2–4 mm [% wag.]	Próbka 4–8 mm [% wag.]
Kwarc	SiO ₂	80,3	63,0	81,3
Kalcyt/Wateryt	CaCO ₃	8,7	–	13,7
Albityt	Na [AlSi ₃ O ₈]	1,2	19,2	–
Mikroclin/Ortoklaz	K[AlSi ₃ O ₈]	9,7	–	4,9
Illit	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	–	16,1	–

5.2. Optymalizacja

5.2.1. Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się

Test gęstości upakowania przeprowadzono dla 10 serii mieszanek betonowych, zwiększając udział kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 kosztem naturalnego w mieszance. Mieszanka referencyjna (0%) zawiera wyłącznie dolomit. Wyniki przedstawione na Rysunku 65 wskazują, że wraz ze wzrostem udziału kruszywa z recyklingu, wartość gęstości upakowania ogółem maleje. Wyjątek stanowią mieszanki, w których zastąpiono 5% i 10% dolomitem za pomocą kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 – w tych przypadkach gęstość upakowania jest nieco wyższa niż w mieszance referencyjnej. Może to świadczyć o tym, że niewielki dodatek kruszywa z recyklingu korzystnie wpływa na zagęszczenie kruszywa w mieszance. Pierwszy wyraźny spadek wartości gęstości upakowania obserwuje się przy zawartości kruszywa z recyklingu przekraczającej 10%. Wyniki w zakresie od 15% do 30% wykazują stosunkowo zbliżone wartości, z widocznym, choć niewielkim i stałym spadkiem. Kolejne wyraźne obniżenie gęstości upakowania następuje przy zawartości kruszywa z recyklingu równej 40%. Różnica pomiędzy mieszanką odniesienia a serią zawierającą 50% kruszywa z recyklingu jest około pięciokrotnie większa niż między mieszanką odniesienia a serią 30%. Mieszanka składająca się wyłącznie z kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 charakteryzuje się najniższą spośród wszystkich serii gęstością upakowania. Ziarna kruszywa pozostawiają między sobą znaczne puste przestrzenie i nie są w stanie szczelnie się ułożyć. Ma na to wpływ morfologia kruszywa z recyklingu – jego powierzchnię pokrywa pozostałość starego zaczynu cementowego, a kształt ziaren cechuje się nieregularnością i ostrymi krawędziami. Gęstość upakowania kruszywa wpływa bezpośrednio na wytrzymałość na ściskanie betonów, co zostało potwierdzone w przeglądzie literatury. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastąpienie kruszywa naturalnego do poziomu 30% daje zadowalające rezultaty i nie powoduje istotnych różnic w porównaniu z mieszanką odniesienia.

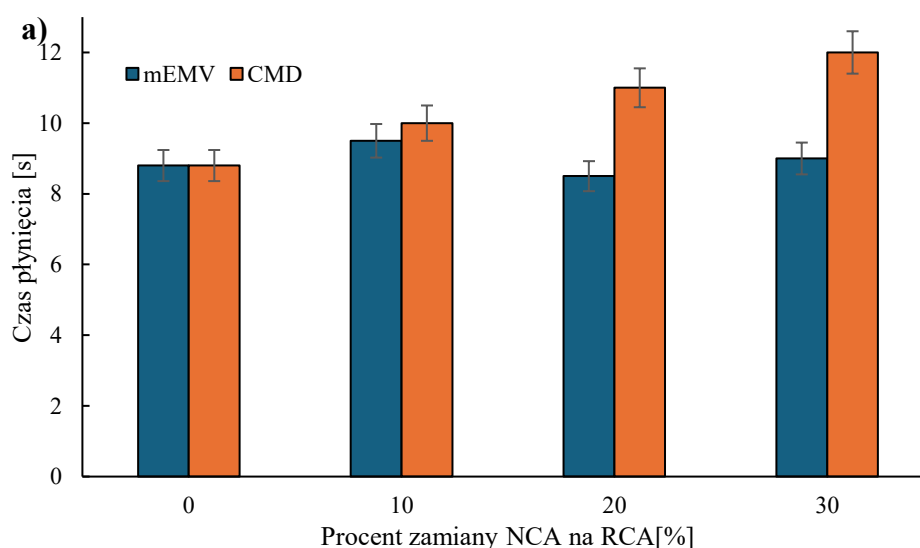


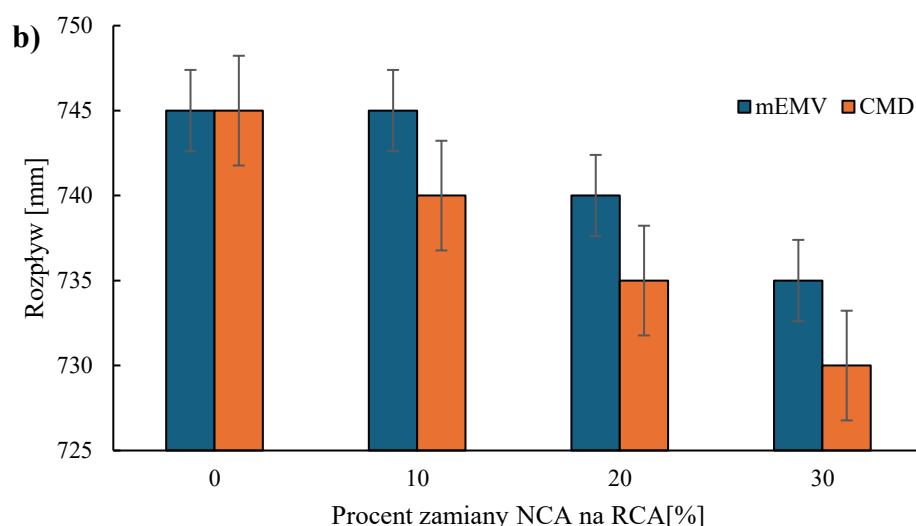
Rysunek 65. Wyniki pomiaru gęstości upakowania kruszywa naturalnego i kruszywa z recyklingu

5.3. Badania właściwości mieszanki samozagęszczającej się

5.3.1. Konsystencja i lepkość

Rysunek 66 przedstawia wyniki badań lepkości i konsystencji mieszanek. Zastępowanie kruszywa grubego naturalnego recyklingowym prowadzi do obniżenia obu parametrów reologicznych. Pomimo że wszystkie mieszanki spełniają wymagania stawiane betonowi samozagęszczającemu się, w przypadku standardowego składu mieszanki (CMD) odnotowano wydłużenie czasu rozplywu o 2,5 sekundy przy zastąpieniu 30% kruszywa grubego. Wyraźnie zaznacza się trend wydłużania czasu rozplywu wraz z każdorazowym, 10-procentowym zwiększeniem udziału kruszywa z recyklingu, co sugeruje zależność o charakterze liniowym. Zastosowanie zmodyfikowanego projektu mieszanki mEMV pozwala jednak na zminimalizowanie tych różnic – różnice pomiędzy mieszanką referencyjną a tymi z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 są niewielkie. Wynika to z faktu, iż skład pozostałych komponentów został dostosowany indywidualnie dla każdej zawartości kruszywa z recyklingu. W przeciwieństwie do lepkości, wzrost zawartości kruszywa z recyklingu powoduje obniżenie konsystencji w obu wariantach projektowych. Chociaż wszystkie mieszanki pozostają w tej samej klasie lepkości, to dodatek kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 skutkuje mniejszą średnicą rozplywu w porównaniu do mieszanki zawierającej wyłącznie kruszywo grube naturalne. Mimo to największa odnotowana różnica – pomiędzy mieszanką referencyjną a wariantem z 30% zawartością kruszywa z recyklingu – wynosi zaledwie 15 mm, co stanowi jedynie 2% całkowitej średnicy rozplywu. Podsumowując, projekt mieszanki mEMV okazuje się rozwiązaniem korzystniejszym dla wszystkich analizowanych serii.

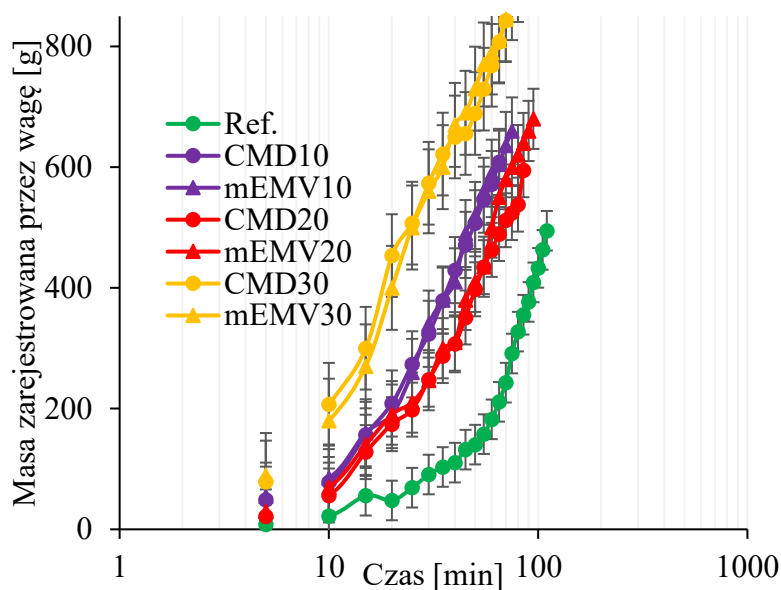




Rysunek 66. Właściwości świeżej mieszanki samozagęszczającej się: a) lepkość, b) konsystencja

5.3.2. Czas początku wiązania

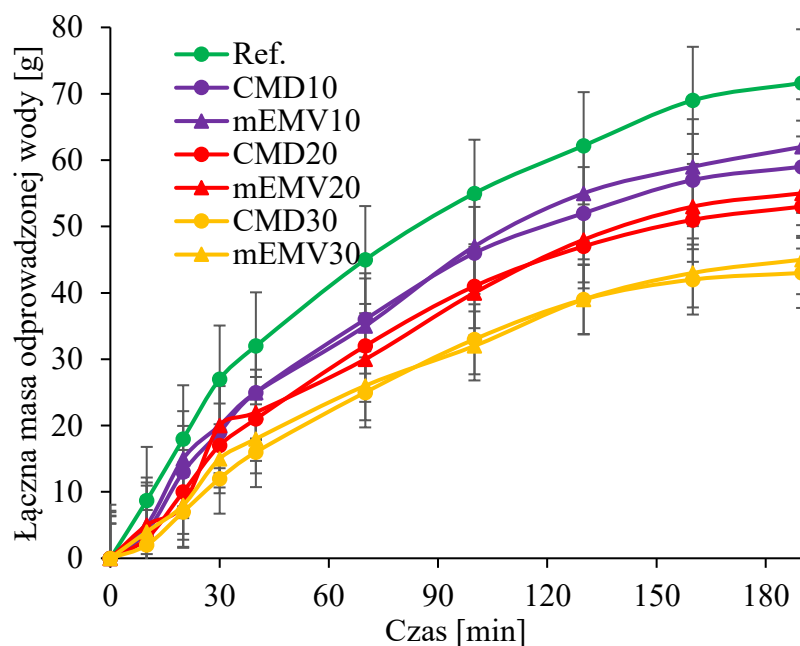
Wyniki testu czasu wiązania, rejestrowanego za pomocą wagi, przedstawiono na Rysunku 67. Czas wiązania określono jako moment, w którym wystąpiła największa różnica masy pomiędzy dwoma kolejnymi punktami pomiarowymi. Dla serii referencyjnej czas wiązania wyniósł 110 minut. W przypadku zastąpienia 10% kruszywa grubego, czas wiązania wynosił odpowiednio 65 minut w metodzie CMD oraz 75 minut w metodzie mEMV. Dla zastąpienia 20% odnotowano 85 minut (CMD) i 90 minut (mEMV), natomiast przy 30% – 70 minut (CMD) i 80 minut (mEMV). Najdłuższy czas wiązania zarejestrowano dla mieszanki referencyjnej, natomiast najkrótszy przy 10% udziale kruszywa z recyklingu. Wybór metody projektowania mieszanki miał znikomy wpływ na czas wiązania. Zmiana masy była bardziej wyraźna w mieszankach zawierających kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1, a wraz ze wzrostem jego udziału krzywe wiązania stawały się coraz bardziej strome. Wyniki te są zgodne z wcześniejszymi badaniami [107] i potwierdzają, że test płyty z użyciem wagi jest wiarygodną metodą określania czasu wiązania betonu. Należy jednak zaznaczyć, że uzyskane w niniejszym badaniu czasy wiązania są istotnie krótsze niż te przedstawione w [107], gdzie czasy wiązania betonu samozagęszczającego się wynosiły od 112 do 278 minut. Różnica ta odpowiada szybkiemu przyrostowi wytrzymałości na ściskanie obserwowanemu dla betonu samozagęszczającego się, opisanemu w 5.4.1.



Rysunek 67. Wyniki badania czasu wiązania świeżej mieszanki SCC

5.3.3. Odsączenie wody z mieszanki

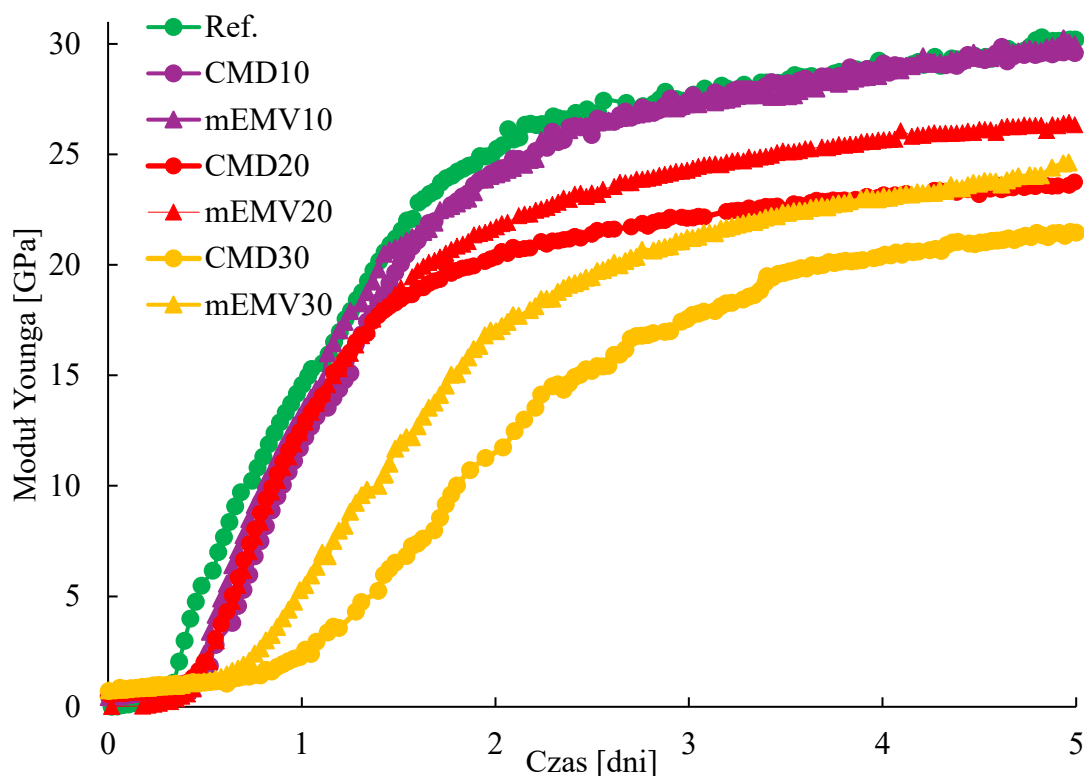
Wyniki testu odsączenia przedstawiono na Rysunku 68. Z rezultatów wynika, że ilość wody uwolnionej podczas tego procesu zależy od rodzaju użytego kruszywa grubego. Największy ubytek wody podczas twardnienia zaobserwowano w serii referencyjnej. Zastąpienie kruszywa grubego naturalnego przez recyklingowe skutkowało zmniejszeniem ilości wydzielanej wody. Podobnie jak w przypadku testu płytowego do opisu początku czasu wiązania, metoda projektowania mieszanki miała marginalne znaczenie dla procesu odsączenia przy tym samym poziomie zastąpienia. Odsączenie wody z mieszanki cementowej ma istotny wpływ na właściwości cementowej warstwy wierzchniej [85]. Zastosowanie do mieszanki dodatków, które pozwalają na zatrzymanie części wody w mieszanke betonu samozagęszczającego się, prowadzi do zapewnienia jednorodności kompozytu. Niejednorodność właściwości kompozytu cementowego w funkcji jego grubości jest częstą przyczyną uszkodzeń warstwy wierzchniej. Poziome elementy budynków są szczególnie narażone na zwiększone odsączenie wody z mieszanki cementowej, gdyż charakteryzują się one stosunkowo małą grubością oraz znaczną powierzchnią, co sprzyja migracji wody z dolnych partii mieszanki ku górze. Szczególnie ważne jest zatem wykorzystywanie do mieszanek cementowych dodatków, które pozwolą nie tylko zmniejszyć objętość odsączonej wody, ale także zapewnią wymaganą jednorodność właściwości kompozytu. Z przeprowadzonych badań wynika, że zaproponowane kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 cechuje się możliwością zatrzymania części wody w mieszanke.



Rysunek 68. Wyniki badania odsączania wody dla świeżej mieszanki samozagęszczającej się

5.3.4. Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)

Rysunek 69 przedstawia wyniki badań modułu sprężystości metodą EMM-ARM. Po upływie pięciu dni wszystkie próbki osiągnęły moduł sprężystości w przedziale od 20 do 30 GPa. Zauważono jednak, iż dodatek kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 spowolnił tempo rozwoju modułu sprężystości, co odzwierciedla się w przebiegu krzywych. Serie z udziałem kruszywa grubego z recyklingu do 20% (próba referencyjna – kolor niebieski, 10% – fioletowy) wykazywały podobną dynamikę wzrostu modułu Younga aż do końca pierwszego dnia dojrzewania. Natomiast próbki z 30% zawartością kruszywa grubego z recyklingu (kolor żółty) podążały analogicznym trendem jedynie do 0,5 dnia, po czym tempo wzrostu modułu Younga uległo spowolnieniu w porównaniu do pozostałych serii. Pomimo początkowego opóźnienia, końcowe wartości modułu Younga sugerują, iż zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 w betonie samozagęszczającym się pozostaje technicznie uzasadnione. Dane dotyczące przebiegu czasowego wskazują, że na wczesnych etapach dojrzewania mieszanki o wysokim udziale kruszywa grubego z recyklingu wymagają szczególnej uwagi. Niemniej jednak końcowe rezultaty potwierdzają, że ograniczone zastosowanie tego kruszywa nie prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych betonu. We wszystkich konfiguracjach projekt mieszanki mEMV konsekwentnie prowadził do uzyskania wyższych wartości modułu Younga — zarówno w odniesieniu do wartości końcowych po pięciu dniach, jak i w przebiegu ciągłych pomiarów. Różnica między mieszanką referencyjną a tą z 10% zawartością kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 była nieistotna. Po pięciu dniach, zastosowanie projektu mEMV skutkowało wzrostem E-modułu odpowiednio o 1,5% dla 10% zamiennika, 13,5% dla 20% oraz 14,5% dla 30% zawartości kruszywa grubego z recyklingu.

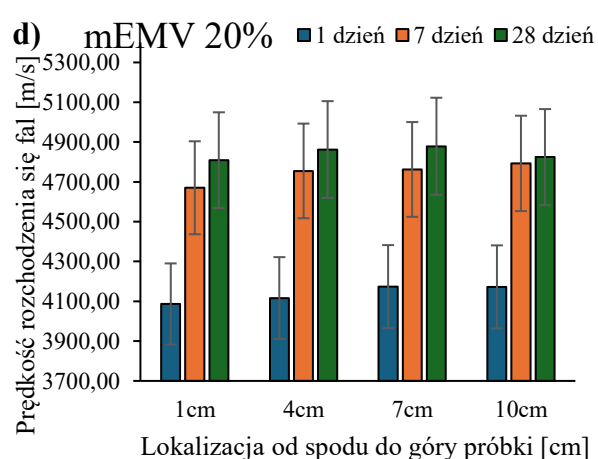
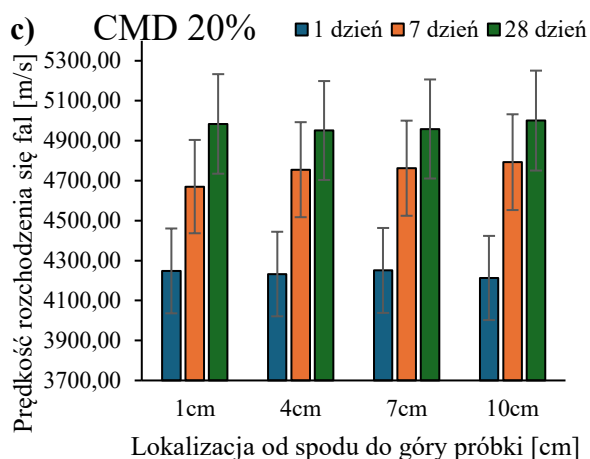
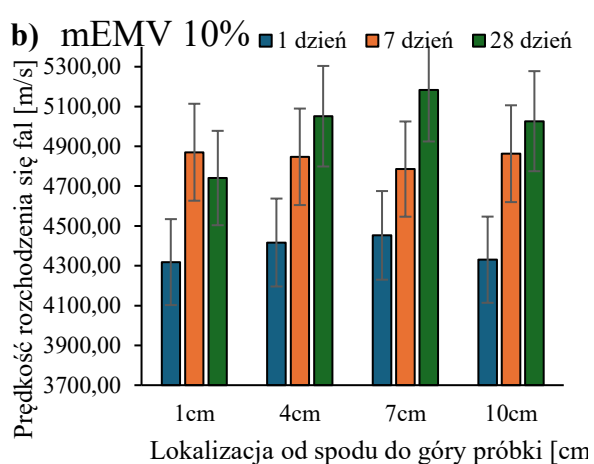
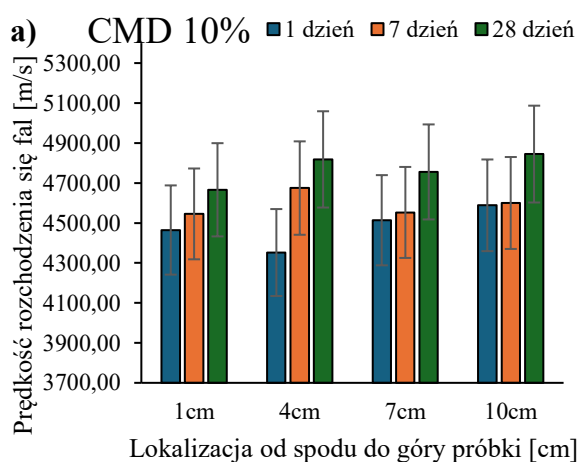
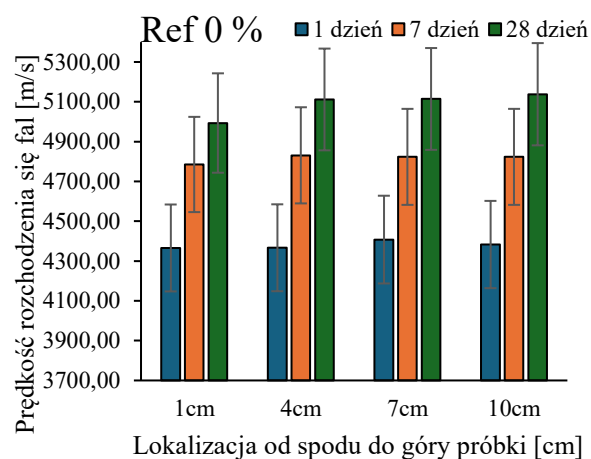


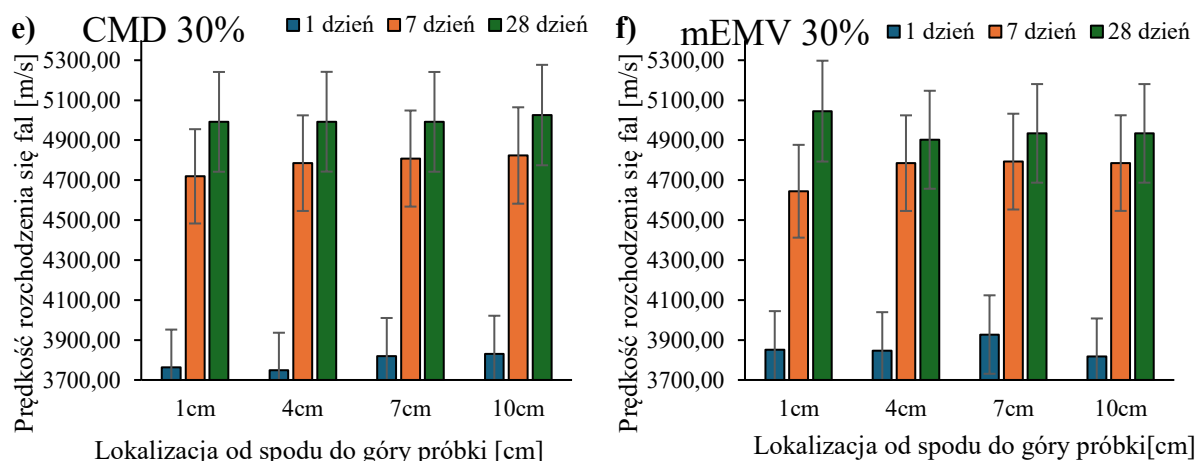
Rysunek 69. Wyniki badania przyrostu modułu Younga metodą EMM-ARM

5.4. Badania właściwości stwardniałego betonu

5.4.1. Jednorodność betonu

Wyniki badania jednorodności betonu za pomocą UPV przedstawiono na Rysunku 70. Badanie to dostarcza szeregu kluczowych informacji, obejmujących tempo przyrostu wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu, zróżnicowanie jednorodności w przekroju poprzecznym próbki, a także wpływ składu mieszanki oraz zawartości kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 na wskazane parametry. We wszystkich seriach beton samozagęszczający się charakteryzował się szybkim przyrostem wytrzymałości. Na podstawie klasyfikacji w [323], w ciągu 24 godzin seria referencyjna osiągnęła jakość co najmniej *dobrą* na podstawie prędkości rozchodzenia się fal, dla serii po 7 dniach dojrzewania *dobrą* i *bardzo dobrą*, dla wszystkich serii po 28 dniach dojrzewania *bardzo dobrą*. Zwiększenie udziału kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 skutkowało jednak spowolnieniem tempa rozwoju wytrzymałości, co widać z wolniejszej prędkości rozchodzenia się fal. Mimo to nawet mieszanka o najniższych parametrach – zawierająca 30% kruszywa grubego z recyklingu – osiągnęła klasę co najmniej *dobrą*, co należy uznać za wynik satysfakcjonujący. Wszystkie serie wykazały jednorodność w obrębie przekroju poprzecznego, a obecność kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 nie wpłynęła negatywnie na homogeniczność betonu. Średnia różnica prędkości rozchodzenia się fal w obrębie przekroju wynosiła 120 m/s, co świadczy o równomiernym rozmieszczeniu składników oraz braku lokalnych stref osłabienia. Zastosowanie projektu mieszanki mEMV przyczyniło się zarówno do przyspieszenia konsolidacji, jak i do uzyskania wyższych wartości prędkości rozchodzenia się fal w dłuższej perspektywie.

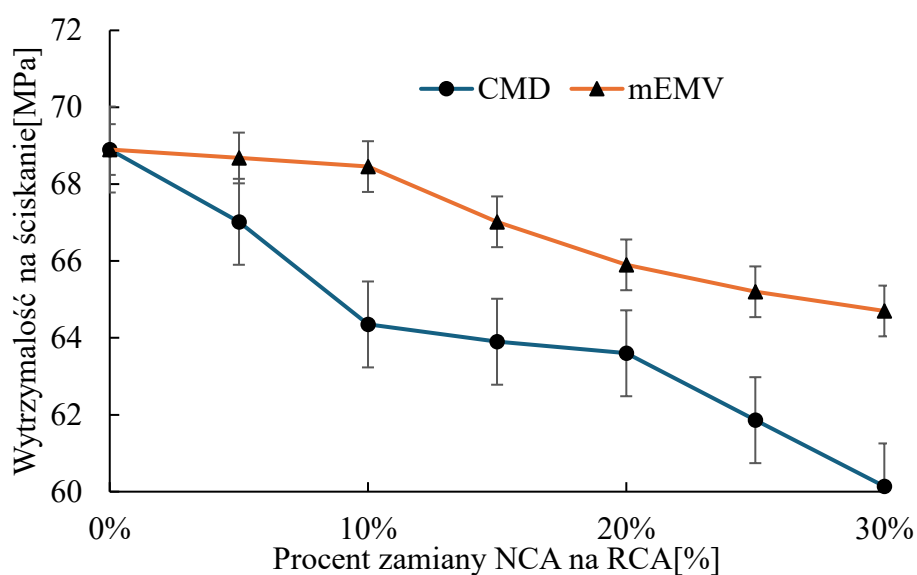




Rysunek 70. Wyniki badania jednorodności betonu metodą UPV dla serii: a) referencyjna b) CMD 10%, c) mEMV 10 %, d) CMD 20%, e) mEMV 20 %, f) CMD 30%, g) mEMV 30 %, h) CMD 40%, i) mEMV 40 %.

5.4.2. Wytrzymałość na ściskanie

Rysunek 71 przedstawia wyniki badań wytrzymałości na ściskanie. Zastosowanie cementu CEM I 52.5R pozwoliło uzyskać wyjściową wytrzymałość na poziomie 68,9 MPa. Wraz ze wzrostem udziału kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 obserwowano spadek wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania. Maksymalne obniżenie wytrzymałości w porównaniu do serii referencyjnej wyniosło 8,76 MPa dla metody CMD oraz 4,2 MPa dla metody mEMV. Choć metoda mEMV nie pozwoliła na całkowite zachowanie referencyjnej wytrzymałości, skutecznie ograniczyła jej spadek. W porównaniu z metodą CMD, projekt mieszanki mEMV umożliwił uzyskanie wyższych wartości wytrzymałości na ściskanie — wzrosty wyniosły odpowiednio 6% dla 10% zamiany kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe, 3,3% dla 20% oraz 6,6% dla 30%. Na podstawie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, mieszanki betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 zostały zaklasyfikowane do odpowiednich klas wytrzymałościowych zgodnych z PN-EN 206+A2 (Tabela 32). Wyniki pokazują, że, mieszanka referencyjna osiągnęła klasę powyżej C50/60, zastosowanie do 20% kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 (zarówno przy metodzie mEMV, jak i CMD) pozwalało na utrzymanie klasy C50/60. Natomiast przy 30% zawartości mieszanka projektowana metodą mEMV nadal spełniała wymagania klasy C50/60, natomiast dla CMD nastąpił spadek do C45/55. Oznacza to, że odpowiedni dobór metody projektowania (mEMV) pozwala skutecznie ograniczyć negatywny wpływ kruszywa z recyklingu na właściwości mechaniczne i utrzymać wysoką klasę wytrzymałościową betonu samozagęszczającego się. Dla obliczenia f_{ck} przyjęto średnie wartości wytrzymałości minus odchylenie bezpieczeństwa, które założono na podstawie doświadczenia projektowego jako 5 MPa.



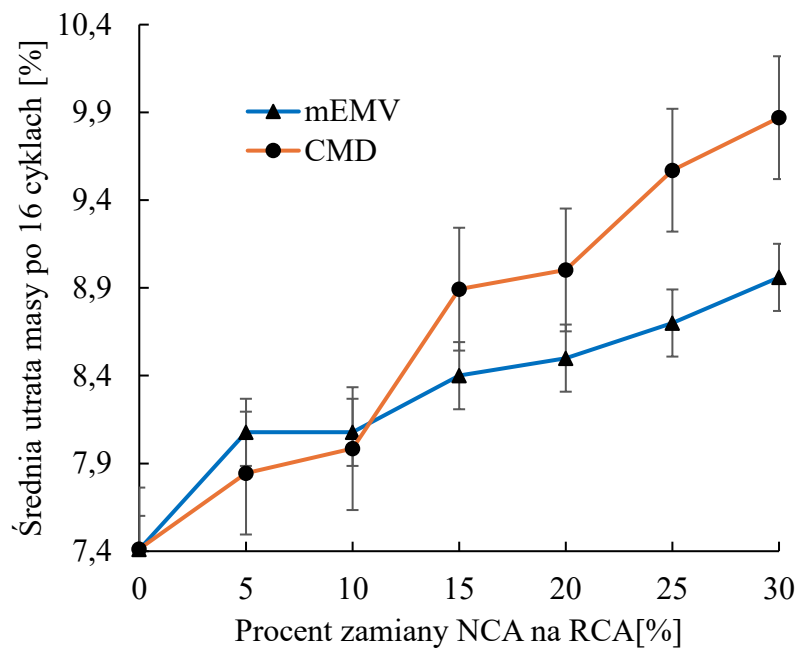
Rysunek 71. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie

Tabela 32. Klasyfikacja wytrzymałościowa po 28 dniach średnich serii według PN-EN 206+A2 [271]

Seria	f_{cm} [MPa]		f_{ck} [MPa]		Klasa betonu wg PN-EN 206+A2
	CMD	mEMV	CMD	mEMV	
Ref.	68.90	68.90	63.90	63.90	$\geq C50/60$
10% RCA	64.35	68.46	59.35	63.45	$\geq C50/60$ dla mEMV, C50/60 dla CMD
20% RCA	63.60	65.90	58.60	60.90	C50/60
30% RCA	60.14	64.70	55.13	59.70	C50/60 dla mEMV, C45/55 dla CMD

5.4.3. Odporność na ścieranie

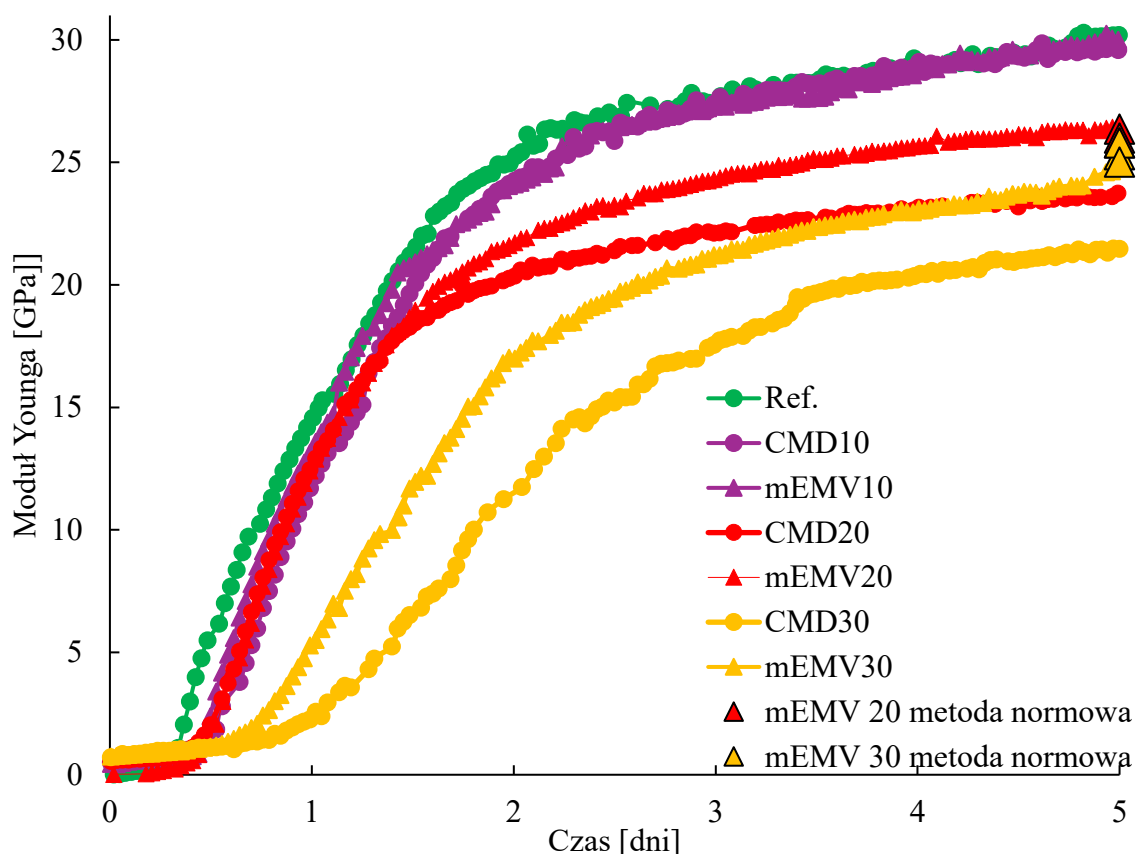
Odporność na ścieranie, przedstawiona na Rysunku 72, wykazuje, że próbki z 5% i 10% zawartością zamiennika kruszywa naturalnego dla obu metod projektowania mieszanki (CMD i mEMV) charakteryzowały się porównywalną utratą masy. Począwszy od 15% udziału kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1, mieszanki mEMV wykazywały systematycznie mniejszą utratę masy – o około 1% w każdej serii – w porównaniu do mieszanek wykonanych metodą CMD. Dla przykładowego elementu o masie 1000 kg oznacza to optymalizację rzędu 10 kg. Znaczny spadek odporności na ścieranie rozpoczyna się od poziomu 15% zamiennika. Obserwowany trend utraty odporności na ścieranie pozostaje zgodny z wynikami wytrzymałości na ściskanie, w których już przy 10% zastąpieniu kruszywa naturalnego odnotowano pogorszenie właściwości mechanicznych. Całkowity spadek właściwości mechanicznych, wyrażony jako utrata masy między mieszanką referencyjną a mieszanką z 30% zamiennika dolomitu, wyniósł odpowiednio 2,46% dla metody CMD oraz 1,55% dla metody mEMV. Zgodnie z normą PN-EN 13813:2003 [283] wszystkie próbki zakwalifikowano do klasy A15 (od 22 do 15 cm³ / 50 cm²).



Rysunek 72. Wyniki badania odporności na ścieranie

5.4.4. Moduł sprężystości metodą normową

Rysunek 73 przedstawia wyniki badań modułu sprężystości metodą normową wraz z wynikami metodą EMM ARM. Badanie wykonano po upływie 5 dni tak by móc porównać je z metodą EMM ARM. Zbadano dwie serie (oznaczone żółtymi i czerwonymi trójkątami) by potwierdzić dokładność metody EMM ARM. Otrzymane wyniki potwierdziły dokładność metody EMM-ARM. Różnice między metodami wyniosły dla obu przypadków około 3 % (Tabela 33) co jest satysfakcjonującym wynikiem.



Rysunek 73. Wyniki badania modułu Younga metodą normową nałożone na wykres moduły Younga metodą EMM-ARM

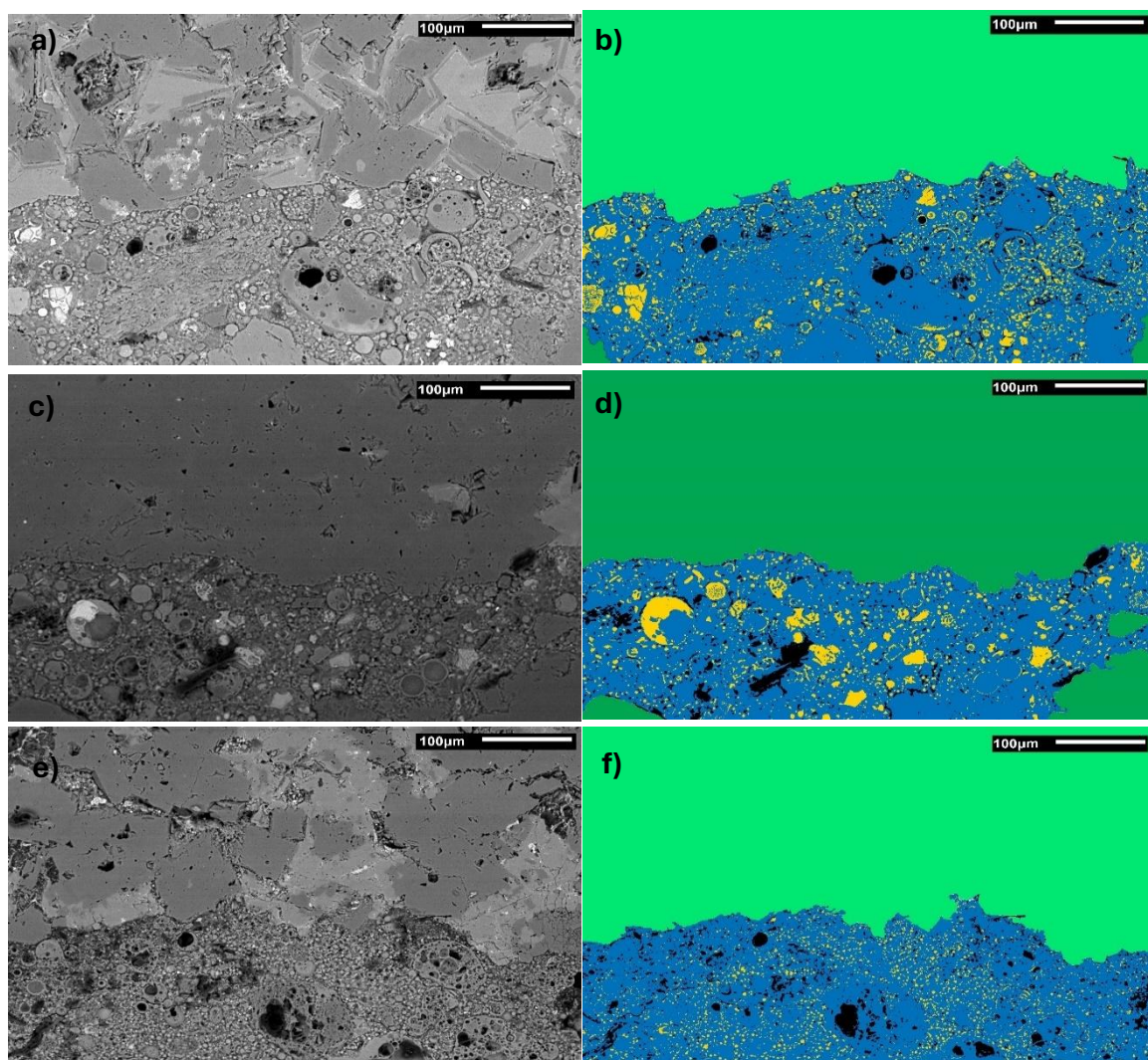
Tabela 33. Porównanie średnich wartości modułu Younga dla dwóch metod badawczych

Zamiana NCA na RCA	Średni moduł Younga po 5 dniach [GPa]			
	Metoda EMM ARM		Metoda normowa	
	CMD	mEMV	mEMV	
0%	30.23	-	-	
10%	29.59	30.01	-	
20%	23.75	26.97	26.06	3.37 % różnicy
30%	21.51	24.63	25.38	3.05 % różnicy

5.4.5. Analiza mikrostruktury

W celu zbadania lokalnych różnic mikrostrukturalnych w obrębie matrycy cementowej przeprowadzono analizę porowatości oraz rozmieszczenia faz hydratacyjnych dla trzech próbek betonu, przy powiększeniu 200×: S1 (10% kruszywa grubego z recyklingu), S2 (20%) oraz S3 (30%). Wyniki przedstawiono na Rysunku 74 oraz w Tabeli 34. Zidentyfikowane fazy obejmowały porowatość (czarne piksele), produkty hydratacji, w tym żel C-S-H (kolor niebieski), oraz niezhydratyzowane ziarna cementu (kolor żółty). Na mapach fazowych oznaczono również dolomit oraz kruszywo grube z recyklingu, odpowiednio jako ciemnozielone i jasnozielone obszary (Rysunek 74b, d, f), jednak nie były one uwzględniane

w analizie ilościowej. Zawartość faz obliczono na podstawie liczby pikseli przypisanych do danej fazy względem całkowitej liczby pikseli w matrycy cementowej (z wyłączeniem kruszywa). W próbce S1, w której analizowano matrycę w sąsiedztwie kruszywa grubego z recyklingu, porowatość wynosiła 5,7%, zawartość produktów hydratacji – 83,1%, a udział niezhydratyzowanego cementu – 11,2%. W próbce S2, przy granicy z kruszywem naturalnym, porowatość była nieco wyższa (7,3%), a niezhydratyzowany cement osiągnął 12,2%. W próbce S3, ponownie w sąsiedztwie kruszywa grubego z recyklingu, porowatość wzrosła do 8,7%, jednak jednocześnie zaobserwowano wyższy udział produktów hydratacji (84,6%) oraz niższy udział niezhydratyzowanego cementu (6,6%). Najwyższy stopień hydratacji ($\alpha = 85,8\%$) odnotowano w próbce S3. Uzupełniając przeanalizowano również rozkład wielkości porów. Na Rysunku 75 przedstawiono histogramy liczby porów według klas wielkości dla wszystkich trzech próbek. W próbce S1, 75% porów miało powierzchnię mniejszą niż $2\ \mu\text{m}^2$, a 95% – poniżej $8\ \mu\text{m}^2$. W próbce S2 udział najmniejszych porów spadł do 69%, a 91% mieściło się poniżej $8\ \mu\text{m}^2$, co wskazuje na nieco luźniejszą strukturę i większe zróżnicowanie porowatości. Z kolei próbka S3 ponownie wykazała dominację drobnych porów – 79% z nich miało powierzchnię poniżej $2\ \mu\text{m}^2$, a 95% poniżej $8\ \mu\text{m}^2$. Rozkłady skumulowane wykazały, że we wszystkich przypadkach ponad 94% porów miało powierzchnię mniejszą niż $10\ \mu\text{m}^2$, co potwierdza dominację bardzo drobnej porowatości kapilarnej w analizowanej matrycy. Podsumowując, obecność kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 w sąsiedztwie matrycy cementowej nie prowadzi do pogorszenia jej mikrostruktury. Pomimo najwyższej porowatości (8,7%), próbka S3 wykazywała również najwyższy udział produktów hydratacji (84,6%) oraz najwyższy stopień hydratacji (85,8%). Może to wynikać ze zdolności kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 do absorpcji wody, co sprzyja retencji wilgoci w otoczeniu cząstek i wspomaga dalszy przebieg hydratacji w matrycy cementowej.



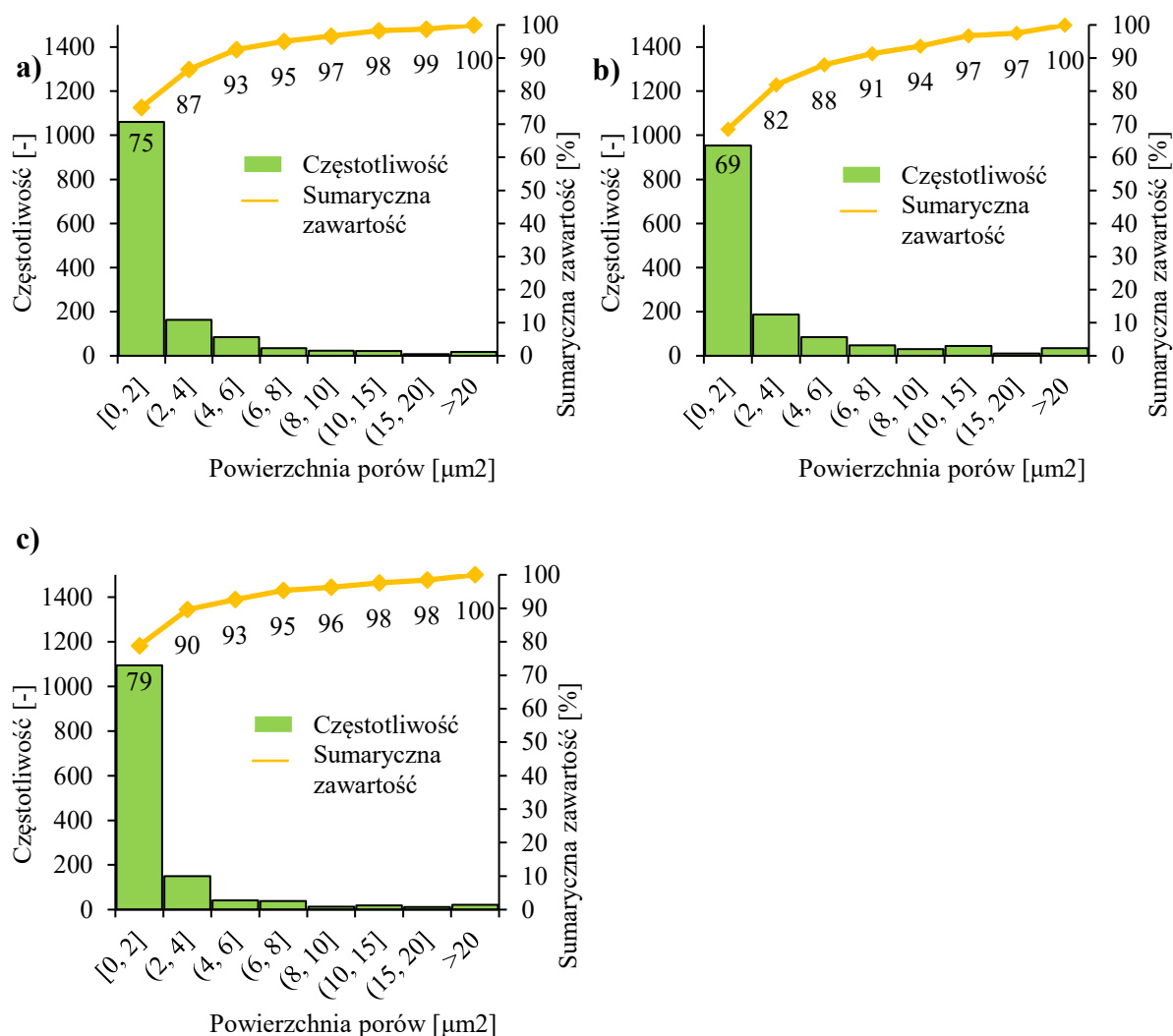
Legenda:

Dolomit	Kruszywo z Plattenbau P1	Produkty hydratacji (HP)	Niezhydratyzowany cement (AC)	Pory
---------	--------------------------	--------------------------	-------------------------------	------

Rysunek 74. Obrazy SEM (a, c, e) oraz odpowiadające im mapy segmentacji faz (b, d, f) matrycy cementowej w próbkach betonu: S1 (a–b), S2 (c–d), oraz S3 (e–f). Segmentowane fazy: kruszywo naturalne (ciemnozielone), recyklingowe (jasnozielone), produkty hydratacji (HP, niebieskie), niezhydratyzowany cement (AC, żółte), porowatość (czarne piksele)

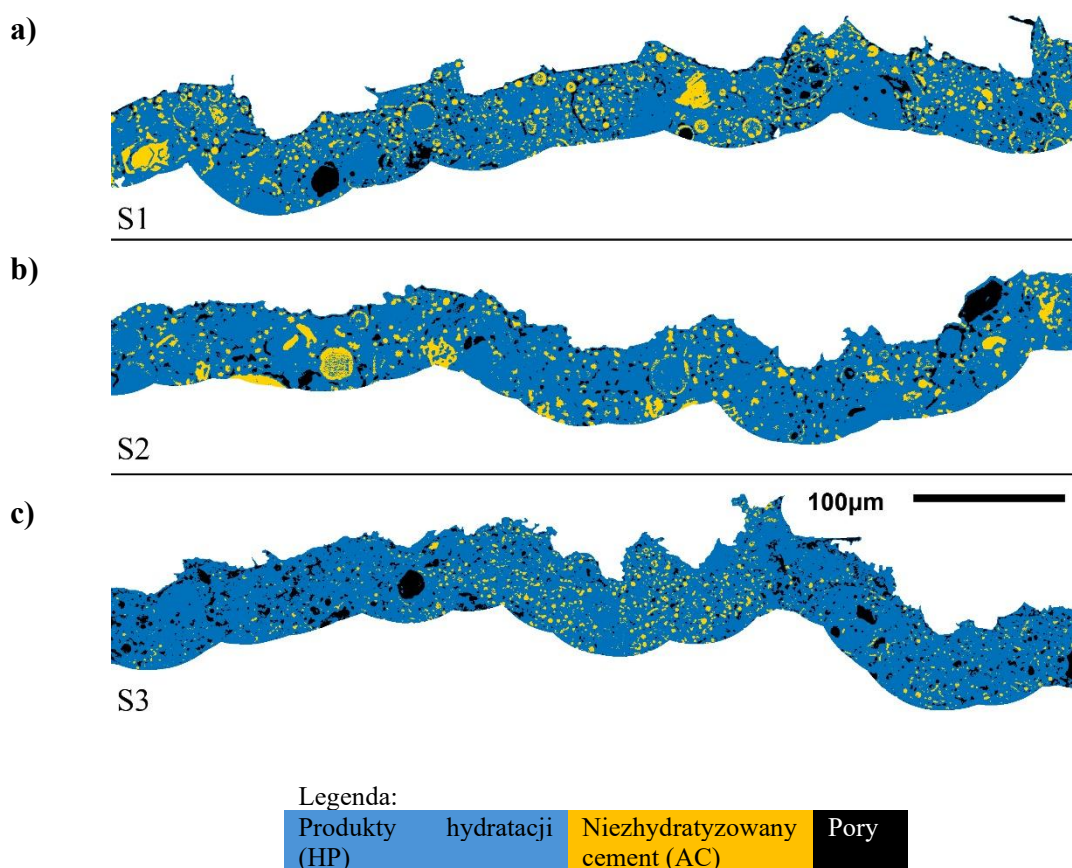
Tabela 34. Zawartość faz i stopień hydratacji w matrycy cementowej próbek S1–S3

Próbka	Porowatość [%]	Produkty hydratacji (HP) [%]	Niezhydratyzowany cement (AC) [%]	Stopień hydratacji [%]
S1	5,7	83,1	11,2	77,9
S2	7,3	80,4	12,2	75,8
S3	8,7	84,6	6,6	85,8



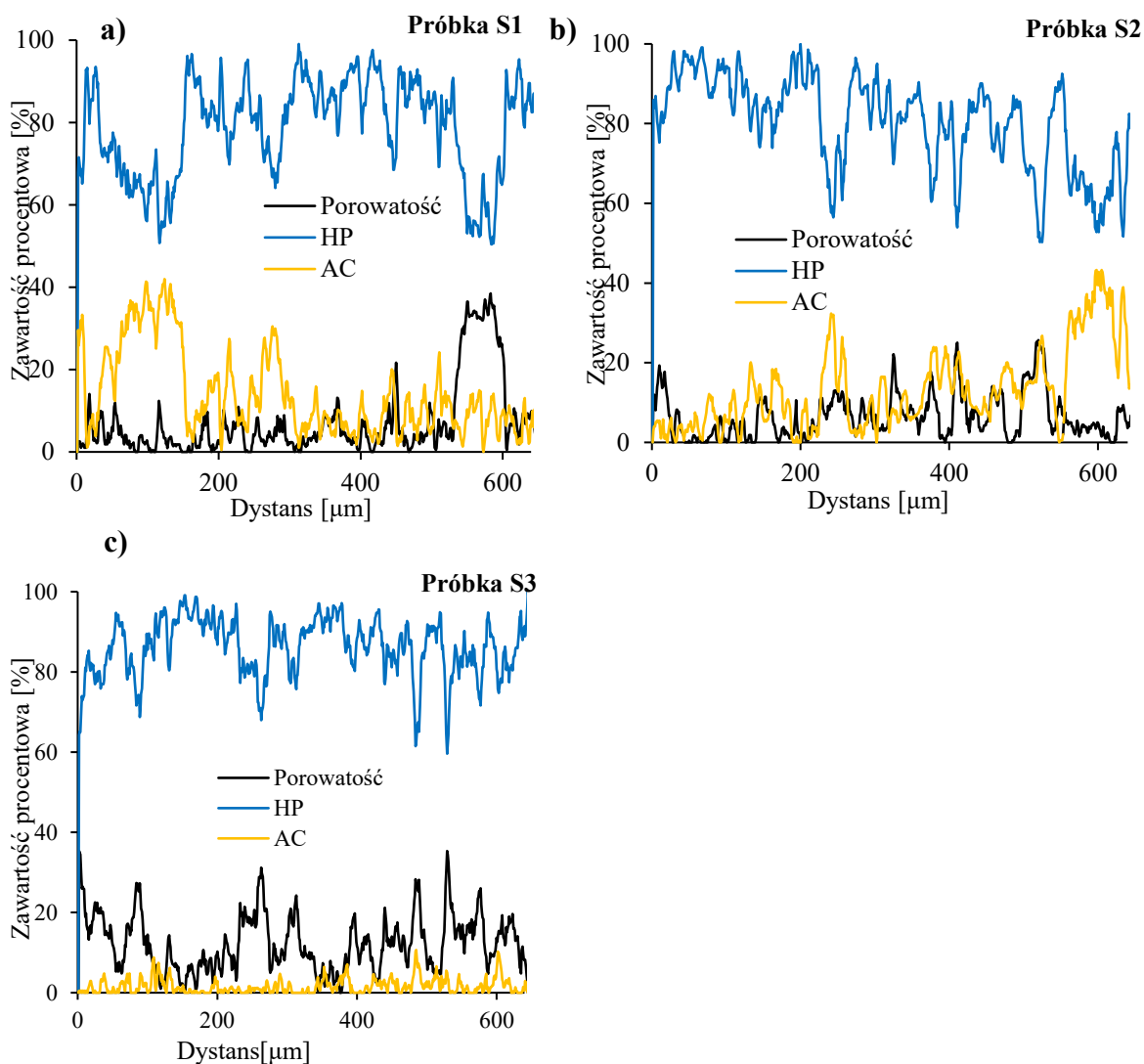
Rysunek 75. Rozkład wielkości porów w matrycy cementowej próbek: a) S1, b) S2 c) S3

W kolejnym etapie z obrazów SEM próbek S1, S2 i S3 wydzielono strefy przejściowe. Dla każdej próbki w oprogramowaniu ImageJ zdefiniowano pas o szerokości 50 μm , liczony od granicy kruszywa w głąb matrycy cementowej. W wyznaczonej strefie przeprowadzono analizę rozmieszczenia porów oraz segmentację fazową (Rysunek 76). W próbkach S1 i S3 analizowana strefa przylegała do kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1, natomiast w próbce S2 – do dolomitu. Wszystkie obrazy analizowano przy powiększeniu 200 $\times$, a porównania fazowe nie uwzględniały pikseli należących do kruszywa. Analogicznie jak w poprzednim etapie, wygenerowano mapy fazowe i histogramy rozmieszczenia porów dla każdej z próbek.



Rysunek 76. Mapy fazowe 50 μm szerokości stref przejściowych (ITZ) w próbkach: a) S1, b) S2 c) S3. Fazy: porowatość (czarne), produkty hydratacji (HP, niebieskie), niezhydratyzowany cement (AC, żółte)

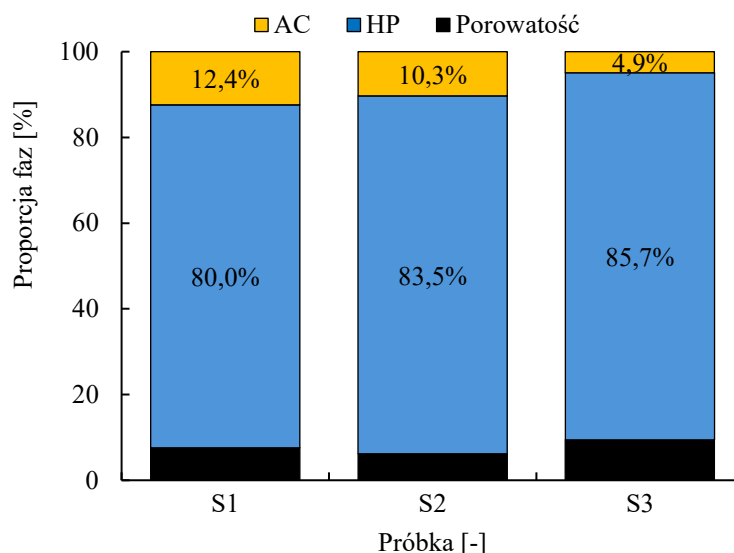
Na Rysunku 77 przedstawiono rozkład faz wzdłuż długości strefy przejściowej. Wykresy ukazują lokalne zmiany zawartości porowatości, produktów hydratacji (HP) oraz niezhydratyzowanego cementu (AC) wzdłuż granicy kruszywo–matryca. Wyniki wskazują na mikrostrukturalne różnice w ITZ, zależne od rodzaju przylegającego kruszywa. Przykładowo, próbka S3 wykazywała stosunkowo wysoką porowatość (średnio 9,4%) oraz najniższą zawartość AC (4,9%), natomiast próbka S2 cechowała się największym udziałem niezhydratyzowanego cementu (10,3%) i najniższą porowatością (6,2%). Wyniki te sugerują, że zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 może prowadzić do bardziej porowatej ITZ, lecz jednocześnie sprzyjać procesowi hydratacji.



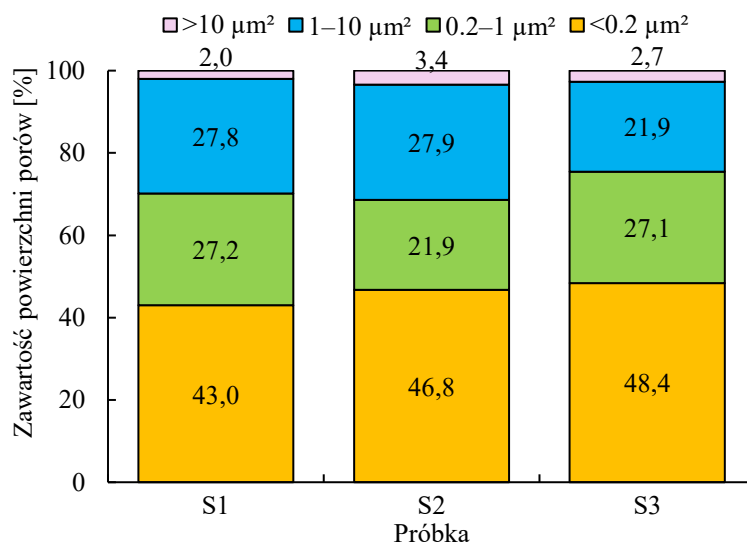
Rysunek 77. Rozkład faz wzdłuż strefy przejściowej (ITZ) o szerokości 50 μm w próbkach: a) S1, b) S2 (b) i c) S3

W celu wyraźniejszego uwidocznienia różnic, na Rysunku 78 zaprezentowano średni skład fazowy w obrębie ITZ dla wszystkich trzech próbek. Próbka S2, zawierająca dolomit, charakteryzowała się umiarkowanym udziałem produktów hydratacji (83,5%) oraz niezhydratyzowanego cementu (10,4%). Z kolei próbka S3 wykazała najbardziej zaawansowany przebieg hydratacji (85,7%) oraz najniższy udział AC (4,9%). Tendencje te mogą być związane z różnicami w zdolności do absorpcji wody i chropowatości powierzchni kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 i dolomitu, które wpływają na lokalny stosunek woda/cement oraz intensywność reakcji hydratacyjnych w obrębie ITZ. Ogółem, wyniki potwierdzają, że rodzaj użytego kruszywa grubego ma istotny wpływ na charakterystyki strefy przejściowej. Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1, pomimo zwiększania lokalnej porowatości, może sprzyjać bardziej efektywnej hydratacji w bezpośrednim sąsiedztwie granicy kruszywo–matryca. Na Rysunku 79 przedstawiono rozkład wielkości porów w strefie ITZ próbek S1–S3, pogrupowany w cztery klasy rozmiarowe. We wszystkich próbkach dominowały najmniejsze pory ($<0,2 \mu\text{m}^2$), stanowiąc odpowiednio: 43,0% (S1), 46,8% (S2)

oraz 48,4% (S3) całkowitej powierzchni porów. Największe zróżnicowanie odnotowano w zakresie porów średnich ($0,2-1 \mu\text{m}^2$), których największy udział występował w próbce S1 (27,2%), a najmniejszy w S2 (21,9%). Udział największych porów ($>10 \mu\text{m}^2$) był relatywnie niewielki. Wyniki te sugerują, iż typ zastosowanego kruszywa wpływa nie tylko na ogólną porowatość ITZ, lecz również na rozkład wielkości porów w tej strefie.



Rysunek 78. Średni skład fazowy w strefie przejściowej (ITZ) o szerokości $50 \mu\text{m}$ w próbkach S1, S2 i S3



Rysunek 79. Rozkład udziału powierzchni porów w ITZ w podziale na klasy wielkości porów dla próbek S1–S3

5.5. Analiza zależności między właściwościami mieszanek betonowych a cechami kruszywa

Celem niniejszej sekcji jest ilościowa analiza zależności między wybranymi właściwościami betonu samozagęszczającego się a cechami kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1. Pomimo że właściwości kruszywa, takie jak nasiąkliwość czy współczynnik

kształtu SF, nie były mierzone dla każdej serii mieszanki osobno, umożliwiono ich porównanie poprzez wprowadzenie zmiennych pochodnych zależnych od procentowego udziału kruszywa grubego z recyklingu w składzie. W analizie zastosowano regresję liniową w celu sprawdzenia, czy i w jakim stopniu zmiany właściwości materiału wejściowego (kruszywa) wpływają na końcowe parametry mechaniczne i fizyczne betonu. Dla każdej serii mieszanek (referencyjna, 10 %, 20 %, 30 %), wyznaczono teoretyczne wartości średnie: nasiąkliwość, procentowa zawartość starej zaprawy, współczynnik kształtu ziaren SF, traktując je jako zmienne niezależne w analizie regresji. Dla przykładu zawartość starej zaprawy dla serii o 10 % zamianie kruszywa wyniosła 12.51 % (wartość średnia) $\cdot 0.1 = 1.25$ %.

Stwierdzono wyraźną, silną ujemną korelację pomiędzy nasiąkliwością kruszywa a wytrzymałością na ściskanie (Rysunek 80a). Wraz ze wzrostem nasiąkliwości, wartość wytrzymałości betonu istotnie malała. Otrzymana zależność jest zgodna z obserwacjami literaturowymi – wyższa nasiąkliwość kruszywa grubego z recyklingu powoduje zwiększoną porowatość betonu oraz potencjalne zakłócenia w stosunku woda/cement w strefie ITZ.

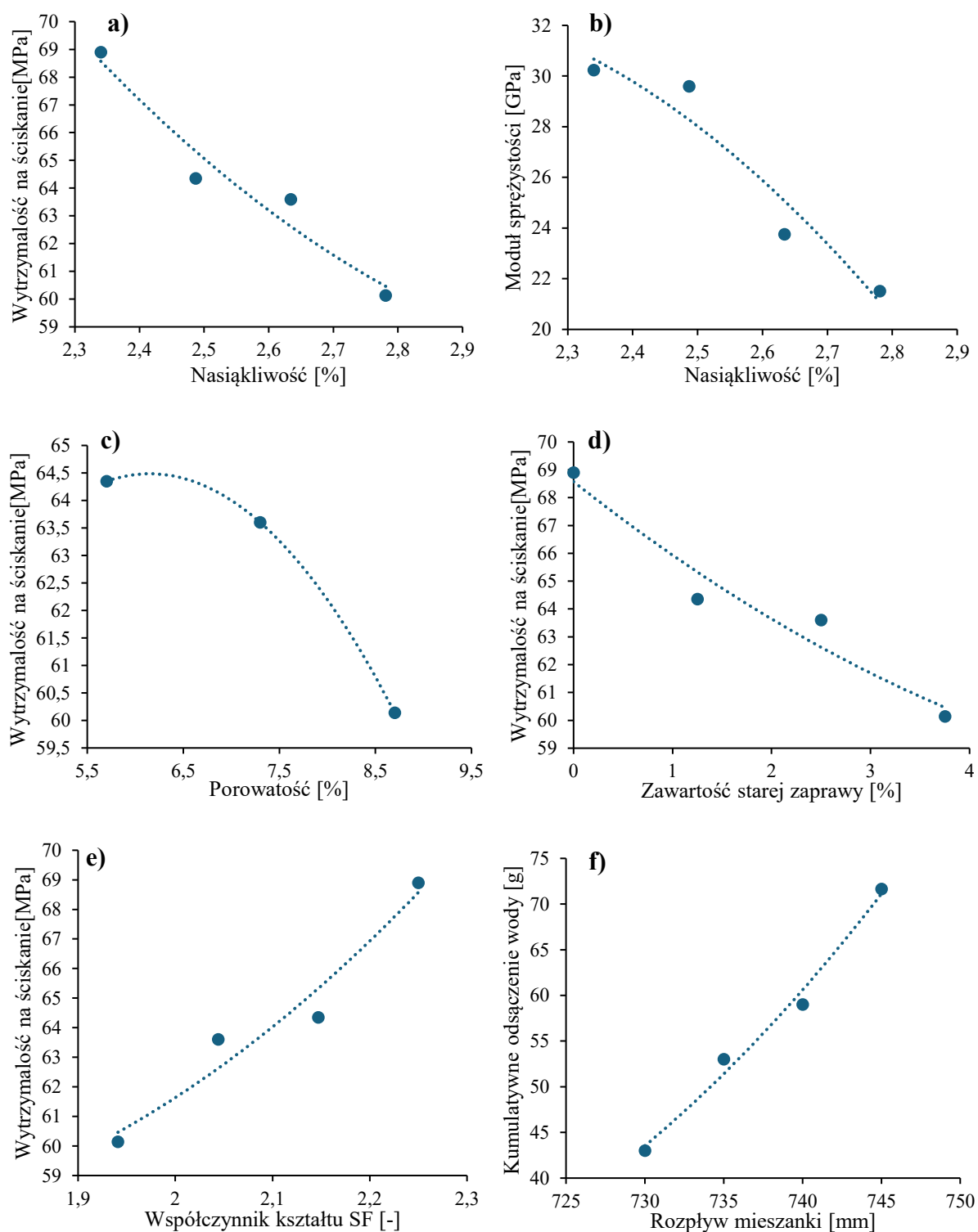
Również w przypadku modułu sprężystości (Rysunek 80b) odnotowano silną ujemną korelację z nasiąkliwością kruszywa. Im większa nasiąkliwość, tym niższy moduł sprężystości uzyskanej mieszanki betonowej. Jakość porowatego kruszywa recyklingowego znacząco wpływa na sztywność materiału.

W przypadku porowatości kruszywa również zaobserwowano ujemną korelację z wytrzymałością na ściskanie (Rysunek 80c). W miarę wzrostu porowatości cząstek kruszywa, wytrzymałość betonu spadała.

Zależność pomiędzy zawartością starej zaprawy w kruszywie grubym z recyklingu Plattenbau P1 a wytrzymałością na ściskanie również okazała się ujemna, co oznacza, że większy udział zaprawy prowadzi do spadku wytrzymałości betonu (Rysunek 80d). Potwierdza to wpływ porowatej i słabszej zaprawy na właściwości mechaniczne.

W przeciwieństwie do wcześniej omówionych zmiennych, dla współczynnika kształtu SF uzyskano dodatnią korelację z wytrzymałością na ściskanie (Rysunek 80e). Oznacza to, że w analizowanej serii danych wzrost SF towarzyszył wzrostowi f_{cm} . Taka zależność może wynikać z bardziej efektywnego zagęszczenia mieszanek w przypadku cząstek o mniej wydłużonym kształcie.

Dodatnią korelację wykazano pomiędzy wartością rozplywu mieszanki (mierzoną w mm) a ilością wody odsączonej z mieszanki w trakcie badania (Rysunek 80f). Wzrost rozplywu wiązał się ze zwiększonym odsączaniem wody, co potwierdza ogólną tendencję, że bardziej płynne mieszanki samozagęszczające się są bardziej podatne na segregację składników.



Rysunek 80. Wyniki regresji dla poszczególnych zależności: a) wytrzymałość na ściskanie od nasiąkliwości kruszywa b) moduł sprężystości od nasiąkliwości c) wytrzymałość na ściskanie od porowatości d) wytrzymałość na ściskanie od zawartości starej zaprawy e) wytrzymałość na ściskanie od SF f) odsączenie wody od rozpływu mieszanki

5.6. Potencjalne praktyczne zastosowanie i ograniczenia technologii

5.6.1. Analiza mechaniczno-ekonomiczna

Analizę ekonomiczną wykonano zgodnie z metodyką zawartą w [191]. Do analizy wydajności mechanicznej betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 wykorzystano wyniki badań obejmujące podstawowe właściwości stwardniałego betonu, takie jak wytrzymałość na ściskanie f_{cm} , ścieralność (ubytek masy Δm) i końcowy moduł sprężystości E_{cm} . Na potrzeby analizy wydajności mechanicznej przyporządkowano różne wagi dla każdej właściwości, w zależności od jej znaczenia w projektowaniu betonu, w celu określenia globalnego współczynnika wydajności mechanicznej. Zatem najwyższą wagę uwzględniono dla wytrzymałości na ściskanie, a następnie dla modułu sprężystości a potem dla ścieralności:

$$MPR = \left(\frac{\left(3 * \frac{f_{cm\ x}}{f_{cm\ ref.}} \right) + \left(2 * \frac{E_{cm\ x}}{E_{cm\ ref.}} \right) + \left(1 * \frac{\Delta m\ x}{\Delta m\ ref.} \right)}{6} \right) \quad (33)$$

Gdzie:

x – dana seria

ref. – seria referencyjna (100 % NCA)

Tabela 35 przedstawia wyniki obliczenia współczynnika wydajności mechanicznej MPR. W analizie wykazano, że przy zastosowaniu klasycznej metody projektowania (CMD), wprowadzenie 30% kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 powoduje spadek mechanicznej wydajności do poziomu 84% względem serii referencyjnej. Taki wynik może być uznany za pogorszenie właściwości, które w kontekście projektowania niektórych elementów może wymagać dodatkowego uzasadnienia. Z kolei metoda mEMV, oparta na modyfikacji składu mieszanki (m.in. redukcja cementu, optymalizacja wody i kruszywa drobnego), pozwoliła ograniczyć spadek MPR do poziomu 90%, co można uznać za akceptowalny kompromis między zrównoważeniem mechanicznym a środowiskowym. Tabela 36 przedstawia wyniki obliczenia współczynnika wydajności ekonomicznej ECR. Przyjęto następujące ceny: CEM I 52.R 400 zł/t, kruszywo drobne 80 zł/t, RCA 60zł/t, NCA 72zł/t, woda 4 zł/t, popiół lotny 195 zł/t, superplastyfikator 4000 zł/t na podstawie ofert dostawców (Tauron, Sika, OnGeo, Kruszbet). Współczynnik ECR (ekonomiczna efektywność) liczony jako stosunek kosztów danej mieszanki do kosztów referencyjnych, również pokazuje korzystny trend (niższy niż 1,0). Świadczy to, że koszt materiałów wykorzystanych na wytworzenie mieszanek z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 jest mniejszy niż serii referencyjnej. Natomiast dla projektowania CMD różnice były niewielkie (sięgające kilku zł za m³) nawet stosując 30 % zamiany kruszywa. Stosując metodę projektowania mEMV, która wprowadza modyfikację w pozostałych składnikach jak cement, woda, kruszywo drobne osiągnięto maksymalną różnicę na korzyść serii mEMV 30 % względem referencyjnej jako 4 %, co wciąż jest wartością niewielką. Zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 może natomiast przedstawiać inne, nieuwzględnione korzyści ekonomiczne - może istotnie ograniczyć ilość odpadów betonowych powstających w wyniku wyburzeń

obiektów budowlanych. W Polsce, według stanu na lipiec 2025 r., koszt utylizacji odpadów sklasyfikowanych pod kodem 17 01 01 (odpady betonu z robót budowlanych i rozbiórkowych) wynosi średnio ok. 35,00 EUR za tonę (na podstawie aktualnych cen rynkowych). Jeden metr sześcienny gruzu betonowego odpowiada masie ok. 1,8 tony odpadów, natomiast średni koszt kontenera o pojemności 7 m³ wynosi około 230 EUR. Dla przykładu, rozbiórka budynku wielorodzinnego wykonanego w technologii wielkopłytywowej o powierzchni użytkowej 3400 m² generuje ok. 2500 ton odpadów betonowych (na podstawie [354]). Wykorzystanie 70% tej ilości jako kruszywa z recyklingu w nowych inwestycjach realizowanych w miejscu rozbiórki (z uwzględnieniem strat powstałych podczas prac rozbiórkowych) pozwala na oszacowanie potencjalnych oszczędności na poziomie ok. 31 970 EUR w kosztach kontenerów na odpady oraz ok. 61 250 EUR w kosztach utylizacji odpadów. Dodatkowe korzyści mogą wynikać z ograniczenia kosztów transportu, nadzoru oraz użytkowania terenu, szczególnie że budynki wielkopłytowe często zlokalizowane są w centrach miast – miejscach atrakcyjnych pod kątem nowych inwestycji. Należy jednak zaznaczyć, że rozbiórka selektywna, obejmująca wydzielenie frakcji betonowych i ich rozdrobnienie na kruszywo grube, generuje wyższe koszty operacyjne w porównaniu do tradycyjnych metod rozbiórki. Niemniej jednak, odpowiednio posegregowane odpady mogą zrekompensować te nakłady finansowe na etapie dalszego gospodarowania odpadami.

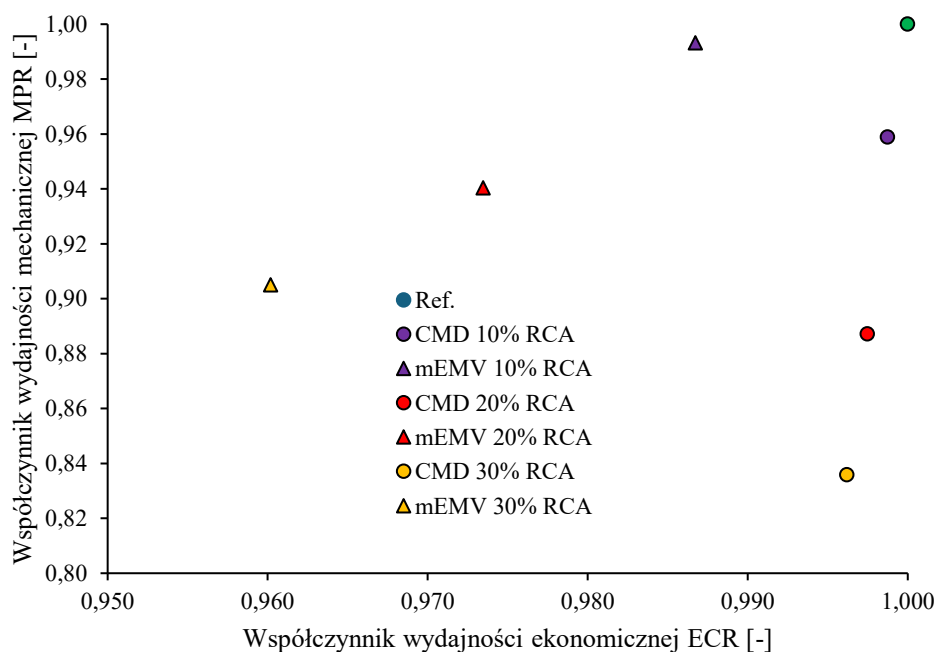
Porównanie współczynników MPR oraz ECR (Rysunek 81) jednoznacznie wskazuje, że metoda mEMV pozwala osiągnąć lepszy kompromis pomiędzy jakością mechaniczną a opłacalnością ekonomiczną. Nawet przy 30% udziale kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 możliwe jest zachowanie akceptowalnych właściwości mechanicznych oraz osiągnięcie oszczędności kosztowych na poziomie kilku procent.

Tabela 35. Wyniki analizy współczynnika wydajności mechanicznej

Seria	f _{cm} [MPa]		E _{cm} [GPa]		Δ _m [%]		MPR [-]	
	CMD	mEMV	CMD	mEMV	CMD	mEMV	CMD	mEMV
Ref.	68.90	68.90	30.23	30.23	92.59	92.59	1.00	1.00
10% RCA	64.35	68.46	29.59	30.01	92.02	91.92	0.96	0.99
20% RCA	63.60	65.90	23.75	26.97	91.00	91.50	0.89	0.94
30% RCA	60.14	64.70	21.51	24.63	90.13	91.04	0.84	0.90

Tabela 36. Wyniki analizy współczynnika wydajności ekonomicznej ECR

		Ref.		10 % RCA		20 % RCA		30 % RCA	
		CMD	mEMV	CMD	mEMV	CMD	mEMV	CMD	mEMV
Skład [kg/m ³]	CEM I 52.R	475	475	475	467.74	475	460.48	475	453.22
	Kruszywo drobne	850	850	850	837.01	850	824.02	850	811.03
	RCA	0	0.00	100	107.39	200	214.78	300	322.16
	NCA	1000	1000	900	900	800	800	700	700
	Woda	176	176	176	173.31	176	170.62	176	167.93
	Popiół lotny	125	125	125	125	125	125	125	125
	Superplast.	19.25	19.25	19.25	19.25	19.25	19.25	19.25	19.25
Cena [zł]	CEM I 52.R	190.00	190.00	190.00	187.10	190.00	184.19	190.00	181.29
	Kruszywo drobne	68.00	68.00	68.00	66.96	68.00	65.92	68.00	64.88
	RCA	-	-	6.00	6.44	12.00	12.89	18.00	19.33
	NCA	72.00	72.00	64.80	64.80	57.60	57.60	50.40	50.40
	Woda	0.70	0.70	0.70	0.69	0.70	0.68	0.70	0.67
	Popiół lotny	24.38	24.38	24.38	24.38	24.38	24.38	24.38	24.38
	Superplast.	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00
	Suma [zł]	432.08	432.08	430.88	427.37	429.68	422.66	428.48	417.95
	ECR	1.000	1.000	0.997	0.989	0.994	0.978	0.992	0.967



Rysunek 81. Wyniki analizy ekonomiczno - mechanicznej

5.6.2. Potencjalny wpływ środowiskowy betonu z kruszywem grubym z recyklingu Plattenbau P1 na przykładzie praktycznego zastosowania

Wykorzystanie kruszywa grubego z recyklingu budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 w technologii betonu samozagęszczającego się pozwala na znaczące ograniczenie wpływu produkcji betonu na środowisko naturalne, w kilku kluczowych obszarach:

- redukcji emisji gazów cieplarnianych,
- zmniejszeniu zużycia surowców pierwotnych,
- ograniczeniu energochłonności procesów produkcyjnych,
- realizacji celów gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) poprzez ponowne włączenie odpadu budowlanego do cyklu produkcyjnego.

W niniejszej rozprawie nie przeprowadzono pełnego cyklu analizy LCA (ang. *Life Cycle Assessment*). Niemniej jednak, w oparciu o dostępne dane literaturowe, można wskazać potencjalne korzyści środowiskowe wynikające z zastosowania kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 w technologii betonu samozagęszczającego się. Należy dodać, że oprócz produkcji cementu, transport (odległość, środek transportu) również w dużym stopniu przyczynia się do obciążenia środowiska, a to zależy bezpośrednio od odległości. Dlatego w projekcie uwypuklono możliwość stosowania kruszywa w nowych mieszankach bezpośrednio na miejscu rozbiórki pod nowe inwestycje. Ponieważ budynki wielkopłytowe są zlokalizowane w centrach miast, przy możliwej rozbiórce istnieje duża szansa na późniejsze zagospodarowanie terenu. Dla oceny praktycznego potencjału wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 przeprowadzono analizę przykładowego stropu prefabrykowanego wykonanego z betonu samozagęszczającego się. Jego układanie dla stropu w wielu warstwach wiąże się z istotnymi wyzwaniami zintegrowania partii betonów, a granica między warstwami mieszanki stanowi strefę nieciągłości betonu i najsłabszą część konstrukcji, co zostało opisano w [82]. Układanie wielu warstw betonu samozagęszczającego się nie stanowiło zakresu opracowania, założono więc pojedynczą warstwę betonu. Założenia projektowe do obliczenia szacunkowej korzyści środowiskowej (Tabela 37):

- Źródło RCA: prefabrykowany panel konstrukcyjny Plattenbau P1 (jednorodne pochodzenie, brak cegły).
- Przetwarzanie: lokalne (na miejscu), dwuetapowe kruszenie i przesiewanie.
- Frakcja końcowa: 4–8 mm.
- Brak transportu na duże odległości (≤ 20 km).
- Typ elementu: płyta stropowa prefabrykowana, z betonu samozagęszczającego się klasy C35/45,
- Wymiary stropu: 6.0×3.0 m, grubość 0.2 m,
- Całkowita objętość betonu: $V = 6.0 * 3.0 * 0.2 = 3.6m^3$
- Zastąpienie 30 % frakcji kruszywa grubego (4–8 mm) recyklatem

Tabela 37. Potencjalne korzyści środowiskowe stosując kruszywo grubego z recyklingu Plattenbau P1 w betonie

Korzyść środowiskowa	Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1	Kruszywo naturalne	Źródło
Redukcja śladu węglowego	Prefabrykat + brak transportu >20 km + wydajne kruszenie: oszczędność szacowana na 15% do 30%. Oszczędność dla analizowanego stropu: $15\% * 250 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3 * 3.6\text{m}^3 = 135 \text{ kgCO}_2\text{eq}$	Produkcja 1 m ³ betonu klasy C35/45 generuje około 250–300 kg CO ₂ eq/m ³	W zależności od źródła i energii w procesie przetwarzania [48] [17]
Oszczędność energii pierwotnej	W przypadku RCA z lokalnych prefabrykatów, proces rozdrabniania i sortowania (bez transportu dalekiego) generuje oszczędność 25–35%. Oszczędność dla analizowanego stropu: $25\% * 1 \text{ GJ/m}^3 * 3.6\text{m}^3 = 0.9 \text{ GJ/m}^3$	Energochłonność procesu wydobycia, kruszenia i transportu kruszywa naturalnego to średnio ~0,75–1,2 GJ/m ³	[372]
Redukcja zapotrzebowania na surowce naturalne	Redukcja eksploatacji złóż skalnych dla kruszywa grubego (frakcja 4–8 mm). Oszczędność dla analizowanego stropu: $30\% * 1000 \text{ kg/m}^3 * 3.6\text{m}^3 = 1080 \text{ kg}$	Na każdy 1 m ³ betonu typu SCC zużywa się ok. 1000–1100 kg kruszywa grubego	[63]
Wskaźnik GOZ i dodatkowe korzyści	- Ograniczenie odpadów budowlanych, zagospodarowanie betonu rozbiórkowego z systemów LPS, które obecnie często trafiają na składowiska, - Uniknięcie transportu utylizacyjnego, recykling na miejscu budowy obniża dodatkowe emisje i koszty.	-	-

Dla jednego prefabrykowanego stropu o wymiarach 6×3 m wykonanym z betonu samozagęszczającego się (frakcja 4–8 mm) możliwe jest:

- Zredukowanie emisji CO₂ o około 135 kg,
- Zaoszczędzenie prawie 1 GJ energii pierwotnej,
- Zastąpienie ponad 1 tony surowców naturalnych,
- Bez negatywnego wpływu na urabialność betonu (dzięki dobranym frakcjom),
- Z zachowaniem powtarzalności kruszywa i niskim ryzykiem technologicznym.

Dodatkowo, w kontekście prefabrykacji, kontrolowane warunki produkcji ułatwiają wdrożenie kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 w porównaniu do betonu towarowego.

5.6.3. Proponowany schemat wdrożenia

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy ograniczeń i szans można zaproponować uproszczony schemat wdrożenia kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do praktyki inżynierskiej. Schemat obejmuje trzy główne etapy: (1) selekcję i przygotowanie kruszywa, (2) projektowanie mieszanki betonu samozagęszczającego się, oraz (3) zastosowanie praktyczne.

1. Selekcja i przygotowanie RCA-LPS

- wybór elementów prefabrykowanych (np. panele stropowe, ścienne) o jednorodnym pochodzeniu,
 - ocena jakości betonu rozbiórkowego (klasa wytrzymałości, zawartość zaprawy, zanieczyszczenia),
 - dwuetapowe kruszenie i przesiewanie w celu uzyskania wymaganych frakcji,
 - kontrola parametrów fizycznych (nasiąkliwość, gęstość, morfologia ziaren) oraz stanu wilgotności.
2. Projektowanie mieszanki betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych
- dobór udziału kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w mieszance z wykorzystaniem metody mEMV i analizy gęstości upakowania,
 - wykonanie serii próbnych z częściową zamianą kruszywa naturalnego (15–30%),
 - ocena właściwości w stanie świeżym (lepkość, konsystencja, czas wiązania, odsączenie wody),
 - ocena właściwości w stanie stwardniałym (wytrzymałość, moduł sprężystości, mikrostruktura ITZ).
3. Zastosowanie praktyczne – etap wdrożenia

Najbardziej racjonalnym i bezpiecznym kierunkiem pierwszego wdrożenia jest prefabrykacja elementów nienośnych, takich jak:

- bloczki i pustaki wypełniające,
- płyty chodnikowe, krawężniki i elementy drogowe,
- elementy małej architektury (ławki, płyty tarasowe, obrzeża).

Prefabrykacja nienośna jest idealnym pierwszym krokiem, ponieważ umożliwia produkcję w warunkach kontrolowanych, zapewnienie powtarzalności i stabilności parametrów mieszanek, ograniczenie ryzyka technologicznego i odpowiedzialności projektowej oraz zebranie doświadczeń przed stopniowym rozszerzeniem zastosowań na elementy konstrukcyjne średnio obciążone, a docelowo także nośne.

5.6.4. Ograniczenia praktycznego wdrożenia

Pomimo pozytywnych wyników badań technologicznych, mechanicznych i ekonomicznych, wdrożenie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do powszechnej produkcji mieszanek betonowych – zwłaszcza samozagęszczających się – napotyka na szereg praktycznych ograniczeń, które należy uwzględnić w ocenie wykonalności tej technologii.

1. Zmienność jakości materiału wejściowego

Kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych jest materiałem wtórnym, a jego właściwości mogą się różnić w zależności od źródła, wieku rozbieranego betonu, sposobu rozdrabniania czy warunków składowania. W przypadku systemów wielkopłytowych jako źródła surowca, chociaż elementy są prefabrykowane i wykonane z betonu wysokiej jakości, brak systemowego oznakowania może utrudniać ocenę ich

pierwotnych parametrów. Zmienność ta może skutkować koniecznością indywidualnej weryfikacji każdej partii, co zwiększa koszty i czas przygotowania.

2. Podwyższona nasiąkliwość i trudności w kontroli wilgotności

Jednym z najczęściej wskazywanych problemów wdrożeniowych kruszywa grubego z recyklingu w wytwórniach betonu jest niekontrolowana wilgotność kruszywa, wynikająca z jego porowatej struktury. Standardowe systemy dozowania w betoniarniach są przystosowane do materiałów o znanej i stabilnej nasiąkliwości. Zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu bez uprzedniego nasycenia, wysuszenia lub kompensacji wodą zarobową może prowadzić do niekontrolowanego obniżenia wskaźnika w/c i utraty urabialności mieszanki, szczególnie istotnej w technologii betonu samozagęszczającego się.

3. Trudność w standaryzacji i kontrolach jakości

Ze względu na brak jednoznacznych, powszechnie obowiązujących norm dotyczących pełnej certyfikacji kruszywa grubego z recyklingu w Polsce, producenci mogą napotykać trudności w spełnieniu wymogów jakościowych, narzucanych przez nadzór inwestorski lub producentów prefabrykatów. Dla projektantów oznacza to zwiększoną niepewność projektową, a dla wykonawców – potencjalne ryzyko reklamacji i wstrzymania dostaw.

4. Akceptacja przez projektantów i inwestorów

Z doświadczeń wdrożeniowych wynika, że dużą barierą jest niskie zaufanie branży budowlanej do materiałów z recyklingu. Nawet w sytuacjach, gdy parametry spełniają wymagania norm, projektanci często unikają ich stosowania w elementach konstrukcyjnych, ograniczając kruszywo grube z recyklingu jedynie do betonów niekonstrukcyjnych (np. podkładowych, drogowych, posadzkowych). Przyczyną jest obawa przed odpowiedzialnością prawną w razie niepowodzenia, jak również brak edukacji w tym zakresie.

5. Ograniczona dostępność infrastruktury przetwórczej

W Polsce wciąż relatywnie niewiele jest wyspecjalizowanych zakładów recyklingu betonu z możliwością produkcji frakcji o wysokim stopniu selekcji, czystości oraz kontrolowanej morfologii ziaren. Brak standaryzowanych linii przetwórczych na poziomie lokalnym może prowadzić do wzrostu kosztów transportu lub konieczności uzależnienia się od nieregularnych dostaw.

Pomimo wymienionych barier, warto podkreślić, że część z nich może być w istotnym stopniu ograniczona w warunkach zakładów prefabrykacji betonowej. Tego typu zakłady dysponują bardziej zaawansowaną kontrolą jakości surowców i gotowych elementów niż typowe wytwórnie betonu towarowego. Stałe, powtarzalne receptury, zamknięty proces technologiczny oraz możliwość bieżącej korekty wilgotności i dozowania wody pozwalają lepiej kompensować zmienność parametrów kruszywa grubego z recyklingu. Ponadto prefabrykacja umożliwia magazynowanie kruszywa w warunkach ograniczających jego nadmierne zawilgocenie lub przesuszenie, co ułatwia utrzymanie zakładanych właściwości mieszanki betonu samozagęszczającego się. W efekcie, wdrożenie technologii betonu samozagęszczającego się z udziałem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków

wielkopłytowych w prefabrykacji może być realną i stosunkowo niskoryzykowną ścieżką praktycznej aplikacji wyników niniejszej pracy.

5.6.5. Ograniczenia przeprowadzonych badań

Pomimo uzyskanych wyników pozwalających na pozytywną ocenę potencjału kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w technologii betonu samozagęszczającego się, należy wskazać kilka istotnych ograniczeń badań:

- W niniejszej rozprawie przeanalizowano kruszywo grube uzyskane wyłącznie z elementów systemowego budynku wielkopłyтового Plattenbau P1 (Niemcy). Wybór tego systemu wynikał z dwóch przesłanek:
 - dostępności materiału badawczego – w Niemczech proces rozbiórki budynków wielkopłytowych przebiega obecnie znacznie dynamiczniej niż w Polsce, co umożliwiło pozyskanie jednorodnego materiału w ilości wystarczającej do przeprowadzenia kompleksowych badań.
 - jednorodności i jakości materiału – system P1 był realizowany w warunkach uprzemysłowionej prefabrykacji, co pozwalało na wstępne założenie wystarczającej wytrzymałości i powtarzalności analizowanego kruszywa.

Jednocześnie należy podkreślić, że skład i właściwości betonu stosowanego w różnych systemach wielkopłytowych mogą się istotnie różnić. Dotyczy to zarówno budynków realizowanych w Polsce (np. OWT, WUF, Wk-70), jak i w innych krajach, gdzie stosowano odmienne receptury, normy projektowe czy surowce lokalne. Z tego względu wyniki uzyskane dla systemu P1 nie mogą być wprost przenoszone na inne systemy bez dodatkowej weryfikacji. Wymienić należy następujące ograniczenia przeprowadzonych badań:

- Skupienie na właściwościach krótkoterminowych – analizie poddano przede wszystkim wczesne fazy dojrzewania betonu (1, 7, 28 dni). Nie prowadzono systematycznych badań trwałości długoterminowej (karbonatyzacja, cykle zamrażania/odmrażania, reakcja ASR), co ogranicza pełną ocenę przydatności materiału do zastosowań konstrukcyjnych.
- Stan wilgotności kruszywa – mieszanki betonu samozagęszczającego się przygotowywano na bazie kruszywa w stanie suchym. Nie przeanalizowano scenariuszy odpowiadających praktyce przemysłowej, w której kruszywo może występować w stanie wilgotnym lub częściowo nasyconym (SSD). Może to wpływać na parametry świeżej mieszanki i wymaga dalszej weryfikacji.
- Skala badań – badania laboratoryjne prowadzono na próbkach modelowych, w warunkach kontrolowanych. Wyniki mogą różnić się od rezultatów uzyskanych w warunkach przemysłowych, szczególnie przy produkcji wielkoskalowej i przy zmiennej jakości kruszywa wejściowego.
- Brak pełnej analizy środowiskowej – ograniczono się do szacunkowych wskaźników środowiskowych (redukcja CO₂, oszczędność surowców), bez wykonania pełnej analizy LCA, która mogłaby precyzyjniej określić efekty środowiskowe zastosowania kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych.

6. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

6.1. Podsumowanie

Celem naukowym niniejszej rozprawy była charakterystyka kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do zastosowania w betonie samozagęszczającym się oraz ocena jego wpływu na wybrane właściwości betonu samozagęszczającego się. W szczególności celem była ocena wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na właściwości: świeżej mieszanki i stwardniałego betonu samozagęszczającego się, międzyfazową strefę przejściową między kruszywem a zaprawą cementową, przejścia betonu od stanu płynnego do stałego podczas utwardzania. Celem aplikacyjnym było wyselekcjonowanie na drodze badawczej optymalnej ilości zamiennika kruszywa grubego naturalnego na recyklingowe pod względem ich właściwości mechanicznych. Celem aplikacyjnym było także zwrócenie uwagi na przydatność betonu samozagęszczającego się wykonanego na bazie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych do pracy statyczno-wytrzymałościowej w niektórych elementach konstrukcyjnych, z punktu widzenia ich trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji.

Przeprowadzony program badań kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 pozwolił na określenie jego podstawowych właściwości, w tym składu chemicznego, krzywej uziarnienia, gęstości w stanie suchym, nasyconym, nasiąkliwości, zawartości starej zaprawy, powierzchni właściwej oraz właściwości morfologicznych ziaren. Dzięki temu wyszczególniono podobieństwa oraz różnice względem stosowanych już rozwiązań na rynku (Tabela 38). Kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 wyróżniało się niską absorpcją wody, zawartością starej zaprawy a także gęstością w porównaniu do podobnych rozwiązań z literatury co podkreśla jego odrębność. Dotychczas nie złożono żadnych roszczeń patentowych / publikacji związanych z proponowaną metodą wykorzystania odpadów betonowych z systemowych budynków wielkopłytowych do wykorzystania jako kruszywo grube w betonie.

W niniejszej rozprawie analizowano kruszywo grube uzyskane z niemieckiego systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1. Nie prowadzono odrębnych badań dla kruszywa z paneli pochodzących z innych, polskich typów systemów LPS, takich jak OWT, WUF czy Wk-70, co stanowi kierunek dalszych prac. Należy jednak podkreślić, że w praktyce prefabrykacji wielkopłytowej elementy konstrukcyjne były wytwarzane zgodnie z normatywnymi wymaganiami minimalnej klasy betonu (zwykle co najmniej B30/B35 w warunkach PRL), zapewniającymi wytrzymałość nie mniejszą niż uzyskana dla panelu analizowanego w niniejszej pracy. W związku z tym można oczekiwać, że panele konstrukcyjne z innych typów technologii wielkopłytowej, o porównywalnej lub wyższej klasie wytrzymałości, będą wykazywać podobny potencjał do wykorzystania jako źródło kruszywa recyklingowego do betonu samozagęszczającego się.

Analizując potencjał wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych należy zauważyć, że w momencie ich projektowania i realizacji nie zakładano perspektywy pełnego cyklu życia obiektów. Budynki te wznoszono z myślą o szybkim zaspokojeniu potrzeb mieszkaniowych, bez refleksji nad ponownym wykorzystaniem materiałów. W konsekwencji obecnie stajemy przed wyzwaniem zagospodarowania znacznych

ilości odpadu betonowego, którego nie przewidziano w planach eksploatacyjnych. We współczesnym projektowaniu należy uwzględniać już na etapie koncepcji możliwość późniejszego odzysku materiałów i ich ponownego wykorzystania. Projektowanie budynków z myślą o demontażu (ang. *Design for Deconstruction*) oraz zrównoważonym cyklu życia jest jednym z kluczowych elementów transformacji w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym. Przyszłe systemy prefabrykacji powinny zatem łączyć nie tylko wysoką jakość użytkową i trwałość, lecz także łatwość selektywnego demontażu i przygotowania do recyklingu.

Tabela 38. Porównanie wybranych właściwości badanych kruszyw z przeglądem literaturowym

Źródło i opis	Gęstość [g/cm ³]	Nasiąkliwość [%]	Odporność na ścieranie [-]	Zawartość zaprawy [%]	Kształt ziaren [-]	Metoda rozdrabniania
Badane kruszywo naturalne – dolomit	2,34	2,34	MDE15	–	–	dwuetapowe rozdrabnianie, patent [340]
Badane kruszywo z recyklingu – Plattenbau P1	2,24	3,81	MDE35	12,51	Współczynnik SF 0,75–1,5	dwuetapowe rozdrabnianie, patent [340]
Odrzucone prefabrykowane płyty betonowe [326]	2,38	4,40	LA 21 %	brak danych	brak danych	kruszenie i przesiewanie
Odrzucone elementy betonowe [98]	2,41	4,15	LA 37 %	52,00	Współczynnik SF 2,25	kruszątko szczękowa, kruszątko udarowa, przesiewanie końcowe
Betonowy budynek mieszkalny [330]	brak danych	3,70	LA 14,8 %	35,45	brak danych	kruszątko o małej wydajności
Budynek, możliwe inne materiały niż beton [261]	2,42	1,25	26,65	brak danych	brak danych	ręczne kruszenie gruzu rozbiórkowego
Zakład recyklingu (beton z elementów infrastruktury) [79]	2,59	6,53	brak danych	brak danych	brak danych	młyn stożkowy z przesiewaczami podciśnieniowymi
Zakład recyklingu (beton z kruszywa granitowego) [265]	2,51	4,10	brak danych	30–35 %	kształt wydłużony	brak danych

Potwierdzone, znane wcześniej z literatury właściwości kruszyw recyklingowych prowadzące do obniżenia właściwości mechanicznych betonu, pozwoliły na wdrożenie działań optymalizacyjnych – określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 oraz dobór metody przygotowania mieszanki uwzględniający obecność starej zaprawy na kruszywie.

Badania mieszanki samozagęszczającej się pozwoliły na określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu Plattenbau P1 na właściwości mieszanki. Wyniki wskazały, iż zastosowanie kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 wykazuje szereg istotnych zalet w kontekście świeżej mieszanki, w tym stabilną konsystencję, lepkość i jednorodność przekroju poprzecznego porównywalną dla mieszanki referencyjnej tylko z naturalnym kruszywem grubym. Ponadto badania wykazały skrócony czas wiązania i ograniczone zjawisko odsączania wody porównując do mieszanki referencyjnej. Przyrost wytrzymałości na ściskanie był nieznacznie obniżony względem mieszanki referencyjnej, ale wciąż na satysfakcjonującym poziomie. Zjawiska te są szczególnie istotne przy praktycznym wykorzystaniu mieszanki samozagęszczającej się dla posadzek. Na podstawie wyników właściwości świeżej mieszanki należy uznać, że ilość kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 została dobrana prawidłowo. Zwiększenie jego udziału kosztem kruszywa grubego naturalnego wiąże się ze spadkiem właściwości mechanicznych i w związku z tym nie jest zalecane. Właściwości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1, przy jednoczesnym utrzymaniu stałego stosunku woda/spoiwo, pozwoliły na zapewnienie odpowiedniej ilości wolnej wody (umożliwiającej przepływ mieszanki) oraz odpowiedniej ilości zaczynu cementowego (ograniczającego upakowanie ziaren kruszywa grubego, a tym samym przeciwdziałającego segregacji). Wszystkie te czynniki przyczyniły się do uzyskania akceptowalnych właściwości reologicznych.

Oznaczanie właściwości wytrzymałościowych stwardniałego betonu, modyfikowanego dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1, wiązało się z obniżeniem właściwości mechanicznych. Zauważono, że zastąpienie części kruszywa grubego naturalnego w kompozycie ma negatywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie, odporność na ścieranie i moduł sprężystości – postępujący wraz ze wzrostem zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1. Wpływ na to ma porowata struktura kruszywa oraz jego umiarkowana jakość. Zastosowanie projektowania mieszanki metodą *modified Equivalent Mortar Volume* pozwoliło na znaczne ograniczenie postępującego pogarszania się wszystkich badanych właściwości stwardniałego betonu.

Otrzymane wyniki badań mieszanek odniesiono do wymagań normowych oraz wytycznych projektowych (Tabela 39). Zgodnie z PN-EN 206+A2 [273] oraz rekomendacjami *fib Model Code* [94], beton przeznaczony do zastosowań konstrukcyjnych powinien spełniać wymagania dotyczące zarówno klasy wytrzymałościowej, jak i właściwości reologicznych w stanie świeżym. W przypadku betonu samozagęszczającego się dodatkowe kryteria określają wytyczne EFNARC [63], które obejmują m.in. klasy konsystencji (SF1–SF3), klasy lepkości (VS1–VS2), oraz odporność na segregację. W niniejszej pracy wykazano, że opracowane mieszanki betonu samozagęszczającego się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu

systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 spełniają wymagania dla klasy konsystencji SF2, a także wymagania w zakresie lepkości i odporności na segregację, co potwierdza ich przydatność do zastosowań w elementach prefabrykowanych.

Tabela 39. Wyniki badań mieszanek odniesione do wymagań normowych i wytycznych

Parametr	Wymagania normowe/wytyczne	Wyniki dla mieszanek z rozprawy	Ocena spełnienia wymagań
Klasa konsystencji (rozpliw)	EFNARC: SF2 = 660–750 mm, SF3 = 760–850 mm	730–745 mm (w zależności od udziału RCA)	Spełniono (SF2)
Klasa lepkości (czas rozpliwu)	EFNARC: VS1 < 2 s, VS2 > 2 s	8–12 s	Spełniono (VS2)
Odporność na segregację (stabilność wizualna)	EFNARC: brak segregacji widocznej	brak segregacji	Spełniono
Wytrzymałość charakterystyczna betonu (fck)	PN-EN 206+A2: min. C30/37 dla konstrukcji nośnych	odpowiadająca klasie C45/55 i wyżej (w zależności od udziału RCA)	Spełniono

Uwzględniając dużą liczbę starzejących się budynków wielkopłytkowych w Europie Wschodniej oraz trwającą rozbiórkę podobnych obiektów w Europie Zachodniej, kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytkowych pozostaje materiałem perspektywicznym dla zastosowań betonowych. Niemniej jednak, uzyskane wyniki w zakresie właściwości mechanicznych wskazują na konieczność stosowania cementów wysokiej wytrzymałości, takich jak CEM I 52.5 lub wyższych klas. W eksperymentach, w których 30% kruszywa grubego naturalnego zastąpiono kruszywem grubym z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1, osiągnięto wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 60 MPa — wartość wystarczającą dla wielu zastosowań konstrukcyjnych, bez konieczności specjalnej obróbki kruszywa.

Autor szczególnie rekomenduje wykorzystanie kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytkowych w betonie samozagęszczającym się, który ze względu na zwiększoną płynność w porównaniu do betonu konwencjonalnego, często cechuje się problemami z nadmiarem wolnej wody oraz segregacją kruszywa. Dzięki swojej porowatej strukturze, kruszywo grube z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 skutecznie absorbuje wodę, redukując zjawisko odsączania wody i poprawiając stabilność mieszanki samozagęszczającej się. Co ciekawe, pomimo że kruszywo grube z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 nie zakłóca procesu hydratacji cementu, skracało ono nieoczekiwanie czas wiązania betonu samozagęszczającego się. Z drugiej strony, wysoka absorpcja wody przez owo kruszywo spowalniała rozwój zarówno modułu sprężystości, jak i wytrzymałości na ściskanie, ponieważ do utrzymania odpowiedniej lepkości i konsystencji wymagane było dodanie dodatkowej ilości wody. Choć woda ta

przyczyniała się do przyspieszenia wiązania i poprawy jednorodności przekroju, to ostatecznie prowadziła do osłabienia struktury betonu.

Potwierdzenie zmiany struktury betonu dokonano przez analizy jego mikrostruktury. Kruszywo z recyklingu cechowało się mniej zwartą strukturą porównując do kruszywa grubego naturalnego. Co ważne, w analizie mikrostruktury wykazano, że kruszywo z recyklingu cechowało się bardzo wysokim poziomem hydratacji. Choć w strefie przejściowej między kruszywem grubym z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 a matrycą cementową zaobserwowano większą porowatość i wyższy udział najmniejszych porów w porównaniu do strefy w próbce z kruszywem grubym naturalnym, strefa przy kruszywie z recyklingu zawierała mniej niezhydratyzowanych cząstek cementu, co może świadczyć o skuteczniejszym przebiegu hydratacji niż w przypadku strefy z kruszywem naturalnym.

Dzięki przeprowadzeniu zaplanowanego programu badań w rozprawie możliwe było wypełnienie wcześniej zdefiniowanych luk badawczych w literaturze związanej z tematyką rozprawy. Podsumowanie wpływu rozprawy doktorskiej na stan wiedzy przedstawia Tabela 40. Tabela 41 przedstawia zbiorczo wpływ kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytkowych a także zastosowanie metody projektowania mieszanki modified Equivalent Mortar Volume na badane właściwości mieszanki samozagęszczalnej i stwardniałego betonu.

Tabela 40. Porównanie stanu wiedzy w literaturze przed i po wykonaniu badań własnych

Badana właściwość	Przegląd literaturowy	Wpływ badania na stan wiedzy
Etap I - Badania właściwości kruszywa grubego pochodzącego z rozbiórki budynku wielkopłytkowego oraz kruszywa grubego naturalnego		
Właściwości kruszywa grubego pochodzącego z rozbiórki budynku wielkopłytkowego	Nieznane – brak danych	Określono na podstawie wybranych właściwości, że odpad pozyskany z systemu Plattenbau P1 znajduje zastosowanie jako kruszywo grube w betonie, szczególnie samozagęszczającym się
Etap II – Optymalizacja		
Metoda projektowania mieszanki mEMV	Nie dość dobrze rozpoznane. Podjęto próbę zastosowania mEMV dla zwykłego betonu. Brak badań dla betonu samozagęszczającego się, który cechuje się restrykcyjnym składem	Określono, że metoda projektowania mieszanki mEMV była szczególnie korzystna dla polepszenia właściwości mechanicznych stwardniałego betonu względem tradycyjnego projektowania.
Określenie optymalnej ilości kruszywa grubego z recyklingu w mieszance samozagęszczającej się za pomocą gęstości upakowania	Nie dość dobrze rozpoznane. Badanie gęstości upakowania jest znane, ale brak jest danych na temat łączenia kruszywa naturalnego z recyklingowym w ramach jednego badania.	Na podstawie badania możliwe było określenie optymalnej zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 biorąc pod uwagę zakładaną wytrzymałość na ściskanie
Etap III - Badania właściwości mieszanki samozagęszczalnej		
Właściwości świeżej mieszanki jak konsystencja i lepkość	Dobrze rozpoznane	Określono, że kruszywo grube z recyklingu Plattenbau P1 nie prowadzi do znacznego pogorszenia właściwości, co jest szczególnie istotne przy mieszance samozagęszczającej się
Czas początku wiązania	Nie dość dobrze rozpoznane. Podjęto próbę określenia czasu wiązania zwykłego betonu. Brak	Określono, że wraz z wzrostem zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego

Badana właściwość	Przegląd literaturowy	Wpływ badania na stan wiedzy
	badan dla wpływu kruszywa recyklingowego na czas wiązania.	budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 czas wiązania skraca się.
Odsączanie wody z mieszanki	Nie dość dobrze rozpoznane. Brak badań dla różnych typów kruszywa i ich wpływu na odsączanie wody.	Określono, że wraz z wzrostem zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 odsączanie wody z mieszanki maleje.
Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)	Nie dość dobrze rozpoznane. Podjęto próbę określenia modułu sprężystości metodą EMM-ARM dla zwykłego betonu. Brak badań dla wpływu kruszywa recyklingowego na przyrost modułu sprężystości w czasie.	Określono, że wraz z wzrostem zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1, moduł sprężystości maleje i przyrasta w wolniejszym tempie.
Etap IV – Badania właściwości stwardniałego betonu		
Jednorodność betonu	Nie dość dobrze rozpoznane. Podjęto próbę określenia jednorodności dla zwykłego betonu. Brak badań dla betonu samozagęszczającego się oraz wpływu kruszywa recyklingowego na jednorodność.	Określono, że zaprojektowany beton samozagęszczający się cechuje się dużą jednorodnością. Nie występują w nim strefy o obniżonej wytrzymałości. Nie stwierdzono negatywnego wpływu kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 na jednorodność.
Właściwości mechaniczne jak wytrzymałość na ściskanie, odporność na ścierani i moduł sprężystości	Dobrze rozpoznane	Określono, że wraz z wzrostem zawartości kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1, właściwości mechaniczne pogarszają się.
Analiza mikrostruktury	Nie dość dobrze rozpoznane. Brak badań dla różnych typów kruszywa i ich wpływu na mikrostrukturę i strefę ITZ.	Określono, że obszar przy kruszywie grubym z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 charakteryzował się największym udziałem produktów hydratacji w strefie przejściowej co świadczy o skutecznym przebiegu hydratacji mimo dużej porowatości.

Tabela 41. Wpływ kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 i metody projektowania modified Equivalent Mortar Volume na badane właściwości

Badana właściwość	Wpływ kruszywa RCA	Wpływ metody mEMV
Etap III - Badania właściwości mieszanki samozagęszczalnej		
Właściwości świeżej mieszanki jak konsystencja i lepkość	Obniżenie właściwości, ale na granicy błędu statystycznego przy zachowaniu tej samej klasy dla lepkości i konsystencji	Utrzymanie lepkości i konsystencji na poziomie bardzo zbliżonym do serii referencyjnej.
Czas początku wiązania	Zredukowany czas wiązania o maksymalnie 40 min względem serii referencyjnej.	Brak istotnego wpływu.
Odsączanie wody z mieszanki	Zredukowanie ilości odsączonej wody o maksymalnie 40 % względem serii referencyjnej.	Brak istotnego wpływu.
Moduł sprężystości metodą odpowiedzi na wzbudzenia środowiskowe (EMM-ARM)	Wolniejszy przyrost modułu. Obniżenie modułu po 5 dniach o maksymalnie 30 % względem serii referencyjnej.	Polepszenie modułu sprężystości o maksymalnie 14 % względem serii projektowanych tradycyjną metodą.
Etap IV – Badania właściwości stwardniałego betonu		

Badana właściwość	Wpływ kruszywa RCA	Wpływ metody mEMV
Jednorodność betonu	Wszystkie serie cechowały się dużą jednorodnością w całym przekroju bez stref o obniżonej wytrzymałości.	Brak istotnego wpływu.
Wytrzymałość na ściskanie	Obniżenie wytrzymałości o maksymalnie 13 % względem serii referencyjnej.	Polepszenie wytrzymałości na ściskanie o maksymalnie 7 % względem serii projektowanych tradycyjną metodą.
Odporność na ścieranie	Obniżenie odporności na ścieranie o maksymalnie 10 % względem serii referencyjnej.	Polepszenie odporności na ścieranie o maksymalnie 1 % względem serii projektowanych tradycyjną metodą.
Analiza mikrostruktury	Kruszywo grube z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 wpłynęło na mikrostrukturę betonu pod względem porowatości i przebiegu hydratacji. Nie stwierdzono jednak istotnych zmian w mikrostrukturze betonu oraz strefie ITZ.	Nie analizowano.

6.2. Wnioski

Na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego, przeprowadzonych analiz, uzyskanych, przeanalizowanych i zinterpretowanych wyników badań doświadczalnych i numerycznych sformułowano wnioski końcowe, podkreślające wypełnienie celów rozprawy:

1. Pomimo że budynki w technologii wielkopłytkowej były projektowane na okres użytkowania wynoszący 50 lat, zakłada się, że przy odpowiednio prowadzonych pracach konserwacyjnych ich trwałość może zostać wydłużona o kolejne pół wieku. Niemniej jednak oznacza to jedynie odsunięcie w czasie nieuniknionego kresu ich eksploatacji. Warto podkreślić, że w momencie projektowania budynków wielkopłytkowych nie uwzględniano etapu ich końca życia ani ponownego wykorzystania materiałów. Doświadczenie to wskazuje, że współczesne systemy prefabrykacji powinny być projektowane z myślą o demontażu i recyklingu, co stanowi istotny element gospodarki o obiegu zamkniętym. W literaturze naukowej podkreśla się nadal niewystarczający poziom wiedzy w zakresie skutecznych technik modernizacji tych obiektów, a znaczna liczba przeprowadzonych renowacji cechuje się niską jakością wykonania. Pomimo wielu katastrof budowlanych, największym problemem pozostają słabe połączenia między prefabrykowanymi panelami. Według przeglądu literaturowego, beton użyty do produkcji płyt prefabrykowanych pozostaje w stanie umożliwiającym jego wtórne wykorzystanie jako kruszywo grube w nowych konstrukcjach betonowych. Panele systemu wielkopłytkowego były produkowane masowo i podlegały procesowi typizacji. W związku z tym, elementy pochodzące z różnych lokalizacji, lecz wykonane w tym samym systemie, mogą wykazywać zbliżone cechy charakterystyczne. Stanowi to istotną zaletę w porównaniu do kruszywa z recyklingu pochodzącego z zakładów utylizacyjnych lub zróżnicowanych elementów prefabrykowanych, które mogą zawierać materiały o niejednorodnym pochodzeniu. Zastosowanie kruszywa recyklingowego o znanym składzie umożliwia kontrolowanie właściwości betonu w stanie świeżym i stwardniałym. Pomimo znacznego udziału prefabrykowanych systemów w zasobie mieszkaniowym krajów Europy Środkowo-

Wschodniej oraz postępujących rozbiórek budynków wielkopłytowych w Europie Zachodniej, wciąż brakuje badań nad recyklingiem paneli jako źródła kruszywa do nowych konstrukcji. Obecnie zaledwie około 20% materiałów mineralnych z recyklingu znajduje zastosowanie w produkcji betonu i asfaltu, a większość kruszywa recyklingowego wykorzystywana jest w budowie dróg i pracach ziemnych, co stanowi niewykorzystany potencjał w przemyśle budowlanym.

2. Analizy wykazały, że kruszywo grube pozyskane z recyklingu niemieckiego systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 charakteryzuje się niską gęstością, niską nasiąkliwością oraz regularnym kształtem ziaren (porównując do podobnych kruszyw recyklingowych już stosowanych), co pozytywnie wpływa na właściwości reologiczne mieszanki betonowej. Niemniej jednak, z uwagi na ograniczoną odporność na ścieranie, zaleca się wstępną obróbkę kruszywa lub zastosowanie cementu wyższej klasy. Regularność kształtu ziaren oraz wąski rozkład frakcji (4–8 mm), uzyskane dzięki dwuetapowemu procesowi rozdrabniania, sprzyjają jednorodności mieszanki oraz jej stabilności. Wszystkie te cechy wskazują, że kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych stanowi perspektywiczne źródło surowca dla zrównoważonego budownictwa, wymagające jednak dalszych badań i świadomego projektowania receptur betonowych. Badania gęstości upakowania wskazują, że bezpieczny poziom zastąpienia kruszywa grubego naturalnego wynosi do 30%, ponieważ większy udział prowadzi do istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych.
3. Kruszywo grube z recyklingu systemowego budynku wielkopłytowego Plattenbau P1 przyczyniło się do utrzymania stabilnej lepkości i konsystencji mieszanki, co potwierdza jego szczególną przydatność w betonie samozagęszczającym się, gdzie urabialność ma większe znaczenie niż w betonie zwykłym. Jedną z metod optymalizacji stosowanych w badaniach było projektowanie mieszanek metodą Równoważnej Objętości Zaprawy, która pozwalała na poprawę właściwości stwardniałego betonu w porównaniu do klasycznej metody projektowania. Choć metoda Równoważnej Objętości Zaprawy ograniczyła pogorszenie wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości i odporności na ścieranie, nie doprowadziła do poprawy tych właściwości względem mieszanki referencyjnej (tylko z kruszywem naturalnym). Mimo to, zastosowanie tej metody projektowania mieszanek pozwoliło na zwiększenie – nawet o 10% wytrzymałości na ściskanie oraz o 10% modułu sprężystości względem tradycyjnego projektowania mieszanki z kruszywem recyklingowym. Autor podkreśla znaczenie metody Równoważnej Objętości Zaprawy w przypadku zastosowań wielkoskalowych, umożliwiając ograniczenie zużycia kluczowych składników i zwiększenie efektywności środowiskowej procesu. Zastosowanie metody Równoważnej Objętości Zaprawy może być mniej efektywne w sytuacjach, gdy kruszywo recyklingowe pochodzi z nieznanego źródła, pochodzi z różnych źródeł w ramach jednej mieszanki lub gdy przygotowywane są niewielkie ilości mieszanek. W takich przypadkach konieczne jest określenie zawartości starej zaprawy, a tym samym zmiennych ilości składników mieszanki, co wymaga dodatkowego czasu i sprzętu.

4. Na podstawie parametrów reologicznych (stosunkowo wysoka lepkość, odporność na segregację składników, konsystencja klasy średniej), zaproponowana mieszanka samozagęszczająca się może być stosowana zarówno do elementów poziomych, jak i pionowych, takich jak ściany czy słupy (przy standardowym stopniu zbrojenia). Autor sugeruje, że w przypadku potencjalnej rozbiórki budynków w technologii wielkopłytywowej, beton samozagęszczający się z dodatkiem kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych mógłby być wykorzystywany bezpośrednio w nowych inwestycjach na miejscu rozbiórki. Elementy konstrukcyjne, takie jak ściany czy słupy, mogłyby zawierać kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych, co ograniczałoby konieczność transportu gruzu na składowiska. Ponadto, dzięki łatwiejszemu betonowaniu, mniejszemu zapotrzebowaniu na siłę roboczą i ograniczonemu hałasowi, beton samozagęszczający się jest odpowiedni do stosowania w gęsto zabudowanych obszarach miejskich, gdzie zlokalizowane są budynki wielkopłytowe.
5. W przeciwieństwie do badań przeglądu literaturowego, które podkreślały niejednorodność betonu z kruszywem recyklingowym, niniejsze badania wykazały jednorodność przekrojów poprzecznych we wszystkich seriach, a różnice pomiędzy punktami pomiarowymi metodą ultradźwiękową nie przekraczały 120 m/s, co świadczy o dobrze wymieszanej mieszance bez wyraźnych stref osłabienia. Zmiany podczas etapu utwardzania, w którym mieszanka traci swoją plastyczność, charakteryzowało się wolniejszym przyrostem wytrzymałości dla mieszanek ze zwiększoną zawartością kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych. Ciągły pomiar modułu sprężystości wykazał, że przy 30% zawartości tego kruszywa należy zachować ostrożność podczas początkowego okresu dojrzewania betonu, gdyż wzrost modułu sprężystości w tym czasie był wolniejszy niż w mieszance referencyjnej, z różnicą przekraczającą 10 GPa po pierwszym dniu. Czas wiązania betonu skracał się wraz ze wzrostem ilości kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych. Zastąpienie kruszywa naturalnego przez to kruszywo ograniczało również odsączenie wody z betonu, dzięki większemu zatrzymywaniu wody w strukturze kruszywa. Jednocześnie ze względu właśnie na zatrzymywanie wody w sobie i porowatą mikrostrukturę, charakterystyka kruszywa wpłynęła na osłabienie wewnętrznej struktury betonu.
6. Na podstawie analizy mikrostrukturalnej kruszywa grubego naturalnego, kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłyтового Plattenbau P1, zaczynu cementowego w obrębie tego kruszywa, matrycy cementowej w nowych próbkach betonu zawierających oba rodzaje kruszywa grubego oraz międzyfazowej strefy przejściowej między kruszywem a matrycą cementową stwierdzono istotne różnice wynikające z rodzaju użytego kruszywa. Analiza obejmowała rozkład porów oraz skład fazowy z uwzględnieniem stopnia hydratacji. Kruszywo grube naturalne charakteryzowało się zwartą strukturą, ale zawierało więcej porów niż recyklingowe. Kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych natomiast wykazywało wyraźnie zaznaczone granice między naturalnym kruszywem a starą zaprawą cementową oraz obecność porów w pierwotnej matrycy. W zaprawie

cementowej w tym kruszywie zaobserwowano wysoki stopień hydratacji (94%), co prawdopodobnie wynika z wieku oryginalnego betonu użytego jako surowiec wtórny. W matrycy cementowej próbek dominującą fazę stanowiły produkty hydratacji, a ich udział — podobnie jak ilość niezhydratyzowanego cementu i porów — różnił się w zależności od rodzaju zastosowanego kruszywa. Nieco wyższy stopień hydratacji występował w matrycy przylegającej do kruszywa recyklingowego. W strefie przejściowej przy tym kruszywie zaobserwowano większą porowatość i wyższy udział najmniejszych porów ($<0,2 \mu\text{m}^2$) w porównaniu do strefy przejściowej w próbce z kruszywem grubym naturalnym. Pomimo większej porowatości, strefa przejściowa przy kruszywie grubym z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 zawierała mniej niezhydratyzowanych cząstek cementu, co może świadczyć o skuteczniejszym przebiegu hydratacji. Analiza rozkładu faz wykazała, że próbka z tym kruszywem charakteryzowała się największym udziałem produktów hydratacji w strefie przejściowej, co wskazuje na bardziej zaawansowany stopień hydratacji w sąsiedztwie kruszywa. Wyniki potwierdzają, że rodzaj kruszywa grubego wpływa na mikrostrukturę betonu zarówno pod względem porowatości, jak i przebiegu hydratacji. Kruszywo recyklingowe może modyfikować lokalny stosunek woda/cement oraz teksturę powierzchni, wpływając tym samym na rozwój mikrostruktury w strefie przejściowej.

Wkład własny autora obejmuje:

- opracowanie metody przygotowania i charakterystyki kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytkowych, obejmującej m.in. proces dwuetapowego rozdrabniania, analizę morfologiczną ziaren, zawartości starej zaprawy i właściwości fizycznych,
- zaprojektowanie programu badań obejmującego serie 13 mieszanek betonu samozagęszczającego się z różnym udziałem kruszywa grubego z recyklingu systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 oraz określenie i interpretację wpływu na właściwości świeżej mieszanki, właściwości mechaniczne i funkcjonalne stwardniałego betonu,
- sformułowanie i zastosowanie procedury oceny betonu w fazie przejściowej (od stanu płynnego do stałego) oraz wskazanie kluczowych parametrów opisujących ten proces,
- identyfikację i analizę mikrostruktury międzyfazowej strefy przejściowej (ITZ) w betonie oraz określenie jej znaczenia dla jednorodności materiału,
- opracowanie analizy mechaniczno–ekonomicznej w celu określenia optymalnego poziomu zastąpienia kruszywa naturalnego kruszywem recyklingowym z uwzględnieniem korzyści środowiskowych.

Podsumowanie hipotezy badawczej:

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono hipotezę, że częściowe zastąpienie kruszywa grubego naturalnego kruszywem z recyklingu, pozyskanego z rozbiórki systemowego budynku wielkopłytkowego Plattenbau P1 w betonie samozagęszczającym się umożliwia uzyskanie materiału o właściwościach mechanicznych i technologicznych

zbliżonych do betonu referencyjnego, przy zachowaniu jego jednorodności. Hipoteza została w pełni potwierdzona w zakresie świeżych właściwości mieszanki oraz krótkoterminowych parametrów mechanicznych przy udziale kruszywa z recyklingu do poziomu ok. 30%. W przypadku większych zastąpień częściowa weryfikacja hipotezy wskazuje na ograniczenia wynikające ze spadku modułu sprężystości i wytrzymałości na ściskanie, co wymaga dalszych badań oraz dodatkowych zabiegów modyfikacyjnych (np. wzmocnienia mikrostruktury, domieszek mineralnych, włókien zbrojeniowych).

6.3. Konkluzja końcowa

Cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte, a wyniki przeprowadzonych badań wskazują jednoznacznie na innowacyjny charakter wykorzystania kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych zastępującego część kruszywa grubego naturalnego w mieszance samozagęszczającej się i stwardniałym betonie. Popularyzacja wyników rozprawy może dodatkowo przyczynić się do zmiany tendencji postrzegania wykorzystanego odpadu betonowego, co pozwoli na zmniejszenie istotnych problemów wskazanych w rozpoznaniu literaturowym, jednocześnie obniżając zużycie surowców naturalnych i wpływając na poprawę środowiska naturalnego.

6.4. Proponowane kierunki dalszych badań

Przeprowadzony w ramach rozprawy doktorskiej przegląd literaturowy, ale także analiza uzyskanych wyników (szczególnie krytyczna) pozwoliła na zdefiniowanie kilku kierunków dalszych badań, które zdaniem autora mogą okazać się istotne oraz pozwolą na wypełnienie znaczących luk badawczych związanych z tematyką rozprawy.

Wykorzystane w rozprawie kruszywo nie było w żaden sposób przetworzone. Obecne trendy, opisane w sekcji 3.3.4 wskazują, że coraz więcej uwagi poświęca się mineralizacji kruszywa za pomocą dwutlenku węgla. Podjęte przez autorów z literatury próby mineralizacji kruszyw wskazują, że proces ten pozwala na osiągnięcie zwartej i mniej porowatej mikrostruktury betonu, co wpływa z korzyścią na jego parametry mechaniczne, a także ma pozytywny wpływ na środowisko [346].

Kolejnym kierunkiem badań powinno być uwzględnienie wpływu różnych rodzajów dodatków wzmacniających jak np. mikrobrojenie rozproszone stosowane w celu modyfikacji właściwości wytrzymałościowych i odkształcalności betonów samozagęszczających się. Takie badania dla betonu samozagęszczającego się w Polsce były już przeprowadzone i potwierdzono pozytywny wpływ zastosowania optymalnego rodzaju włókien jako elementu szerszej strategii redukcji emisji CO₂ poprzez zwiększenie trwałości betonu, zmniejszenie częstotliwości napraw i częściowe zastąpienie cementu [311]. Dalsza analiza powinna uwzględniać wpływ kruszywa z recyklingu na właściwości betonu samozagęszczającego się z włóknami zbrojeniowymi. Przykładowo według [159] dodanie włókien stalowych pozyskanych z opon w betonach lekkich (np. z lekkim kruszywem perlitowym) zwiększa wytrzymałość na ściskanie nawet o 18–48 %, a także poprawia moduł sprężystości – co sugeruje zupełnie nowe możliwości modyfikacji struktury betonu samozagęszczającego się z kruszywem recyklingowym.

W celu kompleksowej oceny potencjału kruszywa grubego z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych, dalsze badania powinny koncentrować się na jego właściwościach użytkowych w różnych technologiach betonu. Szczególnie istotne wydają się:

- prefabrykacja drobnowymiarowa – wykorzystanie betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w produkcji elementów małogabarytowych (płyty chodnikowe, krawężniki, bloczki ścienne), gdzie nie są wymagane najwyższe parametry wytrzymałościowe, a jednocześnie istotna jest szybkość i powtarzalność produkcji [148],
- beton natryskowy (shotcrete) – zastosowanie betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w technologii natryskowej może być korzystne w budownictwie podziemnym i inżynieryjnym, ze względu na potencjał redukcji kosztów i ograniczenie zapotrzebowania na kruszywo naturalne [413],
- elementy nienośne i wypełniające – np. ścianki działowe, warstwy wyrównawcze, pustaki wentylacyjne. W tego typu zastosowaniach kluczowa jest izolacyjność i zdolność do akumulacji ciepła, a nie maksymalne parametry mechaniczne [307],
- konstrukcje tymczasowe – kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych może znaleźć zastosowanie w budowie obiektów o krótkim cyklu życia (np. tymczasowe drogi technologiczne, podpory, obiekty wystawiennicze), gdzie trwałość długookresowa nie jest czynnikiem krytycznym [256].

Z perspektywy trwałości, kluczowe znaczenie mają dalsze badania odporności betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie oraz podatność na reakcję alkalia–krzemionka. Zgodnie z wynikami badań [46], odporność betonu na działanie cykli zamrażania i rozmrażania w większym stopniu zależy od stosunku wodno-cementowego niż od rodzaju zastosowanego kruszywa. Lokalne odspojenia obserwowane podczas badań mogą być wynikiem akumulacji odsączanej wody. Dodatkowo, reakcja alkalia–krzemionka może ulec nasileniu, gdy wysoka nasiąkliwość kruszywa umożliwia wnikanie wody do frakcji zaczynu cementowego, prowadząc do jego rozszerzalności we wczesnym stadium hydratacji [333]. Wyniki rozprawy wskazują, iż kruszywo grube z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych charakteryzuje się niską nasiąkliwością, co skutkowało ograniczeniem efektu odsączania wody. Ta właściwość może zwiększyć przydatność kruszywa do badań trwałościowych, jednak konieczne są dalsze analizy w celu potwierdzenia tych założeń. W celu ograniczenia ryzyka wystąpienia reakcji alkalia-krzemionka rekomenduje się stosowanie dodatków mineralnych, takich jak popiół lotny niskowapniowy oraz cement o niskiej zawartości alkaliów. Kluczowe znaczenie ma także optymalizacja poziomu zastąpienia kruszywa naturalnego oraz dobór kruszywa porównawczego o niskiej reaktywności alkalicznej (jak przedstawiono w Tabeli 19), aby zapewnić długoterminową trwałość betonu. Zagadnieniem wartym pogłębionej analizy jest zjawisko skurczu wewnętrznego nieodwracalnego, na który narażone są betony samozagęszczające się z współczynnikiem w/c poniżej 0,4 i zastosowaniem dodatków mineralnych i który skutkuje wzrostem ryzyka rysowania i pękania. Naprężenia własne wywołane skurczem całkowitym, będącym połączeniem wielu skurczów zachodzących równocześnie wraz z czynnikami materiałowymi i środowiskowymi zachodzącymi później niż na etapie dojrzewania betonu mogą wywołać zarysowanie i pękanie konstrukcji nawet po kilku miesiącach i latach od betonowania, co zostało zgłębione w pracy [434]. Zarysowania w ścianach żelbetowych, szczegółowo opisane

w [147] wskazują na konieczność oceny zdolności betonu SCC z RCA do opóźniania inicjacji pęknięć. Biorąc pod uwagę aspekt praktyczny stosowania kruszywa z recyklingu w konstrukcjach inżynierskich, należałoby zwrócić uwagę na eksplorowanie możliwości poprawy znacznego pogarszania się niektórych parametrów betonu w ujęciu długoterminowym jak odkształcalność. Długotrwałe badania ugięć zginanych elementów betonowych w pracy [318] wykazały, że wartości ugięć elementów z betonu z kruszywem z recyklingu nawet stosując beton wysokowartościowy, były średnio o 45% wyższe niż elementów wykonanych z betonu referencyjnego.

Biorąc pod uwagę odmienne systemy w technologii wielkopłytywowej od analizowanego, kierunki dalszych badań powinny obejmować:

- analizę paneli wielkopłytowych z polskich systemów (OWT, WUF, Wk-70), w szczególności pod kątem porównania ich składu, wytrzymałości oraz zawartości starej zaprawy w kruszywie,
- ocenę możliwości adaptacji opracowanej metodyki przygotowania i optymalizacji mieszanek betonu samozagęszczającego się do materiałów pochodzących z innych rynków,
- opracowanie ram metodologicznych umożliwiających stosowanie kruszywa z różnych systemów prefabrykacji w warunkach gospodarki o obiegu zamkniętym, z uwzględnieniem lokalnych uwarunkowań technologicznych i środowiskowych.

Włączenie takich analiz pozwoliłoby na bardziej kompleksową ocenę potencjału kruszyw z recyklingu wielkopłytowych budynków systemowych w skali międzynarodowej.

Podsumowując, dalsze badania powinny łączyć aspekty trwałościowe, mikrostrukturalne i aplikacyjne, aby możliwe było opracowanie wytycznych dla praktycznego zastosowania betonu samozagęszczającego się z kruszywem grubym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych w prefabrykacji, budownictwie inżynieryjnym oraz elementach o ograniczonym znaczeniu nośnym. Takie podejście pozwoli lepiej powiązać wyniki badań eksperymentalnych z realnymi potrzebami przemysłu budowlanego i gospodarki o obiegu zamkniętym.

6.5. Zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej

Artykuły naukowe:

[A1] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., Sadowski, L., & Gawenda, T. (2022). Towards the application of recycled coarse aggregate sourced from large panel system buildings in the manufacturing of self-compacting concrete. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 205-210.

[A2] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2022). Large panel system technology in the second half of the twentieth century—Literature review, recycling possibilities and research gaps. *Buildings*, 12(11), 1822.

[A3] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2023). Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste—Current state-of-the art and perspectives. *Construction and Building Materials*, 370, 130702.

[A4] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2025). Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate from the demolition of large panel system buildings. *Applied Rheology*, 35(1), 20240023.

[A5] Malazdrewicz, S., Gawenda, T., Stempkowska, A., Żak, A., Ostrowski, K. A., Gronostajska, B., & Sadowski, Ł. (2025). Recycled coarse aggregate sourced from demolition of large panel system buildings: fundamental properties and perspectives for application. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 25(3), 1-23.

6.6. Literatura

[1] Abbas, A., Fathifazl, G., Isgor, O. B., Razaqpur, A. G., Fournier, B., & Foo, S. (2009). Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement and concrete composites*, 31(8), 555-563.

[2] Aggarwal, P., Siddique, R., Aggarwal, Y., & Gupta, S. M. (2008). Self-compacting concrete-procedure for mix design. *Leonardo electronic journal of practices and technologies*, 12, 15-24.

[3] Agudelo-Vera, C. M., Leduc, W. R., Mels, A. R., & Rijnaarts, H. H. (2012). Harvesting urban resources towards more resilient cities. *Resources, conservation and recycling*, 64, 3-12.

[4] Ahimoghadam F., Effect of recycled concrete aggregate properties on the behaviour of new concrete, Doctoral dissertation, University of Ottawa, Ottawa, Canada, 2018.

[5] Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., & Joyklad, P. (2021). A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00683.

[6] Ahmad, W., Ahmad, A., Ostrowski, K. A., Aslam, F., Joyklad, P., & Zajdel, P. (2021). Sustainable approach of using sugarcane bagasse ash in cement-based composites: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00698.

[7] Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and concrete composites*, 24(2), 269-279.

[8] Akçaoğlu, T. (2017). Determining aggregate size & shape effect on concrete microcracking under compression by means of a degree of reversibility method. *Construction and Building Materials*, 143, 376-386.

[9] Akçaoğlu, T., Tokyay, M., & Çelik, T. (2005). Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 358-363.

[10] Akhtar, A., & Sarmah, A. K. (2018). Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281.

[11] Alamri, M., Ali, T., Ahmed, H., Qureshi, M. Z., Elmagarhe, A., Khan, M. A., ... & Mahmood, M. S. (2024). Enhancing the engineering characteristics of sustainable recycled aggregate concrete using fly ash, metakaolin and silica fume. *Heliyon*, 10(7).

[12] Al-Bayati, H. K. A., Tighe, S. L., & Al-Bayati, H. K. A. (2016, September). Utilizing a different technique for improving micro and macro characteristics of coarse recycled concrete aggregate. In *Proceedings of the 2016 Transportation Association of Canada's (TAC) Conference & Exhibition*. Toronto, ON, Canada: Transportation Association of Canada.

[13] Alcocer, S. M., Carranza, R., Perez-Navarrete, D., & Martinez, R. (2002). Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame. *PCI journal*, 47(3), 70-89.

[14] Alfirević, Đ., & Alfirević, S. S. (2015). Urban housing experiments in Yugoslavia 1948-1970. *Spatium*, 1-9.

- [15] Ali, E. E., & Al-Tersawy, S. H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785-791.
- [16] Allujami, H. M., Abdulkareem, M., Jassam, T. M., Al-Mansob, R. A., Ng, J. L., & Ibrahim, A. (2022). Nanomaterials in recycled aggregates concrete applications: Mechanical properties and durability. A review. *Cogent Engineering*, 9(1), 2122885.
- [17] Alnahhal, M. F., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Abutaha, F., Alqedra, M. A., & Nayaka, R. R. (2018). Assessment on engineering properties and CO2 emissions of recycled aggregate concrete incorporating waste products as supplements to Portland cement. *Journal of cleaner production*, 203, 822-835.
- [18] Alyaseen, A., Poddar, A., Alahmad, H., Kumar, N., & Sihag, P. (2023). High-performance self-compacting concrete with recycled coarse aggregate: comprehensive systematic review on mix design parameters. *Journal of structural integrity and maintenance*, 8(3), 161-178.
- [19] Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A., & Mustafa Mohamed, A. (2019). Effects of incorporation of marble powder obtained by recycling waste sludge and limestone powder on rheology, compressive strength, and durability of self-compacting concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- [20] Ang, P., Goh, W., Bu, J., & Cheng, S. (2024). Assessing carbon capture and carbonation in recycled concrete aggregates: A holistic life cycle assessment perspective with simulation at industrial scale. *Journal of Cleaner Production*, 474, 143553.
- [21] Antonini, E., Boeri, A., Lauria, M., & Giglio, F. (2020). Reversibility and durability as potential indicators for Circular building Technologies. *Sustainability*, 12(18), 7659.
- [22] Assaad, J. J. (2017). Influence of recycled aggregates on dynamic/static stability of self-consolidating concrete. *Journal of sustainable cement-based materials*, 6(6), 345-365.
- [23] Aydin, A. C. (2007). Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1149-1154.
- [24] Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R., & Cunha, Á. (2010). Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1096-1105.
- [25] Babińska, J., & Bobrowicz, J. (2021). Trwałość betonu w kontekście reaktywności alkalicznej kruszyw. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, (1), 54-59.
- [26] Bacharz, K., Racziewicz, W., Bacharz, M., & Grzmił, W. (2019). Manufacturing errors of concrete cover as a reason of reinforcement corrosion in a precast element—case study. *Coatings*, 9(11), 702.
- [27] Baghchesaraei, O. R., Lavasani, H. H., & Baghchesaraei, A. (2016). Behavior of prefabricated structures in developed and developing countries. *Bulletin de la Société des Sciences de Liège*, 85, 1229-1234.
- [28] Bajoria, B. V., Parbat, D. K., & Nagarnaik, P. B. (2018). XRD analysis of natural sand, quarry dust, waste plastic (ldpe) to be used as a fine aggregate in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1432-1438.
- [29] Banjad Pečur, I., Milovanović, B., Bjegović, D., Štirmer, N., Bagarić, M., & Carević, I. (2020). Održiv i energetski učinkovit fasadni panel ECO-SANDWICH®—od razvoja do primjene. *Godišnjak Akademije tehničkih znanosti Hrvatske*, 2020(1), 27-41.
- [30] Bao, H., Xu, G., Yu, M., Wang, Q., Li, R., Saafi, M., & Ye, J. (2022). Evolution of ITZ and its effect on the carbonation depth of concrete under supercritical CO2 condition. *Cement and Concrete Composites*, 126, 104336.
- [31] Baranski, J., Szolomicki, J., & Latka, P. (2017). Numerical analysis of the joints of prefabricated elements in large-panel buildings located on the areas of mining damages,[in:] World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS 2017, October 25–27, 2017, San Francisco, USA, SI Ao, C. Douglas, *WS Grundfest [Eds.]*, 2, 847-852.

- [32] Barański, J., & Boroń, J. (2003). Computer Modeling of the Joints for WGP Construction System. In *Int. Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen* (Vol. 16).
- [33] Bardan, M., & Czarnecki, L. (2025). Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials*, 18(3), 488.
- [34] Barreto Santos, M., De Brito, J., & Santos Silva, A. (2020). A review on alkali-silica reaction evolution in recycled aggregate concrete. *Materials*, 13(11), 2625.
- [35] Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste management*, 27(12), 1870-1876.
- [36] Bauen in der DDR – Informationszentrum Plattenbau im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
- [37] Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and building materials*, 68, 501-516.
- [38] Berkowski, P., & Barański, J. (2015, July). 3D Fem Analysis of Precast Concrete Apartment Buildings Under Mining Tremors—A Case Study. In *Proceedings of the 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Porta Delgada, Portugal* (pp. 26-30).
- [39] Berndt, M. L. (2009). Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 23(7), 2606-2613.
- [40] Bertoldi, P., Economidou, M., Palermo, V., Boza-Kiss, B., & Todeschi, V. (2021). How to finance energy renovation of residential buildings: Review of current and emerging financing instruments in the EU. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 10(1), e384.
- [41] Billberg, P. (1999). *Self-compacting concrete for civil engineering structures.: The Swedish experience*. Cement och Betong Institutet.
- [42] Blengini, G. A. (2009). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and environment*, 44(2), 319-330.
- [43] Bobińska, J. (2010). Trwałość kruszyw dolomitowych w aspekcie ich zastosowania do betonu. In *Materiały konferencji Dni Betonu*.
- [44] Boesiger, W.; Girsberger, H. *Le Corbusier 1910–65*; Editorial Gustavo Gili: Barcelona, Spain, 2000.
- [45] Boğa, A. R., & Şenol, A. F. (2023). The effect of waste marble and basalt aggregates on the fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 363, 21129715.
- [46] Bogas, J. A., De Brito, J., & Ramos, D. (2016). Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 115, 294-306.
- [47] Boletín Oficial del Estado (BOE), Structural Concrete Code, in: 2021.
- [48] Bostanci, S. C., Limbachiya, M., & Kew, H. (2018). Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction. *Journal of Cleaner Production*, 189, 176-196.
- [49] Botici, A. A., Ungureanu, V., Ciutina, A., Botici, A., & Dubina, D. (2013, June). Sustainable retrofitting of large panel prefabricated concrete residential buildings. In *Proceedings of the Central Europe towards Sustainable Building 2013 Conference-Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*.
- [50] Brandes, M. R., & Kurama, Y. C. (2016). Use of recycled concrete aggregates in precast/prestressed concrete. *Procedia Engineering*, 145, 1338-1345.
- [51] Breen, J. E. (1980). Developing structural integrity in bearing wall buildings. *PCI JOURNAL*, 25(1), 42-73.
- [52] Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: theoretical and experimental study. *Cement and concrete research*, 35(11), 2116-2136.

- [53] Brunarski L., Runkiewicz L. 1983. *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*. Warszawa: ITB
- [54] Brzev, S., & Guevara-Perez, T. (2010). Precast concrete construction. *British Columbia Institute of Technology: Burnaby, BC, Canada*.
- [55] Bui, V. K., Akkaya, Y., & Shah, S. P. (2002). Rheological model for self-consolidating concrete. *Materials Journal*, 99(6), 549-559.
- [56] Building Research Institute. <https://www.itb.pl/en>
- [57] Butler, L., Tighe, S. L., & West, J. S. (2013). Guidelines for selection and use of coarse recycled-concrete aggregates in structural concrete. *Transportation research record*, 2335(1), 3-12.
- [58] Chajec, A., Kwietniowski, S., Woźniak, Z., Šavija, B., & Sadowski, Ł. (2023). The influence of granite powder waste and the addition of fly ash on concrete bleeding. *Structural Concrete*, 24(3), 4064-4076.
- [59] Chen, B., Zhao, Y., & Peng, L. (2025). Long-term performance of recycled aggregate concrete beams exposed to 10 years of loading and chloride environments. *Engineering Structures*, 333, 120140.
- [60] Choorackal, E., Riviera, P. P., & Santagata, E. (2019). Mix design and mechanical characterization of self-compacting cement-bound mixtures for paving applications. *Construction and Building Materials*, 229, 116894.
- [61] Chu, S. H., Poon, C. S., Lam, C. S., & Li, L. (2021). Effect of natural and recycled aggregate packing on properties of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 278, 122247.
- [62] Cleland, N. M. (2008). Structural integrity and progressive collapse in large-panel precast concrete structural systems. *PCI journal*, 53(4), 55.
- [63] Concrete, S. C. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM, et al*, 22, 563.
- [64] Crowley, D. (1994). Building the world anew: Design in Stalinist and post-Stalinist Poland. *Journal of Design History*, 7(3), 187-203.
- [65] Currie, R. J., Reeves, B. R., & Moore, J. F. A. (1987). *The Structural Adequacy and Durability of Large Panel System Dwellings*. Building Research Establishment.
- [66] Currie, R.J.; Reeves, B.R.; Moore JF, A. *The Structural Adequacy and Durability of Large Panel System Dwellings*; Building Research Establishment: Watford, UK, 1987.
- [67] D'Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2021). Assessing nearly zero energy buildings (NZEBs) development in Europe. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100680.
- [68] De Brito, J., & Silva, R. (2016). Current status on the use of recycled aggregates in concrete: Where do we go from here?. *RILEM Technical Letters*, 1, 1-5.
- [69] De Schutter, G., Bartos, P. J., Domone, P., & Gibbs, J. (2008). *Self-compacting concrete* (Vol. 288). Caithness: Whittles Publishing.
- [70] Deilmann, C., Effenberger, K. H., & Banse, J. (2009). Housing stock shrinkage: Vacancy and demolition trends in Germany. *Building Research & Information*, 37(5-6), 660-668.
- [71] Deja, J., Gawlicki, M., Kohutek, Z., Kotwica, L., Lagosz, A., Mroz, R., & Pichor, W. (2020). Beton. *Technologie i metody badań*. SPC, Kraków.
- [72] Del Bosque, I. S., Zhu, W., Howind, T., Matías, A., De Rojas, M. S., & Medina, C. (2017). Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 81, 25-34.
- [73] de-Prado-Gil, J., Palencia, C., Silva-Monteiro, N., & Martínez-García, R. (2022). To predict the compressive strength of self compacting concrete with recycled aggregates utilizing ensemble machine learning models. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01046.

- [74] Dettenborn, T., Harju, I., Forsman, J., Lehtonen, K., Ahlqvist, E., & Kurki, T. (2021, April). Recycling of concrete from demolished bridges and other engineered structures. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 710, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.
- [75] DIN 4226-102:2017-08 Recycled aggregates for concrete in accordance with DIN EN 12620 - Part 102: Type testing and factory production control
- [76] Djerbi, A. (2018). Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 1023-1033.
- [77] Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M. A., Serna, P., & Castaño-Tabares, J. O. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 23(7), 2545-2553.
- [78] Domone, P. L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and concrete composites*, 28(2), 197-208.
- [79] Duan, Z., Singh, A., Xiao, J., & Hou, S. (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323.
- [80] Dybeł, P. (2023). Wpływ technologii układania betonu samozagęszczalnego na nośność połączenia beton-beton oraz stal-beton w elementach wykonywanych warstwowo Effect of self-compacting concrete placement technology on the load-bearing capacity of the concrete-concrete and. *Cement Wapno Beton*, 28(4), 210-224.
- [81] Dybeł, P., & Kucharska, M. (2023). Effect of multilayer casting technology of self-compacting concrete slabs on the load-bearing capacity of a layer-to-layer joint. *Journal of Building Engineering*, 64, 105655.
- [82] Dybeł, P., & Kucharska, M. (2024). Analysis of the Effect of Layer Height on the Interlayer Bond in Self-Compacting Concrete Mix in Slab Elements. *Materials*, 17(16), 4005.
- [83] Dziedzic Kinga. Reaktywność alkaliczna kruszyw łamanych z wybranych krajowych zakładów produkcji. Praca doktorska pod przewodnictwem Daria Niedźwieckiej.
- [84] Ellingwood, B., & Leyendecker, E. V. (1978). Approaches for design against progressive collapse. *Journal of the Structural Division*, 104(3), 413-423.
- [85] Elyamany HE, Abd Elmoaty AEM, Mohamed B. 2014. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*. 53: s. 295–307
- [86] Europejska Komisja ds. środowiskowych <https://environment.ec.europa.eu/>
- [87] Eurostat, 2024 <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [88] Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, web of science, and Google scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB journal*, 22(2), 338-342.
- [89] Fang, G., Chen, J., Dong, B., & Liu, B. (2023). Microstructure and micromechanical properties of interfacial transition zone in green recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 66, 105860.
- [90] Faraj, R. H., Mohammed, A. A., & Omer, K. M. (2022). Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. *Journal of building engineering*, 50, 104170.
- [91] Fathifazl, G. (2008). *Structural performance of steel reinforced recycled concrete members* (Doctoral dissertation, Carleton University).
- [92] Feng, C., Cui, B., Guo, H., Zhang, W., & Zhu, J. (2023). Study on the effect of reinforced recycled aggregates on the performance of recycled concrete--synergistic effect of cement slurry-carbonation. *Journal of Building Engineering*, 64, 105700.

- [93] Feng, W., Tang, Y., Zhang, Y., Qi, C., Ma, L., & Li, L. (2022). Partially fly ash and nano-silica incorporated recycled coarse aggregate based concrete: Constitutive model and enhancement mechanism. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 192-210.
- [94] *fib Model Code for Concrete Structures* (2020)
- [95] Fintel, M., & Schultz, D. M. (1976). A philosophy for structural integrity of large panel buildings. *PCI JOURNAL*, 21(3), 46-69.
- [96] Fintel, M., Schultz, D. M., & Iqbal, M. (1976). *Philosophy of structural response to normal and abnormal loads*. Portland Cement Association.
- [97] Fiol, F., Revilla-Cuesta, V., Thomas, C., & Manso, J. M. (2023). Self-compacting concrete containing coarse recycled precast-concrete aggregate and its durability in marine-environment-related tests. *Construction and Building Materials*, 377, 131084.
- [98] Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., & Manso, J. M. (2018). The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. *Construction and building materials*, 182, 309-323.
- [99] Folić, R., Laban, M., & Milanko, V. (2011). Reliability and sustainability analysis of large panel residential buildings in Sofia, Skopje and Novi Sad. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 9(1), 161-176.
- [100] Gaimster, R., & Dixon, N. (2003). Self-compacting Concrete. *Advance Concrete Technology: Processes*.
- [101] Gao, S., Guo, J., Zhu, Y., & Jin, Z. (2023). Study on the influence of the properties of interfacial transition zones on the performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 408, 133592.
- [102] Gao, S., Guo, X., Ban, S., Ma, Y., Yu, Q., & Sui, S. (2023). Influence of supplementary cementitious materials on ITZ characteristics of recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 363, 129736.
- [103] Gawenda, T. (2021). Production methods for regular aggregates and innovative developments in Poland. *Minerals*, 11(12), 1429.
- [104] Gawenda, T., & Saramak, D. (2022). Optimization of aggregate production circuit through modeling of crusher operation. *Minerals*, 12(1), 78
- [105] Gayarre, F. L., López-Colina, C., Serrano, M. A., & López-Martínez, A. (2013). Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. *Construction and Building Materials*, 40, 1193-1199.
- [106] Geoportal <http://geoportal.pgi.gov.pl/>
- [107] Ghoddousi, P., Shirzadi Javid, A. A., Sobhani, J., & Zaki Alamdari, A. (2016). A new method to determine initial setting time of cement and concrete using plate test. *Materials and Structures*, 49, 3135-3142.
- [108] Gile, D. (2015). Analyzing translation studies with scientometric data: From CIRIN to citation analysis. *Perspectives*, 23(2), 240-248.
- [109] Girus, K. (2019). Evaluation of the condition of the external layer of walls in the national technological system" S-Sz"(Szczecin System) of large-panel prefabricated construction. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 284, p. 07003). EDP Sciences.
- [110] Główny Urząd Statystyczny <https://stat.gov.pl/>
- [111] Gökçe, H. S., & Andiç-Çakır, Ö. (2019). Bleeding characteristics of high consistency heavyweight concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 194, 153-160.
- [112] Golewski, G. (2015). *Procesy pękania w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych*. Politechnika Lubelska.
- [113] Golewski, G. L. (2019). *Beton modyfikowany popiołem lotnym krzemionkowym poddany ekspozycji niskich temperatur*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- [114] Gołaszewski, J., & Szwabowski, J. (2009). Specyfika technologii betonu samozagęszczalnego. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, (3), 50-53.

- [115] Gołaszewski, J., & Szwabowski, J. (2011). Projektowanie betonu samozagęszczalnego. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 62-69.
- [116] Goodier, C. I. (2003). Development of self-compacting concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 156(4), 405-414.
- [117] Gorzelańczyk, T. (2007). Ocena metodami akustycznymi procesu niszczenia betonów samozagęszczonych. Rozprawa doktorska. *Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej*, seria PRE, nr 9/07, 134 s.
- [118] Gómez Soberón, J. M. V. (2002). Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate.
- [119] Góra, J., & Piasta, W. G. (2004). Wpływ kruszyw łamanych na właściwości wytrzymałościowe betonów wysokiej jakości. *Konferencja „Dni betonu”*. *Polski Cement Sp. z oo, Kraków*.
- [120] Góralczyk, S., & Filipczyk, M. Aktualne badania reaktywności alkalicznej polskich kruszyw-część II. *Kruszywa Mineralne*, 2, 37-48.
- [121] Górski, W. (2021). Problems of early large panel structures in Poland. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 20(3).
- [122] Gramatikov, K., & Bozinovski, Z. L. (2007). Enlargement of Balconies of Existing Residential Building “Karpos” in Skopje. *Cost C16, Improving the Quality of Existing Urban Building Envelopes: Structures*, 3, 91.
- [123] Gramatikov, K.; Bozinovski, Z.L. Enlargement of Balconies of Existing Residential Building “Karpos” in Skopje. *Cost C16 Improv. Qual. Exist. Urban Build. Envel. Struct.* 2007, 3, 91.
- [124] Granja, J., & Azenha, M. (2020). Elastic Modulus Measurement Through Ambient Response Method. *Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials*, 69-98.
- [125] Grdić, Z., Despotović, I., & Topličić-Ćurčić, G. (2008). Properties of self-compacting concrete with different types of additives. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering*, 6(2), 173-177.
- [126] Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., & Ristic, N. S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1129-1133.
- [127] Gronostajska, B. (2016). Kształtowanie środowiska mieszkaniowego dla seniorów. *Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław*.
- [128] Gropius, W. (1965). *The new architecture and the Bauhaus* (Vol. 21). Mit Press.
- [129] Guo, H., Wang, H., Xue, H., Li, H., Li, Y., & Wei, L. (2024). Study on damage deterioration mechanism and service life prediction of hybrid fibre concrete under different salt freezing conditions. *Construction and Building Materials*, 435, 136688.
- [130] Hänsel, H., & Krajewski, B. (1968). *Podstawy rachunku błędów*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [131] Hanson, N. W., & Burnett, E. F. (1978). *Wall Cantilevers and Slab Suspension Tests*. US Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research.
- [132] Harzing, A. W., & Alakangas, S. (2016). Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics*, 106, 787-804.
- [133] Hayles M., Sanchez L. F., Noël M., Eco-efficient low cement recycled concrete aggregate mixtures for structural applications, *Construction and Building Materials* 169/2018, 724–732.
- [134] Heinemann, H. A., & Nijland, T. G. (2009, May). Concrete in the Netherlands: Historic use of components and conservation. In *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*.

- [135] Hoła, J. (2000). Naprężenia inicjujące i krytyczne a destrukcja naprężeniowa w betonie ściśkanym. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Monografie*, 76(33), 182-182.
- [136] Home, R. (2007). Reconstructing Skopje, Macedonia, after the 1963 earthquake: The Master Plan forty years on. *Papers in Land Management*, 7, 660-663.
- [137] Hosseini, M. R., Martek, I., Zavadskas, E. K., Aibinu, A. A., Arashpour, M., & Chileshe, N. (2018). Critical evaluation of off-site construction research: A Scientometric analysis. *Automation in construction*, 87, 235-247.
- [138] Huuhka, S., Kaasalainen, T., Hakanen, J. H., & Lahdensivu, J. (2015). Reusing concrete panels from buildings for building: Potential in Finnish 1970s mass housing. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 105-121.
- [139] Hwang, C., & Tsai, C. (2005). The effect of aggregate packing types on engineering properties of self-consolidating concrete. *SCC*.
- [140] Ismail, S., & Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464-476.
- [141] Jain, A. K., & Chouhan, J. S. (2011). Effect of shape of aggregate on compressive strength and permeability properties of pervious concrete. *International journal of advanced engineering research and studies*, 1(1), 120-126.
- [142] Jamróży, Z. Beton i jego technologie/Concrete and its technology. Warsaw: Wydawnictwo Naukowe PWN (in Polish). 2015.
- [143] Jasiczak, J. (1985). Influence of technological processes on homogeneity and strength of concrete. *Build. Eng*, 12, 561-564.
- [144] Jasiczak, J., & Girus, K. (2017, October). Maintenance and durability of the concrete external layer of curtain walls in prefabricated technological Poznan large panel system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 3, p. 032015). IOP Publishing.
- [145] Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Zych, M., Schlicke, D., & Azenha, M. (2020, October). Experiences on early age cracking of wall-on-slab concrete structures. In *Structures* (Vol. 27, pp. 2520-2549). Elsevier.
- [146] Jędrzejewska, A., Zych, M., Torrenti, J. M., Kanavaris, F., Azenha, M., Chen, F., & Ito, S. (2024). Practical insights on standardised models for estimation of crack width due to imposed strains in edge-restrained reinforced concrete elements. *Engineering Structures*, 305, 117757.
- [147] Jędrzejewska, Agnieszka. (2023). *Stan graniczny zarysowania w ścianach żelbetowych poddanych oddziaływaniu odkształceń wymuszonych*, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [148] Jian, S. M., Wu, B., & Hu, N. (2021). Environmental impacts of three waste concrete recycling strategies for prefabricated components through comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129463.
- [149] Jin, R., Zou, Y., Gidado, K., Ashton, P., & Painting, N. (2019). Scientometric analysis of BIM-based research in construction engineering and management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26(8), 1750-1776.
- [150] Johal, L. S., & Hanson, N. W. (1982). Design for vertical load on horizontal connections in large panel structures. *PCI J*, 27, 62-79.
- [151] Josserand, L., & De Larrard, F. (2004). A method for concrete bleeding measurement. *Materials and structures*, 37, 666-670.
- [152] Josserand, L., Coussy, O., & de Larrard, F. (2006). Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and concrete research*, 36(9), 1603-1608.

- [153] Jovanović, J. (2019). From Yugoslavia to Angola: Housing as Postcolonial Technical Assistance City Building through IMS Žeželj Housing Technology. *Architektura & Urbanizmus*, 53(3-4), 170-181.
- [154] Jovanović, J., Grbić, J., & Petrović, D. (2012). Prefabricated construction in former Yugoslavia. Visual and aesthetic features and technology of prefabrication. *Graue Reihe des Instituts für Stadt-Und Regionalplanung; Technische Universität Berlin: Berlin, Germany*, 175.
- [155] Jule, L., Zhuye, H., Cedric, M., & Xiaosheng, J. (2020). Structural Installation of Precast Concrete Elements. *J. Eng*, 8, 1-8.
- [156] Júnior, N. A., Silva, G. A. O., & Ribeiro, D. V. (2018). Effects of the incorporation of recycled aggregate in the durability of the concrete submitted to freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 161, 723-730.
- [157] Kadela, M., & Garbacz, A. (2024). The impact of defects on the compressive strength of foamed concrete. *Materialy Budowlane*.
- [158] Kadela, M., Cincio, A., Fedorowicz, J., & Gerylo, R. (2019, September). Attempt at numerical representation of gas explosion in a large panel building. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 603, No. 5, p. 052023). IOP Publishing.
- [159] Kadela, M., Małek, M., Jackowski, M., Kunikowski, M., Klimek, A., Dudek, D., & Rośkowicz, M. (2023). Recycling of tire-derived fiber: The contribution of steel cord on the properties of lightweight concrete based on perlite aggregate. *Materials*, 16(5), 2124.
- [160] Kalinowska, H. (1992). *Racjonalizacja napraw wielkopłytowych budynków mieszkalnych* (Doctoral dissertation, Rozprawa doktorska, Wrocław).
- [161] Kapoor, K., Singh, S. P., & Singh, B. (2018). Water permeation properties of self compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. *International Journal of Civil Engineering*, 16, 47-56.
- [162] Kaszyńska, M., & Rucińska, T. (2008). Wpływ kompozycji kruszywa na właściwości lekkich betonów samozagęszczalnych. *Konferencja „Dni Betonu*.
- [163] Kebaïli, O., Mouret, M., Arabi, N., & Cassagnabere, F. (2015). Adverse effect of the mass substitution of natural aggregates by air-dried recycled concrete aggregates on the self-compacting ability of concrete: evidence and analysis through an example. *Journal of Cleaner Production*, 87, 752-761.
- [164] Khan, M., & Ali, M. (2018). Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber. *Construction and Building Materials*, 182, 703-715.
- [165] Khayat, K. H., Ghezal, A., & Hadriche, M. S. (1999). Factorial design model for proportioning self-consolidating concrete. *Materials and Structures*, 32(9), 679-686.
- [166] Kheder, G. F., & Al Jadiri, R. S. (2010). New method for proportioning self-consolidating concrete based on compressive strength requirements. *ACI Materials Journal*, 107(5), 490.
- [167] Kibert, C. J., & Chini, A. R. (2000, August). Overview of deconstruction in selected countries. In *CIB publication* (Vol. 252).
- [168] Kılıç, A., Atış, C. D., Teymen, A., Karahan, O. K. A. N., Özcan, F., Bilim, C., & Özdemir, M. E. T. I. N. (2008). The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cement and concrete composites*, 30(4), 290-296.
- [169] Kim, J. (2021). Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design. *Construction and Building Materials*, 301, 124091.
- [170] Kim, J. (2022). Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Construction and Building Materials*, 328, 127071.

- [171] Kim, J., & Sadowski, Ł. (2019). The equivalent mortar volume method in the manufacturing of recycled aggregate concrete. *Czasopismo Techniczne*, 2019(Volume 11), 123-140.
- [172] Kim, N., Kim, J., & Yang, S. (2016). Mechanical strength properties of RCA concrete made by a modified EMV method. *Sustainability*, 8(9), 924.
- [173] King, S. A., Khalturin, V. I., & Tucker, B. E. (Eds.). (2013). *Seismic hazard and building vulnerability in post-soviet central Asian Republics* (Vol. 52). Springer Science & Business Media.
- [174] Knaack, A. M., & Kurama, Y. C. (2013). Design of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. *ACI Materials Journal*, 110(5), 483.
- [175] Knyziak, P. (2016). The quality and reliability in the structural design, production, execution and maintenance of the precast residential buildings in Poland in the past and now. *Key Engineering Materials*, 691, 420-431.
- [176] Knyziak, P., Krentowski, J. R., & Bieranowski, P. (2017). Risks of the durability of large-panel buildings elevations in reference to the conclusions from technical conditions audits. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 117, p. 00080). EDP Sciences.
- [177] Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., & Jiang, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 24(5), 701-708.
- [178] Konior, J. (2021). Overdurability and Technical Wear of Materials Used in the Construction of Old Buildings. *Materials*, 14(2), 378.
- [179] Kononowicz, W., & Matczak, A. (2011). Poprawa funkcjonalności wielkopłytowych budynków wielorodzinnych na osiedlu "Polanka" we Wrocławiu pod kątem potrzeb osób niepełnosprawnych. *Przegląd Budowlany*, 82, 118-122.
- [180] Korouzhdeh, T., Eskandari-Naddaf, H., & Kazemi, R. (2022). The ITZ microstructure, thickness, porosity and its relation with compressive and flexural strength of cement mortar; influence of cement fineness and water/cement ratio. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(2), 191-201.
- [181] Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete composites*, 31(9), 622-627.
- [182] Kowoll, T., Müller, E., Fritsch-Decker, S., Hettler, S., Störmer, H., Weiss, C., & Gerthsen, D. (2017). Contrast of backscattered electron SEM images of nanoparticles on substrates with complex structure. *Scanning*, 2017(1), 4907457.
- [183] Krentowski, J. R., Knyziak, P., & Mackiewicz, M. (2021). Durability of interlayer connections in external walls in precast residential buildings. *Engineering failure analysis*, 121, 105059.
- [184] Kripanarayanan, K. M. (1976). *Wall Panels: Analysis and Design Criteria* (Vol. 3). US Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research.
- [185] Krishnamoorthy, K. (2003). Some Major Issues of Self-Compacting Concrete. In *Role of Concrete In Sustainable Development: Proceedings of the International Symposium dedicated to Professor Surendra Shah, Northwestern University, USA held on 3–4 September 2003 at the University of Dundee, Scotland, UK* (pp. 489-498). Thomas Telford Publishing.
- [186] Kubissa, J., Koper, M., Koper, W., Kubissa, W., & Koper, A. (2015). Water demand of concrete recycled aggregates. *Procedia Engineering*, 108, 63-71.
- [187] Kukielska, D., & Góralczyk, S. (2015). Reaktywność alkaliczna kruszyw. *Mining Science*, 22(Special Issue 1), 101-110.
- [188] Kumar, A., & Kumar, G. (2018). A mix design procedure for self compacting concrete. *Int. Res. J. Eng. Technol. IRJET*, 5, 65-70.

- [189] Kumar, R. (2017). Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. *Construction and Building Materials*, 142, 248-255.
- [190] Kumar, R. R. (2022). Evaluation of mechanical and carbonation properties of self-compacting treated recycled coarse aggregates with two-stage mixing approaches. *Cleaner Waste Systems*, 3, 100060.
- [191] Kurda, R., De Brito, J., & Silvestre, J. D. (2018). Combined economic and mechanical performance optimization of recycled aggregate concrete with high volume of fly ash. *Applied Sciences*, 8(7), 1189.
- [192] Laban, M.; Milanko, V. Fire safety assessment in urban environment. *Int. Sci. Publ. Ecol. Saf.* 2008, 2, 121–133.
- [193] Levy, S. M., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and concrete research*, 34(11), 1975-1980.
- [194] Li, L., Xuan, D., Sojobi, A. O., Liu, S., & Poon, C. S. (2021). Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 308, 125080.
- [195] Li, W., Wang, D., Chen, B., Hua, K., Su, W., Xiong, C., & Zhang, X. (2022). Research on three-dimensional morphological characteristics evaluation method and processing quality of coarse aggregate. *Buildings*, 12(3), 293.
- [196] Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S., & Shah, S. P. (2012). Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. *Construction and Building Materials*, 35, 1045-1055.
- [197] Li, X., Qin, D., Hu, Y., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., & Joyklad, P. (2022). A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, 45, 103447.
- [198] Li, Y., Zhang, S., Wang, R., Zhao, Y., & Men, C. (2019). Effects of carbonation treatment on the crushing characteristics of recycled coarse aggregates. *Construction and building materials*, 201, 408-420.
- [199] Li, Z., Liu, L., Yan, S., Zhang, M., Xia, J., & Xie, Y. (2019). Effect of freeze-thaw cycles on mechanical and porosity properties of recycled construction waste mixtures. *Construction and Building Materials*, 210, 347-363.
- [200] Ligeza, W. (2015). Renovation of large-panel buildings in context of urban renewal. *Civil and Environmental Engineering Reports*, (17), 83-95.
- [201] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and structures*, 33, 574-580.
- [202] Limbachiya, M., Bostanci, S. C., & Kew, H. (2014). Suitability of BS EN 197-1 CEM II and CEM V cement for production of low carbon concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 397-405.
- [203] Lin, W. T. (2020). Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 242, 118046.
- [204] Lintz, C. A., & Bulka, L. (2015). Skopje, Macedonia 1965 to 2014: In Search of a Modern European Capital. In *Planning Forum; The University of Texas at Austin: Austin, TX, USA* (p. 19).
- [205] Liu, Q. T., Cen, G. P., Cai, L. C., Wu, Y. G., Wu, H. S., & Liu, X. J. (2012). Study and application of the self-compacting recycled pavement concrete of high early strength. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 193, pp. 910-913). Trans Tech Publications Ltd.
- [206] Lu, C., Yu, Q., Wei, J., Niu, Y., Zhang, Y., Lin, C., ... & Yang, P. (2024). Influence of interface transition zones (ITZ) and pore structure on the compressive strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 456, 139299.

- [207] Lyublinskiy, V. A. (2019, December). The deformability of shear bonds in the load-bearing systems of panel buildings. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1425, No. 1, p. 012159). IOP Publishing.
- [208] Ma, Q., Duan, Z., Wang, J., Yin, G., & Li, X. (2024). Frost resistance and improvement techniques of recycled concrete: a comprehensive review. *Frontiers in Materials*, *11*, 1493191.
- [209] Ma, X., He, T., Xu, Y., Yang, R., & Sun, Y. (2022). Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix. *Case Studies in Construction Materials*, *16*, e00989.
- [210] MacCarthy, F. (2019). *Walter Gropius: Visionary Founder of the Bauhaus*. Faber & Faber.
- [211] Mah, C. M., Fujiwara, T., & Ho, C. S. (2016). Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. *Waste Management & Research*, *34*(12), 1224-1230.
- [212] Makul, N., Fediuk, R., Amran, M., Zeyad, A. M., Klyuev, S., Chulkova, I., ... & Azevedo, A. (2021). Design strategy for recycled aggregate concrete: a review of status and future perspectives. *Crystals*, *11*(6), 695.
- [213] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2022). Large panel system technology in the second half of the twentieth century—Literature review, recycling possibilities and research gaps. *Buildings*, *12*(11), 1822.
- [214] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2023). Self-compacting concrete with recycled coarse aggregates from concrete construction and demolition waste—Current state-of-the art and perspectives. *Construction and Building Materials*, *370*, 130702.
- [215] Malazdrewicz, S., Ostrowski, K. A., & Sadowski, Ł. (2025). Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate from the demolition of large panel system buildings. *Applied Rheology*, *35*(1), 20240023.
- [216] Małolepszy, J., Deja, J., Brylicki, W., & Gawlicki, M. (2000). Technologia betonu. Metody badań. *Uczeln. Wyd. Nauk.-Dydakt., Kraków*.
- [217] Manzi, S., Mazzotti, C., & Bignozzi, M. C. (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 312-318.
- [218] Manzi, S., Mazzotti, C., & Bignozzi, M. C. (2017). Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. *Construction and Building Materials*, *157*, 582-590.
- [219] Marathe, S., Sadowski, Ł., & Shree, N. (2024). Geopolymer and alkali-activated permeable concrete pavements: Bibliometrics and systematic current state of the art review, applications, and perspectives. *Construction and Building Materials*, *421*, 135586.
- [220] Marinoni, N., & Broekmans, M. A. (2013). Microstructure of selected aggregate quartz by XRD, and a critical review of the crystallinity index. *Cement and Concrete Research*, *54*, 215-225.
- [221] Martinez, P., Al-Hussein, M., & Ahmad, R. (2019). A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. *Automation in Construction*, *107*, 102947.
- [222] Martínez-García, R., Jagades, P., Fraile-Fernández, F. J., & de Prado-Gil, J. (2022). Influence of design parameters on the fresh and durable properties of self-compacting concrete with recycled aggregate. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1222, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [223] Martínez-García, R., Jagadesh, P., Fraile-Fernández, F. J., Morán-del Pozo, J. M., & Juan-Valdés, A. (2020). Influence of design parameters on fresh properties of self-compacting concrete with recycled aggregate—A review. *Materials*, *13*(24), 5749.

- [224] Masunaga, K. M., Tian, R., & Iyoda, T. (2024, September). Characterization of the Interfacial Transition Zone Between Carbonated Recycled Aggregates and New Cementitious Matrix: The Cement Type Influence on Carbonation. In *FIB International Conference on Concrete Sustainability* (pp. 305-313). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [225] Meddah, M. S., Zitouni, S., & Belâabes, S. (2010). Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and building materials*, 24(4), 505-512.
- [226] Memon, S. A., Bekzhanova, Z., & Murzakarimova, A. (2022). A review of improvement of interfacial transition zone and adherent mortar in recycled concrete aggregate. *Buildings*, 12(10), 1600.
- [227] Miedziałowski, C., & Baszeń, M. (2018). The Overview of Technical State of Unfinished Building Made of Large Panel Elements. *Applied Mechanics and Materials*, 878, 219-223.
- [228] Millais, M. (2015). A critical appraisal of the design, construction and influence of the Unité d'Habitation, Marseilles, France. *Journal of Architecture and Urbanism*, 39(2), 103-115.
- [229] Mistri, A., Dhimi, N., Bhattacharyya, S. K., Barai, S. V., & Mukherjee, A. (2023). Performance of biocement treatment in improving the interfacial properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 369, 130509.
- [230] Mohammed, S. I., & Najim, K. B. (2020, February). Mechanical strength, flexural behavior and fracture energy of Recycled Concrete Aggregate self-compacting concrete. In *Structures* (Vol. 23, pp. 34-43). Elsevier.
- [231] Mohseni, E., Saadati, R., Kordbacheh, N., Parpinchi, Z. S., & Tang, W. (2017). Engineering and microstructural assessment of fibre-reinforced self-compacting concrete containing recycled coarse aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 168, 605-613.
- [232] Muntean, D. M., Ungureanu, V., Petran, I., & Georgescu, M. (2017, October). Large prefabricated concrete panels collective dwellings from the 1970s: context and improvements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 5, p. 052050). IOP Publishing.
- [233] Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., & Hisada, M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and concrete research*, 34(6), 965-971.
- [234] Najduchowska, M., Naziemiec, Z., & Pabiś-Mazgaj, E. (2018). Właściwości mechaniczne wybranych kruszyw krajowych. *Konferencja „Dni Betonu”*, Wisła, 129-144.
- [235] Najim, K. B., & Hall, M. R. (2010). A review of the fresh/hardened properties and applications for plain-PRC and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and building materials*, 24(11), 2043-2051.
- [236] Newland, P. (2008). After Ronan Point: re-imagining the territory. *The Cultural Construction of London's East End; Brill Rodopi: Paderborn, Germany*, 149-182.
- [237] Nežerka, V., Bílý, P., Hrbek, V., & Fládr, J. (2019). Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and concrete composites*, 103, 252-262.
- [238] Niemelä, T., Kosonen, R., & Jokisalo, J. (2017). Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartment buildings in Finland. *Sustainable cities and society*, 32, 9-30.
- [239] Niewiadomski P. (2019). Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na właściwości betonu samozagęszczającego się. Rozprawa doktorska. *Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej*, seria PRE, nr 2, 146 s.
- [240] Niewiadomski, P., & Hoła, J. (2020). Failure process of compressed self-compacting concrete modified with nanoparticles assessed by acoustic emission method. *Automation in Construction*, 112, 103111.

- [241] Niewiadomski, P., & Stefaniuk, D. (2020). Creep assessment of the cement matrix of self-compacting concrete modified with the addition of nanoparticles using the indentation method. *Applied Sciences*, 10(7), 2442.
- [242] Nikolic, J. (2013). New challenging approach for analysis and upgrading of massive building structure: Case study of New Belgrade post-war mega blocks. *CESB 2013 PRAGUE-Central Europe Towards Sustainable Building 2013: Sustainable Building and Refurbishment for Next Generations*, 1-10.
- [243] Nixon, J. P., & Sims, I. (Eds.). (2016). *RILEM Recommendation of the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures* (Vol. 17, p. 168). Dordrecht: Springer.
- [244] Nowakowski, P. (2020). Functional and aesthetic aspects of modernization of large panel residential buildings. In *Advances in Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Architecture, Sustainable Urban Planning and Infrastructure, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10* (pp. 335-346). Springer International Publishing.
- [245] Nowogońska, B. (2014). Prognosis of the technical condition of masonry walls in residential buildings. *Budownictwo i Architektura*, 13(3), 027-032.
- [246] Oberngruber, A. (2016). *Plattenbau-Evaluierung einer stigmatisierten Fertigteilbauweise unter konstruktiver Betrachtung* (Doctoral dissertation, Wien).
- [247] Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15.
- [248] Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural concrete*, 1(1), 3-17.
- [249] Olorunsogo, F. T., & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and concrete research*, 32(2), 179-185.
- [250] Ortiz, J. A., De La Fuente, A., Sebastia, F. M., Segura, I., & Aguado, A. (2017). Steel-fibre-reinforced self-compacting concrete with 100% recycled mixed aggregates suitable for structural applications. *Construction and Building Materials*, 156, 230-241.
- [251] Ostanska, A. (2009). Basics of the methodology of creating programs for revitalization of large housing estates erected in industrialized technology on the example of the housing estate St. Moniuszki in Lublin. *Monographs of the Faculty of Building and Sanitary Engineering; Lublin University of Technology: Lublin, Poland*, 1, 1-173.
- [252] Ostrowski, K., Sadowski, Ł., Stefaniuk, D., Wałach, D., Gawenda, T., Oleksik, K., & Usydus, I. (2018). The effect of the morphology of coarse aggregate on the properties of self-compacting high-performance fibre-reinforced concrete. *Materials*, 11(8), 1372.
- [253] Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., Gicala, M., & Różańska, M. (2020). Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 238, 117794.
- [254] Otsuki, N., Miyazato, S. I., & Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 15(5), 443-451.
- [255] Ouchi, M., Nakamura, S. A., Osterberg, T., Hallberg, S., & Lwin, M. (2003). Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States. *Kochi University of Technology, Kochi, Japan*.
- [256] Pacheco, J., de Brito, J., Ferreira, J., & Soares, D. (2017). Dynamic characterization of full-scale structures made with recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4195-4205.

- [257] Padmini, A. K., Ramamurthy, K., & Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 23(2), 829-836.
- [258] Pall, A. S. (1979). *Limited slip bolted joints: a device to control the seismic response of large panel structures* (Doctoral dissertation, Concordia University).
- [259] Pall, A. S., Marsh, C., & Fazio, P. (1980). Friction joints for seismic control of large panel structures. *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 25(6), 38-61.
- [260] Palmisano, F. Mitigation of progressive collapse by the activation of the elasto-plastic catenary behaviour of RC slab structures. *Open Constr. Build. Technol. J.* 2014, 8, 122–131.
- [261] Panda, K. C., & Bal, P. K. (2013). Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. *Procedia Engineering*, 51, 159-164.
- [262] Panghal, H., & Kumar, A. (2024). Enhancing Concrete Performance with Treated Recycled Aggregates: A Comparative Study of Coating, Chemical, and Abrasion Treatments. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-19.
- [263] Pavithra, A., & Murali, K. (2023). Crushed-stone sand for use in the development of self-compacting concrete (SCC). *Materials Today: Proceedings*.
- [264] Pearson, C.; Delatte, N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes. *J. Perform. Constr. Facil.* 2005, 19, 172–177.
- [265] Pereira-de Oliveira, L. A., Nepomuceno, M., & Rangel, M. (2013). An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates. *Informes de la Construcción*, 65(Extra-1), 31-41.
- [266] Pereira-de-Oliveira, L. A., Nepomuceno, M. C. S., Castro-Gomes, J. P., & Vila, M. D. F. C. (2014). Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 51, 113-120.
- [267] Perron, B. E., Victor, B. G., Hodge, D. R., Salas-Wright, C. P., Vaughn, M. G., & Taylor, R. J. (2017). Laying the foundations for scientometric research: A data science approach. *Research on Social Work Practice*, 27(7), 802-812.
- [268] Persson, B. (2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and concrete Research*, 31(2), 193-198.
- [269] Peshkov, V. V., Gorbach, P. S., Shcherbin, S. A., & Savenkov, A. I. (2021, April). Some aspects of the organization of the processes of renovation of the housing stock in Irkutsk. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 751, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.
- [270] Petersson, O., Billberg, P., & Van, B. K. (1996). A model for Self-Compacting Concrete International Rilem Conference on" Production Methods and Workability of Concrete. In *RILEM Proceedings* (Vol. 32, p. 1996).
- [271] Pittore, M., Bindi, D., Tyagunov, S., Wieland, M., Picozzi, M., Pilz, M., ... & Mikhailova, N. (2011). Seismic hazard and risk in Central Asia.
- [272] Plaza, P., del Bosque, I. S., Frías, M., de Rojas, M. S., & Medina, C. (2021). Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO2 emissions. *Construction and Building Materials*, 285, 122926.
- [273] PN-EN 206:2014-04 Beton -- Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [274] PN-EN 480-4:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu -- Metody badań -- Część 4: Oznaczanie ilości cieczy wydzielającej się samoczynnie z mieszanki betonowej
- [275] PN-EN 933-1:2000 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania
- [276] PN-EN 933-3:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości

- [277] PN-EN 933-4:2008 Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn -- Wskaźnik kształtu
- [278] PN-EN 1097-1:2024 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie odporności na ścieranie (mikro-Deval)
- [279] PN-EN 1097-6:2022 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości
- [280] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [281] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu -- Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
- [282] PN-EN 12620:2013-08 Kruszywa do betonu
- [283] PN-EN 13813:2003 Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonania -- Materiały -- Właściwości i wymagania
- [284] PN-EN 14157:2017-11 Metody badań kamienia naturalnego -- Oznaczanie odporności na ścieranie
- [285] Podawca, K., Pawłat-Zawrzykraj, A., & Dohojda, M. (2018). Analysis of the possibilities for improvement of thermal comfort of living quarters located in multi-family large-panel prefabricated buildings. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 44, p. 00145). EDP Sciences.
- [286] Pomonis, A. (1990). The Spitak (Armenia, USSR) earthquake: Residential building typology and seismic behaviour. *Disasters*, 14(2), 89-114.
- [287] Poon, C. S., Ann, T. W., & Ng, L. H. (2001). On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong. *Resources, conservation and recycling*, 32(2), 157-172.
- [288] Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2007). Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*, 40(9), 981-988.
- [289] Poon, C. S., Shen, P., Jiang, Y., Ma, Z., & Xuan, D. (2023). Total recycling of concrete waste using accelerated carbonation: A review. *Cement and Concrete Research*, 173, 107284.
- [290] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and building materials*, 18(6), 461-468.
- [291] Poongodi, K., Murthi, P., Awoyera, P. O., Gobinath, R., & Olalusi, O. B. (2021). Durability Properties of Self-compacting Concrete Made With Recycled Aggregate. *Silicon*, 13(8), 2727-2735.
- [292] Powers, T. C., & Brownyard, T. L. (1947, February). Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. In *Journal Proceedings* (Vol. 43, No. 9, pp. 669-712).
- [293] Purushothaman, R., Amirthavalli, R. R., & Karan, L. (2015). Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014168.
- [294] Qiang, T., Yu, Z., Yufeng, G., & Fan, G. (2017). Use of cement-chelated solidified (MSWI) fly ash for pavement material: mechanical and environmental evaluations. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(11), 1553-1566.
- [295] Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment*, 42(1), 407-415.
- [296] Rajan, B., & Singh, D. (2019). Quantify effects of stage crushing on dimensional distribution of basaltic aggregates using image technique. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(5), 497-507.
- [297] Rajhans, P., Panda, S. K., & Nayak, S. (2018). Sustainable self compacting concrete from C&D waste by improving the microstructures of concrete ITZ. *Construction and building materials*, 163, 557-570.

- [298] Raman, J. V. M., & Ramasamy, V. (2021). Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6356-6363.
- [299] Revathi, P., Selvi, R. S., & Velin, S. S. (2013). Investigations on fresh and hardened properties of recycled aggregate self compacting concrete. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 94, 179-185.
- [300] Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Serrano-López, R., & Ortega-López, V. (2021). Models for compressive strength estimation through non-destructive testing of highly self-compacting concrete containing recycled concrete aggregate and slag-based binder. *Construction and Building Materials*, 280, 122454.
- [301] Richter, P. (2006). *Der Plattenbau als Krisengebiet: Die architektonische und politische Transformation industriell errichteter Wohngebäude aus der DDR am Beispiel der Stadt Leinefelde* (Doctoral dissertation, Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky).
- [302] Rocco, C. G., & Elices, M. (2009). Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Engineering fracture mechanics*, 76(2), 286-298.
- [303] Romano, E., Iuorio, O., Nikitas, N., & Negro, P. (2018, October). A review of retrofit strategies for Large Panel System buildings. In *Proceedings of The Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*.
- [304] Rossignolo, J. A. (2009). Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex. *Construction and Building Materials*, 23(2), 817-821.
- [305] Rowe, M. C., & Brewer, B. J. (2018). AMORPH: A statistical program for characterizing amorphous materials by X-ray diffraction. *Computers & geosciences*, 120, 21-31.
- [306] ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) NR 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG
- [307] Ruslan, A. K., Nor, N. M., Musnazri, N. A. W., Jamaludin, A. H., Saliah, S. N. M., Fauzi, M. A., ... & Aziz, N. A. (2024). Structural Performance of Precast Non-Load Bearing Wall Panels with Recycled Concrete Aggregate and Perlite. *Jurnal Kejuruteraan*, 36(6), 2251-2257.
- [308] Russell, J. M., Sagaseta, J., Cormie, D., & Jones, A. E. K. (2019, August). Historical review of prescriptive design rules for robustness after the collapse of Ronan Point. In *Structures* (Vol. 20, pp. 365-373). Elsevier.
- [309] Russo, T., Azenha, M., & Granja, J. (2023, June). Open-source EMM-ARM implementation for mortars based on single-board computer. In *International RILEM Conference on Synergising expertise towards sustainability and robustness of CBMs and concrete structures* (pp. 380-391). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [310] Rutkowska, G., Małuszyńska, I., & Rosa, M. (2014). Badania właściwości betonu wyprodukowanego z dodatkiem popiołu lotnego. *Inżynieria Ekologiczna*, (36), 53-64.
- [311] Rutkowska, G., Szulej, J., & Ogrodnik, P. (2025). The Influence of Fibre and Fly Ash Additions on the Properties of Self-Compacting Concrete. *Materials*, 18(11), 2565.
- [312] Rutkowska, G., Wichowski, P., Franus, M., Mendryk, M., & Fronczyk, J. (2020). Modification of ordinary concrete using fly ash from combustion of municipal sewage sludge. *Materials*, 13(2), 487.
- [313] Saak, A. W., Jennings, H. M., & Shah, S. P. (2001). New methodology for designing self-compacting concrete. *Materials Journal*, 98(6), 429-439.
- [314] Saberi, S. S., Mohamed, A., & Eltwati, A. S. (2021, August). Mechanical and physical properties of recycled concrete aggregates for road base materials. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1973, No. 1, p. 012236). IOP Publishing.

- [315] Sadowska-Buraczewska, B. STROPOWE PŁYTY TRÓJWARSTWOWE MODELU HOFFA.
- [316] Sadowska-Buraczewska, B., & Grzegorzczak-Frańczak, M. (2021). Sustainable recycling of high-strength concrete as an alternative to natural aggregates in building structures. *Sustainability*, 13(8), 4286.
- [317] Sadowska-Buraczewska, B., & Skrzypczak, I. (2019, February). Reinforced concrete beams made of high-performance recycled aggregate with use steel fibre. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 5, p. 052021). IOP Publishing.
- [318] Sadowska-Buraczewska, B., Barnat-Hunek, D., & Szafraniec, M. (2020). Influence of recycled high-performance aggregate on deformation and load-carrying capacity of reinforced concrete beams. *Materials*, 13(1), 186.
- [319] Sadowski, Ł., & Stefaniuk, D. (2018). The effect of surface treatment on the microstructure of the skin of concrete. *Applied Surface Science*, 427, 934-941.
- [320] Safan, M. A. (2012). Shear strength of concrete beams cast with self-compacting concrete containing different fillers and coarse aggregates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(7), 760-770.
- [321] Safiuddin, M. D., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2011). Effects of recycled concrete aggregate on the fresh properties of self-consolidating concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1023-1041.
- [322] Sagoe-Crentsil, K. K., Brown, T., & Taylor, A. H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and concrete research*, 31(5), 707-712.
- [323] Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022-1027.
- [324] Sainz-Aja, J. A., Carrascal, I. A., Polanco, J. A., Sosa, I., Thomas, C., Casado, J., & Diego, S. (2020). Determination of the optimum amount of superplasticizer additive for self-compacting concrete. *Applied Sciences*, 10(9), 3096.
- [325] Salem, R. M., Burdette, E. G., & Jackson, N. M. (2003). Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete. *Materials Journal*, 100(3), 216-221.
- [326] Salesa, Á., Pérez-Benedicto, J. Á., Esteban, L. M., Vicente-Vas, R., & Orna-Carmona, M. (2017). Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. *Construction and building materials*, 153, 364-373.
- [327] Salmikov, V.A.; Mikheeva, O.M. Analysis and Forecast of Russian Housing Stock Based on New Data Sources. *Stud. Russ. Econ. Dev.* 2019, 30, 442–450
- [328] Santos, S. A., Da Silva, P. R., & De Brito, J. (2017). Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry. *Materials*, 10(8), 904.
- [329] Santos, S., Da Silva, P. R., & De Brito, J. (2019). Self-compacting concrete with recycled aggregates—a literature review. *Journal of Building Engineering*, 22, 349-371.
- [330] Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540.
- [331] Sasanipour, H., Aslani, F., & Taherinezhad, J. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 227, 116598.
- [332] Scopus database <https://www.scopus.com/>
- [333] Scott, H. C. (2006). *Mitigating alkali silicate reaction in recycled concrete* (Doctoral dissertation, University of New Hampshire (Department of Civil Engineering)).

- [334] Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface science*, 12(4), 411-421.
- [335] Scrivener, K. L., Lothenbach, B., De Belie, N., Gruyaert, E., Skibsted, J., Snellings, R., & Vollpracht, A. (2015). TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs: State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs. *Materials and Structures*, 48(4), 835-862.
- [336] Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., & Press, C. R. C. (Eds.). (2016). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials* (Vol. 540). Boca Raton, FL, USA:: CRC press.
- [337] Sedran, T. D., De Larrard, F., Hourst, F., & Contamines, C. (2004). Mix design of self-compacting concrete (SCC). In *Production methods and workability of concrete* (pp. 451-462). CRC Press.
- [338] Sedran, T., & De Larrard, F. (1999, September). Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In *Proceedings 1st SCC Symp, CBI Sweden, RILEM PRO7* (pp. 321-332).
- [339] Serdar, M., Gabrijel, I., Schlicke, D., Staquet, S., & Azenha, M. (Eds.). (2020). *Advanced Techniques for Testing of Cement-Based Materials*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- [340] Set of devices for the production of regular aggregates] / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie ; wynalazca: Tomasz GAWENDA. — Int.Cl.: B02C 23/12^{(2006.01)}. — Polska. — Opis patentowy ; PL 233689 B1 ; Udziel. 2019-07-08 ; Opubl. 2019-11-29. — Zgłosz. nr P.408045 z dn. 2014-04-28.
- [341] Shaban, W. M., Elbaz, K., Yang, J., Thomas, B. S., Shen, X., Li, L., ... & Li, L. (2021). Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: Mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 276, 121940.
- [342] Shaban, W. M., Yang, J., Su, H., Liu, Q. F., Tsang, D. C., Wang, L., ... & Li, L. (2019). Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 216, 632-647.
- [343] Sharma, H., Sharma, S. K., Ashish, D. K., Adhikary, S. K., & Singh, G. (2023). Effect of various bio-deposition treatment techniques on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Journal of Building Engineering*, 66, 105868.
- [344] Shehata, M. H., Christidis, C., Mikhaiel, W., Rogers, C., & Lachemi, M. (2010). Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 40(4), 575-582.
- [345] Shemie, M. (1973). Bolted connections in large panel system buildings. *PCI Journal*, 18(1), 27-33.
- [346] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. *Journal of cleaner production*, 112, 466-472.
- [347] Shuvo, A. K., Sarker, P. K., & Shaikh, F. U. A. (2024). Efficacy of various accelerated carbonation techniques to improve recycled concrete aggregates: a comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 110257.
- [348] Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- [349] Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117629.
- [350] Silva, R. V., Neves, R., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 22-32.

- [351] Silva, Y. F., Robayo, R. A., Matthey, P. E., & Delvasto, S. (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639-644.
- [352] Singh, V. K., Banshal, S. K., Singhal, K., & Uddin, A. (2015). Scientometric mapping of research on 'Big Data'. *Scientometrics*, 105, 727-741.
- [353] Smith, F. L. (1958). Effect of aggregate quality on resistance of concrete to abrasion. In *Cement and Concrete*. ASTM International.
- [354] Sobotka, A., Sagan, J., & Radziejowska, A. (2019). The estimated quantities of building demolition waste. *Archives of Civil Engineering*, 49-63.
- [355] Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete research*, 34(7), 1199-1208.
- [356] Soni, N., & Shukla, D. K. (2021). Analytical study on mechanical properties of concrete containing crushed recycled coarse aggregate as an alternative of natural sand. *Construction and Building Materials*, 266, 120595.
- [357] Sood, H., Khitoliya, R. K., & Pathak, S. S. (2009). Incorporating European standards for testing self compacting concrete in Indian conditions. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 41.
- [358] Soroka, I., & Stern, N. (1976). Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement. *Cement and concrete research*, 6(3), 367-376.
- [359] Soutsos, M. N., Tang, K., & Millard, S. G. (2011). Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3131-3143.
- [360] Stawiski, B. (2012). The heterogeneity of mechanical properties of concrete in formed constructions horizontally. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(1), 90-94.
- [361] Stawiski, B., & Kania, T. (2019). Examining the distribution of strength across the thickness of reinforced concrete elements subject to sulphate corrosion using the ultrasonic method. *Materials*, 12(16), 2519.
- [362] Stempkowska, A., Gawenda, T., Naziemiec, Z., Adam Ostrowski, K., Saramak, D., & Surowiak, A. (2020). Impact of the geometrical parameters of dolomite coarse aggregate on the thermal and mechanic properties of preplaced aggregate concrete. *Materials*, 13(19), 4358.
- [363] Strzałkowski, P., & Kaźmierczak, U. (2021). Wear and fragmentation resistance of mineral aggregates—a review of micro-Deval and Los Angeles tests. *Materials*, 14(18), 5456.
- [364] Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and concrete research*, 31(12), 1799-1807.
- [365] Sun, C., Chen, Q., Xiao, J., & Liu, W. (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104930.
- [366] Sun, D., Wu, K., Shi, H., Zhang, L., & Zhang, L. (2018). Effect of interfacial transition zone on the transport of sulfate ions in concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 28-37.
- [367] Surya M., Rao V. L. K., Lakshmy P., Mechanical, durability, and time-dependent properties of recycled aggregate concrete with fly ash, *ACI Materials Journal* 112-5/2015, 653.
- [368] Szymańska, D., & Matczak, A. (2002). Urbanization in Poland: tendencies and transformation. *European Urban and Regional Studies*, 9(1), 39-46.
- [369] Śliwiński, J. (1999). *Beton zwykły: projektowanie i podstawowe właściwości*. Polski Cement.
- [370] Tabatabai, H. (2013). *Investigation of testing methods to determine long-term durability of Wisconsin aggregates*. Wisconsin Department of Transportation.

- [371] Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*, 35(6), 1195-1203.
- [372] Tam, V. W., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building materials*, 172, 272-292.
- [373] Tang, W. C., Ryan, P. C., Cui, H. Z., & Liao, W. (2016). Properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
- [374] Tang, X., Zhou, Y., Zhang, C., & Shi, J. (2013). Study on the heterogeneity of concrete and its failure behavior using the equivalent probabilistic model. In *Seismic Safety Evaluation of Concrete Dams* (pp. 541-570). Butterworth-Heinemann.
- [375] Tavakoli, M., & Soroushian, P. (1996). Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *Materials Journal*, 93(2), 178-181.
- [376] Techman, M., & Kaszyńska, M. Właściwości reologiczne ciężkich betonów samozagęszczalnych. DNI BETONU 2016
- [377] Teymouri, E., Norazimah Mohd Pauzi, N., Kwong Soon, W., Forouzan, M., & Salari, M. (2024). Effects of Polycarboxylate-Lignosulfonate Superplasticizer on the Engineering Properties and Cementitious Paste Thickness of Pervious Concrete. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 12(3), 61-84.
- [378] Thanoon, W. A., Peng, L. W., Kadir, M. R. A., Jaafar, M. S., & Salit, M. S. (2003, September). The Experiences of Malaysia and other countries in industrialised building system. In *Proceeding of international conference on industrialised building systems* (Vol. 10, pp. 255-261).
- [379] Thae, W., Iwanami, M., Nakayama, K., & Yodsudjai, W. (2024). Influence of acetic acid treatment on microstructure of interfacial transition zone and performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 417, 135355.
- [380] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejos, P., & De Juan, M. S. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 40, 1054-1065.
- [381] Tofiluk, A., Knyziak, P., & Krentowski, J. (2019, February). Revitalization of twentieth-century prefabricated housing estates as interdisciplinary issue. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 471, No. 11, p. 112096). IOP Publishing.
- [382] Tomaszewicz, D., Jablonska-Krysiewicz, A., & Gryniewicz, M. (2021). Pull-Out Tests and Numerical Simulations of Bonded Threaded Anchors in Concrete Blocks with Thermal Insulation Layer. In *Environmental Challenges in Civil Engineering* (pp. 45-61). Springer International Publishing.
- [383] Topçu, İ. B., & Elgün, V. B. (2004). Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. *Cement and concrete research*, 34(2), 275-281.
- [384] Trzcińska, M. (2021). Add, transform, and utilize. Possibilities of applying druot, lacaton, and vassal's modernization strategies and solutions in polish large-panel housing estates. *Land*, 10(12), 1308.
- [385] Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and concrete research*, 36(5), 943-950.
- [386] Tu, Y., Yu, H., Ma, H., Liu, J., Li, L., & Han, W. (2024). Long-term study on the mechanical properties of the ITZ in coral aggregate concrete and its impact on material durability. *Construction and Building Materials*, 449, 138255.
- [387] Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2014). Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991.
- [388] Tychy mapa miejska <http://www.abc.tychy.pl/en/mapa>

- [389] Urbaniak, E., & Jędrzejewska, A. (2022). Rozwój właściwości betonu w ujęciu draftu prEN 1992-1-1: 2021. *Przegląd Budowlany*, 93(11-12), 58-68.
- [390] Uysal, M. (2012). The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. *Construction and building materials*, 37, 533-540.
- [391] Vahidi, A., Mostaani, A., Gebremariam, A. T., Di Maio, F., & Rem, P. (2024). Feasibility of utilizing recycled coarse aggregates in commercial concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 474, 143578.
- [392] Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, 84(2), 523-538.
- [393] Vieira, E. S., & Gomes, J. A. (2009). A comparison of Scopus and Web of Science for a typical university. *Scientometrics*, 81, 587-600.
- [394] Vintimilla, C., & Etxeberria, M. (2023). Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-Type A used in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 380, 131273.
- [395] Vosviewer software <https://www.vosviewer.com/>
- [396] Wang, J., Zhang, J., Cao, D., Dang, H., & Ding, B. (2020). Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 234, 117366.
- [397] Wang, R., Zhang, Q., & Li, Y. (2022). Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze-thaw cycles and other actions: A review. *Construction and Building Materials*, 319, 126045.
- [398] Wang, S., Zhang, G., Gunasekara, C., Law, D., Tan, Y., & Sun, W. (2025). A Scientific Review of Recycling Practices and Challenges for Autoclaved Aerated Concrete in Sustainable Construction. *Buildings*, 15(14), 2453.
- [399] Wang, Y., Wu, L., Wang, Y., Li, Q., & Xiao, Z. (2018). Prediction model of long-term chloride diffusion into plain concrete considering the effect of the heterogeneity of materials exposed to marine tidal zone. *Construction and Building Materials*, 159, 297-315.
- [400] Wang, Y., Zeng, D., Ueda, T., Fan, Y., Li, C., & Li, J. (2021). Beneficial effect of nanomaterials on the interfacial transition zone (ITZ) of non-dispersible underwater concrete. *Construction and Building Materials*, 293, 123472.
- [401] Wenjian, W., Jin, W., Zhe, W., Guanzheng, W., & Anyi, Y. (2016). Chloride diffusion coefficient of recycled aggregate concrete under compressive loading. *Materials and Structures*, 49(11), 4729-4736.
- [402] Wong, H. S., Head, M. K., & Buenfeld, N. R. (2006). Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images. *Cement and concrete research*, 36(6), 1083-1090.
- [403] World Housing Encyclopedia <https://world-housing.net/>
- [404] Wu, C. R., Zhu, Y. G., Zhang, X. T., & Kou, S. C. (2018). Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. *Cement and Concrete Composites*, 94, 248-254.
- [405] Wu, J. U. N., Ding, Y. A. H. O. N. G., Xu, P., Zhang, M., Guo, M. E. N. G., & Guo, S. (2022). Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*, 66(1), 113-127.
- [406] Wu, K. R., Chen, B., Yao, W., & Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and concrete research*, 31(10), 1421-1425.
- [407] Wu, K., Luo, S., Zheng, J., Yan, J., & Xiao, J. (2022). Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104402.

- [408] Xia, G., & Zhao, Y. (2024). Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03262.
- [409] Xiao, J., Lei, B., & Zhang, C. (2012). On carbonation behavior of recycled aggregate concrete. *Science China Technological Sciences*, 55(9), 2609-2616.
- [410] Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and concrete research*, 35(6), 1187-1194.
- [411] Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D. A., & Shah, S. P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 37, 276-292.
- [412] Xiao, J., Wang, C., Ding, T., & Akbarnezhad, A. (2018). A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 199, 868-881.
- [413] Xiao, M., Ju, F., & He, Z. Q. (2020). Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120810.
- [414] Xu, Y., Zeng, J., Chen, W., Jin, R., Li, B., & Pan, Z. (2018). A holistic review of cement composites reinforced with graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 171, 291-302.
- [415] Xu, Z., Bai, Z., Wu, J., Long, H., Deng, H., Chen, Z., ... & Fan, X. (2022). Microstructural characteristics and nano-modification of interfacial transition zone in concrete: A review. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 2078-2100.
- [416] Xuan, D. X., Shui, Z. H., & Wu, S. P. (2009). Influence of silica fume on the interfacial bond between aggregate and matrix in near-surface layer of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2631-2635.
- [417] Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. S. (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 84, 214-221.
- [418] Yagust, V. I., & Yankelevsky, D. Z. (2007). On potential progressive failure of large-panel buildings. *Journal of Structural Engineering*, 133(11), 1591-1603.
- [419] Yang, J. H., & Fang, H. Y. (2019). Research into different methods for measuring the particle-size distribution of aggregates: An experimental comparison. *Construction and Building Materials*, 221, 469-478.
- [420] Yang, K. H., Chung, H. S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties.
- [421] Yang, S., & Lee, H. (2017). Mechanical properties of recycled aggregate concrete proportioned with modified equivalent mortar volume method for paving applications. *Construction and Building Materials*, 136, 9-17.
- [422] Yang, X., Liu, Y., Liang, J., Meng, Y., Rong, H., Li, D., ... & Liu, Y. (2023). Straightening methods for RCA and RAC—A review. *Cement and Concrete Composites*, 141, 105145.
- [423] Yaqub, M., & Bukhari, I. (2006, August). Effect of size of coarse aggregate on compressive strength of high strength concrete. In *31st Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapur*.
- [424] Yim, H. J., Kim, J. H., Kwak, H. G., & Kim, J. K. (2013). Evaluation of internal bleeding in concrete using a self-weight bleeding test. *Cement and Concrete Research*, 53, 18-24.
- [425] Yu, Y., & Lin, L. (2020). Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 264, 120620.
- [426] Yu, Y., Zhao, X., Xie, T., & Wang, X. (2022). Eco-, economic-and mechanical-efficiencies of using precast rejects as coarse aggregates in self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01591.

- [427] Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111, 15-21.
- [428] Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., & Wirquin, E. (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1927-1932.
- [429] Zegardło, B., Szeląg, M., & Ogrodnik, P. (2016). Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes–The method of production and the interfacial transition zone. *Construction and Building Materials*, 122, 736-742.
- [430] Zhang, S., Li, R., & Pei, J. (2019). Evaluation methods and indexes of morphological characteristics of coarse aggregates for road materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(3), 256-272.
- [431] Zhang, W., Wang, S., Zhao, P., Lu, L., & Cheng, X. (2019). Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 203, 601-607.
- [432] Zhang, X., Li, Z., Zhang, Z., & Li, Y. (2018). Discrete element analysis of the rheological characteristics of self-compacting concrete with irregularly shaped aggregate. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 1-17.
- [433] Zhao, Y., Duan, Y., Zhu, L., Wang, Y., & Jin, Z. (2021). Characterization of coarse aggregate morphology and its effect on rheological and mechanical properties of fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 286, 122940.
- [434] Zieliński, A., & Kaszyńska, M. (2016). Analiza procesu pękania betonów samozagęszczalnych w wyniku oddziaływań skurczowych. *Monografie Technologii Betonu*, 1, 443-465.
- [435] Zitt, M., & Bassecouard, E. (2008). Challenges for scientometric indicators: data demining, knowledge-flow measurements and diversity issues. *Ethics in science and environmental politics*, 8(1), 49-60.
- [436] Żak, A. M., Wieczorek, A., Chowaniec, A., & Sadowski, Ł. (2023). Segmentation of pores in cementitious materials based on backscattered electron measurements: A new proposal of regression-based approach for threshold estimation. *Construction and Building Materials*, 368, 130419.
- [437] Żak, A. M., Wieczorek, A., Chowaniec, A., & Sadowski, Ł. (2023). Segmentation of pores within concrete-epoxy interface using synchronous chemical composition mapping and backscattered electron imaging. *Measurement*, 206, 112334.

STRESZCZENIE

rozprawy doktorskiej mgr inż. Seweryna Malazdrewicz

pt. „Eksperymentalna ocena podstawowych właściwości betonu samozagęszczającego się wykonanego z kruszywem grubym pochodzącym z recyklingu systemowych budynków wielkopłytowych”

Rozprawa doktorska dotyczy oceny możliwości ponownego wykorzystania betonu pochodzącego z rozbiórki budynków wielkopłytowych jako kruszywa grubego w betonie samozagęszczającym się (SCC), ze szczególnym uwzględnieniem właściwości materiałowych, mikrostruktury oraz aspektów środowiskowych. Budynki wznoszone w technologii wielkopłytovej w latach 1945–1990 stanowią istotną część zasobów mieszkaniowych Europy Środkowo-Wschodniej. W perspektywie ich stopniowej modernizacji lub rozbiórki pojawia się wyzwanie związane z racjonalnym zagospodarowaniem powstających odpadów betonowych.

Celem pracy było określenie wpływu kruszywa grubego z recyklingu, pozyskanego z prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych wielkiej płyty, na właściwości mieszanek SCC w stanie świeżym i stwardniałym oraz na ich mikrostrukturę, ze szczególnym uwzględnieniem strefy przejściowej kruszywo–zaczyn cementowy (ITZ). W ramach badań opracowano serie mieszanek SCC, w których kruszywo naturalne zastępowano kruszywem z recyklingu w ilości 10%, 20% oraz 30%. Analizie poddano m.in. właściwości reologiczne mieszanek, podatność na odsączanie wody, czas wiązania, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, odporność na ścieranie oraz jednorodność betonu w przekroju.

Istotnym elementem pracy była szczegółowa analiza mikrostruktury betonu z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz analizy obrazu. Badania obejmowały identyfikację faz hydratacyjnych, ocenę porowatości oraz charakterystykę strefy ITZ w sąsiedztwie kruszywa naturalnego i kruszywa z recyklingu. Wykazano, że kruszywo pochodzące z prefabrykowanych elementów wielkopłytowych, mimo obecności starej zaprawy, może tworzyć relatywnie zwartą i dobrze uwodnioną strefę przejściową, co korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne betonu w porównaniu z typowymi kruszywami z odpadów budowlanych.

Uzupełnieniem badań była ilościowa analiza zależności pomiędzy właściwościami kruszywa z recyklingu (nasiąkliwością, porowatością, zawartością starej zaprawy oraz współczynnikiem kształtu ziaren) a wybranymi parametrami betonu. Uzyskane wyniki potwierdziły istotny wpływ cech materiału wejściowego na właściwości mechaniczne i fizyczne SCC.

Przeprowadzone badania wskazują, że beton pochodzący z rozbiórki budynków wielkopłytowych może stanowić wartościowe źródło kruszywa grubego do zastosowań w betonie samozagęszczającym się. Praca wpisuje się w aktualne kierunki badań związane z gospodarką o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonym rozwojem w budownictwie.

SUMMARY

of MSc. Seweryn Malazdrewicz doctoral dissertation

entitled „ Experimental evaluation of the fundamental properties of self-compacting concrete with coarse aggregate from recycled large-panel system buildings"

This doctoral dissertation investigates the potential reuse of concrete obtained from the demolition of large panel system (LPS) buildings as recycled coarse aggregate in self-compacting concrete (SCC), with particular emphasis on material performance, microstructural characteristics, and sustainability aspects. Buildings constructed using large panel technology between 1945 and 1990 constitute a significant part of the housing stock in Central and Eastern Europe. Their progressive demolition or refurbishment raises important challenges related to the management and reuse of concrete waste.

The main objective of the study was to evaluate the influence of recycled coarse aggregate derived from prefabricated LPS structural elements on the fresh and hardened properties of SCC, as well as on its microstructure, with special attention given to the interfacial transition zone (ITZ). Experimental research was conducted on SCC mixtures in which natural coarse aggregate was replaced with recycled aggregate at levels of 10%, 20%, and 30%. The investigated properties included rheological behaviour, bleeding, setting time, compressive strength, elastic modulus, abrasion resistance, and cross-sectional homogeneity.

A detailed microstructural analysis was performed using scanning electron microscopy (SEM) combined with image analysis techniques. The investigations focused on phase composition, porosity distribution, and the characteristics of the ITZ in concretes containing natural and recycled aggregates. The results demonstrated that recycled aggregate obtained from high-quality prefabricated panels, despite the presence of adhered old mortar, can form a relatively dense and well-hydrated ITZ. This distinguishes it favourably from conventional recycled aggregates originating from mixed construction and demolition waste.

In addition, a quantitative analysis of the relationships between recycled aggregate properties—such as water absorption, porosity, adhered mortar content, and particle shape factor—and selected concrete parameters was carried out. The findings confirmed that the quality and characteristics of the recycled aggregate play a crucial role in determining the mechanical and physical performance of SCC.

The results indicate that concrete from demolished large panel system buildings can serve as a valuable source of recycled coarse aggregate for self-compacting concrete applications. The dissertation contributes to the development of sustainable construction materials and supports the principles of circular economy and resource efficiency in the construction sector.