

WPŁYW TEMPERATURY PRAŻENIA GRUZU BETONOWEGO NA JAKOŚĆ KRUSZYWA RECYKLINGOWEGO I AKTYWNOŚĆ PUCOLANOWĄ RECYKLINGOWEJ ZAPRAWY CEMENTOWEJ

Edyta Pawluczuk



Politechnika
Białostocka

Edyta Pawluczuk

**WPŁYW TEMPERATURY
PRAŻENIA GRUZU BETONOWEGO
NA JAKOŚĆ KRUSZYWA RECYKLINGOWEGO
I AKTYWNOŚĆ PUCOLANOWĄ
RECYKLINGOWEJ ZAPRAWY CEMENTOWEJ**



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ
BIAŁYSTOK 2024

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski
dr hab. inż. Agnieszka Ślosarczyk, prof. PP

Redaktor naukowy dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport:
prof. dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska

Korekta językowa:
Edyta Chrzanowska

Skład, grafika i okładka:
Marcin Dominów

Zdjęcie na okładce:
b0red: <https://pixabay.com/pl/photos/p%C4%99ka%C4%87-bet%C3%B3n-przemys%C5%82owy-grunge-t%C5%82o-2245773/>

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2024

ISBN 978-83-68077-01-8
ISBN 978-83-68077-02-5 (e-Book)
DOI: 10.24427/978-83-68077-02-5



Publikacja jest udostępniona na licencji
Creative Commons Uznanie autorstwa-Użycie niekomercyjne-Bez utworów zależnych 4.0
(CC BY-NC-ND 4.0).

Pełną treść licencji udostępniono na stronie
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pl.
Publikacja jest dostępna w Internecie na stronie Oficyny Wydawniczej PB.

Druk: Print Profit sp. z o.o.

Oficina Wydawnicza Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: oficina.wydawnicza@pb.edu.pl
www.pb.edu.pl

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
Wprowadzenie	11
1. Stan wiedzy w zakresie recyklingu gruzu betonowego.....	13
1.1. Recykling gruzu betonowego w aspekcie środowiskowym.....	13
1.1.1. Odpady z budowy i rozbiórki w ujęciu ilościowym	13
1.1.2. Stan recyklingu odpadów budowlanych.....	16
1.1.3. Ograniczenia w recyklingu odpadów budowlanych	17
1.1.4. Zrównoważona gospodarka kruszywami naturalnymi	19
1.1.5. Ograniczenia emisji dwutlenku węgla w przemyśle betonowym i cementowym	21
1.1.6. Recykling odpadów betonowych w świetle emisji gazów cieplarnianych	23
1.2. Produkcja i właściwości kruszywa z recyklingu	24
1.2.1. Produkcja kruszywa z recyklingu.....	24
1.2.2. Właściwości kruszyw z recyklingu betonu.....	27
1.2.3. Klasyfikacja kruszywa z recyklingu.....	30
1.3. Zastosowanie kruszywa z recyklingu i odpadowej frakcji drobnej w kompozytach cementowych	33
1.3.1. Wpływ kruszywa grubego z recyklingu na właściwości kompozytów cementowych.....	33
1.3.2. Wpływ drobnej frakcji z recyklingu na właściwości kompozytów cementowych.....	37
1.4. Nowoczesne metody uszlachetniania kruszywa z recyklingu.....	40
1.5. Charakterystyka strefy kontaktowej w betonie	49
1.5.1. Znaczenie strefy kontaktowej.....	49
1.5.2. Budowa strefy przejściowej w betonie cementowym – efekt ściany	56
1.5.3. Charakterystyka strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu	60
1.6. Przemiany fazowe zachodzące w betonie pod wpływem wysokiej	

temperatury	61
1.7. Podsumowanie stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki	65
2. Hipoteza badawcza, cele i program badań eksperymentalnych	67
2.1. Hipoteza i cele badań eksperymentalnych	67
2.2. Program badań eksperymentalnych.....	68
3. Badania eksperymentalne – faza poznawcza	71
3.1. Wpływ temperatury na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu.....	71
3.1.1. Cel badań	71
3.1.2. Metodyka badań	71
3.1.3. Wyniki badań właściwości fizyczno-mechanicznych betonów i ich analiza	73
3.1.4. Charakterystyka makroskopowa i analiza termiczna	76
3.1.5. Podsumowanie wyników badań	84
3.2. Przemiany fazowe zachodzące w zaczynie cementowym w wyniku wyrzewania	85
3.2.1. Cel badań	85
3.2.2. Metodyka badań	85
3.2.3. Właściwości fizyczne wyrzewanego zaczynu cementowego	86
3.2.4. Analiza termiczna wyrzewanego zaczynu cementowego.....	90
3.2.5. Analiza dyfrakcyjna wyrzewanego zaczynu cementowego.....	98
3.2.6. Analiza chemiczna wyrzewanego zaczynu cementowego.....	100
3.2.7. Podsumowanie wyników badań	102
3.3. Wpływ wysokiej temperatury na właściwości kruszyw naturalnych	103
3.3.1. Cel badań	103
3.3.2. Metodyka badań	103
3.3.3. Właściwości fizyczno-mechaniczne kruszyw naturalnych po prażeniu . 104	
3.3.4. Charakterystyka opisowa kruszyw naturalnych po prażeniu	105
3.3.5. Podsumowanie wyników badań	107
3.4. Wpływ temperatury i metody obróbki na właściwości kruszyw z recyklingu . 108	
3.4.1. Cel badań	108
3.4.2. Metodyka badań	108
3.4.3. Właściwości kruszyw z recyklingu po prażeniu	110
3.4.4. Charakterystyka opisowa kruszyw z recyklingu po prażeniu.....	112

3.4.5. Identyfikacja faz na powierzchni kruszywa z recyklingu po prażeniu	115
3.4.6. Podsumowanie wyników badań	122
3.5. Ocena zdolności wyprążonego betonu cementowego do regeneracji	122
3.5.1. Cel badań	122
3.5.2. Metodyka badań	122
3.5.3. Wpływ ponownej pielęgnacji na wytrzymałość wygrzewanego betonu na ściskanie	123
3.5.4. Wpływ ponownej pielęgnacji na kształtowanie powierzchni wygrzewanego kruszywa z recyklingu	125
3.5.5. Wpływ ponownej pielęgnacji na kształtowanie faz w zaczynie cementowym	128
3.5.6. Podsumowanie wyników badań	132
3.6. Mechanizmy kształtowania strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu.....	132
3.6.1. Schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu po obróbce termiczno-mechanicznej.....	132
3.6.2. Mechanizmy kształtowania strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu	136
3.6.3. Podsumowanie wyników badań	139
3.7. Parametry procesu przetwarzania gruzu betonowego	140
3.7.1. Schemat procesu obróbki gruzu betonowego	140
3.7.2. Podsumowanie wyników badań	142
4. Właściwości kompozytów cementowych z materiałami z recyklingu – faza weryfikacji.....	143
4.1. Zastosowanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości do betonów cementowych	143
4.1.1. Cel badań	143
4.1.2. Metodyka badań	143
4.1.3. Wyniki badań i ich analiza	150
4.1.4. Podsumowanie wyników badań	172
4.2. Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant I	173
4.2.1. Cel badań	173
4.2.2. Metodyka badań	173
4.2.3. Wyniki badań i ich analiza	176
4.2.4. Podsumowanie wyników badań	179

4.3. Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant II.....	179
4.3.1. Cel badań	179
4.3.2. Metodyka badań	180
4.3.3. Wyniki badań i ich analiza	183
4.3.4. Podsumowanie wyników badań	187
Podsumowanie i wnioski	189
Bibliografia	193
Normy i wytyczne.....	213
Spis tabel.....	215
Spis rysunków	219
Streszczenie	225
Summary	227

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- A_0 – czynnik przedwykładniczy w równaniu Arrheniusa (–)
- b_{ij} – współczynniki równania regresji dla zmiennych x_i, x_j
- $C\&DW$ – odpady pochodzące z budowy i rozbiórki obiektów budowlanych (*Construction and Demolition Waste*)
- $CaCO_3$ – węgiel wapnia, kalcyt
- CaO – tlenek wapnia, wapno
- $Ca(OH)_2$ – wodorotlenek wapnia, portlandyt
- CO_2 – dwutlenek węgla
- $C-S-H$ – uwodniony krzemian wapnia, faza C-S-H
- \bar{C} – ubytek masy na krzywej TG spowodowany rozkładem $CaCO_3$, %
- DFR – drobna frakcja z recyklingu
- D_{obj} – gęstość objętościowa kompozytu cementowego, g/cm^3
- E – moduł Younga, GPa
- E_a – energia aktywacji odwodnienia C-S-H i portlandytu, kJ/mol
- ε – odkształcenie (–)
- f_{cm} – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości betonu na ściskanie, MPa
- $f_{cm,(t)}$ – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury (t), MPa
- $f_{cm,28(20^\circ C)}$ – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości na ściskanie betonu niepoddanego działaniu wysokiej temperatury (20°C), MPa
- $f_{cm,28,pr.}$ – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C po 28 dniach dojrzewania, MPa
- $f_{cm,reg.}$ – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C po 28-dniowej regeneracji w wodzie, MPa
- f_{fkm} – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości betonu na zginanie, MPa
- (Δf_{cm}) – przyrost wytrzymałości obliczony jako wpływ regeneracji betonu na wytrzymałość na ściskanie betonu poddanego wcześniejszemu prażeniu, %

- $G_{kryt(\alpha, N, n-1)}$ – krytyczna wartość kryterium Cochran–Coxa
- G_{obj} – gęstość objętościowa kompozytu geopolimerowego, g/cm^3
- H_0 – hipoteza zerowa
- H_1 – hipoteza alternatywna
- H_1 – woda zawarta w produktach hydratacji w zakresie temperatur 20–480°C, %
- H_{CH} – woda związana w wodorotlenku wapnia, %
- ITZ – strefa przejściowa w betonie (*Interfacial Transition Zone*)
- K – stała szybkości w równaniu Arrheniusa (–)
- k – liczba zmiennych niezależnych
- KN – kruszywo naturalne
- KP – kapilarne podciąganie betonu (przyrostem masy próbki), %
- KR – kruszywo z recyklingu
- m_1 – masa kruszywa z recyklingu przed obróbką, g
- m_2 – masa kruszywa z recyklingu po obróbkę, g
- m_z – zawartość zaprawy cementowej (0/4 mm) w kruszywie z recyklingu, % masy
- M_z – masa złuszczeń, kg/m^2
- n – liczba pomiarów powtórnych w próbie
- n_0 – liczba powtórzeń pomiarów w centrum planu
- N_p – liczba prób w eksperymencie
- N – nasiąkliwość betonu, % masy
- P – całkowita porowatość betonu, %
- r – stała gazowa w równaniu Arrheniusa (–)
- R – współczynnik korelacji (–)
- R_c – wytrzymałość zaprawy cementowej na ściskanie, MPa
- R_f – wytrzymałość zaprawy cementowej na zginanie, MPa
- ρ_a – gęstość objętościowa kruszywa, g/cm^3
- ρ_{rd} – gęstość objętościowa kruszywa w stanie suchym, g/cm^3
- ρ_{ssd} – gęstość objętościowa kruszywa w stanie nasyconym powierzchniowo suchym, g/cm^3
- SE_e – błąd standardowy estymacji
- $S(x)$ – odchylenie standardowe
- S_i^2 – wariancja w i-tej próbie
- S_{max}^2 – maksymalna wariancja z N prób
- SSD – stan nasycony powierzchniowo suchy
- σ – naprężenie, MPa
- t – temperatura wygrzewania, °C
- T – temperatura absolutna, °C

- WA – wskaźnik aktywności, %
- w/c – współczynnik wodno-cementowy
- WP – przepuszczalność wody przez beton, mm
- W_r – wskaźnik rozkruszenia, %
- y – wartość zmiennej
- y_i – i-ta obserwacja zmiennej y
- y_0 – początkowa zawartość C-S-H w zaczynie cementowym, %
- \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej y
- \hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej y
- Δy – zawartość C-S-H po wygrzewaniu, %

Wprowadzenie

Rosnąca sukcesywnie ilość odpadów budowlanych spowodowała, że obecnie ich recykling stał się ważnym problemem społecznym, ekonomicznym i środowiskowym na świecie. Ponadto wzrost globalnej działalności budowlanej zmusza do poszukiwania zrównoważonych zasobów, które zastąpią naturalne materiały używane do produkcji betonu. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat opublikowano wiele wyników badań dotyczących wykorzystania kruszywa pochodzącego z recyklingu odpadów budowlanych i rozbiórkowych do produkcji kompozytów cementowych. Ogólnie rzecz biorąc, ilość obecnej zaprawy cementowej w kruszywie z recyklingu i jakość betonu, z którego ono pochodzi, mają znaczący wpływ na właściwości betonu przygotowanego z udziałem takiego kruszywa. Z tego też względu analizowane są różne metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu bazujące na usuwaniu zaprawy cementowej za pomocą oddziaływania mechanicznego, termicznego, chemicznego lub ich kombinacji. Znane są również działania polegające na zabezpieczeniu powierzchni kruszywa poprzez jej impregnację. Metody te koncentrują się głównie na wytworzeniu grubego kruszywa z recyklingu dobrej jakości, nie jest w nich brana pod uwagę frakcja drobna, która powstaje w procesie jego produkcji i jak dotąd stanowi kłopotliwy do zagospodarowania odpad.

Z punktu widzenia tematyki niniejszej pracy konieczne jest kompleksowe podejście do recyklingu gruzu betonowego, w którym nie będzie materiałów odpadowych, ale wyłącznie wartościowe produkty do ponownego zastosowania. Jak powszechnie wiadomo, strefa przejściowa pomiędzy ziarnem kruszywa a matrycą cementową odgrywa istotną rolę w procesie kształtowania właściwości betonu. Wychodząc z tego założenia, uszkodzenie lub zniszczenie tej strefy prowadzi w konsekwencji do dezintegracji betonu, co ma zasadnicze znaczenie w procesie recyklingu gruzu betonowego prowadzącego do wytworzenia zarówno kruszywa wysokiej jakości, jak i frakcji drobnej pochodzącej z odseparowanej zaprawy, które można będzie wykorzystać w kompozytach cementowych. W tym celu istotne są identyfikacja produktów hydratacji cementu znajdujących się w strefie kontaktowej, wyszczególnienie wiodących produktów decydujących o trwałości strefy oraz ustalenie temperatury, w której następuje ich osłabienie wywołane dehydratacją.

W pracy za najkorzystniejszą metodę destrukcji gruzu betonowego, rozumianą jako utratę integralności kruszywa i zaprawy cementowej bez szkodliwego wpływu na samo ziarno, przyjęto jego wygrzewanie w wysokiej temperaturze poprzez analogię do niszczenia betonu w warunkach pożaru. W efekcie stosownej obróbki gruzu

betonowego możliwe będzie uzyskanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości do stosowania w betonie oraz frakcji drobnej, która w wyniku zmian fizycznych i chemicznych wywołanych wygrzewaniem będzie mogła stanowić częściowy zamiennik spoiwa w kompozytach cementowych. Głównie tym zagadnieniom poświęcona jest niniejsza monografia.

1. Stan wiedzy w zakresie recyklingu gruzu betonowego

1.1. Recykling gruzu betonowego w aspekcie środowiskowym

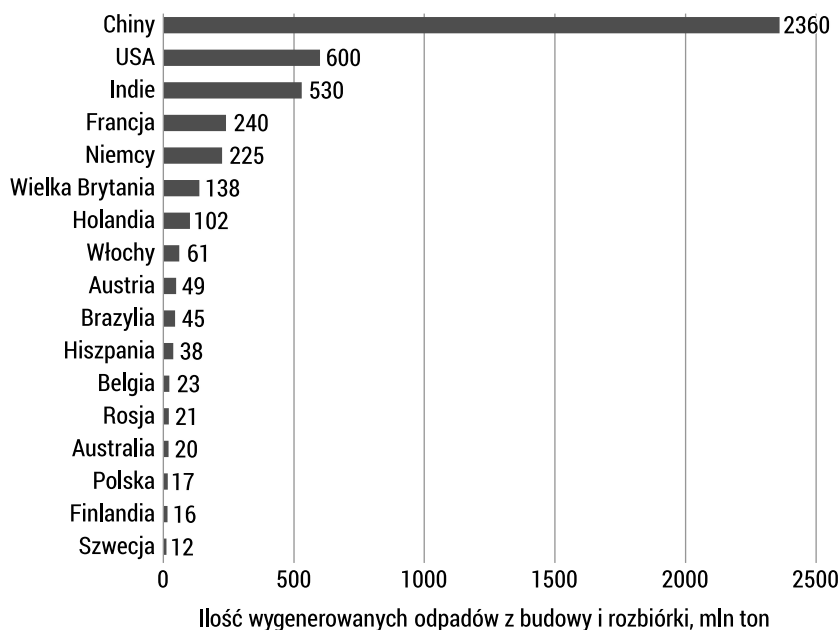
1.1.1. Odpady z budowy i rozbiórki w ujęciu ilościowym

Beton dzięki swoim niezwyklej własnościom jest jednym z najbardziej cenionych budulców, a jego roczne światowe zużycie szacuje się na 10 miliardów ton [153]. Dobre właściwości reologiczne mieszanki betonowej pozwalają na łatwość formowania dowolnych kształtów. Beton stanowi podstawę najróżniejszych obiektów budowlanych, umożliwia kształtowanie cech zależnie od potrzeb i zachowuje zaprojektowane właściwości przez długi okres użytkowania [164]. Jednak jego produkcja z jednej strony pociąga za sobą eksploatację zasobów naturalnych w postaci kruszywa i wody, a z drugiej – produkcja cementu jako nieodzownego składnika betonu generuje około 8–10% globalnej emisji dwutlenku węgla [64, 188] i niewątpliwie w przyszłości ilość ta będzie stale wzrastać. Sukcesywnie rosnąca produkcja betonu generuje również ogromne ilości odpadów podczas budowy i rozbiórki po zakończonym cyklu życia obiektów [95]. Na rys. 1.1 przedstawiono ilości odpadów budowlanych wytworzonych przez wybrane kraje świata w 2018 roku.

Odpady budowlane są nieuniknionym produktem ubocznym działalności społeczeństw uprzemysłowionych. Tylko w 2018 roku Chiny wyprodukowały ich około 2,36 miliarda ton, a Stany Zjednoczone i Indie odpowiednio 600 milionów ton i 530 milionów ton. Unia Europejska również w znacznym stopniu przyczyniła się do wzrostu ilości odpadów z budowy i rozbiórki – tylko Francja i Niemcy wytworzyły łącznie 465 milionów ton, plasując się w czołówce krajów europejskich (rys. 1.1). Szacuje się, że około 36% tego typu odpadów trafia na składowiska bez jakiegokolwiek przetwarzania, co prowadzi do zanieczyszczenia gleby, powietrza i wód gruntowych [11, 94].

Odpady z budowy, remontów i demontażu obiektów budowlanych oraz infrastruktury drogowej (włączając glebę i ziemię z terenów zanieczyszczonych) stanowią grupę 17 według katalogu odpadów [198]. Reprezentują one największy pod względem wielkości strumień odpadów w UE, stanowiący ponad jedną trzecią (35,9%) wszystkich wytwarzanych odpadów [57]. W 2020 roku polski sektor budowlany wygenerował ich 7,35 miliona

ton, przy czym tylko 64% poddano odzyskowi we własnym zakresie przez wytwórcę lub przekazano innym odbiorcom do procesów odzysku [69]. Odpady pochodzące z budowy są mniej zanieczyszczone niż te z rozbiórki, w związku z czym mają one większy potencjał odzysku, ale ich udział jest zdecydowanie mniejszy. Na rys. 1.2 przedstawiono przykładowy skład odpadów pochodzących z budowy i rozbiórki w Europie.

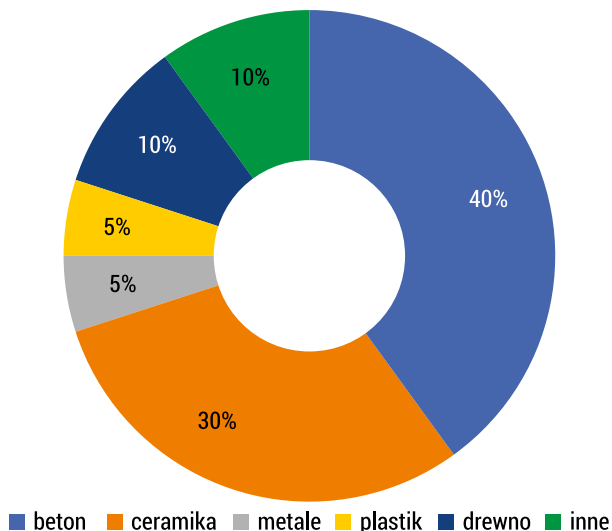


RYS. 1.1. Ilość odpadów budowlanych z budowy i rozbiórki generowana przez wybrane kraje w 2018 roku (dane dla Indii i Rosji pochodzą z 2016 roku, a dla Brazylii i Australii z 2017 roku)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [67, 193, 247].

Jak wynika z rys. 1.2, udział gruzu betonowego w odpadach budowlanych w Europie jest największy i stanowi około 40%, ale występują w nich również ceramika, metale, szkło, drewno, papier i inne. Skład odpadów z budowy i rozbiórki różni się zasadniczo w zależności od regionu świata. Na przykład w Stanach Zjednoczonych udział betonu wynosi 70%, w Chinach 60%, a w Indiach już tylko 23%, co wynika głównie z preferowanych technologii wznoszenia obiektów [11, 52, 241, 263]. Zależy to również od uziarnienia odpadów budowlanych, przy czym we frakcjach drobnych 0/5 mm wynosi on 35%, a w grubych 5/15 mm wzrasta do 45% [37, 202]. Zależność tę potwierdzili również inni badacze [75]. Tradycyjne gromadzenie odpadów na składowiskach nie jest już akceptowalne, zwłaszcza w krajach takich jak Japonia, gdzie szacuje się, że pozostała do wykorzystania pojemność tego typu terenów wystarczy jeszcze na kilka lub kilkanaście lat [97]. W połączeniu z rosnącym niedoborem naturalnego kruszywa presja wywierana na japoński przemysł budowlany, aby znalazł rozwiązania prowadzące do zastąpienia kruszyw naturalnych tymi pochodzącymi z recyklingu betonu,

jest szczególnie silna. W Europie, gdzie brak naturalnego kruszywa nie jest jeszcze aż tak dotkliwy, zdecydowana większość gruzu z budowy i rozbiórki jest angażowana głównie do budowy podłoża drogowego [52].



RYS. 1.2. Skład odpadów budowlanych w Europie

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [168].

Z danych Głównego Urzędu Statystycznego [70] wynika, że w ciągu ostatniej dekady zaobserwowano zredukowanie powierzchni składowisk w Polsce o około 40%, co byłoby zjawiskiem obiecującym, gdyby nie fakt, że na koniec 2021 roku jednocześnie odnotowano istnienie 2246 dzikich wysypisk. Z kolei ilość odpadów przemysłowych zgromadzonych na składowiskach do 2021 roku wyniosła 47 milionów ton i zajmowały one łączną powierzchnię 8 tysięcy hektarów. Ze względu na to, że powierzchnia przeznaczona na składowanie odpadów jest ograniczona, a zapotrzebowanie na kruszywo stale rośnie, wszelkie sposoby wykorzystania odpadów z budowy i rozbiórki zyskują na znaczeniu. Odzyskane z nich materiały mogą być wykorzystywane jako surowiec do wytwarzania produktów pochodnych, co zaproponowano w tabeli 1.1.

Jednak konieczne są szeroko zakrojone badania, zmiany w ustawodawstwie, ale także w świadomości społecznej, aby w sposób zrównoważony wykorzystywać materiały odpadowe. Od kilku lat Parlament Europejski intensywnie pracuje nad przepisami służącymi przejściu od gospodarki liniowej do gospodarki obiegowej. W marcu 2020 roku Komisja Europejska przedstawiła plan działania dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym, koncentrujący się na zapobieganiu powstawania odpadów i gospodarowaniu nimi [108]. W praktyce oznacza to ograniczenie odpadów do minimum. Kiedy cykl życia produktu dobiega końca, surowce i odpady, które z niego pochodzą, powinny pozostać w obiegu, między innymi dzięki recyklingowi, tworząc w ten sposób dodatkową wartość [42, 106].

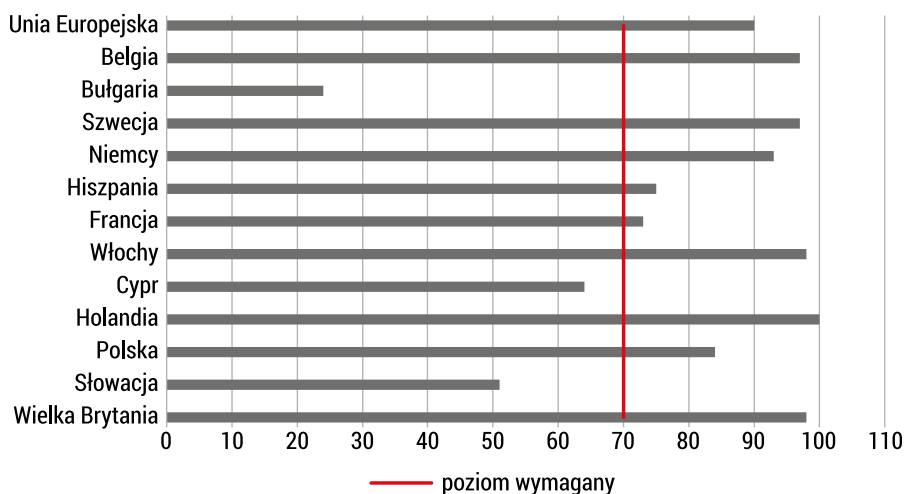
TABELA 1.1. Przykłady zastosowania materiałów z budowy i rozbiórki

Odzyskany materiał	Możliwe zastosowanie
1	2
Drewno z odzysku	surowiec do produkcji elementów pochodnych z drewna
Gont asfaltowy	mieszanka asfaltowa
Płyty gipsowo-kartonowe	nowe płyty gipsowo-kartonowe lub surowiec do produkcji cementu portlandzkiego
Metale	produkty z prekursorów metali (na przykład sztaby)
Beton z budowy i rozbiórki	kruszywo do produkcji mieszanek betonowych i asfaltowych
Asfalt	mieszanki mineralno-asfaltowe

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [52].

1.1.2. Stan recyklingu odpadów budowlanych

Zgodnie z zapisami dyrektywy Parlamentu Europejskiego do 2020 roku poziom ponownego wykorzystania, recyklingu i innych sposobów odzyskiwania odpadów budowlanych i rozbiórkowych innych niż niebezpieczne, z wyjątkiem materiału występującego w stanie naturalnym, miał wynosić minimum 70% wagowo [49]. Duża ilość odpadów budowlanych i rozbiórkowych ma w tym zakresie ogromny potencjał. W 2018 roku wskaźnik odzysku odpadów budowlanych i rozbiórkowych w UE wyniósł 90%, jednak wykazywał on znaczne zróżnicowanie w zależności od kraju (rys. 1.3) [9, 218].



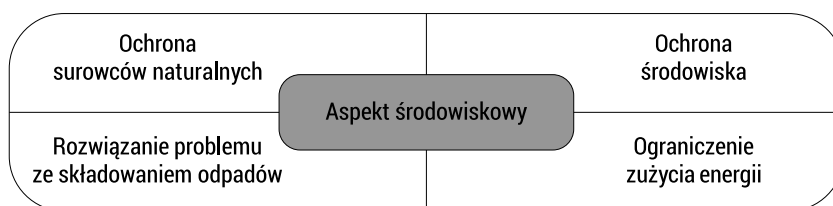
RYS. 1.3. Osiągnięty poziom odzysku i recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki w wybranych krajach Unii Europejskiej w 2018 roku

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [9, 218].

Potencjał odzysku i recyklingu został niemal w pełni, bo w ponad 90%, wykorzystany w krajach wysoko rozwiniętych, takich jak Holandia, Wielka Brytania, Belgia czy Niemcy, a w innych, jak Bułgaria, Cypr czy Słowacja, nie osiągnął jeszcze wymaganego poziomu 70%. W Polsce stopień odzysku odpadów z budowy i rozbiórki jest zadowalający i wynosi 83%, należy jednak zauważyć, że odzysk jest definiowany nie tylko jako recykling, lecz także obejmuje inne formy zagospodarowania, również te, które obniżają wartość odpadu, a udział właśnie tych rozwiązań we wskazanych poziomach jest największy [52].

1.1.3. Ograniczenia w recyklingu odpadów budowlanych

Recykling odpadów z budowy i rozbiórki niesie ze sobą wiele korzyści, głównie dla środowiska (rys. 1.4). Przede wszystkim pozwala zredukować wydobycie surowców naturalnych w postaci kruszyw, co przynajmniej częściowo ogranicza destrukcyjny wpływ na środowisko naturalne.



RYS. 1.4. Korzyści z recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [20].

Włączenie odpadów budowlanych do obiegu eliminuje potrzebę ich składowania na wysypiskach oraz przynosi korzyści ekonomiczne, gdyż wiąże się to z wysokimi kosztami, szczególnie przy odpadach zmieszanych. Według obwieszczenia ministra klimatu i środowiska [167] w 2023 roku górna składka opłaty za deponowanie na składowisku 1 tony odpadów budowlanych o kodzie 17 01 01 (odpady betonu oraz gruz betonowy z rozbiórek i remontów) wynosiła 14,60 zł, a odpadów zmieszanych o kodzie 17 09 04 wzrosła do 22,63 zł. Trzeba też pamiętać, że cena rynkowa kruszywa betonowego jest coraz wyższa i w przypadku frakcji 0/63 mm wynosi nawet 40–50 zł za tonę [283]. Zaletą recyklingu jest również ograniczenie kosztów związanych z transportem kruszyw naturalnych, które zwykle dostarczane są z różnych części kraju. Materiały z recyklingu zwykle dostępne są w niewielkiej odległości, ponieważ coraz więcej firm zajmuje się działalnością rozbiórkową połączoną z rozkruszaniem odpadów, głównie betonowych lub betonowych zawierających ceramikę. Ich recykling jest postrzegany jako droga do zwiększenia konkurencyjności sektora i przejścia na gospodarkę o obiegu zamkniętym.

Założenia tego rodzaju gospodarki koncentrują się nie tylko na ilościowym zwiększeniu poziomu recyklingu, lecz także na [68]:

- utrzymaniu materiałów w gospodarce tak długo, jak to możliwe,
- utrzymaniu ich wewnętrznej jakości na jak najwyższym poziomie,
- ograniczeniu substancji niebezpiecznych w produktach i odpadach.

Takie podejście spowodowałoby skuteczniejsze ograniczenie powstawania odpadów, jednak w wyniku praktyk budowlanych stosowanych w przeszłości i przy braku selektywnej rozbiórki generującej materiały wysokiej czystości obecnie strumienie odpadów w znacznej części nie nadają się do ponownego wykorzystania lub recyklingu w obiegu zamkniętym. W rzeczywistości dokładniejsza analiza danych ujawnia, że wysoki poziom odzysku odpadów budowlanych opiera się w dużej mierze na wypełnianiu wyrobisk lub na wykorzystaniu kruszywa pochodzącego z recyklingu w zastosowaniach takich jak chociażby podbudowy drogowe [40]. W związku z tym zmniejsza się samoistna wartość tych materiałów, jakościowe aspekty recyklingu nie są systematycznie uwzględniane, a w konsekwencji recykling nie odbywa się w obiegu zamkniętym [52]. Od 1 stycznia 2023 roku miały obowiązywać nowe zasady dotyczące gromadzenia i odbierania odpadów budowlanych i rozbiórkowych, co skutecznie zwiększyłyby ich jakość. W praktyce oznaczałoby to obowiązek ich segregacji przez wytwórcę. Jednak ostatecznie wytyczne te zostały przesunięte w czasie i dopiero od 1 stycznia 2025 roku odpady budowlane i rozbiórkowe będą zbierane i odbierane selektywnie, z podziałem na co najmniej sześć kategorii: drewno, metale, szkło, tworzywa sztuczne, gips, odpady mineralne (beton, cegłę, płytki i materiały ceramiczne oraz kamienie) [222]. W praktyce oznacza to, że wytwórca odpadów budowlanych będzie zobligowany do wstępnej ich segregacji według wymienionych wyżej kategorii.

Obecnie występujące ograniczenia w stosowaniu odpadów z budowy i rozbiórki wynikają z kilku podstawowych barier, wśród których można wyróżnić [105]:

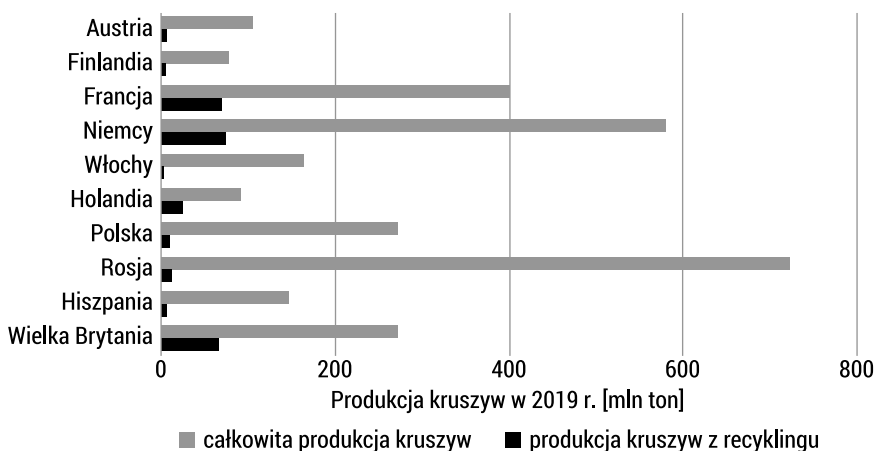
- a) bariery ekonomiczne: wysoka dostępność i niski koszt kruszyw naturalnych obniżają atrakcyjność surowców wtórnych. Rozwiązaniem tego problemu może być na przykład wprowadzenie zakazu lub podniesienie opłat za składowanie odpadów z budowy i rozbiórki. Doprowadzi to do wzrostu podaży surowców wtórnych, co z kolei zwiększy ich atrakcyjność ekonomiczną (większa dostępność i niższe ceny). Według raportu Unii Europejskiej [105] ewentualnie podatki od wydobycia zasobów naturalnych mogłyby również przyczynić się do wzrostu cen surowców pierwotnych i tym samym zwiększenia konkurencyjności odpadów;
- b) bariery kulturowe: kruszywo z recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki jest postrzegane przez konsumentów jako niskiej jakości, zwłaszcza w przypadku jego wykorzystania w zastosowaniach konstrukcyjnych. Głównym czynnikiem sprzyjającym przezwyciężeniu tego problemu jest przekształcenie odpadów w wartościowy surowiec, na przykład przez certyfikację jakości kruszyw z recyklingu oraz kampanię informującą o zaletach i możliwościach ich stosowania. Ważne są też szeroko zakrojone badania w zakresie nowych technologii przetwarzania

szczególnie gruzu betonowego oraz korzystanie z doświadczeń innych państw. Również opracowanie kryteriów utraty przez materiał statusu odpadu zgodnie z dyrektywą ramową w sprawie odpadów [49] mogłoby się przyczynić do poprawy rynkowego wizerunku kruszyw z recyklingu;

- c) bariery techniczne: zanieczyszczenie strumienia odpadów w wyniku nieefektywnego ich sortowania „u źródła” wpływa na niską jakość materiałów poddanych recyklingowi. W związku z tym powinna być wspierana i rozpowszechniana selektywna, kontrolowana rozbiórka obiektów, polegająca na systematycznym usuwaniu zanieczyszczeń i ich sortowaniu. Przyczyni się to także do gromadzenia innych niż beton wartościowych materiałów, takich jak szkło, metale, tworzywa sztuczne, gips i tym podobnych, oraz do odpowiedniego zarządzania materiałami niebezpiecznymi.

1.1.4. Zrównoważona gospodarka kruszywami naturalnymi

Kruszywa naturalne stanowią około 1/3 zużywanych w świecie surowców i materiałów, a pod względem ilościowym są największą grupą wydobywanych kopalin [116]. Ich roczna produkcja łącznie w Unii Europejskiej, Rosji, Turcji, Wielkiej Brytanii i krajach członkowskich Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu (EFTA) jest szacowana na 4,2 miliardy ton, co stanowi niemal 9,3% światowego wydobycia, przy czym same kraje azjatyckie (łącznie z Chinami i Indiami) odpowiadają prawie za 70% ich zużycia [56]. Około 30% wydobywanych kruszyw związanych jest z produkcją betonu [173]. Na rys. 1.5 przedstawiono całkowitą produkcję kruszyw w wybranych krajach w 2019 roku oraz ilość tych wytworzonych z recyklingu.



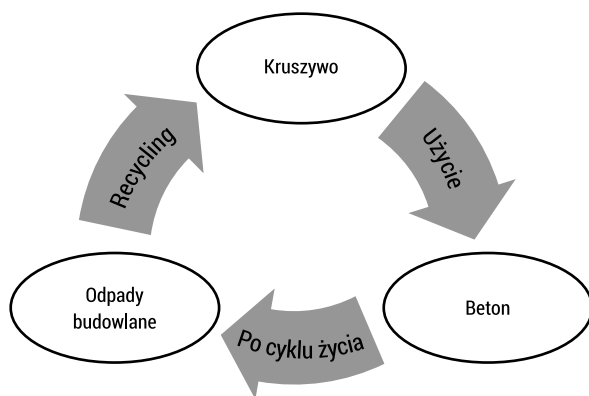
RYS. 1.5. Całkowita produkcja kruszyw oraz kruszyw z recyklingu w wybranych krajach w 2019 roku

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [56].

W 2019 roku największym producentem kruszyw spośród analizowanych krajów była Rosja, która wytworzyła 723 miliony ton, przy czym tylko 1,3% stanowiły kruszywa z recyklingu. W ślad za nią podążały Niemcy i Francja z produkcją wynoszącą odpowiednio 580 milionów ton oraz 399 milionów ton kruszyw ogółem. Najwięcej kruszyw z recyklingu powstało w Holandii (25%) i Wielkiej Brytanii (24%) – średnio stanowiły one nieco ponad 9% wszystkich wyprodukowanych kruszyw w analizowanych krajach [56].

Polska jest jednym z ważniejszych producentów kruszyw ogółem, jednak kruszywa z recyklingu stanowią tylko około 2,5% w ich całkowitej masie, co jest zastanawiające wobec wyników prezentowanych na rys. 1.3, gdzie poziom odzysku odpadów budowlanych wynosił aż 83%. Potwierdza to opinię, że tego typu odpady są używane do zastosowań obniżających ich wartość (na przykład jako wypełnienia czy podbudowy drogowe). Roczna produkcja kruszyw naturalnych w Polsce wynosi blisko 272 miliony ton, a ich głównym beneficjentem jest branża budowlana. Pomimo stosunkowo dużych zasobów geologicznych złóż kruszyw w naszym kraju największym problemem związanym z dostępem do tych surowców jest ich nierównomierne rozlokowanie, co wiąże się z koniecznością transportu przede wszystkim do centralnej i północnej części kraju [116]. Poza tym zasoby wielu udokumentowanych złóż nie będą mogły być w pełni wykorzystane z uwagi na konflikt z zagospodarowaniem przestrzennym terenu, ograniczenia wynikające z konieczności ochrony przyrody ożywionej, krajobrazu i dziedzictwa kulturowego czy warunki geologiczno-górnictwa występowania serii surowcowej [117].

Postępujące w czasie nieuniknione wyczerpywanie się zasobów naturalnych i rosnąca świadomość w zakresie zrównoważonej gospodarki odpadami w krajach rozwiniętych i wschodzących nadają coraz większe znaczenie recyklingowi i ponownemu wykorzystaniu odpadów pochodzących z budowy i rozbiórki obiektów budowlanych [196, 228]. Na rys. 1.6 przedstawiono ideowy schemat zamkniętego obiegu kruszywa w budownictwie.



RYS. 1.6. Schemat ideowy zamkniętego obiegu kruszywa w budownictwie

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [20].

Beton pochodzący z budowy czy rozbiórki ma duży potencjał do ponownego wykorzystania. Tego rodzaju kruszywo można zastosować przede wszystkim w drogownictwie: jako materiał na podbudowy zasadnicze i pomocnicze dróg wszelkich kategorii, składnik mieszanek mineralno-asfaltowych, warstwa drenażowa, materiał na nasypy drogowe oraz wały przeciwpowodziowe, podbudowa pod kostkę brukową przy budowie parkingów, placów i chodników czy materiał na nieutwardzone pobocza dróg [40]. Bardzo popularnym sektorem wykorzystania gruzu betonowego jest także niwelacja terenu, szczególnie w budownictwie komunikacyjnym, gdzie przemieszczane są duże masy ziemne [272]. Możliwości zastosowania tego rodzaju odpadu w mieszankach betonowych, według wymagań normowych, opisano w rozdziale 1.3.

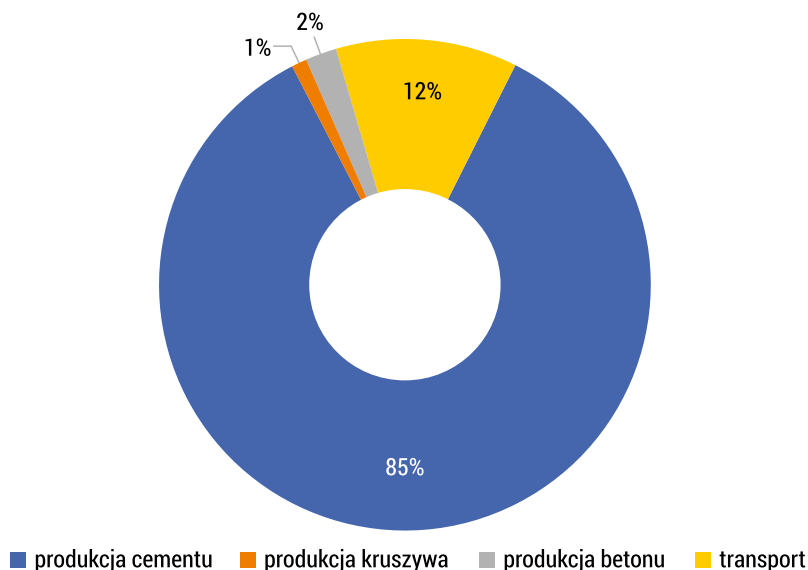
1.1.5. Ograniczenia emisji dwutlenku węgla w przemyśle betonowym i cementowym

Obecnie we wszystkich sektorach przemysłu obserwuje się dążenie do kwantyfikacji emisji gazów cieplarnianych pozwalającej na identyfikację czynników i etapów produkcji najbardziej zanieczyszczających środowisko oraz stanowiącej pierwszy krok w kierunku wdrożenia rozwiązań redukujących tę emisję [62]. Miarą jej wielkości jest ślad węglowy (ang. *carbon footprint*), zdefiniowany jako suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażana ekwiwalentem dwutlenku węgla (eCO_2), bazująca na ocenie cyklu życia [N6]. W Polsce emisję CO_2 w 2020 roku oszacowano na około 303,52 milionów ton. Jest to o 35,7% mniej w porównaniu z rokiem 1988 i o 4,7% mniej w stosunku do roku 2019 [104]. W sektorze budowlanym podstawowym źródłem emisji gazów cieplarnianych jest beton, a zwłaszcza produkcja cementu. Przygotowanie 1 tony betonu zwykłego zanieczyszcza atmosferę ziemską o 112–367 kg eCO_2 , głównie w zależności od zawartości i rodzaju użytego cementu [62]. W przeliczeniu na 1 tonę może to oznaczać mniejszy wpływ na środowisko w porównaniu z innymi materiałami, takimi jak chociażby stal (~1900 kg eCO_2/t), jednak ilość betonu zużywanego na całym świecie (około 10 miliardów ton na rok) sprawia, że przemysł ten znacząco przyczynia się do globalnej emisji CO_2 i **zużycia zasobów naturalnych** [32, 244]. Zdaniem Marinkovica i in. [146] obliczanie śladu węglowego betonu powinno opierać się na nie tylko na analizie cyklu życia obejmującej wydobycie i przygotowanie surowców, ich transport do betonowni, przygotowanie mieszanki betonowej oraz jej transport na plac budowy, lecz także uwzględnić etap użytkowania, rozbiórkę i ewentualne ponowne użycie.

Jak już wspomniano, zdecydowana większość emisji przypadająca na jednostkę wyprodukowanego betonu pochodzi z produkcji cementu, co przedstawiono na rys. 1.7.

Światowa produkcja cementu w 2019 roku wyniosła około 4,1 miliarda ton [29, 64, 188]. W wyniku procesu wypalania klinkieru portlandzkiego w piecu obrotowym uwalniane są do atmosfery ogromne ilości CO_2 (825–890 kg CO_2 na 1 tonę wyprodukowanego klinkieru) powstającego na skutek termicznej dekalcytacji wsadu

materiałowego (około 60% emitowanej ilości CO₂), głównie z węglanu wapnia, zgodnie z reakcją (1.1), oraz emisji CO₂ ze spalania paliwa (około 40% emitowanej ilości CO₂) [64, 118, 188].



RYS. 1.7. Procentowy rozkład emisji CO₂ przy produkcji betonu

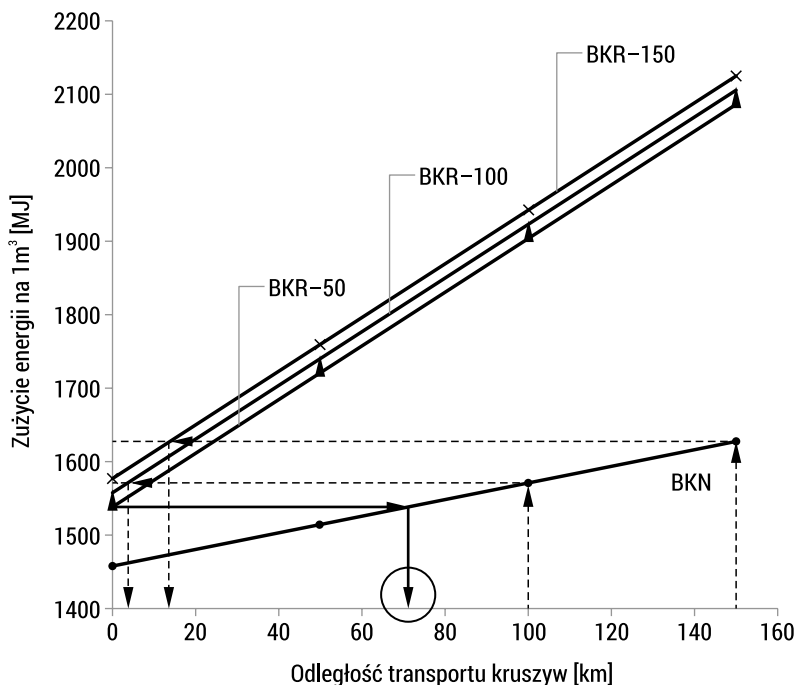
ŹRÓDŁO: na podstawie [146, 224].

Wkład w emisyjność produkcji cementu mają również źródła pośrednie, takie jak transport i energia elektryczna, głównie zużywana w procesie przemiału [118, 220]. Nieustannie rosnące wymagania środowiskowe zmuszają przemysł cementowy do ciągłego dążenia do redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz pyłów. Szczególnie duży nacisk na ograniczenie emisyjności kładzie przyjęta strategia dekarbonizacji, czyli tak zwany Europejski Zielony Ład (*The European Green Deal*) [107], która zakłada, że do roku 2050 Europa będzie zerowym emitentem netto gazów cieplarnianych [51]. Jedną z metod ograniczenia emisyjności cementu jest zmniejszenie stosunku klinkieru do cementu do poziomu 65% w 2050 roku przez stosowanie substytutów w postaci popiołu lotnego i żużla wielkopieczowego [13, 29]. Jednakże z uwagi na to, że w najbliższym czasie podaż obu tych materiałów znacznie się zmniejszy, głównie ze względu na dekarbonizację sektorów energetycznego i hutniczego, pojawia się potrzeba poszukiwania ich zamienników [72]. Dzięki temu materiały pochodzące z recyklingu betonu zyskują na znaczeniu. Ograniczy to emisję CO₂ oraz przyczyni się do zmniejszenia ilości odpadów trudnych do zagospodarowania, jak na przykład drobna frakcja pozostała przy produkcji grubego kruszywa z recyklingu.

1.1.6. Recykling odpadów betonowych w świetle emisji gazów cieplarnianych

Beton z rozbiórki może być ponownie wykorzystany jako kruszywo z recyklingu, jednak jego jakość różni się znacznie w zależności od pochodzenia. W opinii Faviera i in. [60] kruszywa z recyklingu mają gorsze parametry niż naturalne, dlatego często konieczne jest zwiększenie ilości cementu w nowym betonie o około 5%, a tym samym też wody, aby uzyskać wytrzymałość na ściskanie porównywalną do betonu z kruszywem naturalnym. Nadal jednak możliwe jest ograniczenie emisji CO₂, jeśli wykorzystanie kruszyw pochodzących z recyklingu spowoduje zmniejszenie odległości transportu w porównaniu z kruszywami naturalnymi. Interesujące wyniki badań przedstawili w tym zakresie Marinkovic i in. [146], którzy badali wpływ produkcji betonu o tych samych parametrach odpowiednio z kruszywem naturalnym i z kruszywem grubym z recyklingu na środowisko. Ustalili oni między innymi, że jeśli odległość transportu kruszywa naturalnego do betonowni wynosi 100 km i 150 km, maksymalna odległość transportu kruszywa z recyklingu powinna wynosić odpowiednio około 5 km i 15 km, aby uzyskać porównywalne zużycie energii przy wytworzeniu 1 m³ betonu (rys. 1.8).

Natomiast przy założeniu, że zarówno kruszywo naturalne, jak i z recyklingu są dostarczane do betonowni z odległości 100 km, transport tego drugiego zwiększa zużycie energii o 22,43% oraz emisję gazów cieplarnianych o 11,41%. Również Hossain z zespołem [85], stosując technikę środowiskowej oceny cyklu życia (LCA), porównywali skutki produkcji kruszyw pochodzących z recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki oraz tych naturalnych. Prezentują oni całkiem odmienną opinię, że w porównaniu z naturalnymi kruszywami kruszywa grube z recyklingu zmniejszają emisję gazów cieplarnianych aż o 65% przy oszczędności zużycia energii nieodnawialnej o 58%. Ograniczenia w emisji CO₂ rzędu 22% przy zastąpieniu cementu i kruszywa grubego materiałami odpadowymi w ilości odpowiednio 25% i 50% zaobserwowali również inni badacze [27]. W obliczeniach tych uwzględniono wydobycie, transport i rozdrabnianie materiałów. Obiecujące są również wyniki analizy prezentowane przez Awchata i Kumthekara [14], którzy porównywali koszty produkcji betonu z kruszywem naturalnym i z recyklingu. W efekcie ustalono, że produkcja 1 m³ betonu z kruszywem z recyklingu jest o około 7,8% tańsza niż z kruszywem naturalnym. Do porównania przyjęto jednak podobną odległość transportu kruszyw, równą 0,5 km, co może wskazywać na to, że przy dalszym transporcie, dość powszechnym w przypadku kruszyw naturalnych, różnica ta może wzrosnąć na korzyść kruszywa z recyklingu. Potwierdzają to chociażby wyniki badań prezentowane przez Nayanę i Kavithę [163], którzy podają, że stosowanie kruszywa z recyklingu redukuje koszt betonu o 34–41% i emisję CO₂ o 23–28% w porównaniu z użyciem kruszywa naturalnego. Serres i in. [209], badając wpływ na środowisko kruszywa z recyklingu użytego do produkcji betonu, również zauważyli obniżenie zużycia energii o 35% oraz obniżenie emisji gazów cieplarnianych o 25% w stosunku do użycia kruszywa naturalnego, potwierdzając tym samym niższy wskaźnik jego wpływu na środowisko.



RYS. 1.8. Zużycie energii przy wytworzeniu 1 m³ betonu odpowiednio z kruszywem naturalnym i z recyklingu, w zależności od odległości transportu tych kruszyw

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [146].

Zróznicowane wyniki badań zarówno w odniesieniu do zużycia energii, jak i do emisji gazów cieplarnianych w przypadku produkcji betonów z kruszywami naturalnymi i z recyklingu wynikają przede wszystkim z różnic w używanych technologiach przetwarzania surowców, stosowanej energii i rodzaju paliwa oraz odległości transportu surowców i mieszanki betonowej [228]. Środowiskowa korzyść z recyklingu odpadów budowlanych, szczególnie betonowych, jest niepodważalna i podjęcie wszelkich działań zorientowanych na zwiększenie ich wykorzystania jest w pełni uzasadnione. Zdaniem autorki konieczne jest utworzenie planu zarządzania zasobami, w którym odpowiednio przetworzone odpady będą uważane za cenny produkt mogący być konkurencyjnym substytutem surowców naturalnych dostępnych na rynku.

1.2. Produkcja i właściwości kruszyw z recyklingu

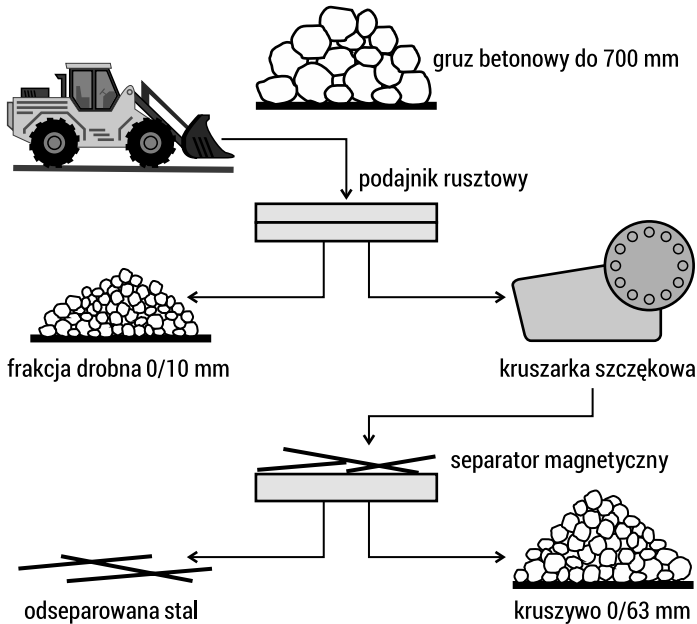
1.2.1. Produkcja kruszywa z recyklingu

Odpady pochodzące z budowy są mniej zanieczyszczone niż odpady z rozbiórki, w związku z czym mają większy potencjał odzysku, ale za to stanowią mniejszą część. Gruz betonowy pochodzący z rozbiórki jest na ogół zanieczyszczony ceramiką

i niewielkimi ilościami innych substancji, które mają szkodliwy wpływ na beton i dlatego nie nadają się do jego produkcji [77, 162, 240, 252]. W związku z tym w większości przypadków zanieczyszczenia te muszą zostać oddzielone podczas procesu przetwarzania gruzu betonowego. Najefektywniejsza jest rozbiórka obiektów prowadzona w sposób selektywny, dzięki której można odzyskać niektóre materiały budowlane do ponownego użycia, jak na przykład cegły, lub do recyklingu (drewno, metale, beton, szkło, tworzywa sztuczne) [106]. Jednak w większości przypadków z uwagi na czasochłonność rozbiórki selektywnej stosuje się wyburzanie kompleksowe, w efekcie czego niezbędna jest późniejsza segregacja odpadów ze szczególnym wydzieleniem gruzu betonowego do dalszego przetwarzania.

Obecnie najczęściej wykorzystuje się mechaniczne metody przetwarzania gruzu betonowego polegające na jedno- lub co najwyżej dwukrotnym jego rozkruszeniu w kruszarkach szczękowych, udarowych lub stożkowych. Działania te nakierowane są głównie na pozyskanie kruszywa grubego przeznaczonego na podbudowy dróg oraz do wzmacniania gruntu [40]. Ze względu na rosnące koszty składowania odpadów na wysypiskach, o czym wspomniano w rozdziale 1.1, oraz wymagania w zakresie poziomu recyklingu odpadów wynikające z dyrektywy Parlamentu Europejskiego [49] powstaje coraz więcej firm zajmujących się przetwarzaniem gruzu, głównie betonowego i betonowego zawierającego elementy ceramiczne, w tak zwany przekrusz. Wyposażone są one zwykle w mobilne zestawy kruszące, które umożliwiają rozdrobnienie gruzu zarówno na terenie zakładu, jak i bezpośrednio na placu rozbiórki.

Na rys. 1.9 przedstawiono przykładowy proces przetwarzania gruzu betonowego, sporządzony na podstawie informacji udostępnianych przez firmy zajmujące się tego typu działalnością. W pierwszej kolejności gruz jest weryfikowany pod względem składu i obecności zanieczyszczeń, jak na przykład ceramika, drewno, szkło, papier czy tworzywa sztuczne. Wstępne oczyszczanie gruzu betonowego odbywa się ręcznie poprzez usunięcie widocznych zanieczyszczeń, które następnie przekazywane są do utylizacji lub przetwarzania. W dalszym etapie gruz jest segregowany pod względem jego składu na czysty beton oraz mieszankę betonu i ceramiki. Odpadowe elementy betonowe o większych gabarytach są wstępnie rozdrabniane mechanicznie na mniejsze fragmenty za pomocą koparki wyposażonej w szczęki mechaniczne lub młot hydrauliczny. Następnie tak przygotowany gruz ładowarka umieszcza w podajniku rusztowym, gdzie następuje odseparowanie frakcji drobnej (na przykład do 10 mm) zawierającej zanieczyszczenia w postaci gruntu i pyły. Z podajnika gruz jest przekazywany do kruszarki szczękowej, która rozdrabnia go do założonego uziarnienia. Nadmierne ograniczenie rozstawu szczęk powoduje istotne obniżenie wydajności kruszarki oraz przyspiesza zużycie szczęk, w związku z tym powszechnie przyjmuje się rozstaw równy 63 mm. Po rozkruszeniu materiał trafia na separator magnetyczny, który wychwytuje fragmenty zbrojenia nieusunięte podczas wstępnego rozdrabniania elementów betonowych. W rezultacie otrzymuje się kruszywo frakcji 0/63 mm, które stosuje się do budowy dróg, placów, chodników, torowisk, wykonywania warstw filtracyjnych i tym podobnych. Schematycznie proces przetwarzania gruzu betonowego przedstawiono na rys. 1.9.

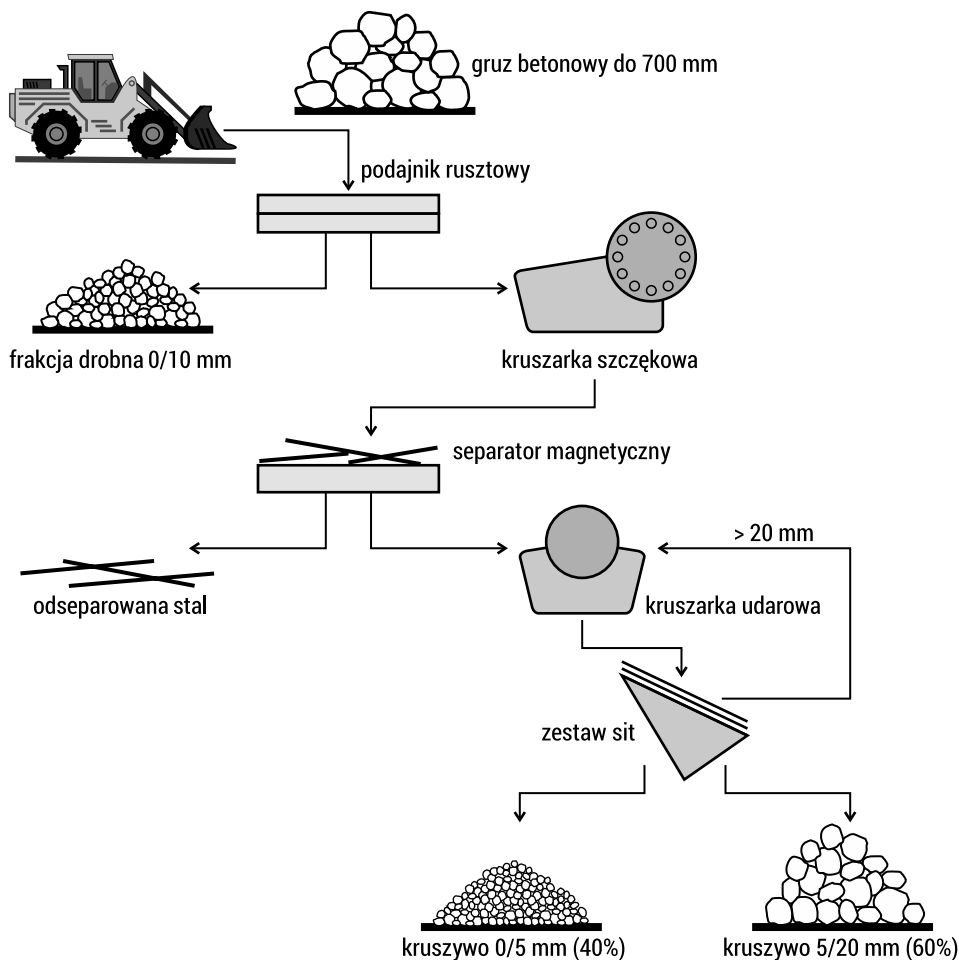


RYS. 1.9. Proces recyklingu gruzu betonowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Konwencjonalne przetwarzanie gruzu w kruszywo z recyklingu często jest niewystarczające z uwagi na jego niejednorodność oraz zawartość innych materiałów, takich jak ceramika, zaprawa, gips, substancje organiczne czy tworzywa sztuczne. Największym problemem jest jednak obecność porowatej zaprawy cementowej w gruzie betonowym, która wpływa na właściwości wytworzonego kruszywa z recyklingu. Do ograniczenia zawartości tej zaprawy przyczynia się liczba procesów mechanicznych stosowanych podczas przetwarzania gruzu betonowego. Na rys. 1.10 przedstawiono schemat recyklingu gruzu z jego dwustopniowym rozkruszaniem.

Przy dwustopniowym rozkruszaniu uzasadnione jest przesianie produktu na frakcje, co rozszerza możliwości jego zastosowania. Ewentualne nadgabaryty są zawracane do obiegu i ponownie rozdrabniane w kruszarce celem uzyskania założonego uziarnienia. Zdaniem większości badaczy [33, 55, 159] wykorzystanie kruszarki udarowej korzystnie wpływa na jakość kruszywa z recyklingu, ograniczając zawartość ziaren płaskich i porowatość frakcji powyżej 4 mm oraz zmniejszając ilość zaprawy cementowej w porównaniu z kruszywem uzyskanym w kruszarce szczękowej. Z tego względu jest ona zalecana do stosowania w drugim etapie rozkruszania. Inni badacze prezentują całkiem odmienne rezultaty badań, wykazując, że produkty końcowe uzyskane w wyniku użycia zarówno kruszarki szczękowej, jak i udarowej charakteryzują się podobną zawartością zaprawy cementowej, zbliżoną gęstością, porowatością oraz rozkładem wielkości cząstek [240]. Zaawansowane metody przetwarzania gruzu betonowego opisano w rozdziale 1.4.



RYS. 1.10. Proces recyklingu gruzu betonowego z dwustopniowym rozkruszaniem

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [162].

1.2.2. Właściwości kruszyw z recyklingu betonu

Wśród badaczy zajmujących się recyklingiem gruzu betonowego panuje powszechna opinia, o czym już wspomniano, że przyczyną pogorszenia wszystkich parametrów kruszywa z recyklingu jest porowata zaprawa cementowa obecna na jego powierzchni [55]. Jej ilość zależy przede wszystkim od właściwości betonu źródłowego i od zastosowanej obróbki technologicznej gruzu betonowego. Szacuje się, że zaprawa cementowa stanowić może nawet 33–55% i 23–44% objętości kruszywa z recyklingu odpowiednio we frakcjach 4/8 mm i 8/16 mm [38]. Inni autorzy potwierdzili również zwiększoną zawartość zaprawy cementowej w drobnej frakcji, dlatego też zwykle nie zaleca się jej stosowania

jako zamiennika piasku w betonie [53, 98, 269]. W tabeli 1.2 przedstawiono wybrane właściwości kruszywa z recyklingu uzyskanego w efekcie rozkruszenia gruzu betonowego, opracowane na podstawie wyników badań prezentowanych w literaturze.

TABELA 1.2. Właściwości kruszyw z recyklingu gruzu betonowego

Fracja, mm	Gęstość nasypowa, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Nasiąkliwość, %	Wskaźnik rozkruszenia, %	Źródło
1	2	3	4	5	6
4,75/25,4	1,39	2,29	5,1	-	[81]
4,75/12,7	1,38	2,35	4,8	-	
4/16	1,23	-	3,2	21,3	[268]
< 4,75	1,29	2,08	11,9	-	[121]
5/25	-	2,55	1,68	-	[216]
0,15/5	-	2,28	6,45	-	
5/31,5	1,41	-	3,8	-	[79]
0,15/5	1,48	-	5,5	-	
4,75-25	1,48	2,41	3,52	38,39	[190]
4,75-20	1,49	2,35	5,2	-	[15]
4,75/20	1,41	2,55	6,85	31	
4,75/25	1,24	2,23	5,8	-	[36]
5/20	-	2,43	4,5	47,82	[144]
12/22	-	2,32	5,27	36,0	[27]
6/12	-	2,28	6,28	32,0	
10 (BZ*)	-	2,41	8,82	-	[187]
20 (BZ*)	-		7,89	-	
10 (BWW**)	-	2,39	6,77	-	
20 (BWW**)	-		6,53	-	

* – kruszywo z betonu zwykłego

** – kruszywo z betonu wysokiej wytrzymałości

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie źródeł podanych w tabeli.

Gęstość, zarówno objętościowa, jak i nasypowa, jest jednym z podstawowych parametrów opisujących kruszywo i ma decydujące znaczenie przy projektowaniu mieszanek betonowych. W tabeli 1.2 przedstawiono gęstości kruszywa z recyklingu o różnych frakcjach. Wynika z nich, że jest ona bardzo zróżnicowana (od 2,28 g/cm³ do 2,55 g/cm³) i zależna nie tylko od ilości zaprawy cementowej, lecz także od składu betonu źródłowego, w tym głównie zastosowanego do produkcji betonu kruszywa naturalnego. Dozowanie składników mieszanki betonowej w zakładzie produkcji

zwykle odbywa się w sposób wagowy, dlatego też bardzo istotne jest wcześniejsze określenie gęstości danej partii kruszywa z recyklingu.

Zaprawa cementowa wpływa również na kilkukrotny wzrost nasiąkliwości kruszywa z recyklingu w porównaniu z naturalnym. Wymaga to na etapie projektowania mieszanki betonowej ustalenia ilości wody zarobowej w taki sposób, aby uwzględniła ona również wodę zaabsorbowaną przez to kruszywo w momencie przygotowywania mieszanki [226]. Jest to tym trudniejsze, im bardziej zróżnicowana jest nasiąkliwość stosowanego kruszywa z recyklingu, w związku z tym część badaczy zaleca doświadczalne dozowanie wody do uzyskania wymaganej konsystencji mieszanki betonowej [1, 103]. Jednakże jest to metoda pracochłonna, wymagająca przygotowywania zarobów próbnych ze względu na intensywne pogarszanie się urabialności mieszanki betonowej w czasie. Zdaniem Ajdukiewicza i Kliszczewicz [1] właściwości takich kompozytów można poprawić przez stosowanie superplastyfikatorów i pyłu krzemionkowego. Również autorka, realizując badania polegające na dozowaniu do mieszanki betonowej kruszywa z recyklingu o różnej wilgotności (0–100%), uzyskała korzystne wyniki właściwości betonów z kruszywem nasyconym wodą [177]. Wstępne nasycenie kruszywa z recyklingu powoduje uszczelnienie przyległej do niego strefy kontaktowej produktami hydratacji cementu, prowadząc jednocześnie do obniżenia porowatości betonu. Inni badacze zaproponowali zbliżone podejście do wytwarzania mieszanki betonowej z kruszywem z recyklingu polegające na dwustopniowej metodzie mieszania składników. Wodę zarobową rozdzielono na dwie części: pierwszą dozowano do kruszywa z recyklingu w celu jego wstępnego nasycenia, drugą zaś po dodaniu pozostałych składników. W efekcie tej modyfikacji zaobserwowano istotną poprawę właściwości betonu, szczególnie wzrost wytrzymałości na ściskanie o 17% [199] lub nawet o 25% [229], w porównaniu z tradycyjną kolejnością dozowania składników. Wysoki wskaźnik rozkruszenia (nawet > 47%) jest wynikiem oddzielania się i rozdrabniania zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa z recyklingu pod wpływem miażdżenia.

Na właściwości kruszywa z recyklingu oddziałuje również jego pochodzenie. Kruszywo przygotowane z betonu o niskiej wytrzymałości zawiera mniej zaprawy niż to z betonu o wysokiej wytrzymałości [53, 174]. Interesujące wyniki badań w zakresie wpływu wytrzymałości na ściskanie betonu źródłowego na właściwości kruszywa z recyklingu zaprezentowali Poon i in. [187]. Okazało się, iż kruszywo uzyskane z betonu wysokiej wytrzymałości charakteryzuje się niższą nasiąkliwością w porównaniu z kruszywem pochodzącym z betonu zwykłego. Zdaniem autorów wynika to z wielkości porów obecnych w zaprawie cementowej otaczającej poszczególne rodzaje kruszyw z recyklingu. Wymiary porów w kruszywie z betonu zwykłego głównie zawierały się w przedziale $0,01 \div 1,0 \mu\text{m}$, natomiast w kruszywie z betonu wysokiej wytrzymałości były mniejsze niż $0,1 \mu\text{m}$. Mniejsze pory były skutkiem obecności domieszek w betonie wysokiej wytrzymałości, poprawiających mikrostrukturę zarówno zaczynu cementowego, jak i strefy stykowej kruszywo–zaczyn, co doprowadziło do obniżenia poziomu nasiąkliwości i, jak twierdzą autorzy, również porowatości uzyskanych kruszyw z recyklingu.

1.2.3. Klasyfikacja kruszyw z recyklingu

Z uwagi na zróżnicowanie właściwości kruszyw z recyklingu w zależności od metody ich produkcji, źródła pochodzenia i składu niezbędne było ich usystematyzowanie ze wskazaniem możliwości i obszaru zastosowania. W 1994 roku Międzynarodowe Stowarzyszenie Laboratoriów i Ekspertów ds. Materiałów, Systemów i Konstrukcji Budowlanych (RILEM) opracowało zalecenia dotyczące kruszyw z recyklingu w zakresie ich dopuszczalnych parametrów oraz warunków stosowania [N34]. Zgodnie z tymi rekomendacjami grube kruszywo z recyklingu podzielono na trzy główne typy:

- Typ I – kruszywo pochodzące z rozkruszenia elementów murowych.
- Typ II – kruszywo pochodzące z rozkruszenia gruzu betonowego.
- Typ III – kruszywo będące mieszaniną kruszywa z recyklingu i kruszywa naturalnego (przy minimalnej zawartości kruszywa naturalnego równej 80% i maksymalnej zawartości kruszywa typu I równej 10%).

Wymagania opracowano przy założeniu stosowania wyłącznie kruszywa grubego z recyklingu. Nie zalecano wykorzystywania do mieszanki betonowej drobnych frakcji (< 4 mm), między innymi ze względu na wysoką ich nasiąkliwość i zawartość zanieczyszczeń. W ślad za tymi wytycznymi w wielu krajach również przygotowano założenia do stosowania kruszyw z recyklingu, często bazujące na rekomendacjach RILEM. W tabeli 1.3 przedstawiono normowe wymagania wprowadzone w wybranych krajach w zakresie niezbędnych właściwości i możliwości stosowania kruszywa z recyklingu.

TABELA 1.3. Wymagania w zakresie właściwości i stosowania kruszywa z recyklingu w różnych krajach

Kraj, źródło	Typ kruszywa z recyklingu	Minimalna gęstość w stanie suchym, kg/m ³	Nasiąkliwość, %	Kruszywo	Zastosowanie
1	2	3	4	5	6
RILEM, [N34]	Typ I	≥ 1 500	≤ 20	Tylko grube do 100%	Beton niekonstrukcyjny do C16/20
	Typ II	≥ 2 000	≤ 10	Tylko grube do 100%	Beton konstrukcyjny do C50/60
	Typ III	≥ 2 400	≤ 3	Tylko grube do 20%	Beton konstrukcyjny bez ograniczeń
Niemcy, DIN 4226-100:2002 [N4]	Typ I	≥ 2 000	≤ 10	Tylko grube 20–35%	Beton konstrukcyjny do C30/37
	Typ II	≥ 2 000	≤ 15	Tylko grube 20–35%	Beton konstrukcyjny do C25/30
	Typ III	≥ 1 800	≤ 20	Tylko grube	Beton niekonstrukcyjny
	Typ IV	≥ 1 500	–	Tylko grube	Beton niekonstrukcyjny

Kraj, źródło	Typ kruszywa z recyklingu	Minimalna gęstość w stanie suchym, kg/m ³	Nasiąkliwość, %	Kruszywo	Zastosowanie
1	2	3	4	5	6
Wielka Brytania, BS 8500-2: 2002 [N2]	Typ I	–	–	Tylko grube do 20%	Beton konstrukcyjny do C40/50
	Typ II	–	–	Tylko grube do 100%	Beton niekonstrukcyjny do C16/20
Hongkong, WBTC No. 12/2002 [N35]	Kruszywo grube	≥ 2 000	≤ 10	Tylko grube do 20%	Beton konstrukcyjny do C25/30
		≥ 2 000	≤ 10	Tylko grube do 100%	Beton niekonstrukcyjny do C20/25
Japonia, JIS A 5021 [N7]	Grube – klasa H	≥ 2 500	≤ 3	–	Bez ograniczeń do 45 MPa
	Drobne – klasa H	≥ 2 500	≤ 3,5	–	
	Grube – klasa M	≥ 2 300	≤ 5	–	Do elementów niepoddawanych suszeniu oraz zamrażaniu i rozmrażaniu
	Drobne – klasa M	≥ 2 200	≤ 7	–	
	Grube – klasa L	–	≤ 7	–	Beton niekonstrukcyjny, podkładowy
	Drobne – klasa L	–	≤ 13	–	
Australia, AS 1141.6.2 [N1]	Klasa 1A	≥ 2 100	≤ 6	Tylko grube do 30%	Beton konstrukcyjny do 40 MPa
	Klasa 1B	≥ 1 800	≤ 8	Tylko grube do 100%	Beton niekonstrukcyjny do 25 MPa
Portugalia, LNEC-E471 [N8]	RCA 1	≥ 2 200	≤ 7	25%	Beton klasy C35/45
	RCA 2	≥ 2 200	≤ 7	20%	Beton klasy C40/50
Polska, PN-EN 206:2014 [N31]	Typ A	≥ 2 100	–	Tylko grube do 30% (50% dla X0)	–
	Typ B	≥ 1 700	–	Tylko grube do 20% (50% dla X0)	Beton do C30/37

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wymagań normowych.

Większość przedstawionych w tabeli 1.3 zaleceń dopuszcza użycie w zastosowaniach konstrukcyjnych kruszyw z recyklingu o gęstości powyżej 2000 kg/m³. W normie PN-EN 206:2014 [N31] określono wymagania i warunki stosowania grubego kruszywa z recyklingu do betonu w zależności od klasy ekspozycji (tabela 1.4).

TABELA 1.4. Maksymalny procent zastąpienia kruszyw grubych (% masowo)

Typ kruszywa z recyklingu	Klasa ekspozycji			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Inne klasy ekspozycji ^{a)}
Typ A: (<i>Rc</i> _{90r} , <i>Rcu</i> _{95r} , <i>Rb</i> _{10r} , <i>Ra</i> _{1r} , <i>Fl</i> _{2r} , <i>Rg</i> _{1r})	50%	30%	30%	0%
Typ B ^{b)} : (<i>Rc</i> _{50r} , <i>Rcu</i> _{70r} , <i>Rb</i> _{30r} , <i>Ra</i> _{5r} , <i>Fl</i> _{2r} , <i>XRg</i> _{2r})	50%	20%	0%	0%

a) Kruszywa z recyklingu typu A znanego pochodzenia można stosować przy klasach ekspozycji, na które zaprojektowano oryginalny beton, przy maksymalnym procencie zastąpienia 30%.

b) Nie zaleca się stosowania kruszyw z recyklingu typu B do betonu klas wytrzymałości na ściskanie > C30/37.

Gdzie: *Rc* – beton, wyroby betonowe, zaprawa, elementy murowe; *Rcu* – kruszywa niezwiązane, kamień naturalny i tym podobne; *Rb* – ceramiczne elementy murowe; *Ra* – materiały bitumiczne; *Fl* – materiał pływający w wodzie; *X* – inne: grunt, glina, metale, niepływające w wodzie; *Rg* – szkło.

ŹRÓDŁO: na podstawie PN-EN 206:2014 [N31].

Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 206:2014 w największym stopniu (bo nawet do 50% masy) można zastąpić kruszywo naturalne kruszywem z recyklingu w betonach nienarażonych na korozję i agresywne działanie środowiska (klasa ekspozycji X0). W pozostałych klasach dopuszczalna zawartość kruszywa z recyklingu jest uzależniona od jego typu (A lub B). Typ A charakteryzuje się przewagą elementów betonowych, natomiast w typie B dopuszczona jest większa zawartość gruzu ceramicznego i innych zanieczyszczeń, jak materiały bitumiczne czy szkło. Jednakże uwarunkowania te dotyczą wyłącznie grubych frakcji z recyklingu (≥ 4 mm). Zwykle drobny materiał (< 4 mm) traktowany jest jako odpad trudny do zagospodarowania z uwagi na wysoką zawartość w nim porowatej zaprawy cementowej oraz zanieczyszczeń [58, 87].

Obecne wytyczne normowe dotyczące stosowania kruszywa z recyklingu są dość zachowawcze ze względu na pewną nieprzewidywalność co do uzyskanych parametrów i ich wpływu na właściwości mieszanki betonowej i betonu. Szerokie zainteresowanie recyklingiem gruzu betonowego, przejawiające się chociażby w aspekcie środowiskowym dotyczącym ograniczenia składowania odpadów i zmniejszenia wydobycia surowców naturalnych, wskazuje na wyraźną potrzebę rozwijania metod obróbki gruzu betonowego w kierunku zwiększenia stopnia zastąpienia kruszyw naturalnych kruszywami z recyklingu nawet do 100% oraz możliwości wykorzystania w kompozytach frakcji drobnej, która stanowić może nawet do 55% masy przetwarzanego gruzu [38, 88]. Niezbędne ku temu są zawężenie zakresu zmienności parametrów tych kruszyw przejawiające się głównie oczyszczeniem ich powierzchni z zaprawy cementowej oraz, a może przede wszystkim poszukiwanie rozwiązań na zagospodarowanie kłopotliwej frakcji drobnej powstałej z rozdrobnienia tejsze zaprawy.

1.3. Zastosowanie kruszywa z recyklingu i odpadowej frakcji drobnej w kompozytach cementowych

1.3.1. Wpływ kruszywa grubego z recyklingu na właściwości kompozytów cementowych

Z uwagi na to, że właściwości kruszywa z recyklingu różnią się od właściwości kruszywa naturalnego, co wykazano w rozdziale 1.2.2, zastosowanie takiego kruszywa w betonie zasadniczo zmienia zarówno właściwości mieszanki betonowej, jak i samego betonu.

Podstawową metodą pomiaru konsystencji mieszanki betonowej jest opad stożka, który w przypadku użycia kruszywa z recyklingu jest mniejszy ze względu na większą nasiąkliwość tego kruszywa oraz strukturę jego powierzchni i kształt będący efektem kruszenia [26]. Negatywny wpływ na konsystencję mieszanki betonowej z użyciem kruszywa z recyklingu zauważyli również Pizoń i in. [183]. Dla odmiany Pedro i in. [178] odnotowali podobną konsystencję mieszanki betonowej zawierającej odpowiednio 100% grubego kruszywa z recyklingu i kruszywa naturalnego, natomiast w pierwszym przypadku do przygotowania mieszanki użyto dodatkowej ilości wody zarobowej.

Na podstawie licznych wyników badań opublikowanych dotychczas w literaturze światowej i dotyczących wpływu kruszywa z recyklingu na właściwości kompozytów opracowano tendencje w zakresie zmian występujących w wybranych cechach betonu (tabela 1.5).

Około 25-procentowy spadek wytrzymałości betonu na ściskanie ze 100-procentową zawartością grubego kruszywa z recyklingu przy tym samym poziomie współczynnika w/c odnotowali Awchat i Kumthekar [14], a potwierdzili to również Xiao i Poon [253]. Nieco większy spadek wytrzymałości na ściskanie betonu, rzędu 28% w obecności 100% kruszywa z recyklingu, zanotowali też Kumutha i Vijani [122]. Z kolei Sagoe-Crentsil i in. [201] ustalili, że przy zastosowaniu kruszywa z recyklingu w ilości 23% uzyskuje się spadek wytrzymałości betonu w porównaniu z kontrolnym na poziomie zaledwie 5%. Dla porównania Gomez-Soberon [74] odnotował obniżenie wytrzymałości na ściskanie tylko o 11% przy całkowitym zastąpieniu grubego kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu, jednak zastosowana procedura mieszania umożliwiła nasycenie tego kruszywa wodą zarobową przed dodaniem pozostałych składników do mieszanki betonowej, co wpłynęło na poprawę strefy kontaktowej w betonie. Największy spadek wytrzymałości betonu na ściskanie rzędu 40% przy zastosowaniu 100% kruszywa z recyklingu uzyskali Sani i in. [202]. Należy jednak zauważyć, że jakość użytego kruszywa z recyklingu była niska, ponieważ tylko 45% jego składu stanowił beton, a pozostałą część tworzyły ceramika, drewno i inne odpady budowlane. Etzeberria i in. [55] sformułowali wniosek,

że do uzyskania wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem z recyklingu porównywalnej z betonem kontrolnym niezbędne jest zastosowanie dodatkowej ilości cementu (około 8,3%).

TABELA 1.5. Tendencje w zmianach właściwości betonów z kruszywem z recyklingu

Cecha	Porównanie z betonem z kruszywem naturalnym	Źródło
1	2	3
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa	Spadek nawet o 40%	[14, 74, 98, 122, 195, 202]
Wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach, MPa	Spadek o 10%, opcjonalnie wzrost o 18%	[53, 55, 58, 74, 76, 110]
Moduł sprężystości, GPa	Spadek nawet o 25%	[47, 55, 66, 74, 99]
Nasiąkliwość, %	Nawet 3,5-krotny wzrost	[99, 126, 191]
Skurcz, mm/m	Wzrost nawet o 70%	[1, 47, 227]
Głębokość karbonatyzacji, mm	Wzrost nawet o 25%	[73, 134, 178]
Dyfuzja chlorków, m ² /s	Wzrost nawet o 86,5%	[171, 191]
Mrozoodporność, MPa	Brak istotnych różnic	[140, 192]

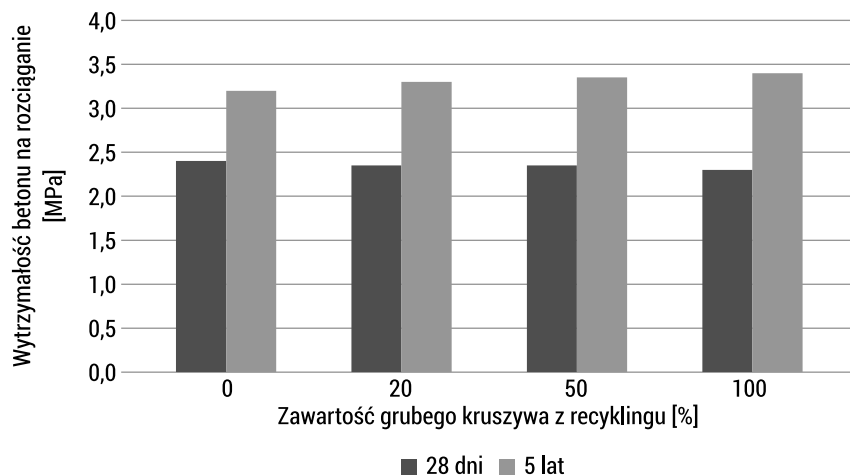
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie źródeł podanych w tabeli.

Ettxeberria i in. [55] zaobserwowali również wzrost wytrzymałości na rozciąganie betonu o 6% i 18%, odpowiednio przy 25- i 50-procentowej zawartości kruszywa z recyklingu w porównaniu z betonem kontrolnym. Wzrost tej wytrzymałości autorzy tłumaczą wysoką nasiąkliwością zaprawy obecnej w częściowo nasyconym kruszywie z recyklingu, a co za tym idzie poprawą jakości nowej strefy przejściowej w betonie z kruszywem z recyklingu. Potwierdzają to wyniki prezentowane przez Kou i Poona [110], którzy po pięciu latach dojrzewania betonu zaobserwowali nieznaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu (rys. 1.11).

Inni badacze zauważyli, że na wytrzymałość na rozciąganie betonu zawierającego 100% grubego kruszywa z recyklingu ma wpływ współczynnik wodno-cementowy [76]. Przy w/c równym 0,65 i 0,50 zaobserwowano odpowiednio spadek tej wytrzymałości o 10% oraz nieznaczny wzrost o 3,5% w porównaniu z betonem kontrolnym. Do badań zastosowano kruszywo z recyklingu dobrej jakości, wytworzone w efekcie dwustopniowego rozkruszania oraz wstępnie nasycone wodą.

Podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, wartość modułu sprężystości betonu zawierającego kruszywo z recyklingu jest zwykle niższa niż betonu kontrolnego. Potwierdzają to wyniki prezentowane przez Genga i in. [66], którzy zaobserwowali spadek wartości modułu sprężystości o około 25% betonu z powodu całkowitego zastąpienia grubego kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu. Ich zdaniem wynika to z faktu, że te ostatnie są bardziej podatne na odkształcenia

niż naturalne. Stopniowy spadek wartości modułu sprężystości wraz ze zwiększaniem ilości kruszywa z recyklingu w betonie odnotowali również Domingo-Cabo i in. [47], co potwierdzają też inni badacze [74, 99]. Głównie wynika to z mniejszej gęstości i większej porowatości betonu z kruszywem z recyklingu z uwagi na obecność zaprawy cementowej w tym kruszywie.



RYS. 1.11. Wytrzymałość betonu na rozciąganie po 28 dniach i 5 latach dojrzewania przy różnej zawartości grubego kruszywa z recyklingu

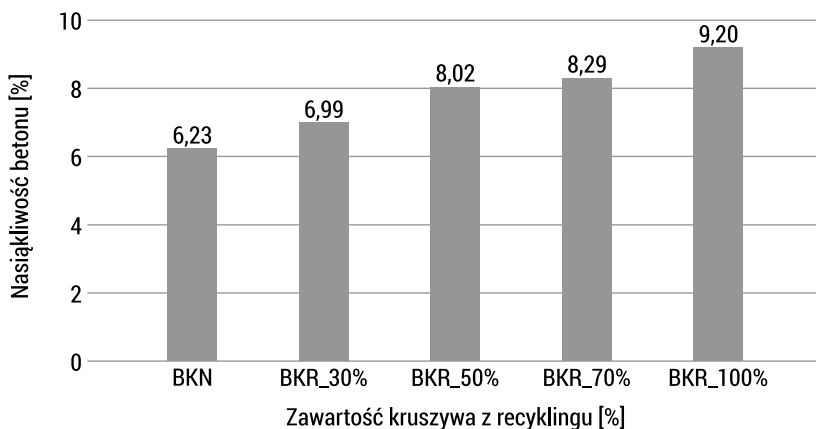
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [110].

Nasiąkliwość betonu jest ważną jego cechą, ponieważ świadczy między innymi o jego odporności na agresywne oddziaływanie środowiska. Z uwagi na fakt, że nasiąkliwość kruszywa z recyklingu jest większa niż kruszywa naturalnego, co wykazano w rozdziale 1.2.2, beton przygotowany z udziałem takiego kruszywa również charakteryzuje się wyższą nasiąkliwością niż beton kontrolny [37]. Potwierdzają to wyniki badań zamieszczone przez Kessala i in. [99], którzy zauważyli, że wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu w betonie do 100% jego nasiąkliwość wzrasta z 6,2% do nawet 9,2% (rys. 1.12). Beton staje się wtedy bardziej przepuszczalny, co jest efektem mikropęknięć wynikających z uszkodzenia kruszywa z recyklingu w wyniku procesu rozkruszania.

Według Kwana i in. [126] użycie w betonie 30% i 80% grubego kruszywa z recyklingu wpłynęło na wzrost nasiąkliwości odpowiednio 1,5- oraz 2,2-krotnie w porównaniu z betonem z kruszywem naturalnym. Również Rao i in. [191] zaobserwowali stopniowy wzrost nasiąkliwości betonu wraz ze zwiększaniem się zawartości grubego kruszywa z recyklingu, stwierdzając nawet jej 3,5-krotny wzrost przy 100-procentowej zawartości kruszywa z recyklingu.

Skurcz wpływa na parametry mechaniczne betonu z powodu powstawania w nim mikropęknięć. Główną przyczyną zwiększania się skurczu w obecności kruszywa z recyklingu jest dodatkowa ilość zaczynu wprowadzona razem z nim do betonu [112].

Znaczący wzrost skurczu betonu wysokiej wytrzymałości zawierającego 100% grubego kruszywa z recyklingu, mieszczący się w granicach 35–45% w porównaniu z betonem z kruszywem naturalnym łamanym, zaobserwowali Ajdukiewicz i Kliszczewicz [1]. Dla porównania, w betonie zwykłym z kruszywem z recyklingu w charakterze 100-procentowego zamiennika kruszywa naturalnego zauważono zwiększenie skurczu nawet o 70% po 180 dniach w porównaniu z betonem kontrolnym [47].



RYS. 1.12. Nasiąkliwość betonu w zależności od zawartości kruszywa z recyklingu (BKN – beton z kruszywem naturalnym, BKR – beton z kruszywem z recyklingu)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [99].

Obecność mikropęknięć i porów w betonie ogólnie przyspiesza postęp karbonatyzacji. Limbachiya [134] zaobserwował podobną głębokość karbonatyzacji w betonie kontrolnym i zawierającym 30% kruszywa z recyklingu. Jednak gdy zawartość kruszywa z recyklingu wzrosła do 50% i 100%, głębokość karbonatyzacji uległa zmniejszeniu odpowiednio o 5% i 12%. Zdaniem autora przyczynami mogą być zwiększona zawartość wodorotlenku wapnia zawartego w zacynie cementowym obecnym w kruszywie z recyklingu oraz wzrost zasadowości w wyniku zwiększenia zawartości cementu dodanego w celu uzyskania porównywalnej wytrzymałości betonu. Odmienne wyniki badań uzyskali Pedro i in. [178], którzy po 91 dniach przechowywania próbek w komorze klimatycznej ($5 \pm 1\%$ CO_2 i 20°C) odnotowali wzrost głębokości karbonatyzacji o 25% w seriach zawierających grube kruszywo z recyklingu w porównaniu z serią kontrolną. Potwierdzają to również wyniki badań prezentowane przez Gomesa i de Brito [73], którzy w obecności 50% grubego kruszywa z recyklingu po 90 dniach zauważyli wzrost głębokości karbonatyzacji o 10% w porównaniu z betonem kontrolnym.

Rao i in. [191] odnotowali wzrost głębokości penetracji chlorków w betonie wraz ze zwiększaniem ilości kruszywa z recyklingu. Przy 100-procentowym zastosowaniu kruszywa z recyklingu głębokość ta zwiększyła się o 14% w porównaniu z betonem kontrolnym. Zdaniem autorów odpowiadają za to stara porowata zaprawa cementowa

oraz strefa kontaktowa w kruszywie z recyklingu, które tworzą przepuszczalną strukturę betonu. Jeszcze większy wzrost głębokości penetracji chlorków w podobnych warunkach, bo aż o 86,5% w odniesieniu do betonu z kruszywem naturalnym, stwierdzili Olorunsogo i Padayachee [171].

Natomiast w przypadku odporności na zamrażanie i rozmrażanie betonu z kruszywem naturalnym i zawierającym 100% grubego kruszywa z recyklingu Razaqpur i in. [192] nie zaobserwowali istotnych różnic. Potwierdzili to również Lotfy i Al-Fayez [140], którzy nawet po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania betonu zawierającego 30% grubego kruszywa z recyklingu nie zauważyli pogorszenia wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z betonem kontrolnym, tłumacząc to obecnością porowatej zaprawy w tym kruszywie, która działa jak domieszka napowietrzająca.

Powyższe obserwacje potwierdzają, że kruszywa z recyklingu betonu charakteryzują się gorszymi właściwościami w porównaniu z kruszywami naturalnymi i znacznym zróżnicowaniem zarówno co do składu, jak i parametrów. Brak powtarzalności ich cech powoduje, że są one stosowane sporadycznie w kompozytach cementowych. Wysoka porowatość i nasiąkliwość wywołane obecnością zaprawy cementowej pogarszają urabialność mieszanki betonowej, co wymaga modyfikacji składu w zakresie ilości wody zarobowej i użycia plastyfikatorów. Aby uzyskać porównywalne parametry wytrzymałościowe, niezbędne jest zastosowanie dodatkowej ilości cementu, co jest szczególnie niekorzystne w obliczu aktualnej polityki redukcji śladu węglowego. Konieczne jest zatem poszukiwanie metody wytwarzania kruszywa z recyklingu o właściwościach porównywalnych do kruszywa naturalnego, co umożliwiłoby w przyszłości jego certyfikację i powszechne wykorzystanie w mieszankach betonowych.

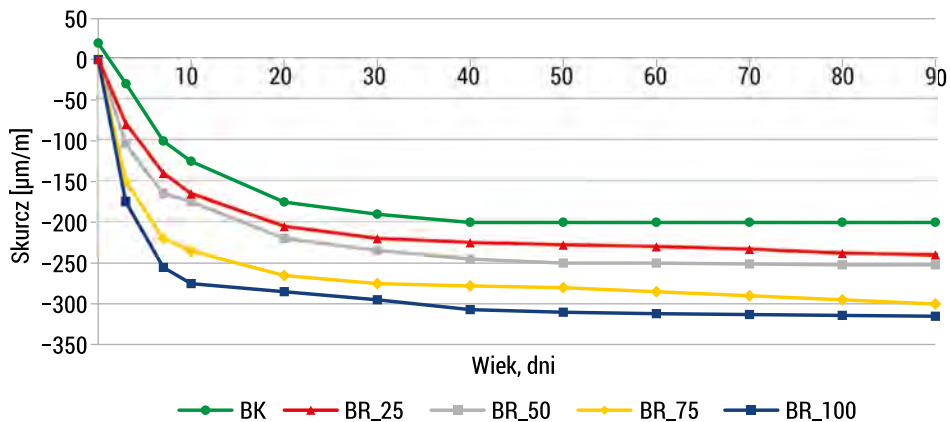
1.3.2. Wpływ drobnej frakcji z recyklingu na właściwości kompozytów cementowych

Produkcja kruszywa z recyklingu wysokiej jakości wiąże się głównie z usunięciem z jego powierzchni porowatej zaprawy cementowej, która – jak się powszechnie przyjmuje – powoduje jego gorsze właściwości fizyczne, mechaniczne i chemiczne w porównaniu z kruszywami naturalnymi. Podczas procesu kruszenia betonu nawet 30–60% jego masy stanowi drobna frakcja (< 4 mm) zawierająca głównie zaprawę cementową [88], w związku z czym powstał poważny problem z jej zagospodarowaniem. W literaturze analizowane są różne możliwości jej wykorzystania jako:

- zamiennika piasku w kompozytach [24, 58, 100, 147, 264, 280],
- zamiennika cementu [22, 275],
- składnika cementu [65, 205].

Jedną z metod zagospodarowania drobnej frakcji z recyklingu, analizowaną szeroko w literaturze, jest zastąpienie nią piasku w kompozytach cementowych w zakresie od 0 do 100%. Khatib [100], prowadząc badania w tym zakresie, zauważył, że przy użyciu

drobnej frakcji z recyklingu w charakterze zamiennika piasku w ilości 25% i 100% nastąpiła redukcja wytrzymałości na ściskanie odpowiednio o 15% i o 30%, natomiast skurcz zwiększył się o około 60% w porównaniu z betonem kontrolnym (rys. 1.13).



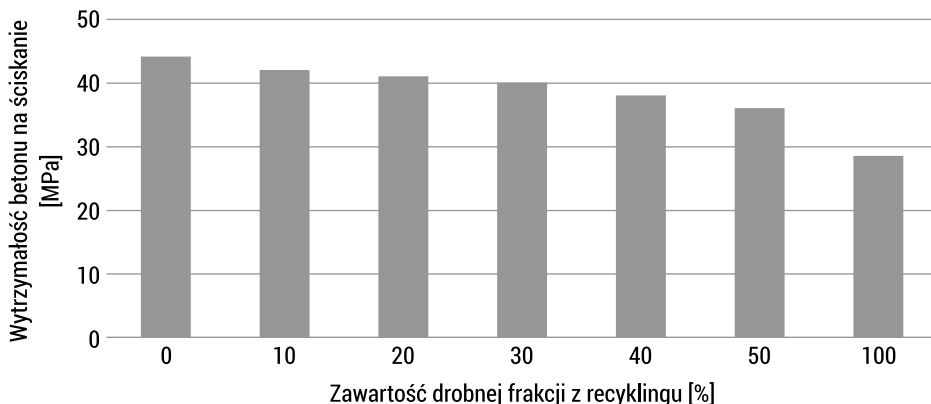
RYS. 1.13. Skurcz betonu kontrolnego (BK) oraz betonu zawierającego grube kruszywo z recyklingu (BR) w ilości 25%, 50%, 75% i 100%

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [100].

Evangelista i de Brito [58], zastępując 100% piasku drobnym kruszywem z recyklingu, zauważyli spadek wytrzymałości betonu na rozciąganie o 30,5% w porównaniu z betonem kontrolnym, z powodu porowatej struktury piasku z recyklingu. Podobne niekorzystne rezultaty uzyskali Yaprak i in. [264], którzy przy całkowitym zastąpieniu piasku frakcją z recyklingu odnotowali pogorszenie konsystencji mieszanki betonowej w postaci zmniejszenia opadu stożka o 51%, co zdaniem autorów wynikało z rozwiniętej powierzchni i większej zawartości pyłów w drobnej frakcji z recyklingu w porównaniu z piaskiem naturalnym. Zarejestrowano również wzrost nasiąkliwości oraz 35-procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie (rys. 1.14).

Według autorów możliwe jest zastąpienie piasku frakcją z recyklingu w ilości do 10% i do 50% w produkcji betonów o wytrzymałości na ściskanie odpowiednio do 30 MPa i do 25 MPa. Bouarroudj i in. [24], stosując drobne kruszywo z recyklingu do zapraw w różnym stanie wilgotności, stwierdzili, że lepsze rezultaty uzyskuje się przy dozowaniu go w stanie wysuszonym ze względu na lepszą przyczepność ziaren do nowej matrycy cementowej. Pomimo to spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z serią kontrolną wyniósł ponad 30%. Zhao i in. [280] zaobserwowali szybszą utratę konsystencji zaprawy w obecności piasku z recyklingu betonu oraz liniowy spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem jego zawartości. Im mniejszą frakcję z recyklingu stosowano, tym gorsze właściwości kompozytu uzyskiwano z uwagi na większą zawartość w niej zaczynu cementowego, wyższą nasiąkliwość oraz słabsze cechy mechaniczne. Zbliżone badania w zakresie zastąpienia piasku w zaprawie drobną frakcją z recyklingu w ilości 0–100% przeprowadzili również

Ismail i in. [87]. Potwierdzili utratę konsystencji w obecności materiału z recyklingu, nawet przy zwiększonej ilości superplastyfikatora, co wynikało głównie z rozwiniętej powierzchni i porowatej struktury tych ziaren. Autorzy dopuszczają zastąpienie maksymalnie 25% piasku naturalnego frakcją z recyklingu, co nie powoduje wyraźnej utraty parametrów wytrzymałościowych. Można więc wysnuć wniosek, że większość badaczy prezentuje zbliżoną, niekorzystną opinię co do zasadności stosowania drobnego kruszywa z recyklingu jako zamiennika piasku, szczególnie w ilościach przekraczających 20–25%.



RYS. 1.14. Zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie przy różnej zawartości drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika piasku

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [264].

Z kolei Bordy i in. [22] podjęli próbę zastąpienia cementu w zaprawie w zakresie 0–100% przygotowaną w warunkach laboratoryjnych drobną frakcją z recyklingu zaczynu cementowego domielonego do 80 μm . Wyniki badań wykazały, że we frakcji drobnej było 24% bezwodnej fazy w postaci klinkieru ujawniającej pewną aktywność hydrauliczną. Jednak wraz ze wzrostem zawartości tej frakcji odnotowano spadek wytrzymałości zaprawy na ściskanie od 12% przy 10-procentowej zawartości frakcji drobnej do nawet 91% przy całkowitym zastąpieniu nią cementu. Dodatkowo stwierdzono obniżenie odporności zaprawy na karbonatyzację i wzrost porowatości całkowitej, co zdaniem autorów oznacza, że drobny materiał z recyklingu nie powinien być traktowany jako wartościowy zamiennik cementu. Także Zhang i in. [275] zauważyli spadek wytrzymałości zaprawy cementowej na ściskanie nawet o 18,1% przy zastąpieniu cementu drobną frakcją z recyklingu w ilości 30%. Czas wiązania zaprawy zawierającej 30% tej frakcji skrócił się o 28% w porównaniu z serią kontrolną. Zauważono też wzrost zawartości dużych porów w zaczynie cementowym z drobną frakcją z recyklingu z uwagi na ograniczoną ilość tworzących się produktów hydratacji. Ustalono również, że porowatość całkowita spadła z 34% do 19%, a według autorów wpłynął na to wypełniający charakter frakcji z recyklingu o ustalonym uziarnieniu do 100 μm .

Nowych dróg zagospodarowania drobnej frakcji recyklingu poszukiwali między innymi Gastaldi i in. [65], którzy zastąpili 30% klinkieru uwodnionym zaczynem cementowym wyseparowanym z gruzu betonowego. Zaprezentowane wyniki badań pozwoliły autorom na konkluzję, że taki klinkier zawierający proszek z recyklingu podczas wypalania emituje do atmosfery prawie o 1/3 mniej CO₂ niż ten w czystej postaci. Jednak nie przeprowadzono badań kompozytów cementowych przygotowanych z udziałem takiego materiału celem oceny ich trwałości. Natomiast Schoon i in. [205], stosując różne ilości drobnego materiału z recyklingu (< 63 μm) głównie do produkcji klinkieru, uzyskali długoterminowe korzystne rezultaty. W procesie wypalania wymagana jest jednak wysoka temperatura powyżej 1400°C, a jak wykazano w dalszej części pracy w badaniach własnych w temperaturze 1000°C zmieszany zaczyn cementowy ulega zbrzyleniu, a jego parametry znacząco pogorszeniu. Dodatkowo powyżej temperatury 600°C następuje stopniowy rozpad węglanu wapnia, co w efekcie powoduje uwalnianie dwutlenku węgla do atmosfery.

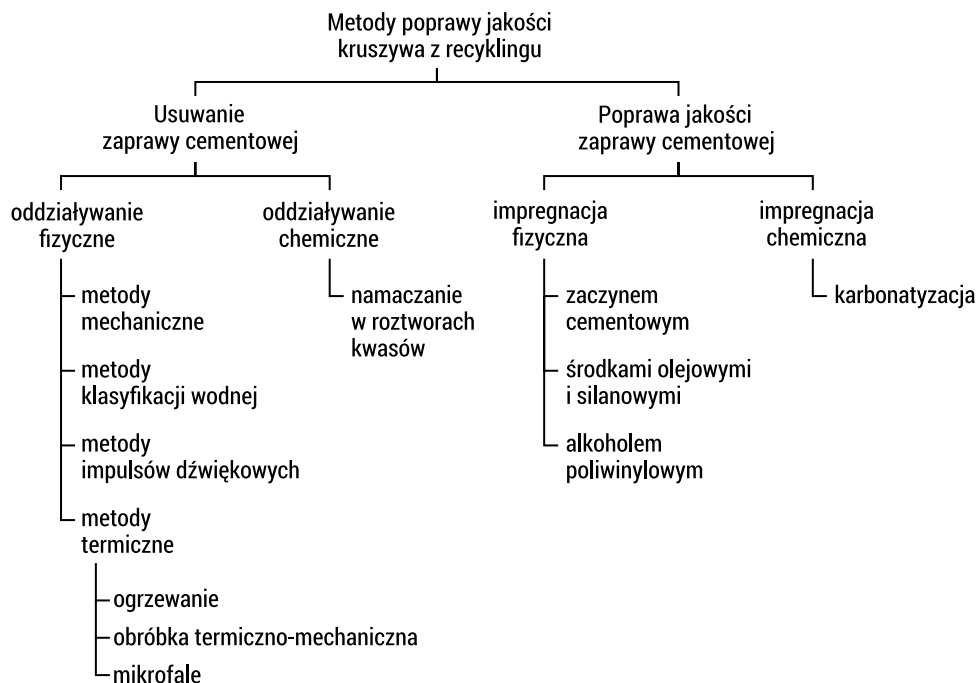
Najpowszechniejszym jak dotąd sposobem zagospodarowania drobnej frakcji z recyklingu jest jej składowanie bądź ewentualnie wypełnianie nią zagłębień. Zwykle stanowi ona odpad stanowiący ogromny problem dla firm zajmujących się produkcją kruszyw z recyklingu, ale również na przykład frezowaniem betonu. Zdaniem autorki frakcja ta ma potencjał do ponownego jej wykorzystania w kompozytach cementowych jako zamiennika cementu, ale konieczne jest opracowanie odpowiedniej technologii jej przetwarzania w kierunku aktywizacji właściwości pucolanowych.

1.4. Nowoczesne metody uszlachetniania kruszywa z recyklingu

Jak już wspomniano, główną przyczyną pogorszenia jakości kruszywa z recyklingu betonu w porównaniu z kruszywem naturalnym jest obecność w jego składzie „starej” zaprawy cementowej oraz zanieczyszczeń. Prowadzi to do pogorszenia właściwości takich kruszyw, a co za tym idzie również do licznych problemów zarówno na etapie projektowania, jak i wykonania mieszanki betonowej. W związku z tym od wielu lat na świecie są opracowywane i rozwijane nowe technologie recyklingu gruzu betonowego ukierunkowane na poprawę właściwości wytworzonego kruszywa. Związane są one głównie z usuwaniem zaprawy cementowej z powierzchni ziaren lub opierają się na poprawie jej jakości [210]. Na podstawie literatury zaproponowano podział metod przetwarzania gruzu betonowego w kierunku poprawy jakości wytworzonego kruszywa z recyklingu, który przedstawiono na rys. 1.15.

Najczęściej wykorzystywane *mechaniczne metody* przetwarzania gruzu betonowego polegające na jego jedno- lub dwukrotnym rozkruszeniu opisano w rozdziale 1.2.1. Wielokrotne kruszenie wpływa na stopniową redukcję zaprawy cementowej obecnej na powierzchni ziaren [129, 261, 267]. Do bardziej zaawansowanych metod

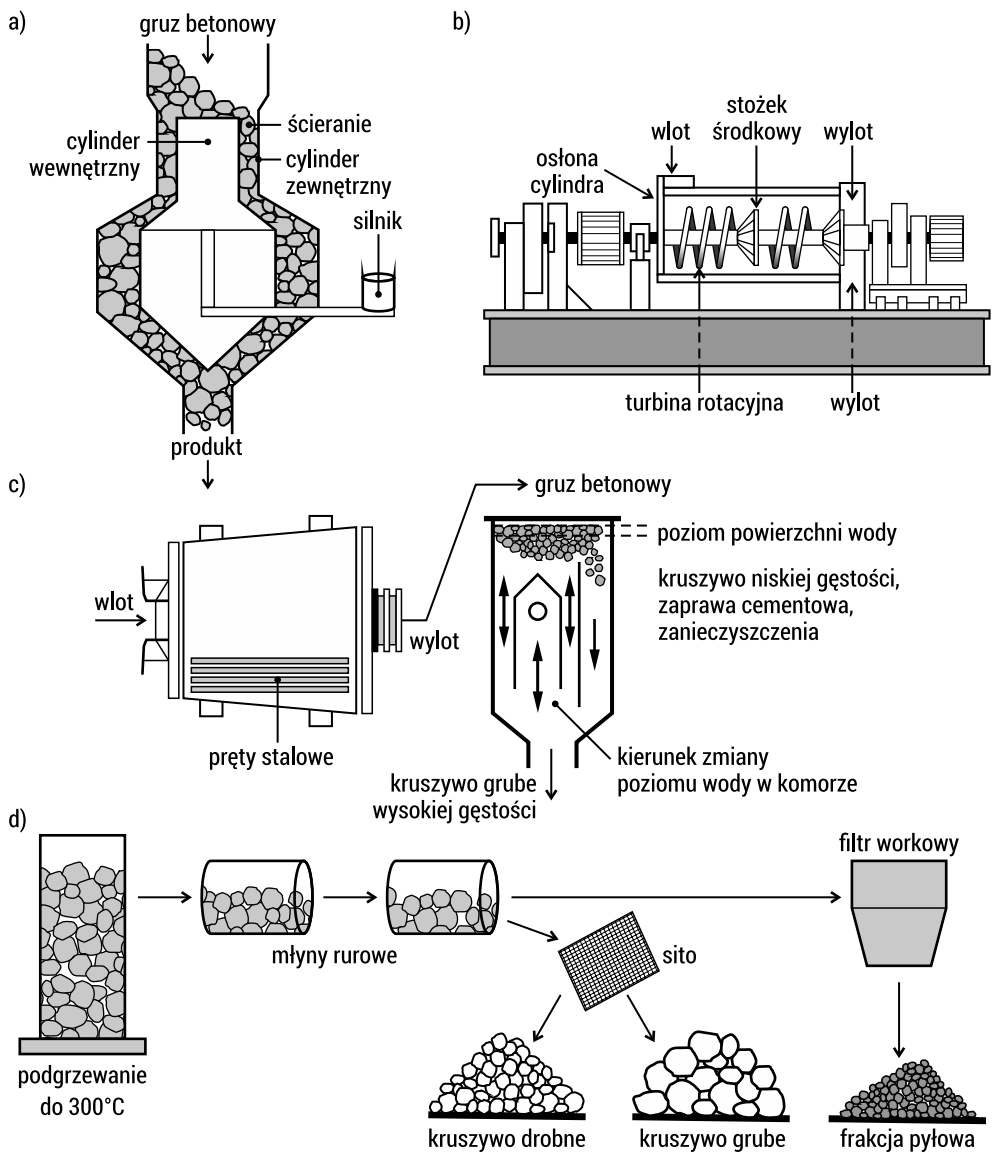
mechanicznych usuwania zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa z recyklingu można zaliczyć rozwiązanie z zastosowaniem mimośrodowego ścierania za pomocą dwóch obracających się cylindrów (rys. 1.16a) lub młyna śrubowego (rys. 1.16b).



RYS. 1.15. Nowoczesne metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W *metodzie mimośrodowego ścierania* stosowany jest nowatorski młyn rotacyjny składający się z cylindrów zewnętrznego i wewnętrznego z wirnikiem mimośrodowym obracającym się z wysoką prędkością (rys. 1.16a). Po wstępnym rozdrobnieniu gruz betonowy umieszczany jest pomiędzy tymi cylindrami, gdzie następuje ścieranie i usuwanie zaprawy cementowej przylegającej do powierzchni kruszywa [261, 267]. Następnie z zaprawy odzyskuje się kruszywo drobne – separator powietrzny usuwa cząstki o wielkości do 0,6 mm. W wyniku tej metody poziom odzysku kruszywa grubego i drobnego z recyklingu wynosi odpowiednio 26,7% i 23,3%, co oznacza, że 50% produktu końcowego stanowi trudny do zagospodarowania odpad w postaci frakcji poniżej 0,6 mm składającej się głównie ze zhydratyzowanego cementu [260, 261, 266]. Z kolei w *metodzie młyna śrubowego* wstępnie rozdrobniony gruz betonowy umieszczany jest w cylindrze obrotowym, w którym odbywa się ścieranie zaprawy cementowej za pomocą osiowo osadzonej śruby ze stożkami (rys. 1.16b). Ten proces jest powtarzany automatycznie kilka razy, w zależności od wymaganej jakości kruszywa. Metoda ta, według Doshō [48], pozwala na otrzymywanie tylko kruszywa grubego o wskaźniku odzysku w zakresie 34–45%.

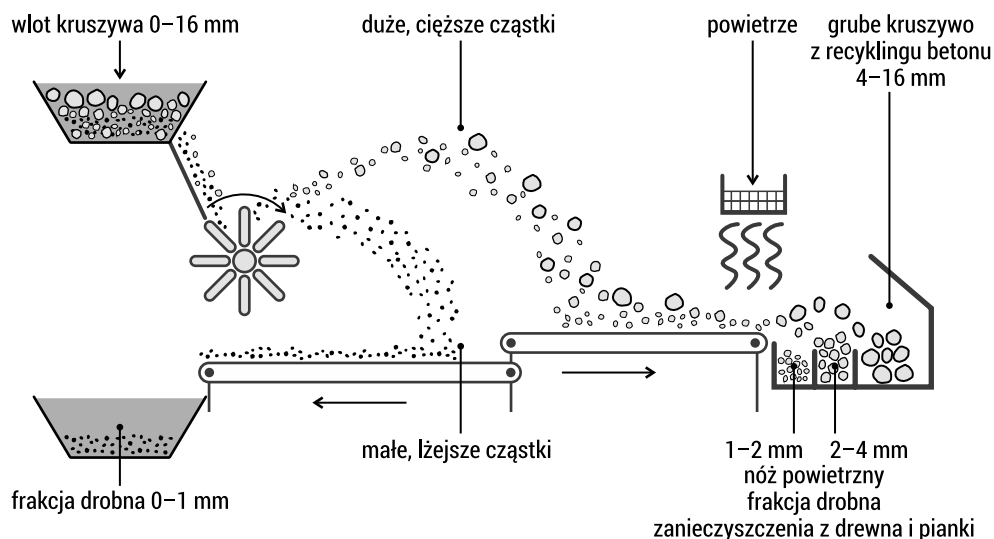


RYS. 1.16. Zaawansowane metody recyklingu gruzu betonowego: a) metoda mimośrodowego ścierania; b) metoda młyna śrubowego; c) metoda koncentracji grawitacyjnej; d) metoda ogrzewania i tarcia

ŹRÓDŁO: opracowanie na podstawie [267, 270].

Inna metoda mechaniczna nowoczesnego recyklingu betonu, nazwana C2CA (ang. *Concrete to Cement and Aggregate*), została opisana w pracach [137–139]. W tym procesie stosowane są selektywne wyburzanie, autogeniczne mielenie i technologia klasyfikacji materiałów na sucho (ang. *Advanced Dry Recovery, ADR*). Mielenie

autogeniczne służy do usuwania luźnej zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa z recyklingu, natomiast technologia ADR ma na celu skuteczne rozdzielenie materiału na drobne i grube frakcje (rys. 1.17). Efektem metody jest uzyskanie wysokogatunkowego kruszywa 4/16 mm oraz frakcji drobnej < 4 mm zawierającej zaczyn cementowy i zanieczyszczenia, takie jak drewno, plastik i inne.



RYS. 1.17. Schemat klasyfikacji materiałów na sucho

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [139].

W efekcie zastosowanej metody uzyskano 57% kruszywa grubego (> 4 mm) oraz 43% frakcji drobnej, z czego kruszywo 1/4 mm stanowiło 23%, a 20% to zaprawa cementowa i zanieczyszczenia [137]. Nasiąkliwość materiałów wynosiła 5,5% i 10,0% odpowiednio dla frakcji grubej i drobnej. Ze względu na stosunkowo wysoką zawartość pozostałej zaprawy cementowej w kruszywie po obróbce zaobserwowano pogorszenie parametrów betonu wraz ze wzrostem zawartości tego kruszywa [138]. Jednak należy zwrócić uwagę na stosunkowo niski koszt zaproponowanej technologii, która może być użyta bezpośrednio na miejscu rozbiórki.

Metoda klasyfikacji grawitacyjnej bazuje na dwóch etapach obróbki gruzu betonowego (rys. 1.16c). W pierwszym etapie wykorzystywany jest młyn ze ściernicą do usuwania zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa. Następnie materiał trafia do urządzenia, gdzie w środowisku wodnym następuje klasyfikacja materiałów. Fragmenty gruzu betonowego są przesuwane wielokrotnie w górę i w dół w wyniku pulsowania wody, co prowadzi do jego rozwarstwienia. Ziarna kruszywa grubego o wysokiej gęstości opadają na dół, natomiast lżejsze cząstki zaprawy, kawałki drewna i inne zanieczyszczenia przemieszczają się w kierunku górnej części urządzenia. W wyniku tej metody otrzymuje się najmniej, bo około 20% kruszywa grubego [48]. Można więc przypuszczać, że albo pierwszy etap ścierania zaprawy jest nieskuteczny i dlatego

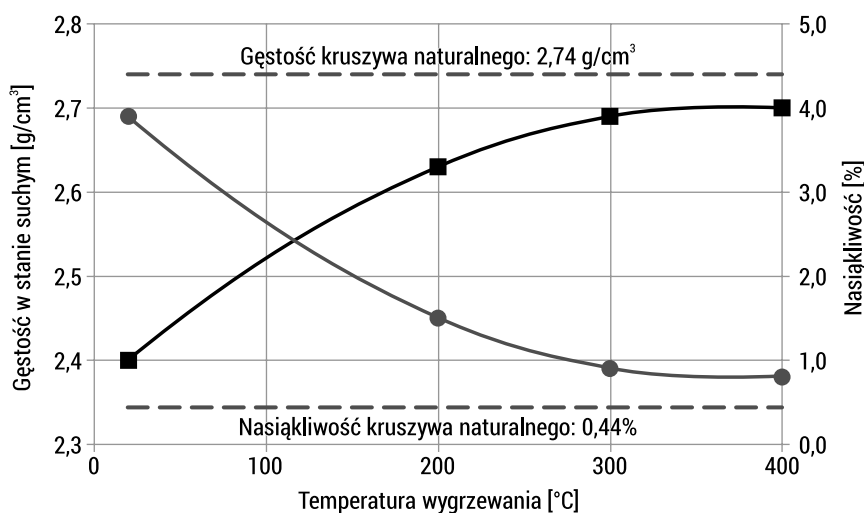
nadal 80% cząstek charakteryzuje się zbyt niską gęstością, albo wymagania odnośnie do produktu końcowego są tak rygorystyczne, że tylko niewielki procent wytworzonych kruszyw z recyklingu może je spełnić. Należy też zauważyć, że metoda ta nie oddziela materiału betonowego niskiej gęstości od zanieczyszczeń, dlatego zdecydowana część wsadu stanowi trudny do zagospodarowania odpad.

Inną metodę oczyszczania kruszywa z recyklingu, przy użyciu wysokowydajnych impulsów dźwiękowych, opisano w pracy [135]. Podstawową zasadą tej metody jest przemiana energii elektrycznej w energię mechaniczną impulsów dźwiękowych generowanych pod wodą. Energia elektryczna przepływa między dwiema elektrodami w wypełnionym wodą zbiorniku z gruzem betonowym, generując fale. Jeśli fale te napotkają powierzchnie graniczne o różnej gęstości, czyli kruszywo i zaczyn cementowy, powstają naprężenia ściskające i rozciągające. Te ostatnie niszczą przede wszystkim połączenie między kruszywem a zaczynem. Pęknięcia przebiegają głównie wzdłuż granicy faz. Energia może być kontrolowana przez ustawienie parametrów kondensatora, napięcie naładowania, odległości między elektrodami i liczby impulsów. W efekcie około 50% ziaren większych niż 2 mm zostaje pozbawionych zaczynu cementowego [135]. Jednak rozwiązanie to jeszcze długo pozostanie na etapie badań laboratoryjnych z uwagi na stopień skomplikowania niezbędnej aparatury.

Za najbardziej korzystne sposoby obróbki gruzu betonowego uważa się *metody termiczne* głównie ze względu na skuteczność i prostotę wykonania [210]. Obejmują one głównie ogrzewanie tradycyjne połączone z obróbką mechaniczną oraz ogrzewanie mikrofalowe. Przykładem metody tradycyjnej jest rozwiązanie wykorzystujące piec i dwa rurowe młyny obrotowe oraz sita i filtr workowy (rys. 1.16d). Gruz betonowy podgrzewany jest tam do temperatury 300°C, w wyniku czego następuje, zdaniem autorów, częściowa utrata przyczepności między zaczynem a ziarnem kruszywa naturalnego [213]. Następnie gruz trafia do pierwszego młyna pomiędzy dwa cylindry, zewnętrzny i wewnętrzny, gdzie kule stalowe ścierają zaprawę cementową. Potem grube kruszywo wraz z odseparowaną zaprawą transportowane jest do kolejnego młyna, w którym kruszywo pełni funkcję medium ścierającego zaczyn cementowy z powierzchni kruszywa drobnego. W efekcie tej metody otrzymuje się 35% kruszywa grubego, 30% kruszywa drobnego i 35% frakcji pyłowej. Na rys. 1.18 przedstawiono wpływ temperatury wygrzewania na uzyskane właściwości grubego kruszywa z recyklingu.

Wynika z tego, że wzrost temperatury wygrzewania gruzu betonowego do 400°C wpływa korzystnie na poprawę zarówno gęstości w stanie suchym, jak i nasiąkliwości uzyskanego kruszywa z recyklingu, zbliżając je w tych parametrach do kruszywa naturalnego. Z kolei Sui i Mueller [221] rozszerzyli zakres temperatury wygrzewania gruzu betonowego do 600°C, wprowadzając przy tym obróbkę mechaniczną w różnicowanym czasie od 3 do 14 min. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że już temperatura wygrzewania równa 250–300°C w połączeniu z odpowiednio długim czasem obróbki mechanicznej pozwala uzyskać kruszywo z recyklingu o właściwościach zbliżonych do kruszywa naturalnego. Nie przeprowadzono jednak żadnych badań w zakresie wpływu wyprodukowanego w ten sposób kruszywa

z recyklingu na właściwości betonu, a ma to istotne znaczenie w procesie kształtowania strefy przejściowej między tym kruszywem a nowym zaczynem. Pozostaje również problem z zagospodarowaniem ogromnej ilości frakcji drobnej i materiałów pylastych z uwagi między innymi na trudności z kontrolą ich jakości i opłacalności zastosowania [213]. W opinii Kurody i in. [124] oraz Shimy i in. [212] frakcje te, mające zdolność do absorbowania wody, powinny być głównie stosowane do stabilizacji gruntu. Zbyt niska temperatura prażenia wpływa tylko częściowo na proces dehydratacji zaczynu cementowego, dlatego powiązanie między powierzchnią kruszywa z recyklingu a nowym zaczynem może mieć wyłącznie charakter fizyczny, polegający co najwyżej na wypełnianiu większych porów obecnych w pozostałej na kruszywie starej zaprawie nowym zaczynem cementowym. Z kolei Mulder i in. [158] ustalili, że po poddaniu gruzu betonowego obróbce termicznej w temperaturze równej 700°C tylko 2% stwardniałego zaczynu cementowego pozostaje na powierzchni kruszywa grubego. Podobne podejście zaprezentowali Ma i in. [143], którzy ogrzewali beton nawet do 750°C, uzyskując kruszywo grube niemal całkowicie oczyszczone z zaprawy cementowej. Wynika z tego, że istnieje korelacja pomiędzy wzrostem temperatury wygrzewania gruzu betonowego a skutecznością usuwania zaprawy cementowej. Warto jednak zauważyć, że gdy temperatura wygrzewania będzie zbyt wysoka, uszkodzeniu może ulec samo ziarno kruszywa, dlatego przy wdrażaniu takiej metody należy starannie ją dobierać [5].



RYS. 1.18. Wpływ temperatury wygrzewania gruzu na jakość kruszywa z recyklingu betonu

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [213].

Akbarnezhad i in. [3] zaproponowali nowatorskie podejście do zagadnienia poprawy jakości kruszywa z recyklingu betonu poprzez częściowe usunięcie zaprawy cementowej za pomocą *mikrofal*. Technika ta wykorzystuje różnicę we właściwościach elektromagnetycznych przylegającej zaprawy i kruszywa naturalnego do generowania

wysokich naprężeń termicznych w zaprawie, zwłaszcza na styku z ziarnem, powodując rozwarstwienie materiałów. Dodatkowo wytworzone naprężenia powodują rozbięcie cząstek zaprawy na mniejsze fragmenty. Grube kruszywo z recyklingu odzyskane po ogrzewaniu mikrofalowym przez 180 s zawiera mniej niż 5% zaprawy cementowej [31]. Według innych badań najkorzystniejszy wpływ działania mikrofal obserwuje się przy czasie ekspozycji od 30 do 50 s oraz w przypadku kruszyw grubych powyżej 20 mm [25, 136]. Badania na temat zastosowania mikrofal do oczyszczania kruszywa z recyklingu wymagają jeszcze znacznych nakładów pracy, aby zastosować to rozwiązanie na skalę przemysłową [136, 250, 251]. Poza tym metoda ta jest skuteczna przede wszystkim w przypadku grubego kruszywa z recyklingu, natomiast frakcja drobna nie była przedmiotem analiz.

Inne podejście do uzdatniania kruszyw z recyklingu, bazujące na *chemicznej obróbce*, zaproponowali Tam i in. [225, 230, 231]. Metoda ta polegała na wstępnym namaczaniu kruszywa z recyklingu w środowisku kwaśnym w obecności HCl, H₂SO₄ lub H₃PO₄, o stężeniu równym 0,1 mol/dm³ umożliwiającym usunięcie zaprawy cementowej bez obniżania jakości ziaren. Po 24 godzinach namaczania konieczne jest płukanie kruszywa w wodzie destylowanej celem zlikwidowania kwaśnego odczynu. Wybrane właściwości kruszywa z recyklingu po namaczaniu w roztworach kwasów przedstawiono w tabeli 1.6.

TABELA 1.6. Właściwości kruszywa z recyklingu przed namaczaniem i po namaczaniu w roztworach kwasów

Cecha	Uziarnienie kruszywa, mm	Przed namaczaniem	Namaczanie w roztworach kwasów		
			HCl	H ₂ SO ₄	H ₃ PO ₄
1	2	3	4	5	6
Nasiąkliwość, %	10 20	2,63 1,65	2,31 1,45	2,37 1,48	2,41 1,53
Zawartość chlorków, %	10 20	0,0012 0,0016	0,0056 0,0025	0,0001 0,0001	0,0001 0,0001
Zawartość siarczanów, %	10 20	0,0025 0,0025	0,0082 0,0076	0,104 0,109	0,0109 0,0110
pH	10 20	11,63 10,46	9,34 9,07	9,35 8,95	9,33 8,55

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [230].

Jak wskazują wyniki zamieszczone w tabeli 1.6, w efekcie zastosowania obróbki chemicznej uzyskano tylko nieznaczne obniżenie nasiąkliwości kruszywa z 2,63% do 2,31% dla ziaren 10 mm przy nasycaniu w roztworze kwasu solnego. Należy również zauważyć, że spadek pH kruszywa nawet do 8,55, pomimo wciąż alkalicznego odczynu, może w przyszłości negatywnie oddziaływać na trwałość betonu. W efekcie użycia 30% kruszywa grubego po obróbce chemicznej jako zamiennika kruszywa

naturalnego uzyskano stosunkowo niewielki wzrost wytrzymałości betonu, wynoszący maksymalnie 5,17% w porównaniu z betonem na kruszywie niepoddanym obróbce [39]. Zbliżone rezultaty uzyskali też inni badacze, którzy odnotowali poprawę wytrzymałości na ściskanie betonu z użyciem kruszywa z recyklingu namaczanego w roztworach kwasów solnego, azotowego i siarkowego, ale wyniki te były wyraźnie gorsze w porównaniu z betonem kontrolnym [203]. Także efekty zbliżonego eksperymentu przeprowadzonego przez autorkę podczas przygotowywania rozprawy doktorskiej nie potwierdziły korzystnego wpływu oddziaływania środowiska kwaśnego na zauważalne usunięcie zaprawy cementowej z powierzchni ziaren kruszywa [176].

Powyższą metodę chemicznego oczyszczania kruszywa z recyklingu z zaprawy cementowej rozwinęli Wang i in. [249], którzy po namaczeniu kruszywa z recyklingu w roztworze kwasu octowego, odpowiednio o stężeniach 1%, 3% i 5%, następnie poddali je obróbce mechanicznej. Kwas octowy reagował z głównymi składnikami zaprawy cementowej, mianowicie z węglanem wapnia, wodorotlenkiem wapnia oraz z uwodnionym krzemianem wapnia. Reakcja ta, przez osłabienie przylegającej zaprawy, umożliwiła jej oddzielenie od ziarna kruszywa naturalnego poprzez mechaniczne ścieranie. W rezultacie uzyskano niewiele, bo od 3% do 9% usuniętej zaprawy cementowej w zależności od stężenia kwasu octowego. Ponadto zastosowanie roztworów kwasów w tego typu pracach jest niebezpieczne i stanowi zagrożenie dla zdrowia pracowników.

Druga grupa metod przetwarzania gruzu betonowego prezentuje alternatywne podejście do poprawy jakości kruszywa z recyklingu. Zamiast usuwać osłabioną i porowatą zaprawę cementową, jest ona zatrzymywana na kruszywie naturalnym, co powoduje jej wzmocnienie głównie poprzez wypełnienie i zagęszczenie słabych partii. Techniki te bazują na fizycznej impregnacji powierzchni kruszywa z recyklingu oraz na oddziaływaniu na nią chemicznie.

Impregnacja ma na celu poprawę parametrów zaprawy cementowej otaczającej ziarna kruszywa przez obniżenie jej nasiąkliwości i zmniejszenie rozwiniętej powierzchni. Jedną z metod uszczelniania kruszywa z recyklingu została dokładnie opisana w pracy Ajdukiewicza i Kliszczewicz [2]. Pierwsza faza procesu w tej metodzie polegała na tradycyjnym przekruszaniu i przesiewaniu kruszywa do frakcji mniejszych niż 40 mm. Następnie kruszywo z recyklingu powlekało się zaczynem cementowym w celu zmniejszenia rozwiniętej powierzchni i porowatości ziaren. Po 24 godzinach umieszczano je w bębnie obrotowym, gdzie w wyniku otaczania następowało wygładzanie powierzchni. Końcowym etapem było podzielenie materiału na wymagane frakcje. W wyniku procesu ulepszania kruszywa z recyklingu zmniejszała się jego wodoodporność o 20 kg/m³ i polepszała się urabialność mieszanek betonowych. Dzięki obniżeniu współczynnika w/c zaobserwowano wzrost wytrzymałości betonu, a także zmniejszenie odkształceń skurczowych od wysychania. Jednak proces ten wymaga zastosowania dodatkowej ilości cementu, którego produkcja emituje dwutlenek węgla do atmosfery. Impregnację kruszywa z recyklingu cienką warstwą cementu o grubości 0,16–0,23 mm stosowali również Martirena i in. [148]. W efekcie zauważono zwiększenie zagęszczenia strefy przejściowej pomiędzy matrycą cementową a grubym

kruszywem z recyklingu, co skutkowało zmniejszeniem jej porowatości i przyczyniło się do wzrostu wytrzymałości betonu. Z kolei Tsujino i in. [238] do impregnacji kruszywa zastosowali odpowiednio środki olejowe i silanowe. Skutkiem była redukcja nasiąkliwości kruszywa z recyklingu z 5,5% do 3,5% w przypadku środka olejowego oraz do 1,0% w obecności impregnatu silanowego. O ile jednak środek typu olejowego nie pogorszył znacząco właściwości mechanicznych betonu, o tyle impregnat silanowy znacznie je obniżył. Tak więc metoda ta okazała się mało efektywna. Należy również zaznaczyć, że przedmiotem eksperymentu były wyłącznie grube kruszywa z recyklingu.

Kou i Poon [111] analizowali możliwości poprawy jakości kruszywa z recyklingu poprzez ich impregnację *polimerem* w postaci alkoholu poliwinylowego o stężeniu równym odpowiednio 6%, 8%, 10% i 12%. W tym celu kruszywa wielkości 20 mm i 10 mm umieszczono w eksykatorkach z pompą próżniową pracującą pod ciśnieniem przez 6 godzin. Następnie dodawano do niego roztwór polimeru, tak aby kruszywo było w nim namoczone przez 24 godziny przy włączonej pompie próżniowej. Po wysuszeniu kruszywo poddano odpowiednim badaniom. Prezentowane wyniki wskazują, że największe ograniczenie nasiąkliwości kruszywa z 6,23% do 1,63% uzyskano przy 10-procentowym stężeniu polimeru. Zastosowanie tak zaimpregnowanego kruszywa poprawiło również właściwości mechaniczne betonu i jego odporność na penetrację jonów chlorkowych, jednak nadal były one gorsze w porównaniu z betonem kontrolnym. Należy zauważyć, że pomimo znaczącej skuteczności metody na chwilę obecną pozostaje ona ograniczona do warunków laboratoryjnych z uwagi na rygorystyczną procedurę procesu impregnacji oraz niezbędne oprzyrządowanie.

Zhang i in. [274] podjęli próbę poprawy jakości kruszywa z recyklingu betonu poprzez *przyspieszoną karbonatyzację* obecnej w jego składzie zaprawy cementowej. Kruszywo z recyklingu traktowano przez 7 dni dwutlenkiem węgla o stężeniu 20% przy ciśnieniu równym 0,2 MPa. Podczas reakcji CO_2 reagował z wodorotlenkiem wapnia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) i uwodnionym krzemianem wapnia (C-S-H), tworząc węglan wapnia (CaCO_3), który wypełniał pory kapilarne w porowatej zaprawie cementowej. Wyniki wskazują, że proces karbonatyzacji spowodował zwiększenie gęstości kruszywa o 5,6%, obniżając przy tym nasiąkliwość z 8,7% do 6,7% oraz wskaźnik rozkruszenia z 17,1% do 15,8% w odniesieniu do kruszywa niepoddanego obróbce. Według samych autorów korzystniejsze efekty uzyskano dla kruszyw najdrobniejszych (0,16/0,32 mm), które zawierały najwięcej zaczynu cementowego. Karbonatyzacja wpływa również na strukturę strefy kontaktowej w samym kruszywie z recyklingu, głównie w zakresie mikrotwardości i gęstości [211]. Metoda ta może być doskonałym sposobem składowania dwutlenku węgla, jednak sam proces karbonatyzacji jest długotrwały (trwa około 7 dni) i wymaga urządzenia zapewniającego odpowiednie warunki dla jego prawidłowego przebiegu głównie w zakresie stałego ciśnienia i utrzymania odpowiedniego stężenia CO_2 .

Z analizy licznie przedstawianych w literaturze metod przetwarzania gruzu betonowego wynika, że istnieje pilna potrzeba poszukiwania i znalezienia takiego rozwiązania, które będzie charakteryzowało się kompleksowym podejściem do recyklingu betonu, a nie skupi się jedynie na wytworzeniu samego kruszywa grubego

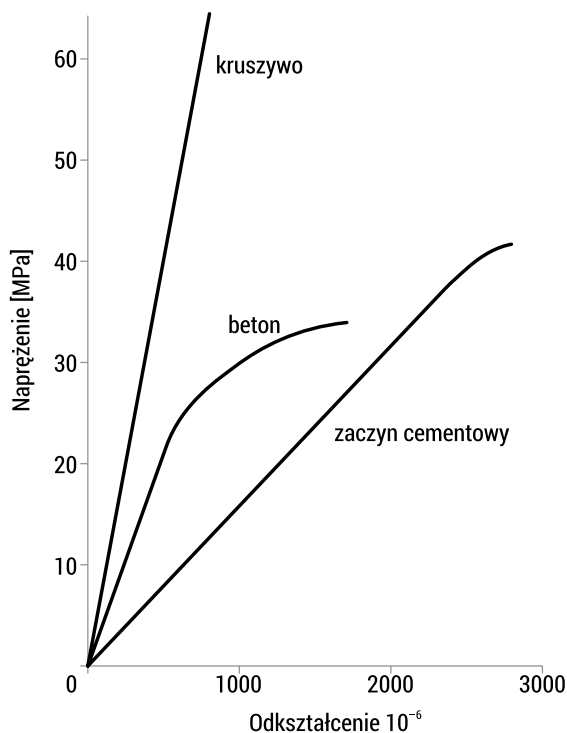
o podwyższonej jakości. Prezentowane metody bazujące na usunięciu zaprawy cementowej nie są w pełni skuteczne, ponieważ znaczna część tej zaprawy ostatecznie pozostaje na powierzchni ziarna. Dodatkowo jej zawartość zostaje zredukowana w różnym stopniu, w zależności od parametrów proponowanego rozwiązania. Zróżnicowana ilość zaprawy to brak powtarzalności cech kruszywa z recyklingu, co tym samym utrudnia projektowanie składu mieszanki betonowej i ogranicza możliwości jego zastosowania w kompozytach. Proponowane dotychczas metody nie eliminują również obecności zanieczyszczeń w kruszywie z recyklingu lub usuwają tylko część z nich, głównie o niskiej gęstości, jak na przykład klasyfikacja wodna. Szczególnie niektóre zanieczyszczenia niekorzystnie wpływają na właściwości wytrzymałościowe betonu przygotowanego na bazie tego kruszywa. Do tych zanieczyszczeń przede wszystkim zaliczyć można szkło, materiały bitumiczne, plastik, drewno czy gips [91]. Dodatkowo w opisanych wyżej nowoczesnych metodach recyklingu gruzu betonowego w zasadzie nie podejmowano próby zagospodarowania frakcji drobnej pozostałej po oddzieleniu i oczyszczeniu kruszywa z recyklingu, a niejednokrotnie stanowi ona około połowy masy gruzu betonowego poddanego obróbce. Zwykle proponuje się jej składowanie lub ewentualnie zastosowanie do stabilizacji terenu. Sporadyczne próby wykorzystania tej frakcji jako dodatku do klinkieru pozostawiają wiele niewiadomych, między innymi w zakresie dopuszczalnej ilości, stopnia rozdrobnienia czy ograniczeń co do składu, przede wszystkim z uwagi na obecność zanieczyszczeń. Z kolei metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu bazujące na impregnacji jego powierzchni wymagają zwykle profesjonalnych urządzeń i utrzymania reżimu technologicznego w zakresie parametrów procesu, co ogranicza te metody do badań w laboratorium. Poza tym są one długotrwałe, a co za tym idzie ich wydajność jest zdecydowanie niewielka. Zaproponowane kilka lat temu sposoby impregnacji powierzchni kruszywa zaczynem cementowym są obecnie nieaktualne, chociażby z uwagi na ograniczenia emisyjności dwutlenku węgla w procesie produkcji cementu i dążenie do gospodarki zeroemisyjnej.

1.5. Charakterystyka strefy kontaktowej w betonie

1.5.1. Znaczenie strefy kontaktowej

Strefa kontaktowa, czy raczej przejściowa (ITZ – *Interfacial Transition Zone*), w betonie to obszar zaczynu cementowego znajdującego się wokół ziarna kruszywa, który jest zaburzony przez obecność tego ziarna. Badacze od wielu lat reprezentują zróżnicowane poglądy na temat znaczenia tej warstwy w procesie niszczenia betonu, jej grubości i właściwości odmiennych od innych obszarów zaczynu cementowego [46, 63, 93]. Pochodzenie tej strefy wynika z upakowania ziaren cementu wobec znacznie większego ziarna kruszywa, co prowadzi do lokalnego wzrostu porowatości w wyniku zmniejszenia ilości cząstek cementu w tym regionie [207]. Wielkość strefy przejściowej jest

zależna do ziaren cementu, przy czym największe różnice występują w pierwszych 15–20 μm od granicy faz. W typowym betonie stanowi ona około 20–30% całkowitej objętości zaczynu cementowego [206, 207]. Zainteresowanie strefą przejściową wynika głównie z roli, jaką odgrywa ona w procesie niszczenia betonu. Mikrospękania rozwijają się bowiem w obszarze granicznym z uwagi na zaburzenie własności ośrodka spowodowane niedoskonałością wiązania zaczynu z kruszywem [181]. Beton jest często uważany za dwufazowy materiał kompozytowy złożony z zaczynu cementowego i kruszywa. Na rys. 1.19 przedstawiono porównanie krzywych zależności naprężenie–odkształcenie ($\sigma - \varepsilon$) oddzielnie dla zaczynu cementowego, kruszywa i betonu w wyniku działania obciążenia.



RYS. 1.19. Porównanie krzywych naprężenie–odkształcenie dla kruszywa, zaczynu cementowego i betonu

ŹRÓDŁO: opracowanie na podstawie [207].

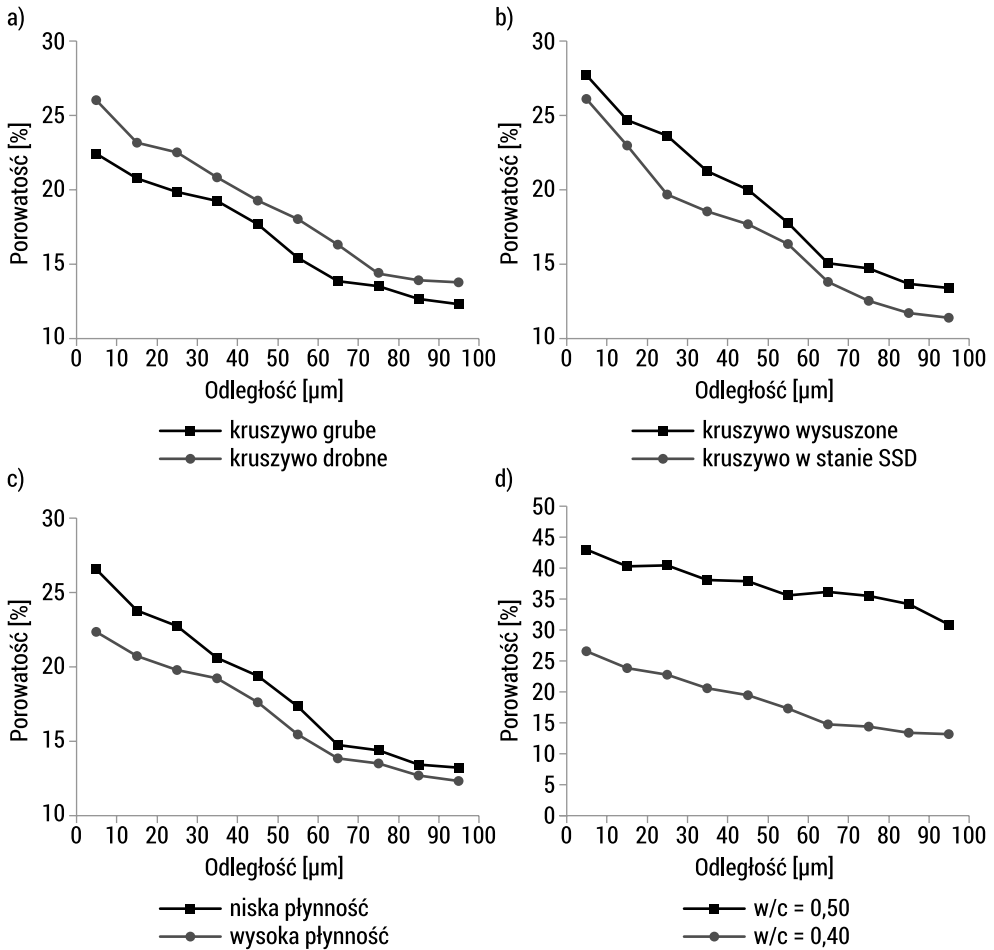
Zarówno zaczyn cementowy, jak i kruszywo wykazały kruche właściwości sprężyste, to znaczy liniowe, odwracalne odkształcenie aż do granicy, po której następuje nagle uszkodzenie. Natomiast beton jako materiał kompozytowy wykazał znaczące właściwości quasi-plastyczne. Nośność nadal rosła poza liniową granicę sprężystości, a po szczytowym obciążeniu nastąpił stopniowy spadek nośności. Takie zachowanie, które ma ważne konsekwencje praktyczne, jest spowodowane rozwojem wielu

mikropęknięć, głównie w strefie kontaktowej. Prowadzi ono do powszechnego postrzegania ITZ jako słabego ogniwa w betonie [207]. Pomimo potwierdzonej wieloma badaniami różnicy między ITZ a zaczynem cementowym nadal bardzo trudno jest precyzyjnie określić jej działanie. Dzieje się tak, ponieważ nie jest to odrębna „strefa”, ale obszar o stopniowo zmieniającej się mikrostrukturze. Dodatkowo przygotowywane w pracach badawczych próbki wzorcowe, w których właściwości strefy kontaktowej mogą być mierzone oddzielnie, mają tendencję do kształtowania tych stref w odmienny sposób niż w rzeczywistym betonie.

Budowa warstwy przejściowej między kruszywem a zaczynem cementowym jest istotnym parametrem decydującym o trwałości betonu, a wielu autorów sądzi wręcz, że jest to czynnik decydujący [83, 132, 141]. Uważa się, że mikrostruktura strefy kontaktowej różni się morfologią, składem, gęstością i innymi właściwościami od mikrostruktury matrycy cementowej [86, 233]. Zgodnie z rozpowszechnionymi poglądami zaczyn cementowy zalegający w bliskim otoczeniu kruszywa charakteryzuje się większą porowatością, zwiększonym współczynnikiem w/c i obniżoną wytrzymałością. Dodatkowo właściwości tej warstwy zmieniają się wraz z odległością od powierzchni ziaren, co potwierdzili Ollivier i Grandet [170]. Podczas analizowania właściwości strefy przejściowej najczęściej rozważane są następujące zagadnienia:

- porowatość strefy,
- zwiększony lokalnie współczynnik w/c,
- grubość warstwy o odmiennych właściwościach,
- obecność niezhydratyzowanych ziaren cementu,
- właściwości transportowe,
- właściwości mechaniczne.

W dalszej części pokrótce scharakteryzowano każde z nich. W opinii większości badaczy na porowatość strefy przejściowej znaczący wpływ ma wielkość zastosowanego kruszywa. Elsharief i in. [50] stwierdzili, że zmniejszenie wielkości kruszywa z zakresu 2,36– 4,75 mm do 150–300 μm prowadzi do mniejszej porowatości i większej zawartości cząstek nieuwodnionych w obszarze otaczającym kruszywo. Z kolei we wcześniejszych wynikach badań Ping i in. [182] wykazali, że wielkość frakcji nie ma istotnego wpływu na porowatość strefy przejściowej, ale grubość tej strefy zmniejsza się wraz z ograniczeniem wielkości kruszywa. Do zbliżonych wniosków doszli Xie i in. [256], którzy badali porowatość międzyfazowej strefy przejściowej w modelowym betonie w zależności od takich czynników, jak wielkość kruszywa, stan jego nasycenia, konsystencja zaczynu cementowego i współczynnik w/c (rys. 1.20). Do badań wykorzystano mikroskopię skaningową z detekcją elektronów wstecznie rozproszonych (*Backscatter Electron*). Stwierdzono, że obecność kruszywa drobnego (rys. 1.20a) oraz kruszywa w stanie suchym (rys. 1.20b) zwiększa nieznacznie porowatość strefy przejściowej. Wpływa na to również konsystencja zaczynu cementowego, szczególnie w odległości do 25 μm od kruszywa (rys. 1.20c). Jednak największy wpływ na porowatość zarówno w obszarze ITZ, jak i w zaczynie cementowym ma zmiana współczynnika w/c (rys. 1.20d).



RYS. 1.20. Porowatość międzyfazowej strefy przejściowej w modelowym betonie z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej z detekcją elektronów wstecznie rozproszonych, w zależności od: a) wielkości kruszywa, b) stanu nasycenia kruszywa (SSD – stan nasycony powierzchniowo suchy), c) konsystencji zaczynu, d) współczynnika w/c

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [256].

Znaczący wzrost porowatości kapilarnej z 5–9% w zaczynie cementowym do 25% w ITZ dla mieszanek o stosunku w/c w zakresie 0,35–0,42 odnotowali również inni badacze [35]. Nie zaobserwowano takich zmian dla mieszanek o współczynniku w/c = 0,30. W pracy Scrivener i in. [208] scharakteryzowano mikrostrukturę strefy przejściowej w betonach wysokiej wytrzymałości z pyłem krzemionkowym i bez pyłu. W przypadku betonów o tym samym współczynniku w/c stwierdzono, że pył krzemionkowy miał tylko niewielki wpływ na porowatość samego zaczynu cementowego. Natomiast jego obecność na tyle poprawiła gęstość strefy przejściowej, że jej porowatość była zbliżona do porowatości matrycy cementowej. Wyniki te potwierdzają

hipotezę, że głównym efektem działania pyłu krzemionkowego w betonie jest poprawa wiązania między kruszywem a zaczynem. Korzystny wpływ stosowania drobnoziarnistych dodatków, takich jak pył krzemionkowy czy popiół lotny, na szczelność strefy przejściowej oraz jej szerokość wykazali odpowiednio Golewski [71] oraz Nezerka i in. [165]. Dzięki zastosowaniu bardzo drobnych i dobrze zdyspergowanych dodatków mineralnych początkowy współczynnik w/c wokół kruszywa został obniżony, a strefa przejściowa zagęszczona. Podobne opinie prezentowali inni badacze, którzy w obecności nanokrzemionki uzyskali znaczące zmniejszenie objętości porów z 51% do 13% w strefie przejściowej i z 19% do 11% w zaczynie cementowym [258]. Mikrowypełniacz zagęszcza strefę przejściową i zmienia strukturę porów [197, 279] oraz uczestniczy w hydratacji cementu, wchodząc w reakcję pucolanową z wodorkiem wapnia, co zwiększa zawartość fazy C-S-H [223, 273].

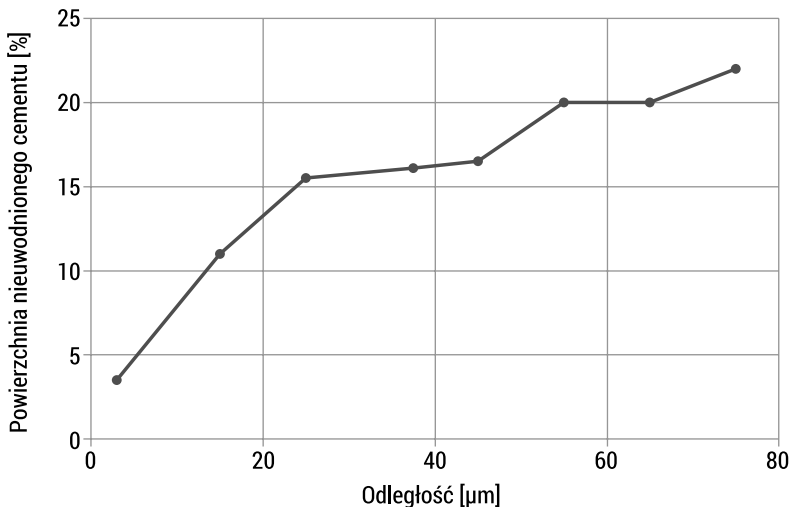
Powszechnie przyjmuje się, że współczynnik w/c jest jednym z głównych czynników determinujących porowatość i wytrzymałość betonu. Zdaniem większości badaczy może on wpływać również na właściwości strefy przejściowej. Generalnie uważa się, że wzrost współczynnika w/c zwiększa lokalną porowatość ITZ [217], ale są również opinie, że ma niewielki wpływ na jej szerokość [21]. Xie i in. [256], badając wpływ współczynnika w/c na jakość strefy przejściowej w zaprawie cementowej, wykazali, że przy jego zwiększeniu z 0,40 do 0,50 wzrasta porowatość w strefie międzyfazowej z 27% do 43%. Wyniki te wskazują, że efekt ściany wytworzonej przez obecność kruszywa prowadzi do strefy przejściowej o szerokości rzędu 15 μm wokół każdego ziarna kruszywa, w której jest mniej ziaren cementu. Odpowiada to strefie o wyższym współczynniku wodno-cementowym. W typowym betonie około 20–30% zaczynu cementowego znajduje się w obrębie 15 μm od kruszywa. Dlatego wyższy stosunek wody do cementu w tej strefie oznacza, że stosunek w/c w zaczynie cementowym w odległości większej niż 15 μm od kruszywa musi zostać zmniejszony o około 0,05 [207].

Diamond i Huang [43] przebadali cztery różne serie betonów, każdy w wieku 3 i 100 dni. We wszystkich wynikach zaobserwowali oni obecność niewodnionego cementu, która zmniejszała się stopniowo w miarę zbliżania się do powierzchni kruszywa (rys. 1.21).

Zależność ta potwierdza, że efekt ściany pozbawia obszary znajdujące się w pobliżu ziaren kruszywa odpowiedniej ilości cząstek cementu, nawet w dobrze wymieszanym betonie. W ten sposób powstaje lokalna otoczka wokół ziaren kruszywa, o nieco innych właściwościach w początkowej fazie hydratacji w porównaniu z pozostałym zaczynem cementowym.

Wydaje się, że ewolucja mikrostruktury strefy przejściowej (ITZ) w porównaniu z mikrostrukturą zaczynu cementowego zależy od początkowej zawartości niewodnionych ziaren cementu. Wyniki sugerują, że obecność stosunkowo małej ilości tych ziaren w ITZ we wczesnym wieku może powodować wzrost jej porowatości w stosunku do zaczynu cementowego w czasie. Z kolei duża ilość niewodnionych ziaren cementu w ITZ we wczesnym wieku może powodować z czasem zmniejszanie się jej porowatości w stosunku do porowatości zaczynu [42]. Ponadto na niektórych

powierzchniach kruszywa można zauważyć duże złogi wodorotlenku wapnia, podczas gdy inne mają go mało. Te różnice bardzo utrudniają scharakteryzowanie „przeciętej” mikrostruktury ITZ [206].



RYS. 1.21. Powierzchnia nieuwodnionego cementu w % w zależności od odległości od ziarna kruszywa w 3-dniowym betonie

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [43].

Właściwości transportowe kompozytów na bazie cementu, w tym dyfuzyjność substancji rozpuszczonej, przewodnictwo elektryczne i przepuszczalność wody, są uważane za wskaźniki ich trwałości. Przyjmuje się, że to właśnie międzyfazowa strefa przejściowa między zaczynem cementowym a kruszywem oraz puste przestrzenie powietrzne odgrywają kluczową rolę we właściwościach transportowych kompozytów cementowych. Opracowany przez Yanga i in. [262] czterofazowy model mikromechaniczny umożliwia w sposób ilościowy określenie wpływu lokalnych właściwości ITZ i stanu nasycenia pustek powietrznych na właściwości transportowe kompozytów na bazie cementu. Zdaniem Delagrave i in. [41] obecność piasku w zaczynie cementowym prowadzi do modyfikowania mikrostruktury i właściwości transportowych zapraw cementowych. Przedstawione wyniki wskazują na globalne obniżenie współczynnika dyfuzji jonów chlorkowych dla zapraw przy jednoczesnym wzroście właściwości transportowych zaczynu, ponieważ jego porowatość jest modyfikowana przez cząstki piasku. Modyfikację tę można przypisać wielu międzyfazowym strefom przejściowym. Kruszywa obecne w zaczynie cementowym działają jak stałe wtrącenia zwiększające krętność matrycy, ale obecność licznych ITZ sprzyja przemieszczaniu się jonów chlorkowych [41]. Również Ye i in. [265] potwierdzają znaczenie strefy kontaktowej w zagadnieniu dyfuzji jonów chlorkowych w betonie.

Wpływ strefy przejściowej na właściwości mechaniczne betonu nie budzi wątpliwości. Niemniej jednak ocena właściwości mechanicznych strefy kontaktowej

na podstawie właściwości całego betonu jest utrudniona. Scrivener i in. [207] przeprowadzili badania betonu pod kątem rozwoju mikropęknięć i ich zależności od mechanizmów uszkodzeń. W rezultacie stwierdzono, że po obciążeniu betonu mikropęknięcia rozpoczynają się w ITZ, gdy lokalne naprężenie główne przekracza początkową wytrzymałość na rozciąganie. Rozwój pęknięcia wiązania wzdłuż granicy faz i jego zależność od nieliniowego zachowania betonu były badane przez różnych badaczy [83, 181, 206] w celu zaprojektowania materiału pod względem jego optymalnego wykorzystania. Wyniki opublikowane przez Mondala i in. [156] wskazują na to, że średni moduł sprężystości ITZ wynosi od 70% do 85% średniego modułu zaczynu cementowego, w zależności od typu kruszywa. Autorzy wskazują też, że ekstremalna niejednorodność w obrębie granicy faz i słabe wiązanie między kruszywem a zaczynem pozostają głównym problemem, który wpływa na ogólne właściwości mechaniczne betonu.

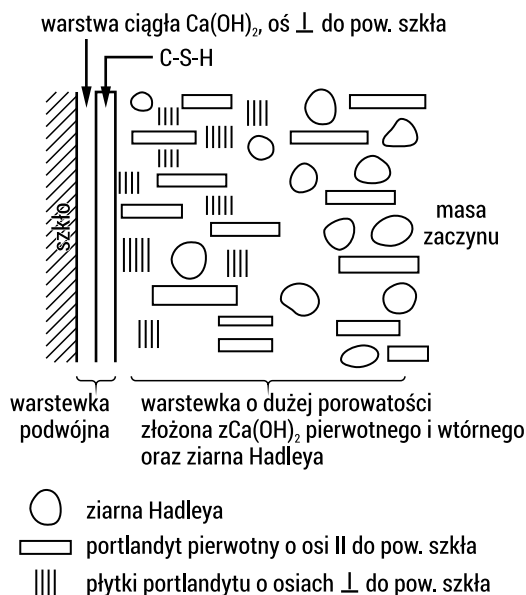
Zwykle przyjmuje się, że grubość strefy przejściowej jest równa odległości mierzonej od powierzchni ziarna kruszywa, na której zaczyn cementowy ma charakterystyczną mikrostrukturę, odmienną od jego pozostałej części. Grubość ITZ jest zróżnicowana w zależności od rodzaju użytego kruszywa i cementu, współczynnika w/c, wieku kompozytu oraz metody pomiaru. Scrivener i in. [208] udowodnili, że na grubość ITZ wpływa upakowanie ziaren cementu. Ponieważ nie zaobserwowano wyraźnego przejścia pomiędzy strefą międzyfazową a matrycą cementową, stwierdzono, że zmiany te są progresywne i najbardziej znaczące w odległości 15–20 μm od kruszywa. Dlatego w dobrym jakościowo betonie strefa przejściowa nie jest widoczna jako wyraźne pasmo o zwiększonej porowatości. W celu porównania grubości ITZ w różnych betonach Leemann i in. [128] zaproponowali, aby zdefiniować ją jako strefę w pobliżu kruszyw, w której porowatość przekracza tę dla zaczynu cementowego o 15%. Liczne badania dotyczące strefy przejściowej w betonie wykazały, że jej grubość jest porównywalna z wielkością cząstek cementu i waha się między 20 a 100 μm [169, 207]. Monteiro i in. [157], wykorzystując skaningową mikroskopię elektronową i analizę dyfraktometrii rentgenowskiej, stwierdzili, że grubość ITZ zwiększa się wraz ze wzrostem frakcji kruszywa. W opinii Diamonda i Huanga [43] strefa kontaktowa zawiera tyle samo C-S-H na jednostkę objętości, co pozostały zaczyn cementowy. Według nich struktura strefy przejściowej w zwykłych betonach nie różni się na tyle od struktury matrycy cementowej, aby stanowić podstawę dla znaczących skutków w zakresie przepuszczalności lub właściwości mechanicznych.

Z uwagi na powyższe rozważania oczywiste staje się, że strefa przejściowa decyduje o trwałości betonu i tym samym wpływa na proces jego niszczenia. Jest to istotne z punktu widzenia procesu recyklingu gruzu betonowego, w którym konieczna jest jego dezintegracja w postaci oddzielenia ziaren kruszywa grubego od zaprawy cementowej.

1.5.2. Budowa strefy przejściowej w betonie cementowym – efekt ściany

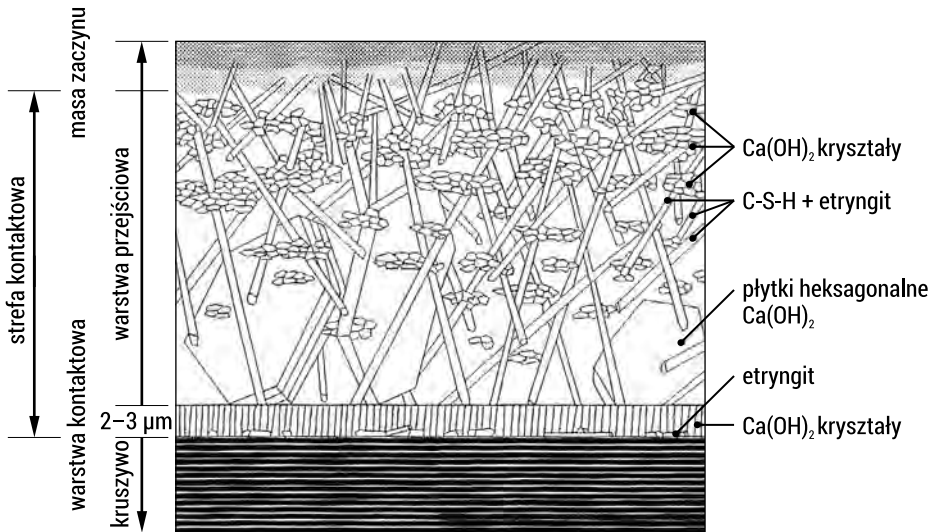
Jak już wcześniej wspomniano, zainteresowanie strefą na granicy kruszywa i zaczynu cementowego wynika z roli, jaką odgrywa ona w procesie niszczenia betonu. W betonie cementowym najmniej odkształcalnym składnikiem jest kruszywo, w którym koncentrują się naprężenia i przenoszą się na strefę przejściową. Mikrospękania rozwijają się bowiem w obszarze granicznym z uwagi na zaburzenie własności ośrodka spowodowane niedoskonałością wiązania zaczynu z kruszywem [196]. Założenie to było podstawą do stworzenia kilku modeli budowy strefy przejściowej zaprezentowanych na rys. 1.22 [17, 157, 170, 282]. Model zaproponowany przez Barnesę [17] opracowano dla układu szkło–zaczyn cementowy i wyróżniono w nim warstwę podwójną (*duplex film*) grubości kilku mikrometrów złożoną z warstewki kryształów portlandytu, zorientowanych prostopadle do powierzchni ziarna kruszywa i fazy C-S-H. Następnie wyróżniono strefę o zwiększonej porowatości złożoną z pierwotnego i wtórnego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i zhydratyzowanych ziaren cementu tworzących tak zwane ziarna Hadleya. Ziarna te otoczone są hydratami, głównie warstwą C-S-H o grubości 1 μm . Model ten nie uwzględnia formowania się innych produktów hydratacji, jak ettryngit, w strefie przejściowej.

a) model Barnesy [17]

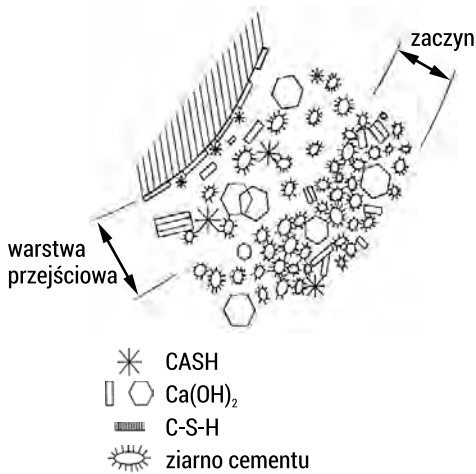


RYS. 1.22. Wybrane modele strefy kontaktowej kruszywo–zaczyn w betonie

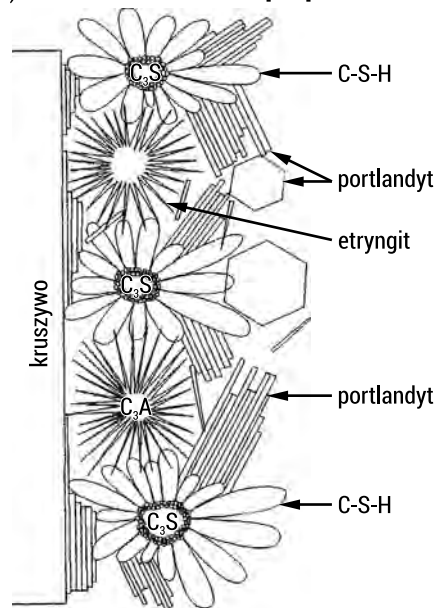
b) model Zimbelmanna [282]



c) model Monteiro [157]



d) model Olliviera–Grandeta [170]



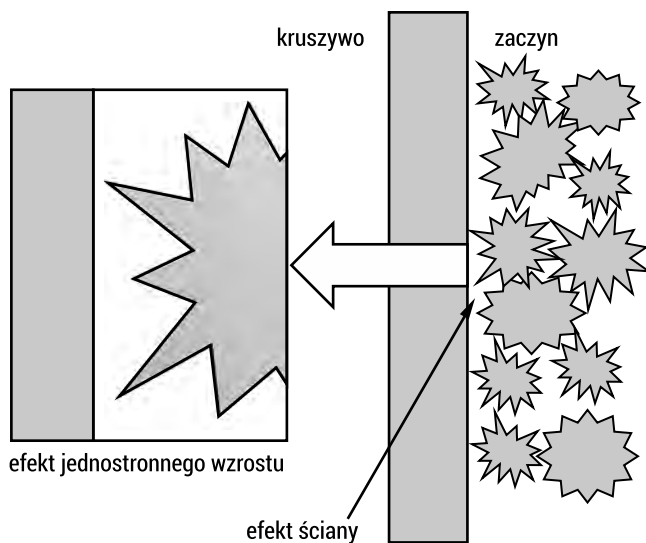
RYS. 1.22. Wybrane modele strefy kontaktowej kruszywo–zaczyn w betonie

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [17, 157, 170, 282].

W modelu opracowanym przez Olliviera i Grandeta [170] uwzględniono wczesną hydratację C_3A prowadzącą do szybkiego formowania się ettryngitu w strefie kontaktowej. Nie wyróżniono natomiast warstwy podwójnej o złożonej budowie. Z kolei Monteiro [157] główny nacisk położył na zwiększoną porowatość strefy przejściowej. Wyróżnił również obecność kryształów $Ca(OH)_2$ i ettryngitu na powierzchni ziarna kruszywa. W modelu Zimbelmanna [282] bezpośrednio na powierzchni kruszywa znajduje się gęsta warstwa portlandytu pokrywająca sieć kryształów ettryngitu grubości 2–3 μm . Następnie występuje warstwa przejściowa o grubości około 20–30 μm , złożona w większości z dużych heksagonalnych kryształów portlandytu ustawionych prostopadle do powierzchni ziarna, „poprzerastanych” kryształami ettryngitu i miejscami fazą C-S-H. Jest to strefa o zwiększonej porowatości. Pomimo różnic w budowie strefy kontaktowej w poszczególnych modelach wszyscy autorzy są zgodni co do występowania strefy o zwiększonej porowatości, wzbogaconej w portlandyt w stosunku do zaczynu oddalonego od powierzchni kruszywa.

Jednym z podstawowych czynników powodujących formowanie się wodorotlenku wapnia w pobliżu kruszywa jest lokalne zwiększenie współczynnika w/c w porównaniu z pozostałym zaczynem cementowym. Efekt ten związany jest ze zjawiskiem adsorpcji wody na powierzchni kruszywa w czasie jego zwilżania podczas wykonywania mieszanki betonowej. Po dodaniu wody do suchego kruszywa następuje pokrywanie ziaren jej cienką błonką (woda błonkowa), zatrzymanie wody między zbliżonymi do siebie ziarnami (woda kapilarna) oraz jej uwięzienie między co najmniej trzema ziarnami kruszywa (woda meniskowa) [40]. Lokalne zwiększenie ilości wody umożliwia rozpuszczanie się składników cementu i krystalizację produktów reakcji z roztworu. Dzięki wysokiemu stosunkowi wody do cementu te krystaliczne produkty w sąsiedztwie gruboziarnistego kruszywa składają się ze stosunkowo większych kryształów i dlatego tworzą bardziej porowatą strukturę niż w zaczynie cementowym, o czym wspomniano już w podrozdziale 1.5.1. Płytkowe kryształy wodorotlenku wapnia mają tendencję do układania się w zorientowanych warstwach, najczęściej prostopadle do powierzchni kruszywa. Ostatecznie, wraz z postępowaniem procesu hydratacji, słabo krystaliczny C-S-H i druga generacja mniejszych kryształów ettryngitu i wodorotlenku wapnia zaczynają wypełniać pustą przestrzeń, która istnieje między szkieletem utworzonym przez duże kryształy ettryngitu i wodorotlenku wapnia [151]. Pomaga to poprawić gęstość, a tym samym wytrzymałość strefy międzyfazowej. Z kolei w przypadku porowatych kruszyw lekkich nie stwierdzono występowania strefy przejściowej o zmienionej budowie czy składzie z uwagi na efekt kapilarnego podciągania wody do wnętrza ziaren [149]. Wówczas nawet zalecane nawilżanie wstępne kruszyw o porowatości powyżej 10% nie prowadzi do formowania się strefy bogatej w portlandyt [40].

Innym czynnikiem wpływającym na zwiększenie porowatości w warstwie granicznej jest efekt ściany wynikający z trudności ścisłego upakowania cząstek przy powierzchni kruszywa oraz bezpośrednio z nim związany efekt jednostronnego wzrostu produktów hydratacji [40, 90]. Schemat obu tych efektów przedstawiono na rys. 1.23.



RYS. 1.23. Efekt ściany i jednostronnego wzrostu produktów hydratacji na niereaktywnym kruszywie

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [40].

Efekty te występują również w kruszywach reaktywnych w stosunku do zaczynu, jednak z powodu zachodzących reakcji chemicznych budowa strefy przejściowej ulega zmianie. W przypadku reaktywnego kruszywa krzemionkowego reakcji ulegają jony wapniowe z roztworu z krzemionką z kruszywa (tworzy się zmodyfikowana faza C-S-H), natomiast przy kruszywach węglanowych jest to reakcja glinianów wapniowych z kalcytem, z utworzeniem w późniejszym etapie $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$. W obu przypadkach porowatość strefy przejściowej maleje, przyczepność kruszywa do zaczynu rośnie, a warstwa portlandytu (szczególnie zorientowanego prostopadle do powierzchni kruszywa) albo nie występuje w ogóle, albo jest zdegenerowana [78, 123]. Zhang i Ye [276] obliczyli energię aktywacji (E_a) odwodnienia C-S-H i portlandytu według równania Arrheniusa (1.2) z wyników analizy termicznej:

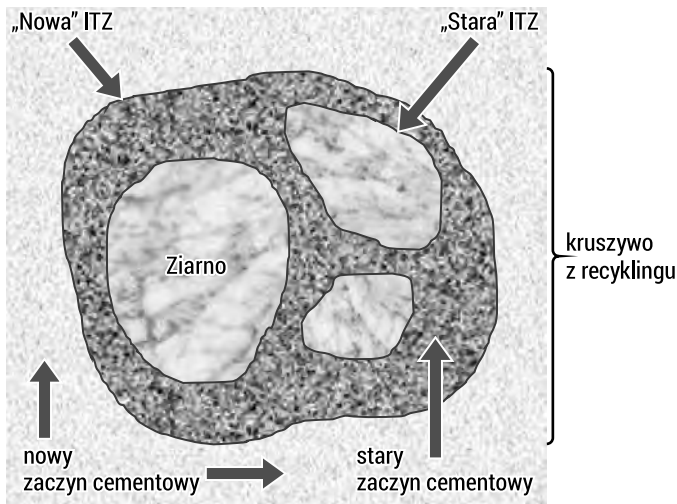
$$K(T) = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{rT}\right) \quad (1.2)$$

gdzie: K – stała szybkości; E_a – energia aktywacji procesu, kJ/mol; r – stała gazowa; T – temperatura absolutna, °C; A_0 – czynnik przedwykładniczy w równaniu Arrheniusa.

Energia ta w przypadku portlandytu wynosi 151,82 kJ/mol, podczas gdy dla żelu C-S-H waha się od 83,69 do 371,93 kJ/mol. W związku z tym odwodnienie portlandytu jest reakcją jednoetapową, podczas gdy odwodnienie C-S-H składa się z wielu etapów ze względu na jego złożoną strukturę, co wykazano również w rozdziale 1.6.

1.5.3. Charakterystyka strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu

W betonach zawierających kruszywo z recyklingu strefa przejściowa jest bardziej skomplikowana niż w przypadku betonów z kruszywem naturalnym [54, 187]. Z uwagi na obecność starej zaprawy cementowej w kruszywie z recyklingu występują tu dwie strefy przejściowe, czyli „stara”, obecna w samym kruszywie z recyklingu pomiędzy ziarnem kruszywa naturalnego a starym zaczynem cementowym, oraz „nowa” – między starym a nowym zaczynem cementowym [102, 247]. Schematycznie przedstawiono to na rys. 1.24.



RYS. 1.24. Strefy kontaktowe w betonie z kruszywem z recyklingu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Jest to jedna z głównych różnic między betonem z kruszywem z recyklingu a zwykłym. Powszechnie przyjmuje się, że strefy te mają znaczący wpływ na właściwości mechaniczne betonu, które zależą od jakości słabszej z obu tych stref. Xiao i in. [255], badając propagację rys w betonie z kruszywem z recyklingu pod obciążeniem, ustalili, że pęknięcia pojawiły się najpierw w słabych strefach przejściowych (ITZ), a następnie rozprzestrzeniły się w rejonie matrycy, łącząc się ze sobą.

Aby poprawić jakość betonu z kruszywem z recyklingu, Tam i in. [225] opracowali dwuetapową metodę mieszania. Podczas pierwszego etapu użyto połowę wody zarobowej, co doprowadziło do powstania na powierzchni kruszywa z recyklingu cienkiej warstwy zaczynu cementowego, który wnikał w porowatą starą zaprawę cementową, wypełniając jej pęknięcia i ubytki. W drugim etapie dodawana była pozostała woda w celu zakończenia procesu mieszania betonu. Badania skaningowe (SEM) potwierdziły skuteczność poprawy jakości betonu przy stosowaniu proponowanej metody – poprawiła się strefa przejściowa między ziarnem kruszywa z recyklingu a nowym zaczynem

cementowym. Jednak sami autorzy przyznali, że jakość ITZ zależy od wielu czynników, jak właściwości powierzchni kruszywa, wiązania chemicznego czy techniki przygotowania próbki, które są niełatwe do zmierzenia. Chociaż w niektórych badaniach uzyskano wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu, to jednak wyniki uznano za trudne do odtworzenia. Kilka lat później Li i in. [131], korelując wyniki stosowanej metody nanoindentacji i SEM z wytrzymałością na ściskanie, potwierdzili, że dwustopniowe mieszanie ma korzystny wpływ na właściwości mechaniczne betonu z kruszywem z recyklingu poprzez poprawę właściwości nowej ITZ. Kruszywo z recyklingu w różnym stopniu wstępnego nasycenia wodą (0–100%) stosowała również autorka [177]. Przeprowadzone badania wskazały na korzystny wpływ pełnego nasycenia na rozpatrywane cechy betonów. Wytrzymałość na ściskanie wzrosła o około 17% w porównaniu z betonem zawierającym kruszywo suche, a nasiąkliwość i współczynnik sorpcji wody obniżyły się odpowiednio o około 7% i 22%. Xiao i in. [254] wykorzystali najbardziej zaawansowane techniki (nanoindentację, mikroskopię sił atomowych i skaningową mikroskopię elektronową) do badania wpływu proporcji mieszanki, rodzaju kruszywa i wieku hydratacji na właściwości starych i nowych stref kontaktowych w betonie z recyklingu na nanotwardość i grubość ITZ. Na podstawie badań wskazano, że grubości starej i nowej strefy mieściły się odpowiednio w przedziałach 40–50 μm i 55–65 μm . Stwierdzono również, że nanotwardość starej ITZ wynosiła 70–80% nanotwardości starej zaprawy, podczas gdy w przypadku nowej ITZ było to 80–90% nanotwardości nowej zaprawy. Jakość nowej strefy kontaktowej głównie zależy od właściwości powierzchni kruszywa z recyklingu. Z tego też względu wiele prac poświęcono metodom usuwania starej zaprawy cementowej z powierzchni tego kruszywa, co zdaniem badaczy jest kluczem do poprawy parametrów betonu przygotowanego z jego udziałem [61, 145, 175].

1.6. Przemiany fazowe zachodzące w betonie pod wpływem wysokiej temperatury

Beton jest materiałem niepalnym, nie zwiększa obciążenia ogniowego podczas pożaru, a jednocześnie stanowi naturalną barierę powstrzymującą rozprzestrzenianie się ognia. Wystawiony na ekspozycję wysokich temperatur nie wytwarza żadnych gazów toksycznych ani nie wydziela dymu [125]. Jednakże wysoka temperatura powoduje w strukturze betonu szereg przemian fizycznych, a także reakcji chemicznych, które w efekcie prowadzą do nieodwracalnych zmian znacząco wpływających na jego właściwości lub też powodują jego całkowite zniszczenie [16, 160, N30]. Jest to zagadnienie kluczowe z uwagi na podjętą w niniejszej pracy tematykę związaną z wpływem temperatury prążeń gruzu betonowego na jakość uzyskanego kruszywa recyklingowego i właściwości pucolanowe oddzielonej zaprawy cementowej, dlatego zostało tu przedstawione.

Szerokie zastosowanie betonu jako materiału konstrukcyjnego doprowadziło do konieczności pełnego zrozumienia wpływu ognia na tego rodzaju konstrukcje.

Na przestrzeni lat wielu badaczy analizowało zjawisko niszczenia betonu pod kątem wpływu różnych czynników szczególnie na gwałtowne odpryskiwanie betonu (*explosive spalling*) podczas pożaru [7, 8, 45, 257]. Na tej podstawie stwierdzono, że zachowanie kompozytu cementowego poddanego działaniu wysokiej temperatury jest wypadkową wielu czynników, takich jak:

- maksymalna temperatura nagrzewania i czas jej oddziaływania – przy ogrzewaniu betonu w zakresie od 20°C do 800°C wykazano, że wytrzymałość na ściskanie w zakresie temperatur 100–400°C zmniejszyła się o około jedną czwartą w porównaniu z temperaturą 20°C. Wraz ze wzrostem temperatury wytrzymałość spadała do około jednej czwartej swojej początkowej wytrzymałości w temperaturze 800°C [30, 154];
- szybkość nagrzewania i chłodzenia – stwierdzono, że zmienne te mają znaczący wpływ na beton nagrzany do niższego zakresu temperatur, a w wysokich temperaturach ich wpływ jest mniej wyraźny. Prawie cała utrata wytrzymałości na ściskanie następuje w ciągu dwóch godzin od narażenia na maksymalną temperaturę [155, 172];
- współczynnik w/c – w celu uzyskania większej wytrzymałości i lepszej trwałości betonu zmniejsza się stosunek wody do cementu. W efekcie porowatość i – co ważniejsze – przepuszczalność betonu są również znacznie zmniejszone. Ze względu na te modyfikacje istnieje zwiększone niebezpieczeństwo gwałtownego odpryskiwania, gdy beton jest poddawany działaniu wysokich temperatur, które występują chociażby podczas pożaru [242];
- transport wilgoci – w wyniku badań przeprowadzonych przez van der Heijdena i in. [242] wykazano, że przy ogrzaniu betonu do 250°C woda wewnątrz próbki podgrzewa się do temperatury 170°C, co powoduje wzrost ciśnienia w jego wnętrzu. Samo parowanie wody może wywoływać ciśnienie bliskie wytrzymałości betonu na rozciąganie. W bardziej nieprzepuszczalnych materiałach, takich jak beton, front suszenia jest wyraźnie opóźniony, co prowadzi do przegrzania wody i wysokiego ciśnienia w porach. Stwierdzono, że przepuszczalność, porowatość i nasycenie materiału są krytycznymi parametrami w zjawisku odpryskiwania betonu podczas ogrzewania [4, 242, 243].

Toumi i Resheidat [237] ustalili zależność zmian porowatości betonu cementowego od temperatury jego wygrzewania. Zgodnie z wynikami ich badań do 500°C całkowita porowatość betonu wzrasta liniowo wraz ze wzrostem temperatury według zależności (1.3). Przy wyższej temperaturze porowatość rosła według zależności wykładniczej (1.4), co doprowadziło do całkowitej degradacji betonu w 1250°C.

$$P = 0,0131 \cdot t + 5,6929 \quad (R^2 = 0,99) \quad t \leq 500^\circ\text{C} \quad (1.3)$$

$$P = 1,3978 \cdot e^{0,0037 \cdot t} \quad (R^2 = 1,00) \quad t > 500^\circ\text{C} \quad (1.4)$$

gdzie: P – całkowita porowatość betonu, %; t – temperatura wygrzewania, °C.

Dezintegrację betonu wraz ze wzrostem temperatury objawiającą się uszkodzeniem strefy przejściowej między kruszywem a zaczynem cementowym powodować mogą również zróżnicowany skurcz zaczynu, niestabilność termiczna i rozszerzanie się grubego kruszywa [142, 152].

Pogorszenie właściwości fizyczno-mechanicznych betonu pod wpływem działania wysokiej temperatury ma jednak swoje źródło głównie w przemianach chemicznych zachodzących szczególnie w zaczynie cementowym. Niektóre z nich mają charakter częściowo odwracalny, a inne są trwałe [10, 248]. W tabeli 1.7 przedstawiono zmiany fazowe zachodzące w zaczynie cementowym podczas wygrzewania betonu do 1300°C zaobserwowane przez badaczy.

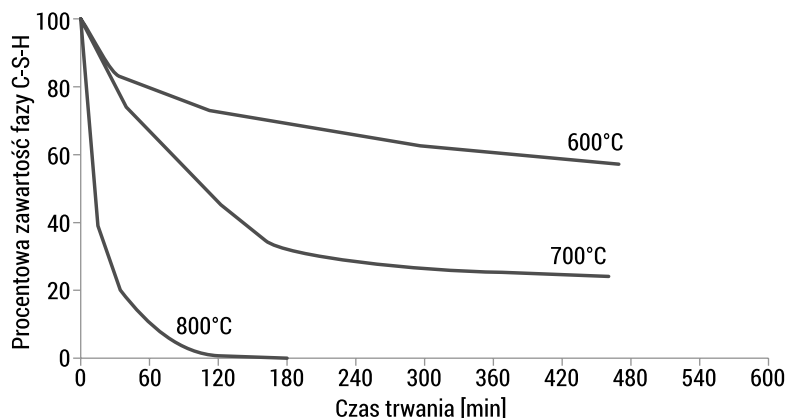
TABELA 1.7. Zmiany fazowe zachodzące w betonie podczas wygrzewania

Zakres temperatury, °C	Zmiany zachodzące w betonie/zaczynie cementowym
1	2
20–200°C	20–120°C – utrata wody kapilarnej
	70–120°C – rozpad ettryngitu
	do 200°C – dehydratacja fazy C-S-H
	150–170°C – rozkład gipsu ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
400–600°C	400–540°C – dehydroksylacja $\text{Ca}(\text{OH})_2$
	powyżej 400°C – wzrost porowatości betonu
600–1000°C	600–800°C – kolejny etap rozpadu fazy C-S-H i formowanie $\beta\text{-C}_2\text{S}$
	600–960°C – dekarbonizacja CaCO_3
1250–1300°C	topienie betonu (spoiwa cementowego)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie [6, 80, 82, 127, 245, 248, 281].

Niektóre zmiany zachodzą w betonie w sposób nagły, a inne postępują stopniowo, w dość szerokim zakresie temperatur. Beton cementowy wykazuje stosunkowo dużą odporność na działanie temperatury do około 200°C, sięgającą 90% wytrzymałości początkowej [40]. Przy dalszym wzroście temperatury następuje stopniowa redukcja wytrzymałości i pogorszenie innych cech użytkowych betonu, co w konsekwencji prowadzi do całkowitego jego zniszczenia. W miarę wzrostu temperatury betonu do 105°C następuje odparowanie wody związanej w nim fizycznie [6], która zostaje całkowicie usunięta do 120°C. W zakresie temperatur 70–120°C ulega rozpadowi ettryngit, co zauważyli Lee i in. [127], a mechanizm ten szczegółowo analizowali Zhou i Glasser [281]. W wąskim zakresie temperatur 150–170°C następuje również rozkład gipsu ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Wielu autorów jest zgodnych co do tego, że dehydratacja uwodnionych krzemianów wapnia (faza C-S-H) jest procesem postępującym stopniowo, przy czym rozpoczyna się już w temperaturze powyżej 100°C i postępuje nawet do 900°C [80, 127]. Głównymi produktami rozpadu tej fazy są krzemiany wapnia

w postaci β -C₂S i C₃S. Jednak Peng i Huang [179] ustalili, że początek dehydratacji fazy C-S-H następuje dopiero w 560°C, a powyżej 600°C rozkład ten jest nagły wraz ze wzrostem temperatury (rys. 1.25).



RYS. 1.25. Procentowa zawartość fazy C-S-H w zależności od czasu oddziaływania temperatury 600–800°C w odniesieniu do wartości wyjściowej

ŹRÓDŁO: opracowano na podstawie [179].

Ważnym etapem w destrukcji betonu pod wpływem temperatury jest dehydroksylacja wodorotlenku wapnia (Ca(OH)₂), która następuje w stosunkowo wąskim przedziale 400–540°C według reakcji (1.5) [80]:



Według wyników badań prezentowanych przez Limę i in. [133] rozpad Ca(OH)₂ zachodzi intensywnie w zakresie temperatur 500–570°C, a Thomas i in. [234] uważają, że w przedziale 500–600°C. Innego zdania są Peng i Huang [179], którzy w wyniku analizy termicznej zaczynów cementowych ustalili, że całkowity rozpad Ca(OH)₂ następuje już do temperatury 500°C. Wszyscy są jednak zgodni co do tego, że dehydroksylacja wodorotlenku wapnia ma nagły charakter, a w jej efekcie wzrasta porowatość matrycy cementowej i pojawiają się mikropełnięcia [40, 127]. Przy dalszym wzroście temperatury wygrzewania betonu, od 600°C do 800°C, następuje kolejny etap dehydratacji fazy C-S-H i formowanie krzemianów wapnia w postaci larnitu (β -C₂S) [127, 184]. W zakresie temperatur 600–960°C zachodzi również dekarbonizacja węglanu wapnia według reakcji (1.6) [200]:



Według Wang'a i in. [248] węgiel wapnia rozpada się już do temperatury 800°C. Natomiast na podstawie obserwacji prezentowanych przez Hager [80] można wywnioskować, że dekarbonizacja CaCO₃ zachodzi w wąskim przedziale temperatur dopiero pomiędzy 930°C a 960°C. W granicach 1250–1300°C następuje już topnienie betonu.

Przyjmując powyższą analizę, można stwierdzić, że betony ogrzewane do temperatury powyżej 800°C nie są zdolne do przenoszenia dużych obciążeń i ulegają destrukcji, co ustalili również Pulkit i Adhikary [189].

Równocześnie z przemianami fazowymi w matrycy cementowej przebiegają procesy związane z oddziaływaniem wysokiej temperatury na kruszywo. Ze względu na zróżnicowany skład chemiczny kruszywa różnego pochodzenia zachowują się inaczej podczas wygrzewania, co przekłada się na zmiany we właściwościach betonu. Najmniej odporne na wysoką temperaturę są kruszywa zawierające siarczki, na przykład piryt, których rozkład następuje już poniżej 200°C [40]. Kruszywa kwarcowe ulegają przemianie fazowej z niskotemperaturowej odmiany α w wysokotemperaturową odmianę β w temperaturze 573°C [84, 194]. Towarzyszy temu wzrost objętości, wyraźnie widoczny na krzywej DTA podczas analizy termicznej [80]. Z kolei kruszywa krzemianowe tracą swoją wytrzymałość w temperaturze około 600°C [204]. Odporniejsze na wysoką temperaturę są kruszywa węglanowe, takie jak wapień czy dolomit, które zachowują się stabilnie do 600°C. Powyżej temperatury 750°C kruszywa te ulegają dekarbonizacji i pojawiają się mikropęknięcia [82]. Rozpad dolomitu następuje w 840°C w wyniku reakcji endotermicznej pochłaniającej ciepło z otoczenia [189]. Najbardziej odpornym na działanie wysokich temperatur jest bazalt – znaczne zwiększenie jego objętości następuje dopiero w 900°C [194], a topnienie w 1050°C [80].

1.7. Podsumowanie stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki

Na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie recyklingu odpadów budowlanych można stwierdzić, że staje się on koniecznością współczesnego świata. Z jednej strony wzrost eksploatacji zasobów naturalnych w postaci kruszywa i wody oraz surowców do produkcji klinkieru cementowego, a z drugiej ogromne ilości produkowanych odpadów wymagających zagospodarowania wymuszają podjęcie działań naprawczych zmierzających do wprowadzenia tych odpadów do obiegu zamkniętego. Wśród nich dominuje gruz betonowy, który wykazuje ogromny potencjał do ponownego wykorzystania jako kruszywo do betonu, ale w rzeczywistości takie jego zastosowanie ma charakter śladowy. Pomimo istniejących od wielu lat wytycznych normowych oraz opracowanych zaleceń co do możliwości stosowania kruszyw z recyklingu gruzu betonowego w kompozytach cementowych są one najchętniej używane jako materiał na podbudowy dróg wszelkich kategorii, warstwa drenażowa, materiał na nasypy drogowe oraz wały przeciwpowodziowe czy podbudowa pod kostkę brukową. Takie działania, chociaż przyczyniają się do osiągnięcia wymaganego dyrektywą Unii Europejskiej poziomu recyklingu odpadów budowlanych wynoszącego 70%, istotnie obniżają wartość tych materiałów. Wyjaśnienia tego stanu rzeczy należy upatrywać, co omówiono w poprzednich rozdziałach, w zróżnicowanej i zwykle niskiej jakości kruszyw z recyklingu w porównaniu z naturalnymi.

Wprowadza to istotny poziom niepewności w uzyskiwanych parametrach nie tylko samych kruszyw, lecz także mieszanek betonowych i betonów. Wysoka porowatość i nasiąkliwość kruszyw z recyklingu pogarszają urabialność mieszanek betonowych, w następstwie czego konieczna jest modyfikacja ich składu w zakresie ilości wody zarobowej i użycia plastyfikatorów. Uzyskanie porównywalnych z betonem kontrolnym parametrów wytrzymałościowych wymaga natomiast zastosowania dodatkowej ilości cementu, co jest szczególnie niekorzystne w obliczu aktualnej polityki dekarbonizacji. Na wyraźne pogorszenie parametrów kruszywa z recyklingu wpływa przede wszystkim ilość obecnej w jego składzie zaprawy cementowej oraz zanieczyszczeń stanowiących efekt kompleksowej rozbiórki.

Sytuacja, w której w dobie wszechobecných zasad zrównoważonego rozwoju zdolność kruszyw z recyklingu do ponownego użycia nie jest w pełni wykorzystana, wywołuje uzasadniony niedosyt. W rozdziale 1.4 pracy szczegółowo przeanalizowano dostępne w literaturze światowej metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu, ukierunkowane na możliwość jego zastosowania w betonie. Bazują one głównie na usuwaniu zaprawy cementowej za pomocą oddziaływania na gruz betonowy czynnikiem mechanicznym, termicznym, chemicznym lub ich kombinacją. Uwzględniono również zabiegi polegające na zabezpieczeniu powierzchni kruszywa poprzez jej impregnację. Jak wykazano, skuteczność tych metod jest zróżnicowana. Metody mechaniczne, termiczne czy chemiczne koncentrują się głównie na wytworzeniu grubego kruszywa z recyklingu dobrej jakości, nie biorąc pod uwagę frakcji drobnej, która powstaje w procesie produkcji takiego kruszywa. Im bardziej skuteczną jest metoda oczyszczania kruszywa z recyklingu, tym więcej frakcji drobnej powstaje w takim procesie, nawet do 60% masy materiału wsadowego. Zwykle proponuje się jej składowanie lub ewentualne zastosowanie do stabilizacji terenu. Sporadyczne próby użycia tej frakcji jako dodatku do klinkieru pozostawiają wiele niewiadomych, między innymi w zakresie dopuszczalnej ilości, stopnia rozdrobnienia czy ograniczeń co do składu, przede wszystkim z uwagi na obecność zanieczyszczeń. Proponowane dotychczas metody nie eliminują też problemu obecności innych kategorii odpadów w kruszywie z recyklingu, a jak wykazano, niektóre z nich szczególnie niekorzystnie wpływają na właściwości wytrzymałościowe betonu przygotowanego na bazie tego kruszywa. Do tych zanieczyszczeń głównie zaliczyć można szkło, materiały bitumiczne, plastik, drewno czy gips.

Z kolei metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu bazujące na impregnacji jego powierzchni wymagają profesjonalnych urządzeń i utrzymania reżimu technologicznego w zakresie parametrów procesu, co ogranicza te metody do badań w warunkach laboratoryjnych. Poza tym są one długotrwałe, a co za tym idzie ich wydajność jest zdecydowanie ograniczona. Zapropionowana wśród tych metod impregnacja powierzchni kruszywa zaczynem cementowym obecnie straciła na aktualności z uwagi na konieczność użycia dodatkowego cementu i zwiększenia śladu węglowego.

Wobec istniejącego stanu wiedzy, zdaniem autorki, w pełni uzasadnione jest ukierunkowanie możliwości zastosowania kruszywa z recyklingu betonu przede wszystkim jako zamiennika kruszywa naturalnego w kompozytach cementowych,

co – jak już wspomniano – dotychczas jest rozwiązaniem wyjątkowo rzadko stosowanym. Z powodu braku takiego sposobu przetwarzania gruzu betonowego, który pozwoliłby wykorzystać wszystkie produkty powstałe w procesie recyklingu, istnieje pilna potrzeba opracowania takiej metody, która umożliwiłaby przetworzenie gruzu w sposób kompleksowy – bezodpadowy, wypełniając tym samym istniejącą lukę badawczą. Oprócz uzyskania kruszywa grubego o podwyższonej jakości do zastosowania w betonie możliwe będzie wytworzenie aktywnej frakcji drobnej, z potencjałem do wykorzystania jako częściowego zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych. Jest to temat szczególnie aktualny wobec ogłoszonej strategii dekarbonizacji. Jedną z metod ograniczenia emisyjności cementu jest zmniejszenie stosunku klinkieru do cementu do poziomu 65% do 2050 roku poprzez stosowanie substytutów w postaci popiołu lotnego i żużla wielkopiecowego. Jednak ze względu na dekarbonizację również sektora energetycznego i hutniczego w najbliższym czasie podaż obu tych materiałów będzie znacznie ograniczona. Z tego względu pojawia się pilna potrzeba poszukiwania innowacyjnych zamienników tych dodatków, przez co aktywna frakcja drobna pochodząca z recyklingu gruzu betonowego szczególnie zyskuje na znaczeniu.

2. Hipoteza badawcza, cele i program badań eksperymentalnych

2.1. Hipoteza i cele badań eksperymentalnych

Po analizie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego recyklingu gruzu betonowego i wobec braku skutecznej i efektywnej metody jego przetwarzania ukierunkowanej na możliwość wykorzystania wszystkich uzyskanych materiałów zainteresowanie autorki skoncentrowało się na zagadnieniu uszkodzenia struktury betonu w wyniku działania wysokiej temperatury poprzez analogię do zagadnienia niszczenia betonu w warunkach pożaru. Zdaniem autorki z punktu widzenia mechaniki pękania kompozytów cementowych w wysokich temperaturach istotne jest ustalenie takiej temperatury, która osłabi przyczepność zaczynu cementowego do kruszywa oraz spowoduje zmiany fizyczne i chemiczne w samym zaczynie, modyfikując jego właściwości pucolanowe, nie powodując przy tym uszkodzeń w samym ziarnie kruszywa naturalnego. W efekcie stosownej obróbki gruzu betonowego planuje się uzyskanie kruszywa z recyklingu możliwie wysokiej jakości do użycia w betonie oraz frakcji drobnej, która będzie mogła stanowić częściowy zamiennik spoiwa w kompozytach cementowych.

Na tej podstawie sformułowano następującą hipotezę badawczą:

Istnieje taka temperatura prażenia gruzu betonowego, w której wyniku następuje dehydratacja stwardniałego zaczynu cementowego, powodując znaczne osłabienie wiązań fizyczno-chemicznych pomiędzy kruszywem a produktami hydratacji cementu,

co będzie skutkowało łatwym ich rozdzieleniem i uzyskaniem wysokiej jakości kruszywa z recyklingu oraz aktywnej frakcji drobnej z przeznaczeniem do zastosowania w kompozytach cementowych.

Wobec sformułowanej tezy badawczej określono następujące cele naukowe:

- określenie wpływu temperatury prażenia gruzu betonowego na właściwości uzyskanego kruszywa grubego, drobnej frakcji recyklingowej oraz kompozytów cementowych przygotowanych z ich udziałem;
- ustalenie najkorzystniejszych parametrów metody przetwarzania gruzu betonowego w aspekcie wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości i aktywnej frakcji drobnej do zastosowania w kompozytach cementowych;
- określenie mechanizmu kształtowania strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zaczyn cementowy w nowym betonie w zależności od temperatury wygrzewania gruzu betonowego.

Określono również następujące cele użytkowe:

- uzyskanie wysokiej jakości kruszywa z recyklingu o właściwościach nie gorszych od właściwości kruszywa naturalnego w betonie w wyniku zastosowania odpowiedniej metody obróbki;
- uzyskanie aktywnej drobnej frakcji z recyklingu do zastosowania w kompozytach cementowych;
- kompleksowe zagospodarowanie gruzu betonowego w kompozytach cementowych.

W dalszej części pracy przeprowadzono badania eksperymentalne zmierzające do osiągnięcia założonych celów i udowodnienia hipotezy badawczej.

2.2. Program badań eksperymentalnych

W tabeli 2.1 zamieszczono program badań podzielony na dwie fazy: badania poznawcze (faza I) i badania weryfikujące (faza II). Określono cel realizacji każdego z etapów badań oraz sformułowano spodziewane efekty.

TABELA 2.1. Program badań eksperymentalnych

FAZA I – BADANIA POZNAWCZE (rozdział 3)

Badania poznawcze miały na celu zdefiniowanie parametrów obróbki gruzu betonowego pod kątem wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości i frakcji drobnej do zastosowania w kompozytach cementowych oraz rozpoznanie mechanizmów kształtowania strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zaczyn cementowy w nowym betonie

ETAP 1 – Wpływ temperatury na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu

Celem badań było określenie wpływu temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu cementowego z kruszywem odpowiednio żwirowym i łamanym.

Efektom badań było ustalenie temperatury odpowiadającej za dezintegrację betonu cementowego w postaci skutecznego oddzielenia zaprawy cementowej od powierzchni ziarna kruszywa grubego. W dalszych etapach temperatura ta była podstawą do opracowania parametrów termiczno-mechanicznej obróbki gruzu betonowego, mającej na celu wytworzenie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz kształtowanie właściwości pucolanowych frakcji drobnej

ETAP 2 – Przemiany fazowe zachodzące w zaccynie cementowym w wyniku wygrzewania

Celem badań było określenie wpływu temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na przemiany fazowe zachodzące w zaccynie cementowym.

W efekcie ustalenia te przyczyniły się do zidentyfikowania produktów hydratacji cementu, które są obecne na powierzchni kruszywa z recyklingu powstałego w wyniku wygrzewania i uczestniczą w procesie kształtowania strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zacczyn cementowy w nowym betonie

ETAP 3 – Wpływ wysokiej temperatury na właściwości kruszyw naturalnych

Celem badań było określenie zmian właściwości kruszyw naturalnych pod wpływem działania wysokiej temperatury w zakresie 20–1000°C. Do badań wybrano najczęściej stosowane do betonów kruszywa naturalne frakcji 4/16 mm, takie jak: żwir, dolomit, granit i bazalt.

Efektom badań było określenie maksymalnej temperatury prażenia, która nie spowoduje wyraźnego uszkodzenia struktury ziarna kruszywa. Temperatura ta była podstawą do ustalenia parametrów obróbki termicznej gruzu betonowego, która nie powinna uszkadzać struktury ziaren kruszywa

ETAP 4 – Wpływ wysokiej temperatury na właściwości kruszyw z recyklingu betonu

Celem badań było ustalenie najkorzystniejszej temperatury wygrzewania gruzu betonowego z uwagi na pozyskanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz możliwości kształtowania szczelnej strefy kontaktowej w nowym betonie.

Efektom badań była identyfikacja produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji pozostałych na powierzchni kruszywa z recyklingu poddanego działaniu temperatury. Posłużyło to opracowaniu w etapie 6 oryginalnych schematów budowy strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zacczyn cementowy w nowym betonie w zależności od temperatury wygrzewania

ETAP 5 – Określenie zdolności do regeneracji betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury

Celem badań było ustalenie najkorzystniejszej temperatury wygrzewania gruzu betonowego z uwagi na możliwość regeneracji betonu w efekcie ponownej pielęgnacji w wodzie.

Efektom badań było ustalenie takiej temperatury wygrzewania betonu, która umożliwi najskuteczniejszą jego regenerację przejawiającą się wzrostem wytrzymałości na ściskanie w efekcie ponownej pielęgnacji. Analiza zmian zachodzących zarówno na powierzchni kruszywa z recyklingu, jak i w samym zaccynie cementowym pozwoliła na opracowanie oryginalnych schematów budowy strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu w zależności od wysokości temperatury wcześniejszej obróbki gruzu betonowego

<p>ETAP 6 – Mechanizm kształtowania strefy kontaktowej kruszywo z recyklingu wysokiej jakości – nowy zaczyn cementowy w betonie</p> <p>Celem badań była próba wyjaśnienia mechanizmu kształtowania się strefy kontaktowej pomiędzy powierzchnią kruszywa z recyklingu wysokiej jakości a nowym zaczynem cementowym. Efektem badań było opracowanie oryginalnych schematów budowy strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zaczyn cementowy w nowym betonie w zależności od temperatury wygrzewania</p>
<p>ETAP 7 – Zdefiniowanie parametrów obróbki gruzu betonowego w warunkach laboratoryjnych</p> <p>Celem badań było zdefiniowanie na podstawie wyników badań uzyskanych w poprzednich etapach parametrów obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego pod kątem wytworzenia kruszywa z recyklingu najwyższej jakości oraz drobnej frakcji z recyklingu o właściwościach pucolanowych. Parametry te zostaną zweryfikowane w drugiej fazie badań poprzez zastosowanie kruszywa z recyklingu i drobnej frakcji w kompozytach cementowych</p>
<p>FAZA II – BADANIA WERYFIKUJĄCE Badania miały na celu weryfikację zidentyfikowanych w I fazie badań parametrów metody przetwarzania gruzu betonowego w kruszywo z recyklingu wysokiej jakości i frakcję drobną w aspekcie możliwości ich stosowania w kompozytach cementowych</p>
<p>Etap 1 – Zastosowanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości do betonów cementowych</p>
<p>Etap 2 – Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant I (zaczyn cementowy przygotowany w laboratorium)</p>
<p>Etap 3 – Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant II (zaprawa cementowa wyseparowana z 20-letniego betonu)</p>
<p>Podsumowanie i wnioski</p>

3. Badania eksperymentalne – faza poznawcza

3.1. Wpływ temperatury na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu

3.1.1. Cel badań

Celem badań było określenie wpływu temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu cementowego z kruszywem odpowiednio żwirowym i łamanym. Z punktu widzenia niniejszej pracy ważne jest ustalenie temperatury odpowiadającej za dezintegrację betonu przejawiającą się skutecznym oddzieleniem zaprawy cementowej od powierzchni ziarna kruszywa grubego. W dalszych etapach badań temperatura ta będzie podstawą do opracowania parametrów termiczno-mechanicznej obróbki gruzu betonowego, mającej na celu wytworzenie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz kształtowanie właściwości pucolanowych frakcji drobnej.

3.1.2. Metodyka badań

Do wykonania badań wykorzystano próbki betonowe 100 × 100 × 100 mm przygotowane na bazie grubego kruszywa żwirowego (serie oznaczone jako BŻ) i łamanego (serie BŁ). Po okresie normowego dojrzewania próbki poddano obróbce termicznej w zakresie temperatur 20–1000°C. Założono, że po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych oraz z uwagi na skład pozbawiony komponentów opóźniających wiązanie (tabela 3.1) beton uzyskał wymaganą wytrzymałość na ściskanie. Przed prażeniem próbki wstępnie osuszono przez 1 dzień w warunkach laboratoryjnych, analogicznie jak w pracy [8]. Po ostudzeniu dla poszczególnych serii betonów ustalono wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, gęstość objętościową i wodoszczelność oraz dokonano charakterystyki makroskopowej. Celem uproszczenia eksperymentu dla próbek niepoddanych prażeniu, a przebywających w warunkach laboratoryjnych, przypisano temperaturę 20°C. W eksperymencie przyjęto dwie następujące zmienne:

- X – rodzaj kruszywa grubego (kruszywo żwirowe – 0; kruszywo łamane – 1);
- Y – temperatura wygrzewania betonu cementowego (20°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C).

Zmienna X miała więc charakter jakościowy. Opracowany plan badań (pełny z dwiema zmiennymi) przedstawiono w tabeli 3.1.

TABELA 3.1. Plan badań

Oznaczenie serii	X – rodzaj kruszywa grubego	Y – temperatura wygrzewania betonu, °C
1_BŻ_20	0 – kruszywo grube żwirowe	20 – brak prażenia
2_BŻ_200		200
3_BŻ_400		400
4_BŻ_600		600
5_BŻ_800		800
6_BŻ_1000		1000
7_BŁ_20	1 – kruszywo grube łamane	20 – brak prażenia
8_BŁ_200		200
9_BŁ_400		400
10_BŁ_600		600
11_BŁ_800		800
12_BŁ_1000		1000

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Receptury mieszanki betonowej do przygotowania próbek przedstawiono w tabeli 3.2. Przyjęto powszechnie stosowany i dostępny w okresie wykonywania badań cement CEM I 42,5R w ilości 300 kg/m³, zapewniającej spełnienie wymagań dla klasy ekspozycji XC i uzyskanie betonu zwykłego. Uziarnienie kruszywa zaprojektowano z uwzględnieniem krzywych normowych. Przy ustaleniu ilości kruszywa łamanego uwzględniono jego gęstość równą 2,70 kg/dm³. Nie stosowano dodatków ani domieszek modyfikujących właściwości mieszanki betonowej i betonu. Na tej podstawie receptury mieszanki betonowej zamieszczone w tabeli 3.2 uznano za reprezentatywne.

Po 28 dniach dojrzewania w wodzie i częściowym osuszeniu w warunkach powietrzno-suchych przez 1 dzień próbki poddano obróbce termicznej w piecu ceramicznym ze sterowanym procesem nagrzewania przez 4 godziny. Z uwagi na założenie równomiernego nagrzania materiału czas prażenia betonu ustalono na podstawie badań zaprezentowanych w pracach [18, 19]. W badaniach tych nagrzewanie próbek przebiegało według krzywej standardowej obrazującej narastanie temperatury w trakcie znormalizowanego pożaru w zakresie od 20 do 1000°C. Temperaturę mierzono za pomocą trzech termopar zewnętrznych oraz jednej termopary wewnętrznej. Próbki wygrzewano do momentu wyrównania temperatur na wszystkich termoparach

pomiarowych. Z rezultatów badań prezentowanych przez Bednarek i in. [19] wynika, że czas równomiernego nagrzania betonu do temperatury 800°C wyniósł 220 minut. Na tej podstawie w prezentowanym eksperymencie przyjęto czas wygrzewania równy 4 godziny (240 minut). Po tym czasie próbki pozostawiono w piecu do całkowitego wystudzenia, a pełny cykl obróbki wyniósł około doby.

TABELA 3.2. Receptury mieszanki betonowej na 1 m³

Składnik	Ilość (X – kruszywo żwirowe), kg	Ilość (Y – kruszywo łamane), kg
	Serie 1–6 (BŻ)	Serie 7–12 (BŁ)
1	2	3
Cement CEM I 42,5R	300	300
Woda	150	150
w/c	0,50	0,50
Piasek 0/2 mm	699	699
Kruszywo 2/4 mm	200	203
Kruszywo 4/8 mm	499	508
Kruszywo 8/16 mm	599	610

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W dalszej kolejności wykonano badania wytrzymałości betonu po 28 dniach dojrzewania, zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 [N22], nasiąkliwości według wytycznych normy PN-88/B-06250 [N10] oraz gęstości objętościowej wyznaczonej na podstawie PN-EN 12390-7:2019-08 [N24]. Każde z tych badań przeprowadzono na sześciu próbkach o wymiarach 100 × 100 × 100 mm w poszczególnych seriach. Wodoprzepuszczalność betonu wykonano według wytycznych normy PN-EN 12390-8:2019-08 [N25] po 28 dniach dojrzewania. Do próbek umieszczonych w urządzeniu przyłożono wodę pod ciśnieniem 500±50 kPa przez okres 72±2 godziny. Następnie próbkę rozłupywano i mierzono głębokość penetracji wody z dokładnością do 1 mm. Badanie wodoszczelności wykonano na dwóch próbkach w każdej serii.

3.1.3. Wyniki badań właściwości fizyczno-mechanicznych betonów i ich analiza

W tabeli 3.3 przedstawiono wartości średnie z wyników badań poszczególnych cech betonów według planu eksperymentu (tabela 3.1). W nawiasach podano wartości odchyień standardowych. Badanie wodoszczelności wykonano na dwóch próbkach w każdej serii, dlatego w tym wypadku nie podano wartości odchyień standardowych.

TABELA 3.3. Wartości średnie z wyników badań poszczególnych cech betonów wraz z odchyleniem standardowym $S(x)$

Seria	$f_{cm,28}$, MPa $S(f_{cm,28})$	Nasiąkliwość, % masy $S(N)$	Gęstość objętościowa, g/cm^3 $S(D_v)$	Głębokość penetracji wody, mm
1	2	3	4	5
1_BŻ_20	67,18 (2,21)	4,1 (0,44)	2,32 (0,01)	41
2_BŻ_200	62,54 (1,75)	4,4 (0,12)	2,31 (0,02)	50
3_BŻ_400	54,17 (1,83)	5,5 (0,04)	2,27 (0,05)	66
4_BŻ_600	36,67 (1,84)	7,6 (0,40)	2,23 (0,03)	przesiąkanie
5_BŻ_800	11,28 (0,46)	- *	2,09 (0,02)	przesiąkanie
6_BŻ_1000	<i>Zniszczenie próbki po wygrzewaniu</i>			
7_BŁ_20	71,50 (1,71)	3,5 (0,25)	2,41 (0,03)	46
8_BŁ_200	61,64 (1,66)	3,8 (0,05)	2,33 (0,04)	63
9_BŁ_400	52,14 (4,27)	4,9 (0,07)	2,32 (0,03)	80
10_BŁ_600	41,66 (2,05)	8,0 (0,33)	2,20 (0,02)	przesiąkanie
11_BŁ_800	4,39 (0,31)	- *	2,16 (0,01)	przesiąkanie
12_BŁ_1000	<i>Zniszczenie próbki po wygrzewaniu</i>			

* – próbki w 800°C rozpadły się po umieszczeniu w wodzie.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

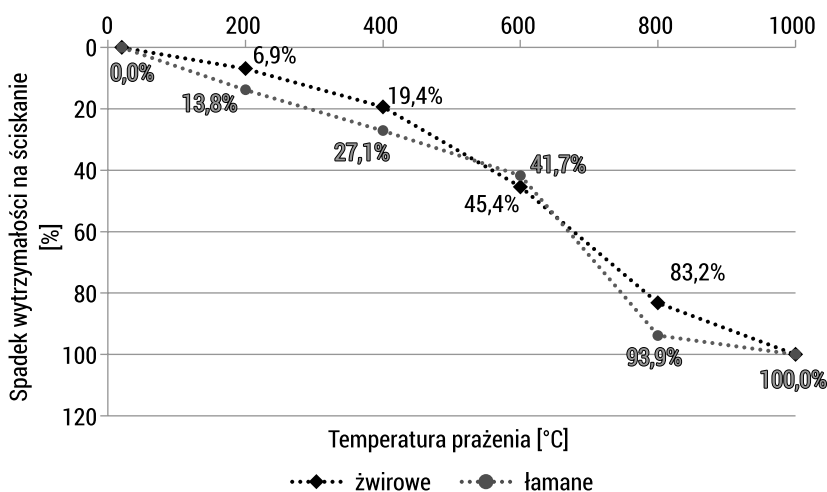
Jak wskazują wyniki badań zaprezentowane w tabeli 3.3, wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania nastąpił stopniowy spadek wytrzymałości na ściskanie do momentu zniszczenia próbek w 1000°C. Na rys. 3.1 przedstawiono procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie betonu (S) z kruszywem żwirowym i łamanym podczas wygrzewania w zakresie temperatur 20–1000°C. Spadek ten ustalono według zależności (3.1) na podstawie pracy [232]:

$$S = \left(1 - \frac{f_{cm,(t)}}{f_{cm,28(20^\circ C)}} \right) \cdot 100\% \quad (3.1)$$

gdzie: $f_{cm,(t)}$ – wytrzymałość na ściskanie betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury (t), MPa; $f_{cm,28(20^\circ C)}$ – wytrzymałość na ściskanie betonu niepoddanego działaniu wysokiej temperatury (20°C), MPa.

Przy temperaturze wygrzewania betonu do 200°C odnotowano spadek wytrzymałości na ściskanie o 6,9% i 13,8% w stosunku do betonu niepoddanego obróbce, odpowiednio w obecności kruszywa żwirowego i łamanego. Wynika to głównie z odparowania wody wolnej, odwodnienia ettryngitu i częściowego odwodnienia

krzemianów wapnia (C-S-H) oraz dekompozycji gipsu [80]. W przypadku wzrostu temperatury do 400°C nastąpił dalszy spadek wytrzymałości na ściskanie o 19,4% z kruszywem żwirowym i o 27,1% z łamanym w stosunku do wytrzymałości wyjściowej. To z kolei związane jest z uwalnianiem się wody związanej chemicznie [239]. Przy 600°C spadek ten wyniósł ponad 40% w obu przypadkach, co wynika przede wszystkim z częściowej degradacji uwodnionych krzemianów wapnia oraz rozpadu wodorotlenku wapnia. Dla porównania Culfik i Ozturan [34] odnotowali znacznie wyższy, bo aż 65-procentowy spadek wytrzymałości kompozytów cementowych na ściskanie przy ich wygrzewaniu w 600°C, jednak badania te były prowadzone na zaprawach wysokiej wytrzymałości o niskim współczynniku w/c = 0,38. Dalsze wygrzewanie doprowadziło do niemal całkowitej dezintegracji kompozytu w 800°C, wywołane głównie rozpadem węglanu wapnia (CaCO₃) na CaO i H₂O oraz przekształceniem żelu C-S-H w β-C₂S w wyniku odwodnienia [80]. W tej temperaturze widoczne były liczne uszkodzenia ziaren żwiru, natomiast ziarna kruszywa łamanego rozpadały się pod lekkim naciskiem. Zaobserwowano również około dwukrotny wzrost nasiąkliwości betonu wygrzanego w 600°C, co wynika, jak już wspomniano, z osłabienia strefy kontaktowej w betonie oraz licznych rys i spękań pojawiających się w matrycy cementowej.



RYS. 3.1. Procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem żwirowym i łamanym podczas wygrzewania w zakresie temperatur 20–1000°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

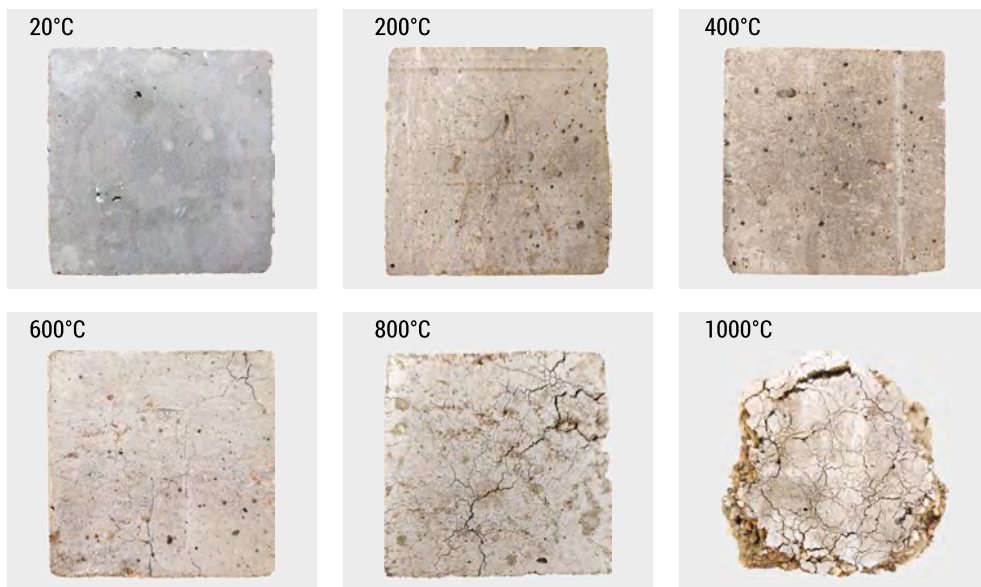
Potwierdzeniem braku szczelności struktury betonu było też przesiąkanie próbek podczas badania przepuszczalności wody pod ciśnieniem (tabela 3.3). Na tej podstawie można stwierdzić, że temperatura krytyczna betonu wynosi od 600°C do 800°C, kiedy to nastąpiło niemal całkowite jego zniszczenie. W tym zakresie beton stracił większość swojej wytrzymałości na ściskanie. W przypadku betonów zwykłych jej względne

obniżenie w wyniku działania wysokiej temperatury nie zależy od ich wytrzymałości początkowej [114]. Przy betonach wysokiej wytrzymałości – im ta wytrzymałość jest wyższa, tym szybciej zmniejsza się podczas ogrzewania szczególnie do temperatury 400°C [N29, 180]. Z uwagi na zwartą strukturę i brak wolnych przestrzeni w betonie wysokiej wytrzymałości para wodna powstająca w nim po osiągnięciu 100°C, nie mogąc wydostać się na zewnątrz, przyczynia się do niszczenia jego struktury [12, 114]. Podczas wygrzewania próbek betonowych w temperaturze 1000°C (serie 6_BŻ_1000 i 12_BŁ_1000) uległy one poważnym zniszczeniom i nie udało się zbadać ich wytrzymałości na ściskanie, dlatego w tych seriach przyjęto spadek wytrzymałości równy 100%.

Wraz ze wzrostem temperatury prażenia zaobserwowano również pogorszenie pozostałych badanych cech betonu, jak gęstość objętościowa, nasiąkliwość czy wodoprzepuszczalność (tabela 3.2), szczególnie powyżej temperatury 400°C. W 600°C nastąpiło przesiąkanie próbek podczas badania wodoprzepuszczalności, co uzasadnia znaczny wzrost nasiąkliwości betonów w tej temperaturze do 7,8% i 8,0% w obecności kruszywa żwirowego i łamanego, podczas gdy w 20°C wynosiła ona odpowiednio 4,1% i 3,5%. Świadczy to o uszkodzeniu struktury betonu i to głównie w strefie kontaktowej. Większą głębokość przesiąkania wodą betonu z kruszywem łamanym przy mniejszej jego nasiąkliwości w porównaniu z betonem z kruszywem żwirowym można tłumaczyć zbyt małą liczbą próbek poddanych badaniu w każdej serii (2 próbki), jak i samą procedurą pomiaru głębokości przenikania wody (ustalono głębokość maksymalną, jednak często występowała ona jedynie na niewielkim odcinku próbki). W 800°C nie udało się zbadać nasiąkliwości betonu, ponieważ próbki rozpadły się po umieszczeniu ich w wodzie, co jest adekwatne do niemal całkowitej utraty wytrzymałości na ściskanie w tej temperaturze.

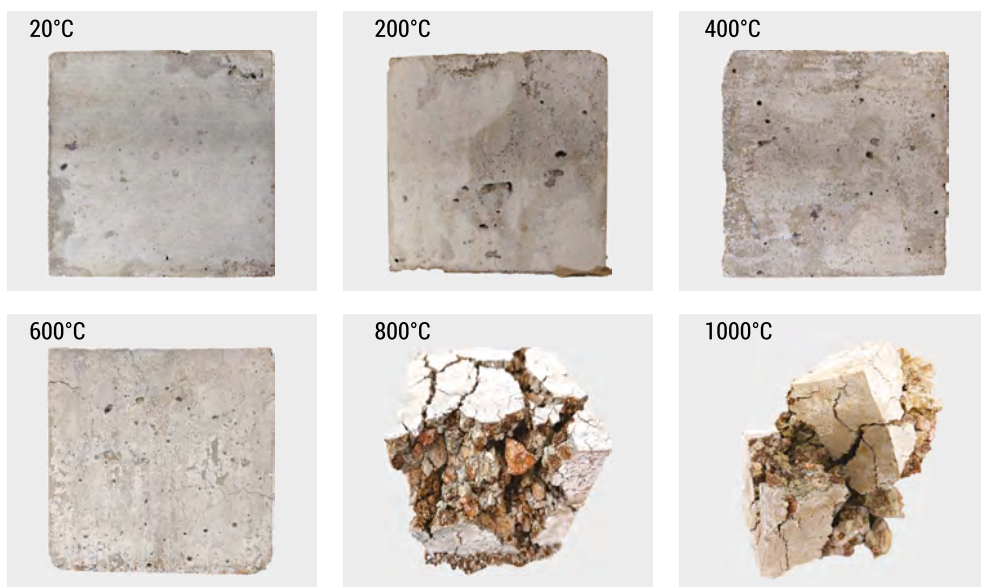
3.1.4. Charakterystyka makroskopowa i analiza termiczna

Charakterystykę makroskopową przeprowadzono zarówno na powierzchni, jak i na przełamach próbek betonowych poddanych wygrzewaniu w zakresie temperatur 20–1000°C. Obserwacje makroskopowe przeprowadzono okiem nieuzbrojonym, natomiast zawartość wodorotlenku wapnia i węglanu wapnia w wyseparowanym zaczynie oznaczono, stosując analizę termiczną (DTG, DTA i TG). W tym celu fragmenty próbek stopniowo rozdrabniano w młynku, sukcesywnie usuwając ziarna kruszywa. Uzyskaną w ten sposób próbkę przesiano przez sito o boku oczka 0,063 mm i umieszczono w eksykatorze do momentu wykonania badania, wykorzystując analogię do pracy Jarmontowicz i Krzywobłockiej-Laurów [89]. Na rys. 3.2 i 3.3 przedstawiono powierzchnie próbek betonowych po ich wygrzaniu w temperaturach objętych eksperymentem, a na rys. 3.4 i 3.5 przełamy tych próbek po badaniu wytrzymałości na ściskanie.



RYS. 3.2. Próbkę betonowe 100 × 100 × 100 mm na kruszywie żwirowym po wygrzewaniu w temperaturze 20–1000°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.

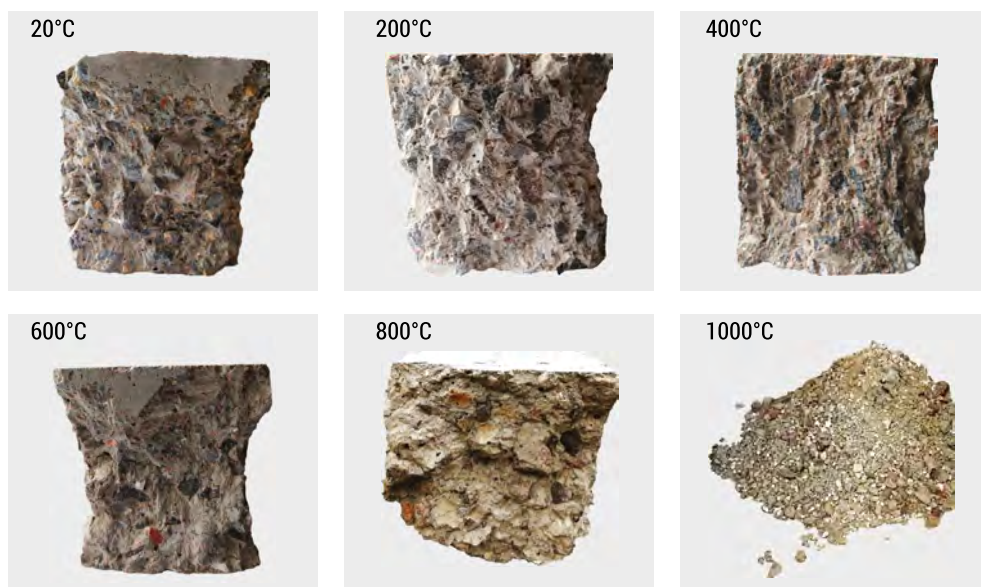


RYS. 3.3. Próbkę betonowe 100 × 100 × 100 mm na kruszywie łamanym po wygrzewaniu w temperaturze 20–1000°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.4. Przelamy próbek (serie 1–6) wygrzewanych w temperaturach według planu badań
 ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.5. Przelamy próbek (serie 7–12) wygrzewanych w temperaturach według planu badań
 ŹRÓDŁO: fot. autorka.

W tabeli 3.4 przedstawiono charakterystykę betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C. Uwzględniono w niej zmiany zabarwienia betonu i obecność defektów struktury zaobserwowane nieuzbrojonym okiem. Oceny przyczepności

zaczynu cementowego do kruszywa dokonano poprzez nacisk palców. Następnie na podstawie analizy termicznej określono zawartość wody związanej, wodorotlenku wapnia oraz węglanu wapnia dla wyseparowanych z betonu i zmieszanych do frakcji pyłowej zapraw cementowych.

TABELA 3.4. Charakterystyka betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C

Rodzaj obserwacji	Temperatura prażenia, °C					
	20	200	400	600	800	1000
1	2	3	4	5	6	7
Zabarwienie betonu na podstawie oceny wizualnej	Szare	Rozjaśnienie powierzchni betonu i przełamaniu do jasnoszarego	Jasnoszare z odcieniem różowym	Jasnoszare	Jasnoszare z ciemnymi przebarwieniami	Jasnoszare z ciemnymi przebarwieniami
Obecność defektów struktury (rys, odprysków i innych) na podstawie oceny wizualnej	Brak widocznych defektów	Brak widocznych defektów	Drobne rysy, śladowe spękania	Widoczne liczne rysy i spękania, osłabienie więzi między kruszywem a zaczynem	Zniszczenie struktury betonu, widoczny „spalling”	Rozpad próbki, całkowita dezintegracja betonu
Przyczepność zaczynu do kruszywa (pod naciskiem palców)	Bardzo dobra	Dobra	Miejskami słaba	Słaba i bardzo słaba	Bardzo słaba/brak	Brak
Zawartość składników w zaczynie wyseparowanym z betonu:						
woda związana, %	11,37	4,54	1,89	0,17	0,05	Brak ubytków masy
wodorotlenek wapnia, %	8,71	10,28	10,07	1,19	0,33	
węglan wapnia, %	15,89	21,20	22,20	18,86	1,54	

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zawartość wody związanej oznaczono jako sumę wody zawartej w produktach hydratacji (uwodnionych krzemianach, glinosiarczanach, glinianach i glinożelazianach wapnia) w zakresie temperatur 20–480°C i wody związanej w wodorotlenku wapnia ($H_{Ca(OH)_2}$), w zakresie temperatur 480–580°C. Oznaczenie zawartości oparto na założeniu, że w zaczynie ulega on całkowitemu rozkładowi w zakresie temperatur 480–580°C zgodnie z reakcją (3.2) na podstawie [119]:



Procentową zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ustalono, mnożąc ubytek masy spowodowany dehydroksylacją wodorotlenku wapnia ($H_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$) przez współczynnik 4,11 zgodnie z zależnością (3.3) [245]:

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 \% = 4,11 \cdot (H_{\text{Ca}(\text{OH})_2}) \quad (3.3)$$

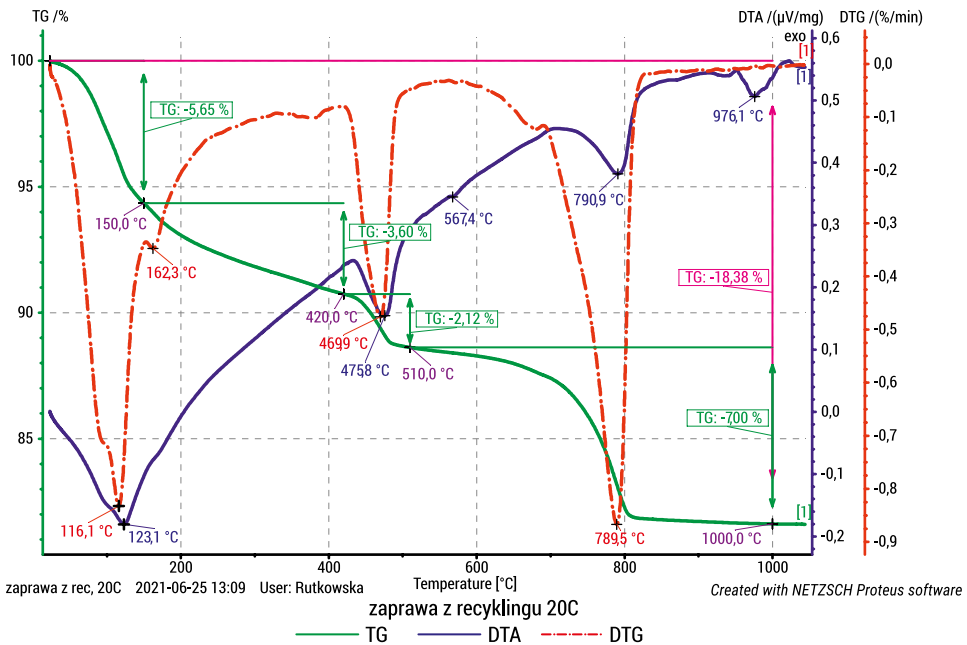
Zawartość węgla wapnia (CaCO_3) oznaczono jako iloczyn ubytku masy spowodowanego jego rozpadem w zakresie temperatur 580–1000°C i odpowiedniego współczynnika 2,27 z zależności (3.4) zgodnie z [245]:

$$\text{CaCO}_3 \% = 2,27 \cdot \bar{C} \quad (3.4)$$

gdzie: \bar{C} oznacza ubytek masy na krzywej TG spowodowany rozkładem CaCO_3 , %.

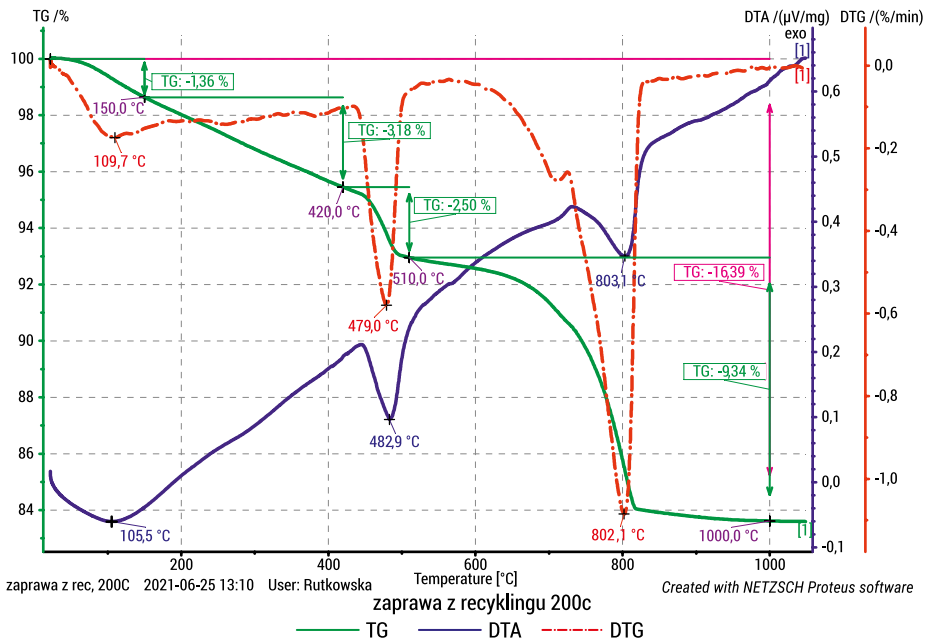
Ostatecznie zakres temperatur rozpadu wodorotlenku wapnia i węgla wapnia regulowano w zależności od rzeczywistych obserwowanych na krzywej TG ubytków masy.

Na rys. 3.6–3.11 przedstawiono wyniki analizy termicznej zapraw cementowych wyseparowanych z betonów wygrzewanych w temperaturach 20–1000°C.



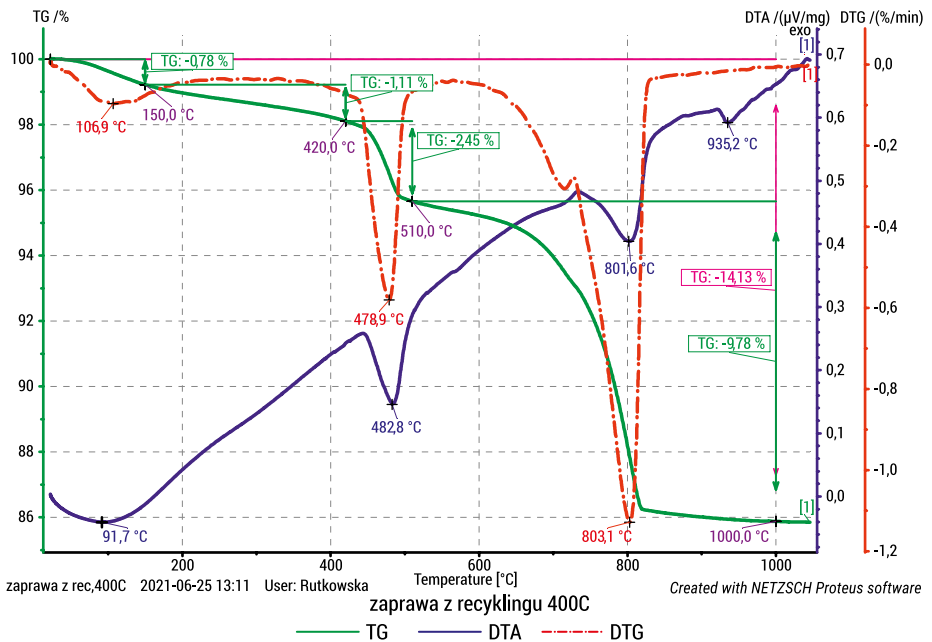
RYS. 3.6. Analiza termiczna zaprawy cementowej_20°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



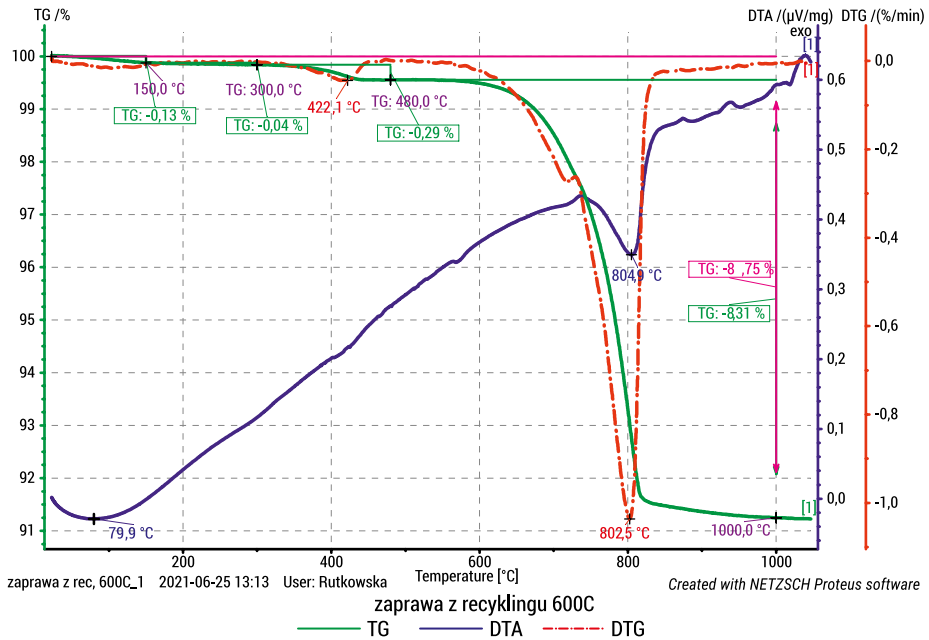
RYS. 3.7. Analiza termiczna zaprawy cementowej_200°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



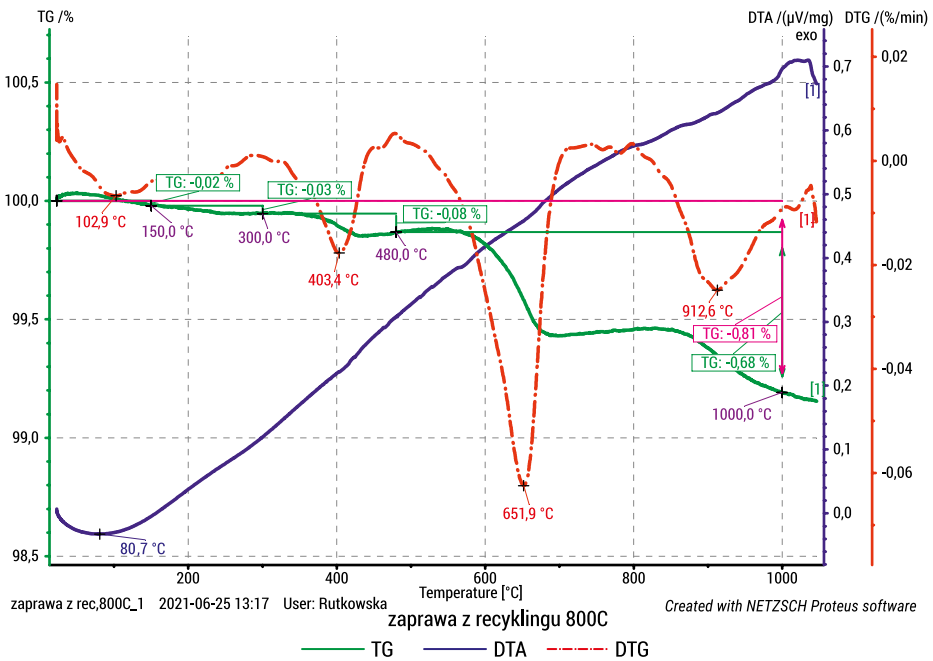
RYS. 3.8. Analiza termiczna zaprawy cementowej_400°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



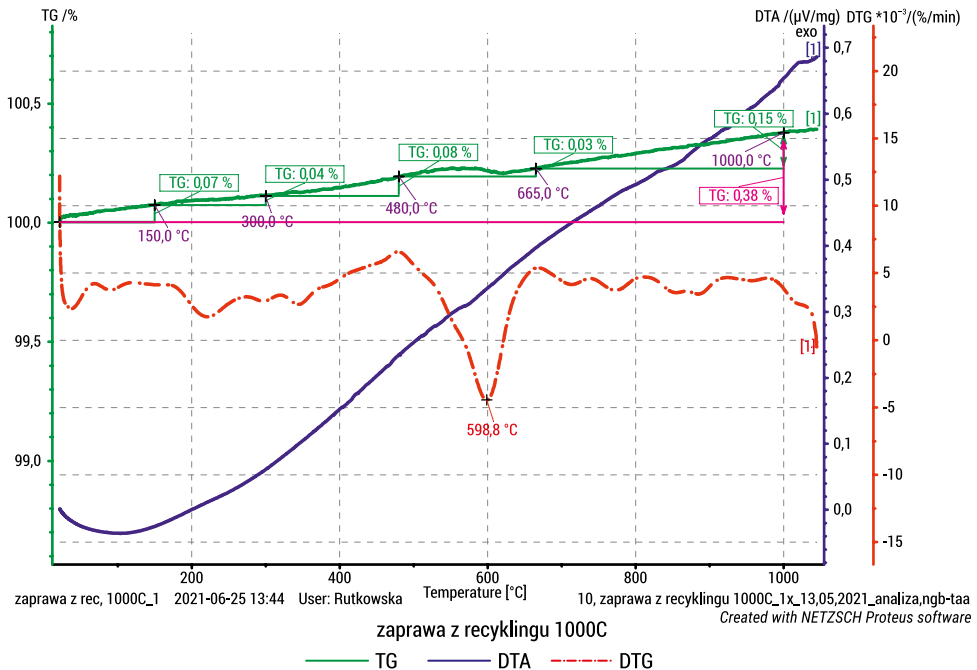
RYS. 3.9. Analiza termiczna zaprawy cementowej_600°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.10. Analiza termiczna zaprawy cementowej_800°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

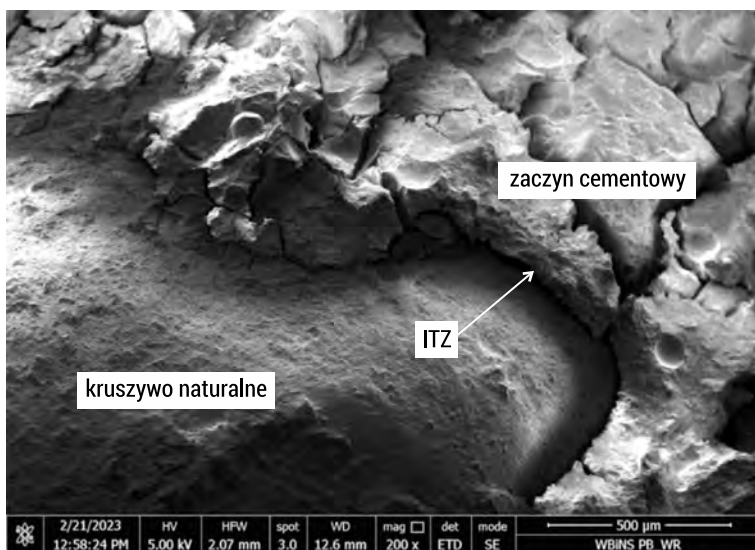


RYS. 3.11. Analiza termiczna zaprawy cementowej_1000°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Ocena makroskopowa próbek betonowych, jak i ich przełamów wykazała stopniowe ich zniszczenie wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania. Zmiana barwy betonu wynikała przede wszystkim ze stopniowego uwalniania wody oraz dehydratacji zaczynu cementowego, ale także z przekształceń zachodzących w obrębie samego ziarna kruszywa, co ustalili również inni autorzy [80]. Pojawienie się różowo-czerwonego zabarwienia w temperaturze około 400°C należy tłumaczyć utlenianiem składników mineralnych, głównie związków żelaza obecnych w składzie kruszywa, co zaobserwowano też w badaniach realizowanych chociażby przez Shorta i in. [214]. Poza zmianą barwy betonu przy wygrzewaniu do temperatury 400°C zauważono jedynie drobne defekty w postaci rys i spękań. Poważne uszkodzenia makrostruktury wystąpiły dopiero w temperaturze 600°C, a powstały one przede wszystkim na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu, co świadczy o uszkodzeniu strefy kontaktowej pomiędzy nimi (rys. 3.12).

Zniszczenie betonu pod naciskiem palców można wyjaśnić niemal całkowitą dehydroksylacją portlandytu, który głównie zlokalizowany bywa w strefie kontaktowej i tworzy efekt ściany, co opisano w rozdziale 1.5.2. Zmiana barwy mogła być wynikiem rozkładu termicznego węgla wapnia, w efekcie czego powstawało wapno, co skutkowało pojawieniem się jasnych odcieni szarości.



RYS. 3.12. Uszkodzenie strefy kontaktowej w betonie wyprażonym w 600°C, × 200

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Analiza termiczna zaczynu wyseparowanego z betonu wykazała, że w temperaturze 800°C zaobserwowano tylko śladowe ilości węglanu wapnia (CaCO_3), który uległ rozpadowi na CaO i CO_2 , a na powierzchni betonu widoczne były odpryski (*spalling*). W 1000°C, w odróżnieniu od niższych temperatur, nie zaobserwowano ubytków masy, co świadczy o wcześniejszym całkowitym rozpadzie produktów hydratacji cementu.

3.1.5. Podsumowanie wyników badań

Przeprowadzone badania dotyczyły określenia wpływu temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu cementowego. Betony przygotowano odpowiednio z kruszywem żwirowym i łamanym. Wraz ze wzrostem temperatury następowało stopniowe pogorszenie ich właściwości, natomiast w 600°C spadek wytrzymałości na ściskanie wyniósł ponad 40% w przypadku obu rodzajów betonów, co łączyło się również z wyraźnym pogorszeniem ich pozostałych cech. Wynikało to z osłabienia strefy kontaktowej w betonie oraz licznych rys i spękań pojawiających się w matrycy cementowej. Przy dalszym wzroście temperatury do 800°C zaobserwowano już uszkodzenia ziaren kruszywa żwirowego i łamanego. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że temperatura wygrzewania równa 600°C powoduje najskuteczniejszą dezintegrację betonu będącą efektem uszkodzenia strefy kontaktowej między ziarnem kruszywa a zaczynem cementowym bez szkodliwego

wpływu na ziarna kruszywa. W dalszych etapach temperatura ta stanowiła podstawę do opracowania parametrów termiczno-mechanicznej obróbki gruzu betonowego mającej na celu wytworzenie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz kształtowanie właściwości pucolanowych frakcji drobnej.

3.2. Przemiany fazowe zachodzące w zacznym cementowym w wyniku wygrzewania

3.2.1. Cel badań

Badania przeprowadzono celem określenia wpływu temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na przemiany fazowe zachodzące w zacznym cementowym. Przygotowany zmielony zaczyn cementowy był odpowiednikiem drobnej frakcji z recyklingu, która powstała z zaprawy cementowej oddzielonej w procesie produkcji grubego kruszywa z recyklingu wysokiej jakości z gruzu betonowego.

Przyjęta procedura badawcza opiera się głównie na zacznym cementowym o znanym składzie, wytworzonym w laboratorium i pozbawionym zanieczyszczeń, które mogłyby zakłócić proces analizy wyników. Istotą zaproponowanej w pracy metody przetwarzania gruzu betonowego jest przede wszystkim dehydroksylacja portlandytu, dlatego biorąc pod uwagę proces karbonatyzacji, równoległe powstało pytanie o jego zawartość w wieloletnim betonie przeznaczonym do rozbiórki. Dla ustalenia obecności i ilości wodorotlenku wapnia w tak zwanym starym betonie analizę termiczną uzupełniono o zacznym cementowe wyseparowane z trzech rodzajów gruzu betonowego, przy czym dwa pochodziły z konstrukcji żelbetowej po rozbiórce a trzeci z kruszywa frakcji 0/63 mm składowanego przez kilka miesięcy na placu firmy zajmującej się recyklingiem gruzu budowlanego.

3.2.2. Metodyka badań

Do realizacji badań przygotowano zaczyn cementowy o współczynniku $w/c = 0,45$, wykonany z powszechnie dostępnego w momencie realizacji badań cementu CEM I 42,5R i wody. Próbkę o wymiarach $100 \times 100 \times 100$ mm poddano dojrzewaniu w środowisku wodnym do uzyskania wieku 28 dni. Po tym czasie wysuszono je w temperaturze $60 \pm 5^\circ\text{C}$ i wstępnie rozdrobniono w laboratoryjnej kruszarce szczękowej. Następnie materiał domielono w młynie kulowym do uzyskania frakcji 0/0,063 mm i poddano prażeniu w piecu ceramicznym w następujących temperaturach: 20°C (oznaczenie przyjęto symbolicznie dla braku obróbki termicznej), 200, 400, 600, 800 i 1000°C. Czas prażenia w danej temperaturze był stały i wynosił 1 godzinę. Materiał poddany

działaniu temperatury 1000°C uległ widocznej zmianie zabarwienia oraz zbryleniu (rys. 3.13) i dlatego przed badaniem został dodatkowo domielony i ponownie przesiany. W tak wysokiej temperaturze tworzą się silne wiązania ceramiczne związane z częściowym topnieniem składników zaczynu. W wyniku spiekania następuje łączenie się ziaren, co dokładniej opisano w pracy [246].



RYS. 3.13. Zbrylony zaczyn cementowy po wyprężeniu w temperaturze 1000°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.

Wyprężone materiały do momentu wykonania badań przechowywano w szczelnie zamkniętych pojemnikach celem uniknięcia zawilgocenia. Następnie wykonano badanie właściwości fizycznych wyprężonych zmielonych zaczynów oraz użytego w badaniu cementu. Badania powierzchni właściwej metodą BET, na podstawie normy PN-EN 196-6 [N28] oraz gęstości piknometrycznej zgodnie z normą PN-EN 1097-7 [N18], zmielonego zaczynu cementowego poddanego różnym temperaturom wygrzewania oraz cementu CEM I 42,5R wykonano w akredytowanym laboratorium zewnętrznym. Badanie powierzchni właściwej metodą Blaine'a na podstawie normy PN-EN 196-6 [N28] i gęstości nasypowej w stanie luźnym według normy PN-EN 1097-3 [N16] przeprowadzono w laboratorium Politechniki Białostockiej. Dla każdej z właściwości wykonano trzy pomiary.

3.2.3. Właściwości fizyczne wygrzewanego zaczynu cementowego

Wartości średnie z wyników badań właściwości fizycznych wyprężonych zmielonych zaczynów cementowych oraz użytego w badaniu cementu podano w tabeli 3.5.

TABELA 3.5. Wartości średnie z wyników badań właściwości fizycznych cementu i zmielonego zaczynu cementowego

Badany materiał	Powierzchnia właściwa metodą BET	Powierzchnia właściwa metodą Blaine'a	Gęstość piknometryczna	Gęstość nasypowa w stanie luźnym
	cm ² /g	cm ² /g	g/cm ³	g/cm ³
1	2	3	4	5
ZC_20°C	8 140 ± 150*	3 046,5 (0,71)	2,22 ± 0,02*	0,80 (0,01)
ZC_200°C	10 520 ± 200*	3 117,0 (0,01)	2,29 ± 0,02*	0,81 (0,03)
ZC_400°C	10 580 ± 200*	3 182,0 (2,83)	2,33 ± 0,02*	0,83 (0,03)
ZC_600°C	12 070 ± 250*	3 273,0 (2,83)	2,62 ± 0,02*	0,85 (0,01)
ZC_800°C	13 480 ± 300*	3 817,5 (3,54)	3,12 ± 0,02*	0,85 (0,03)
ZC_1000°C	5 430 ± 50*	2 669,0 (1,41)	2,27 ± 0,02*	0,77 (0,02)
CEM I 42,5R	4 170 ± 50*	3 863,0 (2,83)	3,08 ± 0,02*	1,10 (0,03)

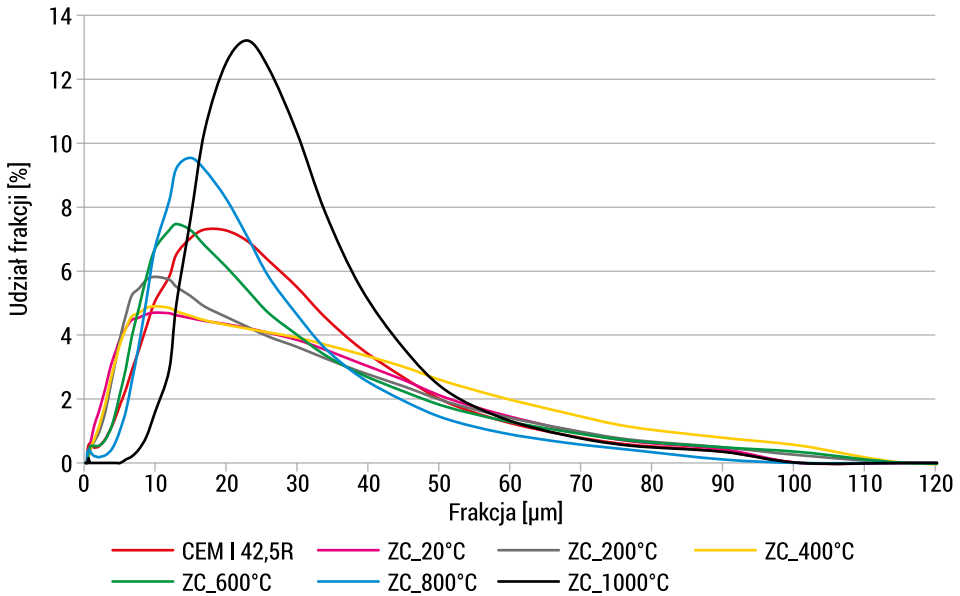
* Niepewność na podstawie testów statystycznych laboratorium, p = 95%.

W nawiasach podano wartości odchylenia standardowych S(x).

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

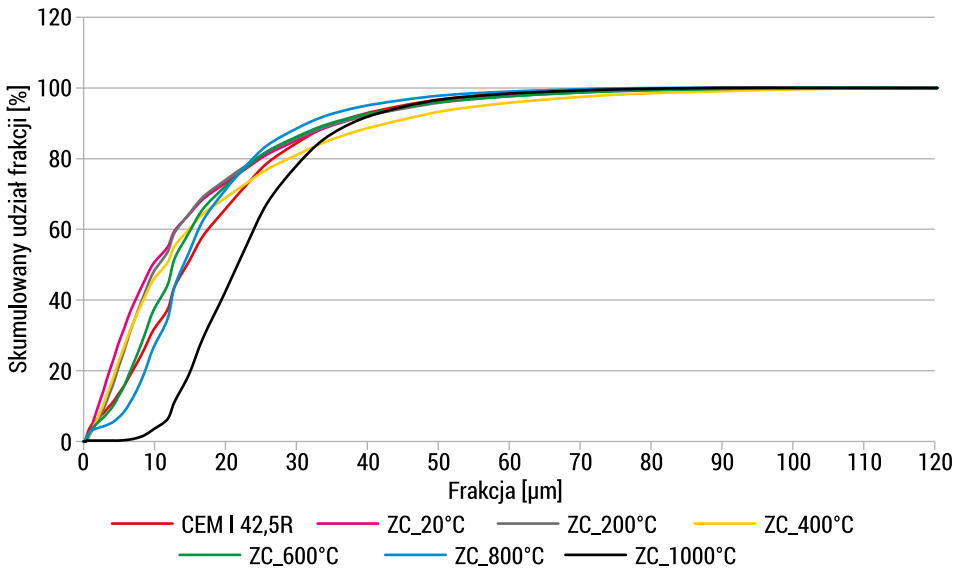
Jak wynika z wartości średnich z wyników badań przedstawionych w tabeli 3.5, pomiary powierzchni właściwej wykonane metodą Blaine'a oraz BET nie mogą być porównywane. Powierzchnia proszków obliczona metodą BET jest wielokrotnie większa niż ta ustalona metodą Blaine'a, jednak ogólna tendencja dotycząca zmian powierzchni została zachowana. Dlatego też termin „powierzchnia właściwa” jest niejednoznaczny i musi być opatrzony informacją o sposobie jej mierzenia. Według metody BET zmielony zaczyn cementowy charakteryzował się dwu-, trzykrotnie większą powierzchnią właściwą od powierzchni cementu, w zależności od temperatury wypalania, przy czym wraz ze wzrostem tej temperatury do 800°C następował wzrost powierzchni związany z rozdrobnieniem zaczynu. Może to wynikać z rozpadu produktów hydratacji cementu, głównie wodorotlenku wapnia, oraz dekarbonatyzacji węglanu wapnia z uwolnieniem CO₂. W temperaturze 1000°C nastąpił nagły spadek powierzchni, co wiąże się z zaobserwowanym wcześniej zbryleniem próbki. Wyniki badania gęstości zarówno piknometrycznej, jak i nasypowej również wzrosły wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania do 800°C. W tej temperaturze gęstość piknometryczna zmielonego zaczynu była nawet wyższa niż cementu, co świadczy o wyraźnych przemianach fazowych zachodzących w tym zaczynie, szczególnie dotyczących odwodnienia fazy C-S-H.

Wyniki analizy ziarnowej materiałów w zakresie 0,1–600 μm wykonane metodą dyfrakcji laserowej według ISO 13320:2009 [N5] przedstawiono na rys. 3.14, a na rys. 3.15 zaprezentowano skumulowany udział procentowy poszczególnych frakcji.



RYS. 3.14. Rozkład wielkości cząstek cementu i zmielonych zaczynów cementowych wygrzewanych w różnych temperaturach

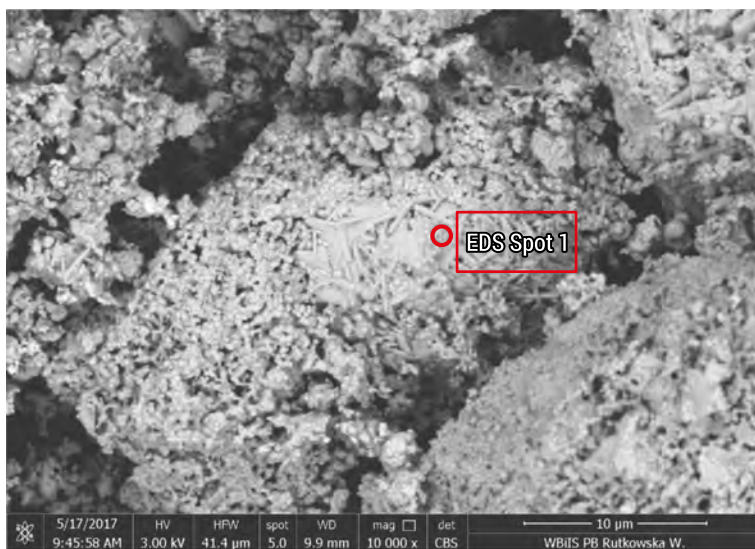
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań wykonanych przez laboratorium zewnętrzne.



RYS. 3.15. Skumulowany udział procentowy wielkości cząstek cementu i zmielonych zaczynów cementowych wygrzewanych w różnych temperaturach

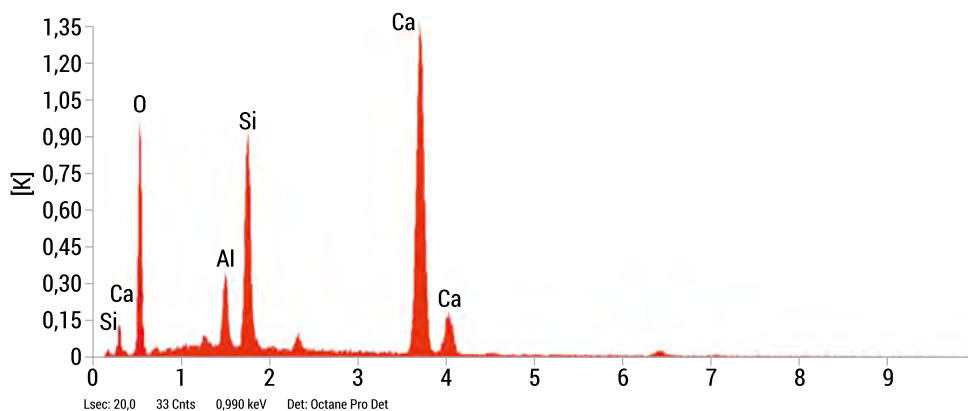
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań wykonanych przez laboratorium zewnętrzne.

Jak wynika z danych przedstawionych na wykresie zaprezentowanym na rys. 3.14, przy niższych temperaturach wygrzewania w zakresie 20–400°C krzywe ukazujące rozkład uziarnienia proszków są bardziej spłaszczone w porównaniu z wyższymi temperaturami i są przesunięte w kierunku cząstek o mniejszym uziarnieniu. W materiałach tych blisko połowę stanowią cząstki o wielkości do 10 µm, co oznacza, że najłatwiej ulegają one rozdrobnieniu podczas mielenia. W przypadku zaczynów wygrzewanych w temperaturach 600°C i 800°C zawartość tych cząstek była stosunkowo mniejsza i wyniosła w sumie odpowiednio 37% i 26%, co zbliżone było do uziarnienia badanego cementu CEM I 42,5R (32%). Wyraźną rozbieżność odnotowano dla krzywej przedstawiającej uziarnienie zaczynu wyprażonego w 1000°C, który zawierał tylko 3,4% cząstek o wielkości do 10 µm (rys. 3.15). Z kolei największym udziałem ziaren w zakresie 10–30 µm charakteryzowały się zaczyny prażone w 800°C (62%) i 1000°C (74%), natomiast uziarnienie w tym przedziale zaczynów wygrzewanych w 600°C ponownie było zbliżone do uziarnienia cementu (około 50%). Można więc stwierdzić, że najbardziej zbieżny do rozkładu wielkości cząstek cementu okazał się zaczyn prażony w 600°C, prawdopodobnie z uwagi na to, że do tej temperatury nastąpiło niemal całkowite odwodnienie produktów hydratacji cementu, a szczególnie rozkład wodorotlenku wapnia, w którego wyniku powstało ponownie wapno będące również głównym składnikiem CEM I 42,5R. Wyraźne zwiększenie zawartości cząstek w granicach 15–50 µm zaczynu wyprażonego w 1000°C wynika z tego, że w efekcie wygrzewania nastąpiło jego zbrylenie widoczne na rys. 3.13. Celem dokładniejszej analizy zjawiska zmielony zaczyn obserwowano pod skaningowym mikroskopem elektronowym (rys. 3.16), a wyniki analizy pierwiastkowej EDS przedstawiono na rys. 3.17.



RYS. 3.16. Obraz SEM zmielonego zaczynu (ZC_1000°C), × 10 000

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.17. Analiza EDS zmielonego zaczynu (ZC_1000°C)

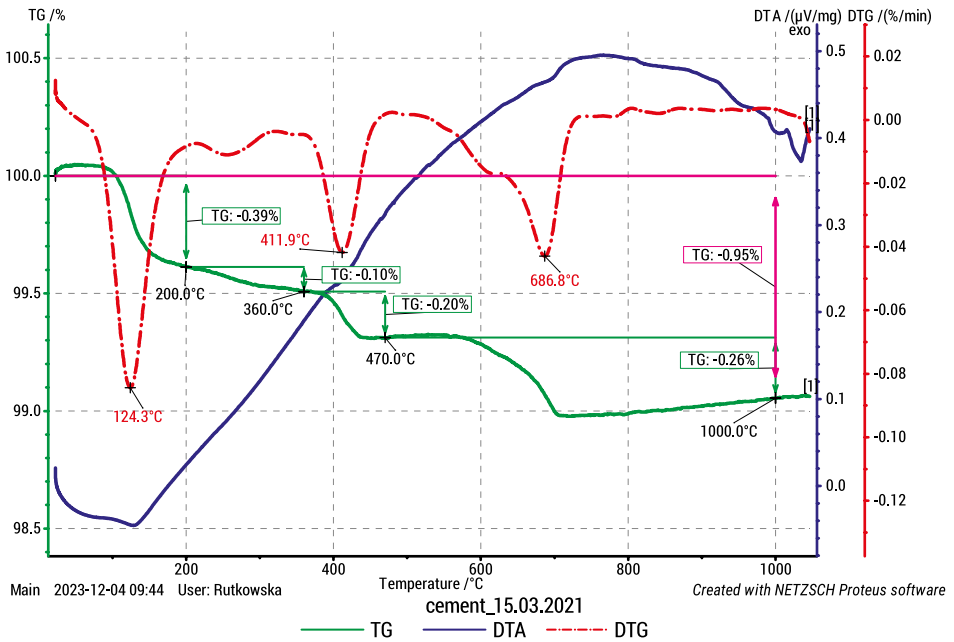
ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Obraz zaczynu przedstawiony na rys. 3.16 wskazuje, że ma on formę porowatą, ziarna są częściowo połączone ze sobą, co jest efektem kurczenia się żelu C-S-H w wyniku odwodnienia. Zjawisko to zaobserwowali też inni badacze [279]. Analiza EDS (rys. 3.17) wykazała głównie obecność takich pierwiastków, jak wapń, tlen czy krzem, które stanowią podstawę budowy tlenku wapnia (CaO), oraz krzemianów wapnia utworzonych w efekcie odwodnienia żelu C-S-H i tworzących fazę krystaliczną w postaci belitu (β -C₂S) (ustalono na podstawie składu fazowego określonego w punkcie 3.2.5). Przed badaniem proszek został ponownie rozdrobniony, ale pomimo tego wpłynęło to na jego uziarnienie. Wszystkie badane materiały charakteryzowały się tym, że ponad 95% ich składu stanowiły cząstki o wielkości do 50 μ m.

3.2.4. Analiza termiczna wygrzewanego zaczynu cementowego

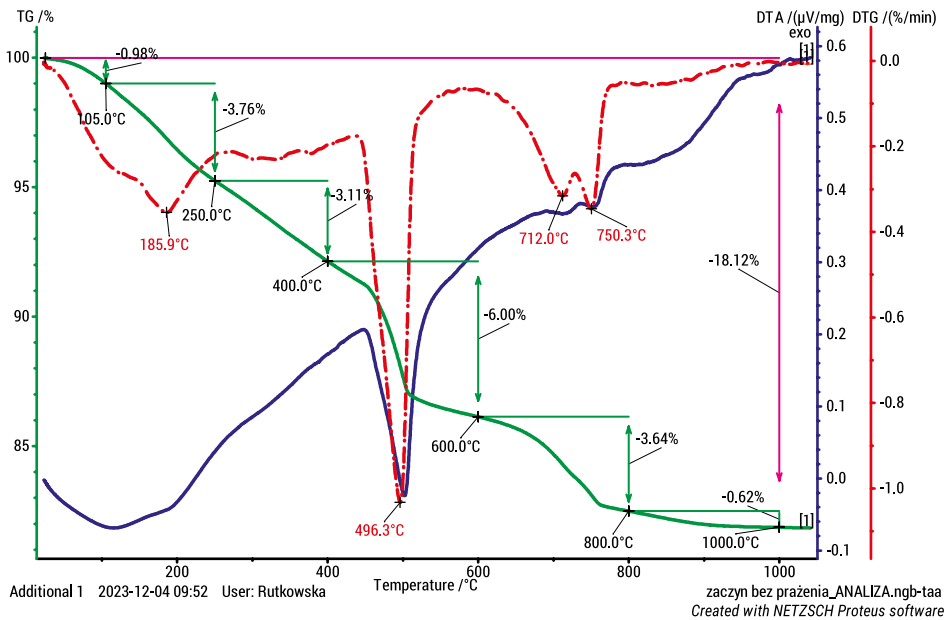
Dla wyjaśnienia powyższych zmian konieczne było przeprowadzenie dalszych badań pod kątem zidentyfikowania faz występujących w badanym zaczynie cementowym oraz obliczenia ich ilości w danej temperaturze prażenia. W tym celu próbki zmielonego zaczynu cementowego poddano analizie termicznej (DTG, DTA i TG) dla ilościowego oznaczenia jego wybranych składników, takich jak zawartość wody związanej w produktach hydratacji i hydrolizy oraz zawartość wodorotlenku i węgla wapnia na podstawie [119].

Na rys. 3.18–3.24 przedstawiono wyniki analizy termicznej cementu CEM I 42,5R oraz przygotowanych na jego bazie zaczynów wygrzewanych w temperaturach 20–1000°C.



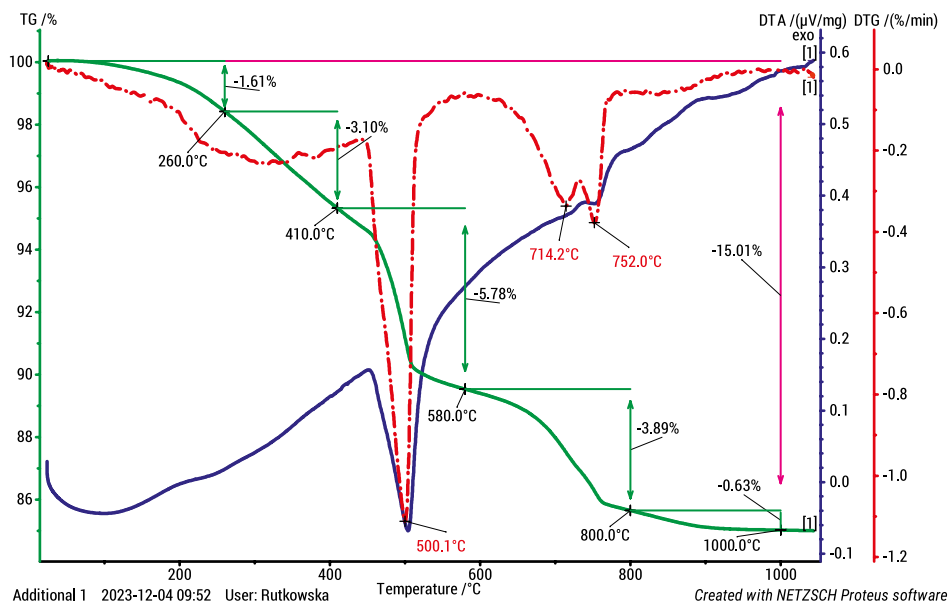
RYS. 3.18. Analiza termiczna cementu CEM I 42,5 R

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



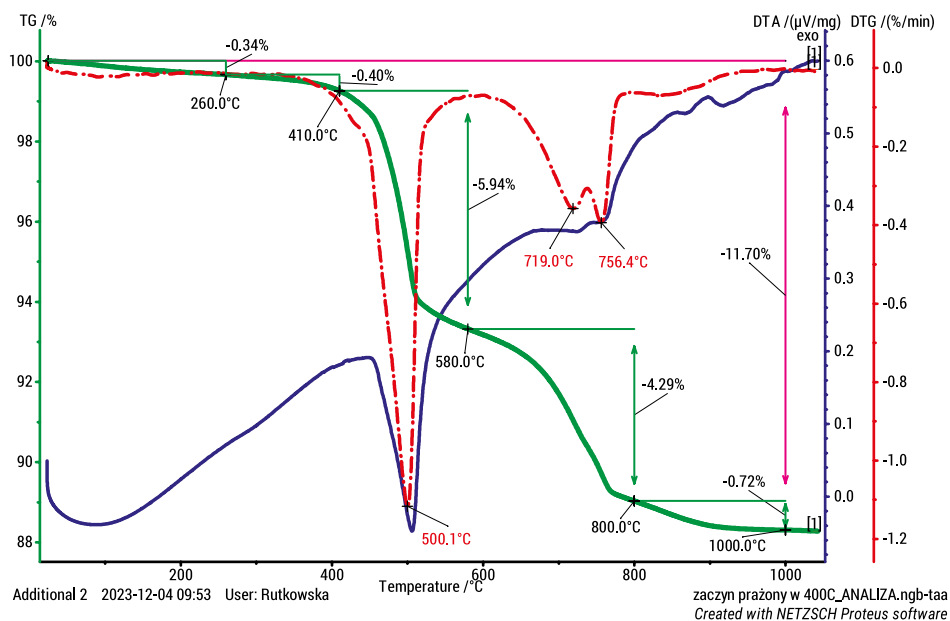
RYS. 3.19. Analiza termiczna ZC_20°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



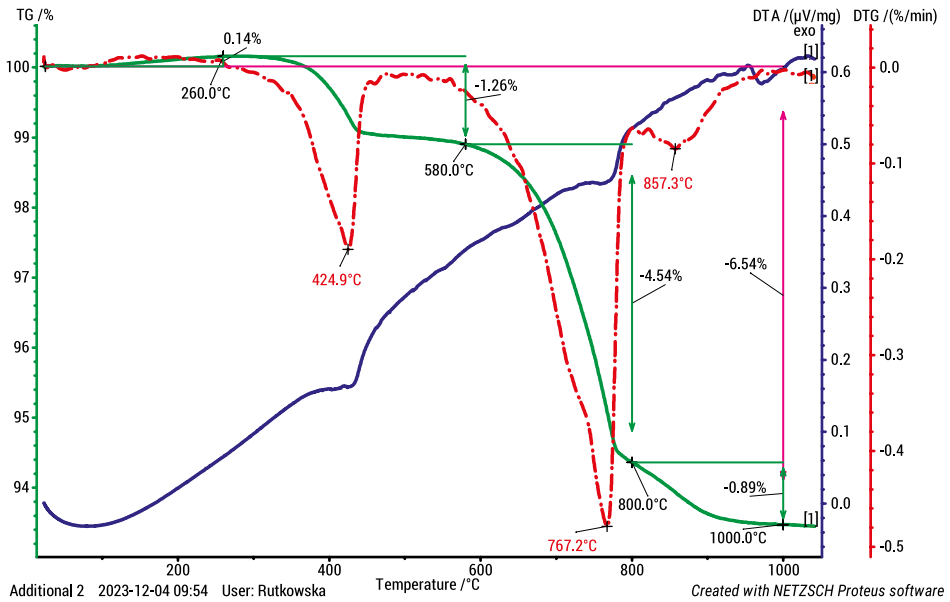
RYS. 3.20. Analiza termiczna ZC_200°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



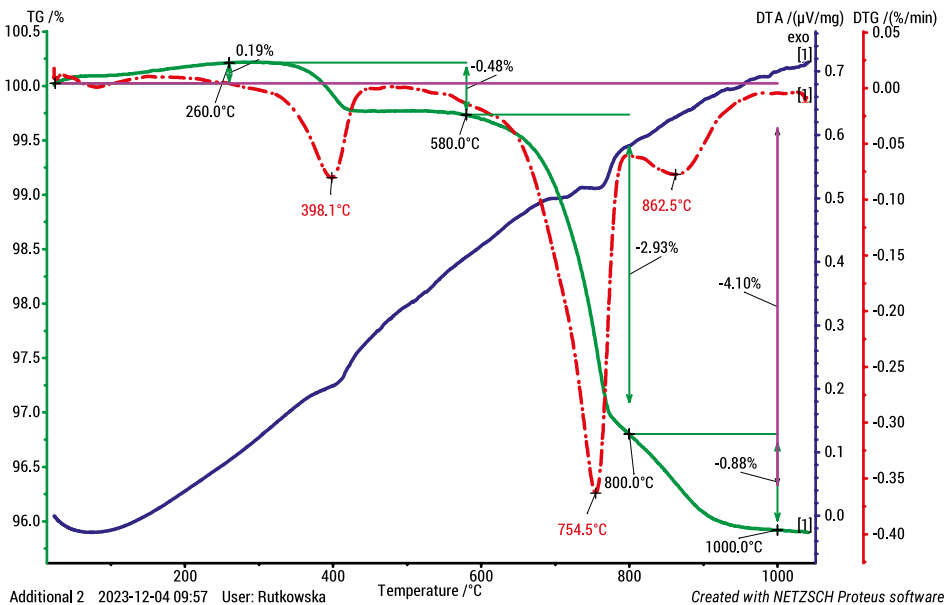
RYS. 3.21. Analiza termiczna ZC_400°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



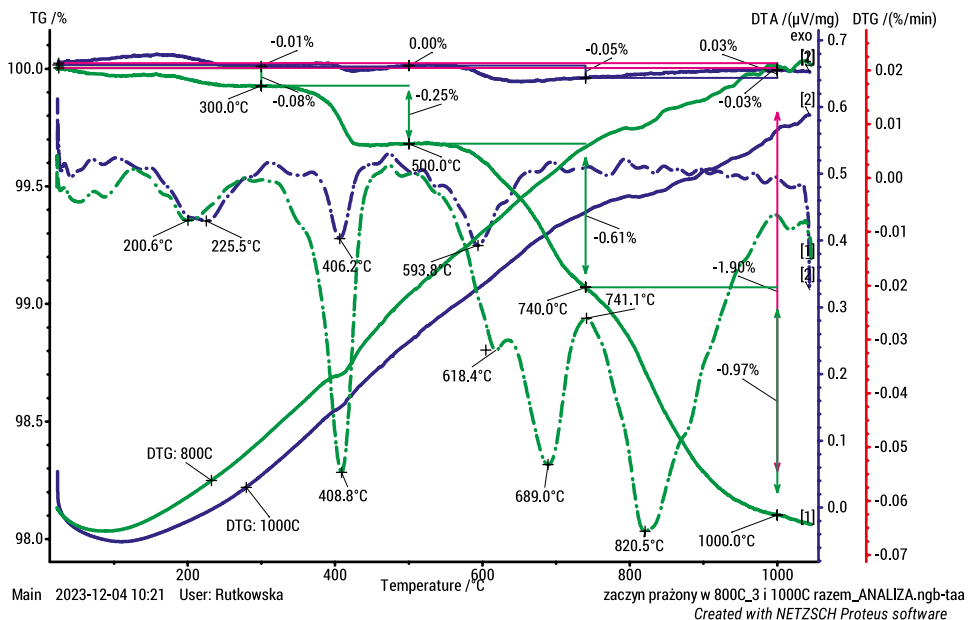
RYS. 3.22. Analiza termiczna ZC_600°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.23. Analiza termiczna ZC_800°C

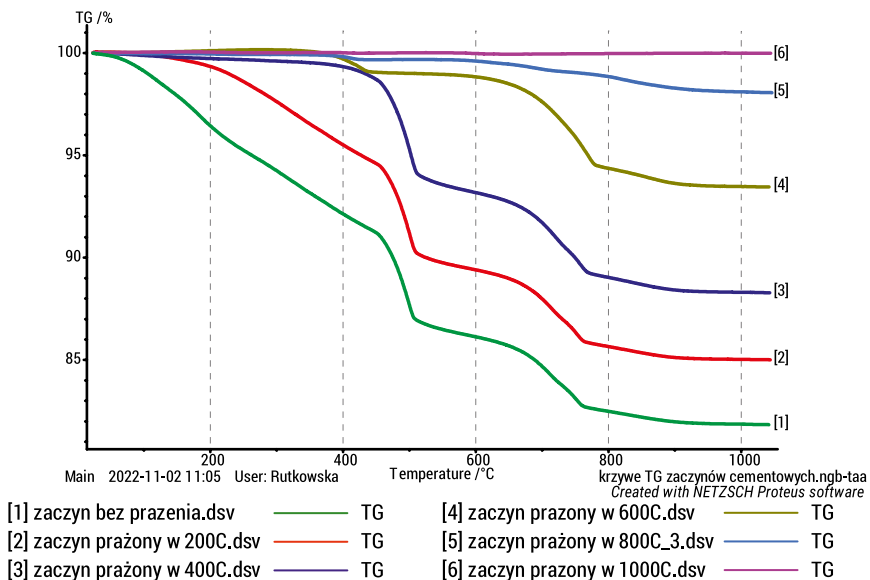
ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.24. Analiza termiczna ZC_800°C i ZC_1000°C

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Do celów porównawczych wyniki zaczynu cementowego prażonego w zakresie 20–1000°C zestawiono na zbiorczym wykresie (rys. 3.25).



RYS. 3.25. Krzywe TG zaczynu cementowego poddanego różnym temperaturom prażenia

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Zawartość wody związanej, wodorotlenku wapnia oraz węglanu wapnia ustalono według zależności (3.3) i (3.4). H_1 oznaczono jako wodę zawartą w produktach hydratacji (uwodnionych krzemianach, glinosiarczanach, glinianach i glikożelazianach wapnia) w zakresie temperatur 20–580°C. Materiał badawczy przygotowano z zaczynu cementowego, dlatego nie było konieczności wprowadzania poprawek związanych z zawartością części nierozpuszczalnych w HCl, czyli pozostałości kruszywa [119]. W tabeli 3.6 przedstawiono procentowe zawartości poszczególnych składników cementu i zmielonego zaczynu cementowego po trzech dniach od wyprażenia.

TABELA 3.6. Wyniki analizy termicznej cementu i zaczynu cementowego po trzech dniach od wyprażenia

Temperatura prażenia, °C	w/c	Składnik zaczynu, % masy					
		Woda związana			\bar{C}	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
		H ₁	H _{CH}	Σ			
CEM I 42,5R	0,45	0,49	0,20	0,69	0,26	0,82	0,59
20		8,04	5,67	13,71	4,40	23,30	9,99
200		4,71	5,78	10,49	4,52	23,76	10,26
400		0,74	5,94	6,68	5,01	24,41	11,37
600		0,00	1,26	1,26	5,43	5,18	12,33
800		0,08	0,25	0,33	1,58	1,03	3,59
1000		0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zawartość wody związanej (H_1) zaobserwowanej w temperaturze do 200°C świadczy o częściowym odwodnieniu ettryngitu do temperatury 100°C i początku dehydratacji uwodnionych krzemianów wapniowych C-S-H [28, 39]. Zaczyn cementowy poddany działaniu temperatur w zakresie 20–400°C charakteryzował się największą zawartością wodorotlenku wapnia w granicach 23,3–24,4% masy, co częściowo było efektem rozpadu ettryngitu i udziału jonów Ca²⁺ w tworzeniu Ca(OH)₂. Tak więc portlandyt okazał się stabilny chemicznie do temperatury około 400°C. Powyżej tej temperatury proces dehydroksylacji silnie narastał i został zakończony w około 600°C, kiedy to wodorotlenek wapnia niemal całkowicie rozpadł się na CaO i H₂O. Należy zauważyć, że w temperaturach powyżej 600°C zaobserwowano śladowe ilości Ca(OH)₂ z uwagi na to, że materiał ten poddano analizie termicznej po kilku dniach od wyprażenia i pomimo przechowywania w szczelnych pojemnikach nastąpił w nim częściowy proces rehydratacji. Na uwagę zasługuje fakt, że temperatura dehydroksylacji portlandytu wtórnego wykształconego w wyniku rehydratacji jest niższa od temperatury, w której następuje rozpad portlandytu pierwotnego, i kształtuje się w przedziale 398–424°C (rys. 3.22–3.24). Zdaniem autorki ma to szczególne znaczenie w przypadku opracowania parametrów obróbki termiczno-mechanicznej gruzu

betonowego zawierającego już kruszywo z recyklingu wysokiej jakości, a co za tym idzie ustalenia dopuszczalnej krotności wprowadzenia do obiegu tego typu odpadów betonowych. Zagadnienie to ze względu na złożoność problemu wymaga jednak odrębnych badań, ale w przyszłości jest nieuniknione.

Natomiast całkowity rozpad węglanu wapnia przewidywany jest w zakresie temperatur 580–1000°C, co tłumaczy dużą zawartość CaCO_3 w spoiwie wyprażonym w temperaturze do 600°C (nawet do 12% masy spoiwa). Wysoka zawartość węglanu wapnia zaobserwowana w eksperymencie jest efektem wysokiego stopnia rozdrobnienia badanego materiału, co przy tak rozwiniętej jego powierzchni sprzyjało postępowi karbonatyzacji. Zjawisko to dotyczy wszystkich składników zaczynu cementowego, ale portlandyt jest najbardziej na nie podatny. W tworzeniu się węglanu wapnia w zakresie temperatur 200–600°C swój udział, podobnie jak w przypadku portlandytu, miały jony wapniowe z rozpadu ettryngitu. Wyraźne zanikanie węglanu wapnia odnotowano przy temperaturze od 600°C do 800°C, co wskazuje, że jego kalcynacja jest procesem stopniowym. Do 1000°C nastąpił całkowity rozkład CaCO_3 , potwierdzony jego śladową zawartością równą 0,05% (tabela 3.6).

W celu porównania składu fazowego zaczynu cementowego przygotowanego na potrzeby eksperymentu (ZC_0) i pochodzącego z gruzu betonowego uzyskanego w wyniku rozbiórki obiektów budowlanych analizę termiczną rozszerzono o dodatkowe próbki badawcze oznaczone jako ZRB_30, ZRB_50 i ZRK_30, gdzie:

- ZC_0 – zaczyn cementowy o znanym składzie, po 28 dniach dojrzewania;
- ZRB_30 – zaczyn cementowy wyseparowany z fragmentu konstrukcji żelbetowej, której wiek w momencie rozbiórki oszacowano na 25–30 lat;
- ZRB_50 – zaczyn cementowy wyseparowany z fragmentu konstrukcji żelbetowej, której wiek w momencie rozbiórki oszacowano na 50 lat;
- ZRBK_30 – zaczyn cementowy wyseparowany z kruszywa betonowego frakcji do 63 mm, od kilku miesięcy składowanego na placu firmy. Wiek betonu oszacowano na 30 lat.

W tabeli 3.7 zamieszczono wyniki analizy termicznej zaczynów cementowych wyseparowanych z betonu różnego pochodzenia.

Ubytki masy związane z dehydratacją fazy C-S-H, dehydroksylacją Ca(OH)_2 oraz dekarbonatyzacją CaCO_3 ustalono na podstawie krzywych DTA, jak w tabeli 3.6. Straty prażenia obliczono jako sumę ubytków masy na krzywej DTA w wyniku prażenia. Zawartość wodorotlenku wapnia i węglanu wapnia obliczono według zależności (3.3) i (3.4). Obliczony skarbonatyzowany Ca(OH)_2 ustalono ze wzoru (3.5):

$$\text{obliczony skarbonatyzowany } \text{Ca(OH)}_2 = 0,74 \cdot \text{zawartość } \text{CaCO}_3 \quad (3.5)$$

Całkowity hipotetyczny uwolniony Ca(OH)_2 ustalono jako sumę zawartości CaCO_3 i obliczonego skarbonatyzowanego Ca(OH)_2 . Natomiast stopień karbonatyzacji określono jako iloraz obliczonego skarbonatyzowanego Ca(OH)_2 i całkowitego hipotetycznego uwolnionego Ca(OH)_2 .

TABELA 3.7. Wyniki analizy termicznej zaczynów cementowych wyseparowanych z betonów różnego pochodzenia

Oznaczenie	Badany zaczyn cementowy			
	ZC_0	ZRB_30	ZRB_50	ZRBK_30
1	2	3	4	5
Dehydratacja C-S-H, %	8,04	13,31	4,11	7,78
Dehydroksylacja Ca(OH) ₂ , %	5,67	1,77	2,85	0,41
Dekarbonatyzacja, %	4,4	6,98	12,56	14,14
Strata prażenia, %	18,11	22,06	19,52	22,33
Zawartość Ca(OH) ₂ , %	23,30	7,27	11,71	1,69
Zawartość CaCO ₃ , %	9,99	19,54	28,5	32,10
Obliczony skarbonatyzowany Ca(OH) ₂ , %	7,39	14,46	21,1	23,75
Całkowity hipotetyczny uwolniony Ca(OH) ₂ , %	30,69	21,74	32,8	25,44
Stopień karbonatyzacji Ca(OH) ₂ , %	24,1	66,5	64,3	93,4

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki przedstawione w tabeli 3.7 wskazują, że proces karbonatyzacji w betonie zachodzi stopniowo. Najwięcej wodorotlenku wapnia znajduje się w „nowym” zaczynie cementowym (ZC_0), a stopień jego karbonatyzacji jest równy 24,1%. Jednak nawet po 30 czy 50 latach użytkowania stopień karbonatyzacji betonu kształtuje się na poziomie odpowiednio 66,5% (ZRB_30) oraz 64,3% (ZRB_50). Oznacza to, że postęp karbonatyzacji jest pochodną nie tylko wieku betonu, lecz także jego składników, warunków dojrzewania czy eksploatacji. Na uwagę zasługuje również stosunkowo wysoka zawartość wodorotlenku wapnia rzędu 7–12% w zaczynach wyseparowanych z fragmentów konstrukcji mających 30 i 50 lat (ZRB_30; ZRB_50). Potwierdza to skuteczność obróbki termicznej gruzu betonowego zorientowanej na dehydroksylację Ca(OH)₂. Zastanawiające są za to wyniki uzyskane w przypadku zaczynu wyseparowanego z gruzu rozdrobnionego do postaci kruszywa i składowanego przez kilka miesięcy na otwartej przestrzeni (ZRBK_30). Zaobserwowano tu tylko śladowe ilości wodorotlenku wapnia, około 1,69%, a stopień karbonatyzacji wyniósł 93,4%. Wynika to głównie z wcześniejszego rozdrobnienia gruzu oraz uszkodzenia struktury zaczynu cementowego w efekcie rozkruszania, co umożliwiło swobodny dostęp dwutlenku węgla. Na tej podstawie można stwierdzić, że gruz powinien być poddany działaniu wysokiej temperatury bezpośrednio po procesie rozkruszania.

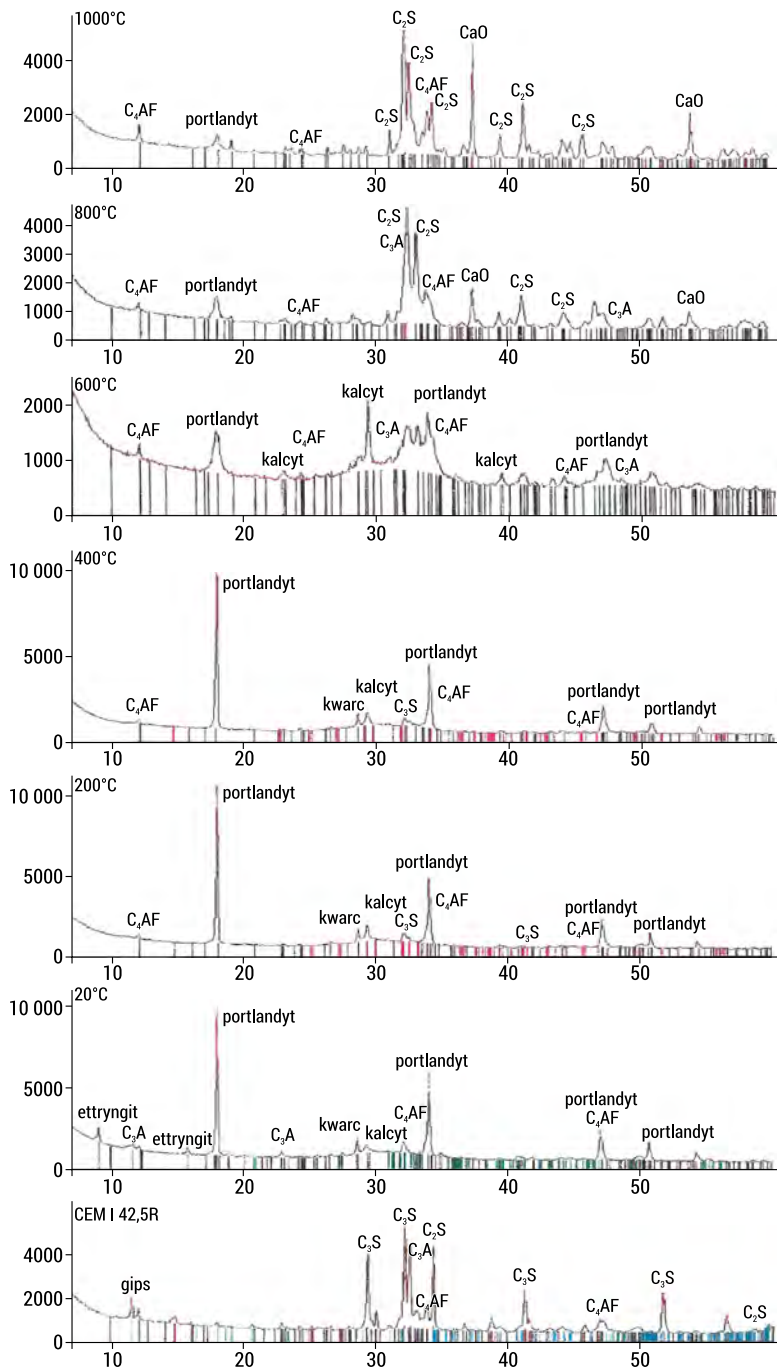
Badania na wieloletnich kompozytach cementowych przedstawiane są w literaturze rzadko, zdecydowana większość analiz dotyczy zapraw czy betonów stosunkowo „młodych”, maksymalnie kilkuletnich. Dla przykładu Nocuń-Wczelik i in. [166] badali zaczyny sporządzone z cementu portlandzkiego CEM I 32,5N i cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 32,5N po 13 latach dojrzewania oraz syntetycznego belitu β -Ca₂SiO₄ po 40 latach dojrzewania. Zaobserwowano

w nich obecność portlandytu, kalcytu, waterytu oraz szczątkowe ilości faz krzemianowych. W zaczynie z cementem portlandzkim po 13 latach dojrzewania zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wyniosła 11,4%, a kalcytu 38,3%, natomiast w obecności cementu popiołowego ilości tych faz były nieco mniejsze: 7,3% wodorotlenku wapnia i 28,2% węglanu wapnia. Dla zaczynu z cementem belitowym po 40 latach dojrzewania ilość portlandytu ustalono na poziomie 10,6%, a kalcytu na 34,5%. Stwierdzono również, że stopień karbonatyzacji wszystkich badanych zaczynów kształtował się na poziomie około 70%. Podobnie w pracy Li [130] – w 11-letnich zaczynach wykonanych z białego cementu z różnymi domieszkami zidentyfikowano takie fazy, jak portlandyt, uwodnione krzemiany wapnia oraz ettryngit, nie podając jednak ich ilości. Z kolei wyniki badań autorstwa Karasia i Klimek [96], dotyczące mikrostruktury próbek pobranych ze 100-letniego betonowego mostu zlokalizowanego w Lublinie, potwierdziły obecność uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, ettryngitu oraz częściowo odkształconych płytek wodorotlenku wapnia, a ogólną kondycję obiektu określono na bardzo dobrą. Pięćdziesięcioletni zaczyn alitowy analizowali Geng i in. [66]. W ich badaniach zastosowano szeroki wachlarz badań mikrostrukturalnych, które wykazały, że w zaczynie nadal dominowały uwodnione krzemiany wapnia, portlandyt i niewielka ilość nieprzereagowanego alitu. Analizując przedstawione dane literaturowe, można zauważyć, że ocena stanu kompozytów cementowych po wielu latach dojrzewania jest na ogół optymistyczna, a postęp karbonatyzacji jest na tyle ograniczony, że wodorotlenek wapnia obserwowany jest w betonie nawet po 100 latach użytkowania.

3.2.5. Analiza dyfrakcyjna wyrzewanego zaczynu cementowego

Następnie próbki cementu oraz zaczynu cementowego wyrzewanego w zakresie temperatur 20–1000°C poddano analizie jakościowej składu fazowego metodą dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD). Z przyczyn technicznych (zlecenie badania w laboratorium zewnętrznym) badanie próbek przeprowadzono po ponad dwóch miesiącach od ich wyprażenia. Na rys. 3.26 zestawiono dyfraktogramy próbek cementu i zmielonego zaczynu cementowego w zależności od oddziałującej temperatury.

W próbce cementu zidentyfikowano refleksy podstawowych faz klinkieru, takie jak: alit (C_3S), belit (larnit – C_2S), glinian trójwapniowy (C_3A) oraz brownmilleryt (C_4AF). Odnotowano również obecność gipsu. W zaczynie cementowym referencyjnym ($\text{ZC}_{20^\circ\text{C}}$), czyli niepoddanym prażeniu, zaobserwowano produkty hydratacji cementu, głównie portlandyt i ettryngit oraz kalcyt. W mniejszej ilości pojawiły się też uwodnione gliniany, kwarc i brownmilleryt. Wraz z podgrzewaniem próbek do 200°C niektóre refleksy zanikły, przede wszystkim nie zaobserwowano już ettryngitu, co jest bliskie wynikom prezentowanym przez Castellote i in. [28] czy Hager [80], którzy stwierdzili całkowity jego rozpad do temperatury odpowiednio 90°C i 150°C.



RYS. 3.26. Dyfraktogramy próbek cementu i zaczynu cementowego prażonych w temperaturach 20–1000°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań zleconych laboratorium zewnętrznemu.

Z kolei inni badacze oszacowali, że ettryngit rozpada się dopiero w 300°C [19]. Obok portlandytu i kalcytu pojawiły się także niewielkie ilości brownmillerytu, kwarcu i alitu. Podobne fazy zaobserwowano w temperaturze 400°C i 600°C, natomiast udział portlandytu wraz ze wzrostem temperatury do 600°C uległ wyraźnemu zredukowaniu, co potwierdzają również wyniki analizy termicznej (tabela 3.6). W zaczynie wyprażonym w 800°C główną fazę stanowił już belit (C₂S), będący głównie produktem rozpadu fazy C-S-H, którego ilość wyraźnie wzrosła w temperaturze powyżej 600°C. Zaobserwowano też śladowe ilości portlandytu, brownmillerytu i glinianu trójwapieniowego. Obecność tego pierwszego wynikała przede wszystkim z tego, że badanie przeprowadzono po około dwóch miesiącach od wyprażenia próbek, kiedy to wilgoć z powietrza oddziaływała na wolne wapno (pomimo przechowywania materiału w szczelnych pojemnikach). Wapno to powstało głównie jako efekt rozpadu kalcytu, którego nie zaobserwowano już w 800°C. Zaczyn prażony w 1000°C składał się przede wszystkim z belitu i zdecydowanie większej ilości wolnego wapna niż w przypadku zaczynu prażonego w 800°C, co potwierdza niemal całkowity rozpad CaCO₃ i Ca(OH)₂. Zauważono także niewielkie ilości brownmillerytu.

3.2.6. Analiza chemiczna wygrzewanego zaczynu cementowego

W dalszej kolejności cement CEM I 42,5R oraz zmielone zaczyny cementowe poddane działaniu temperatur w zakresie 20–1000°C poddano analizie chemicznej głównie celem ustalenia ich składu tlenkowego. Skład chemiczny badanych materiałów przedstawiono w tabeli 3.8.

TABELA 3.8. Skład chemiczny cementu i zmielonego zaczynu cementowego poddanego działaniu temperatur w zakresie 20–1000°C

Materiał	Skład chemiczny, %									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CEM I 42,5R	22,0	3,65	4,48	60,6	1,37	3,67	0,78	0,09	1,59	98,23
	Reaktywny SiO ₂					21,6				
	Reaktywny CaO					58,1				
	Wolny CaO					1,21				
ZC_20°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	17,7	3,13	3,84	52,0	0,91	2,94	0,57	0,13	17,2	98,42
	Reaktywny SiO ₂					17,4				
	Reaktywny CaO					44,9				
	Wolny CaO					13,9				

Material	Skład chemiczny, %									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ZC_ 200°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	18,0	3,16	3,90	52,9	0,93	2,68	0,59	0,11	15,9	98,17
	Reaktywny SiO ₂					17,6				
	Reaktywny CaO					45,6				
	Wolny CaO					12,0				
ZC_ 400°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	18,6	3,31	4,01	55,0	0,98	2,87	0,62	0,06	12,7	98,15
	Reaktywny SiO ₂					18,0				
	Reaktywny CaO					47,8				
	Wolny CaO					11,9				
ZC_ 600°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	19,8	3,48	4,30	58,0	1,01	2,95	0,66	0,05	7,83	98,08
	Reaktywny SiO ₂					18,8				
	Reaktywny CaO					50,7				
	Wolny CaO					11,7				
ZC_ 800°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	20,8	3,66	4,57	61,2	1,06	3,04	0,69	1,90	2,95	99,87
	Reaktywny SiO ₂					20,3				
	Reaktywny CaO					58,3				
	Wolny CaO					11,1				
ZC_ 1000°C	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	NR *)	SP **)	Suma
	21,2	3,78	4,67	62,9	1,11	3,39	0,67	0,21	0,74	98,67
	Reaktywny SiO ₂					20,0				
	Reaktywny CaO					60,7				
	Wolny CaO					11,7				

*) – części nierozpuszczalne w HCl i Na₂CO₃.

**) – straty prażenia.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie wyników badań zleconych laboratorium zewnętrznemu.

Zawartość reaktywnej krzemionki i wapna w zaczynach cementowych zwiększała się stopniowo wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania, co wynikało z postępujących procesów dehydratacji oraz dekarbonizacji. Jednak bez względu na temperaturę ich zawartość była wysoka i wynosiła około 17–20% i 45–61%, odpowiednio dla SiO₂ i CaO. Obecność tych tlenków w kontakcie z wodą sprzyja tworzeniu się fazy C-S-H w nowym kompozycie cementowym, co prowadzi do uszczelnienia jego struktury oraz poprawy jego wytrzymałości i trwałości [236]. Występowanie wolnego

wapna zmniejsza ilość ettryngitu powstającego w początkowym okresie, a szczególnie w pierwszych godzinach hydratacji, gdy zaczyn jest jeszcze plastyczny. W późniejszym okresie wolne wapno może się przyczynić do zwiększenia ekspansji zaczynu cementowego w wyniku powstawania wodorotlenku wapnia [150]. Obecność reaktywnej krzemionki może prowadzić do reagowania z wodorotlenkiem wapnia, który jest najmniej trwałą fazą w betonie, również fazę C-S-H. Wraz ze wzrostem temperatury nastąpiło stopniowe zmniejszanie strat prażenia w zmielonym zaczynie cementowym, co świadczy o postępującym rozpadzie produktów hydratacji i karbonatyzacji i zakończeniu tych procesów w temperaturze 1000°C. Zauważono też, że zawartość alkaliów w zmielonych zaczynach cementowych była niewielka (do 0,69%), co stanowiło wartość nawet niższą niż w przypadku porównawczego cementu (0,78%). Na tej podstawie sformułowano przypuszczenie, że zmielony zaczyn cementowy po wyprażeniu w odpowiednio wysokiej temperaturze wykazuje pewne właściwości zbliżone do pucolanowych. W rozdziale 4.2 metodą fizyczną ustalono wskaźniki aktywności zmielonych zaczynów cementowych wyprażonych w zakresie temperatur 20–1000°C, uzyskując interesujące rezultaty.

3.2.7. Podsumowanie wyników badań

Przeprowadzone badania miały przede wszystkim określić wpływ temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na przemiany fazowe zachodzące w samym zaczynie cementowym stanowiącym odpowiednik zaprawy obecnej w gruzie betonowym. Do realizacji eksperymentu przyjęto zaczyn cementowy o znanym składzie celem wyeliminowania wpływu kruszywa drobnego oraz potencjalnych zanieczyszczeń na uzyskane wyniki badań. Zaplanowany szeroki zakres badań zaczynów uwzględniający właściwości fizyczne, analizę termiczną, dyfraktometrię rentgenowską oraz analizę chemiczną przyczynił się do zidentyfikowania produktów hydratacji cementu obecnych na powierzchni kruszywa z recyklingu poddanego różnym temperaturom wygrzewania. W dalszych etapach stanowiło to podstawę opracowania mechanizmów kształtowania strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zaczyn cementowy w nowym betonie. Dla porównania analizę termiczną rozszerzono o próbki zaczynów wyseparowanych z betonów, których wiek oszacowano w przedziale 25–50 lat. Uzyskane wyniki potwierdziły zbliżony mechanizm kształtowania produktów hydratacji cementu, pod warunkiem że gruz betonowy jest poddany obróbce termicznej bezpośrednio po procesie rozkruszania. W przypadku wcześniejszego rozdrobnienia gruzu, przy swobodnym dostępie powietrza, postęp karbonatyzacji następuje zdecydowanie szybciej.

3.3. Wpływ wysokiej temperatury na właściwości kruszyw naturalnych

3.3.1. Cel badań

Badania zaplanowano dla określenia zmian właściwości użytych w eksperymencie kruszyw naturalnych pod wpływem działania wysokiej temperatury, które w dalszej kolejności będą stanowiły podstawę przygotowania kruszyw z recyklingu. Spodziewanym efektem było między innymi określenie maksymalnej temperatury prażenia, przy której nie następuje wyraźne uszkodzenie struktury ziarna kruszywa. Zagadnienie wpływu temperatury na parametry kruszyw jest rozpoznane w literaturze [239, 278], jednak o ich jakości decyduje wiele czynników: pochodzenie geologiczne, tekstura i struktura skał oraz sposób ich powstawania, przeobrażenia i wietrzenia [40]. Z tego względu przed badaniem podatności kruszyw z recyklingu betonu na wysoką temperaturę zaplanowano przeprowadzenie takich badań na kruszywach naturalnych.

3.3.2. Metodyka badań

Do badań wybrano powszechnie stosowane kruszywa mineralne frakcji 4/16 mm:

- żwir, dolomit (pochodzące ze skał osadowych),
- granit (pochodzący ze skał magmowych głębinowych),
- bazalt (pochodzący ze skał magmowych wylewnych).

Kruszywa te poddano obróbce termicznej w piecu ceramicznym komorowym w temperaturach: 20°C (bez obróbki), 200°C, 400°C, 600°C i 800°C. Czas trwania zasadniczego prażenia wynosił 2 godziny. Początkowo zaplanowano maksymalną temperaturę obróbki równą 1000°C, ale wstępne badania wykazały, że wszystkie kruszywa w tej temperaturze uległy poważnym zniszczeniom, w związku z tym ostatecznie graniczną temperaturę wygrzewania ustalono na poziomie 800°C. Po zakończeniu właściwego procesu obróbki materiał przesiano przez sita do uzyskania frakcji 4/16 mm i wykorzystano do badań właściwości fizyczno-mechanicznych w zakresie gęstości właściwej na podstawie PN-EN 1097-7 [N18], gęstości objętościowej i nasiąkliwości zgodnie z PN-EN 1097-6 [N17] oraz wytrzymałości na miążdżenie według PN-B-06714-40:1978 [N12]. Badanie wytrzymałości na miążdżenie polegało na ustaleniu ubytku masy ziaren w wyniku miążdżenia siłą równą 200 kN próbki umieszczonej w naczyniu cylindrycznym. Po badaniu kruszywo przesiano przez sito o boku oczka 1 mm i obliczono wskaźnik rozkruszenia.

3.3.3. Właściwości fizyczno-mechaniczne kruszyw naturalnych po prażeniu

Wartości średnie z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych kruszyw (każda wartość została obliczona na podstawie dwóch lub trzech powtórzeń) przedstawiono w tabeli 3.9.

TABELA 3.9. Wartości średnie z wyników badań właściwości kruszyw naturalnych

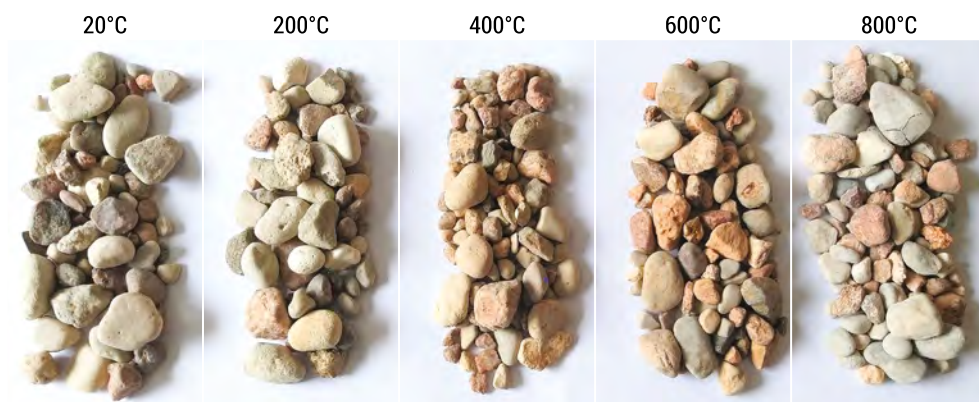
Seria	Temperatura prażenia, °C	Gęstość właściwa, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Nasiąkliwość, %	Wskaźnik rozkruszenia, %
1	2	3	4	5	6
KN (żwir)	20	2,68	2,65	1,26	4,45
	200	2,67	2,64	1,60	5,48
	400	2,65	2,62	1,67	5,48
	600	2,64	2,63	2,01	5,55
	800	2,64	2,63	3,54	6,02
KN (dolomit)	20	2,84	2,82	0,82	5,04
	200	2,79	2,78	0,77	4,74
	400	2,74	2,73	1,23	5,28
	600	2,72	2,70	2,26	5,33
	800	2,58	2,55	7,52	10,48
KN (granit)	20	2,73	2,71	0,58	7,67
	200	2,71	2,68	0,66	8,68
	400	2,68	2,66	0,78	8,55
	600	2,71	2,66	1,52	8,72
	800	2,59	2,51	6,63	11,11
KN (bazalt)	20	3,02	2,95	0,75	2,66
	200	2,98	2,92	1,21	2,70
	400	2,97	2,95	1,17	2,87
	600	3,00	2,91	1,25	3,11
	800	2,95	2,90	1,28	3,18

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Badane gęstości kruszyw, zarówno właściwa, jak i objętościowa, stopniowo się obniżały wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania. Jednak proces ten przebiegał powoli, prowadząc do spadku gęstości średnio o 1–2% przy 600°C w stosunku do gęstości kruszywa niepoddanego prażeniu, co mieści się w granicach błęd pomiarowego. Spadek gęstości koresponduje ze stopniowym nieznacznym wzrostem nasiąkliwości oraz wskaźnika rozkruszenia kruszyw. W przypadku dolomitu i granitu zaobserwowano wyraźne pogorszenie właściwości przy ich ogrzewaniu w temperaturze powyżej 600°C. Nasiąkliwość dolomitu i granitu wzrosła odpowiednio do 7,52% i 6,63%, a wskaźnik rozkruszenia do 10,48% i 11,11%, co świadczy o destrukcyjnym wpływie temperatury powyżej 600°C na badane ziarna. W przypadku żwiru nie zaobserwowano aż tak istotnego wpływu wysokiej temperatury na jego właściwości fizyczno-mechaniczne do 800°C. Najbardziej odporny na wygrzewanie okazał się jednak bazalt, który nie wykazywał zmian właściwości podczas eksperymentu, co potwierdza również charakterystyka opisowa makrostruktury kruszyw zamieszczona w dalszej części pracy.

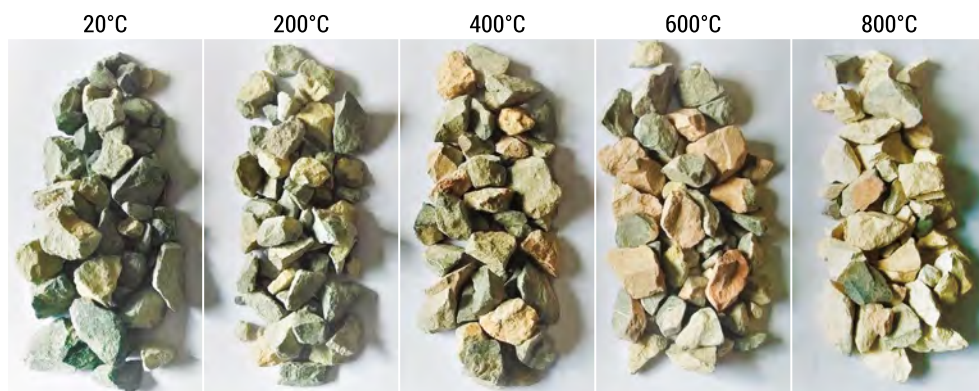
3.3.4. Charakterystyka opisowa kruszyw naturalnych po prażeniu

Następnie wykonano charakterystykę opisową zmian zachodzących w makrostrukturze i zabarwieniu kruszyw naturalnych poddanych obróbce termicznej na podstawie obserwacji nieuzbrojonym okiem. Na rys. 3.27–3.29 przedstawiono badane kruszywa po prażeniu odpowiednio w temperaturach 200–800°C oraz niepoddane obróbce termicznej (20°C).



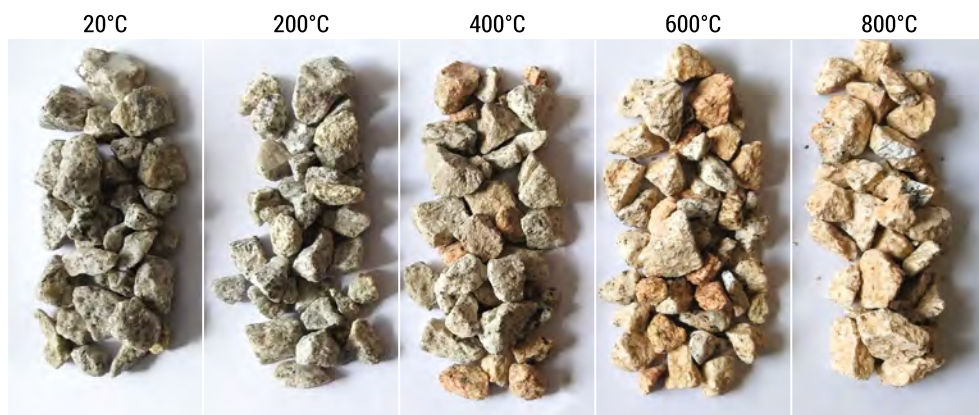
RYS. 3.27. Kruszywo żwirowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.28. Kruszywo dolomitowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.29. Kruszywo granitowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C

ŹRÓDŁO: fot. autorka.

W pracy nie załączono fotografii bazaltu, jednak w jego strukturze nie zaobserwowano zmian w analizowanym zakresie temperatur. Na podstawie obserwacji poszczególnych kruszyw sporządzono ich opisową charakterystykę, biorąc pod uwagę szczególnie widoczne uszkodzenia oraz zmianę barwy (tabela 3.10).

Na podstawie powyższych obserwacji ustalono, że do temperatury 200°C nie wystąpiły widoczne zmiany ani w zakresie barwy, ani pojawiających się uszkodzeń w kruszywach poddanych badaniu. Dopiero powyżej temperatury 200°C dochodziło do stopniowej zmiany zabarwienia pojedynczych ziaren kruszywa żwirowego, dolomitu i granitu, które to zjawisko uległo intensyfikacji w zakresie temperatur 400–600°C. Kruszywa zabarwiły się na kolor różowy, co związane było głównie z występowaniem w ich składzie niektórych związków żelaza. Nie zaobserwowano natomiast poważnych destrukcyjnych zmian w ich strukturze pod wpływem oddziaływania temperatury do 600°C.

Okazało się, że dolomit i granit były mniej odporne na działanie wysokiej temperatury niż żwir i bazalt. Wstępne widoczne uszkodzenie tych kruszyw pojawiło się już w 600°C, a w 800°C ziarna dolomitu i granitu ulegały przełamaniu pod naciskiem palców, żwir zaś wykazał liczne spękania i uszkodzenia ziaren. Było to również powiązane ze zmianą barwy tych kruszyw na szarą. Natomiast nie zaobserwowano wpływu temperatury w zakresie 20–800°C na makrostrukturę bazaltu. Potwierdzono też, że odporność kruszyw bazaltowych na działanie wysokiej temperatury jest najwyższa.

TABELA 3.10. Charakterystyka opisowa kruszyw poddanych obróbce termicznej

Rodzaj kruszywa	Temperatura prażenia	Charakterystyka opisowa
1	2	3
KN (żwir)	20–200°C	Brak widocznych zmian barwy i uszkodzeń
	> 200–400°C	Stopniowa zmiana zabarwienia na odcień brunatny
	> 400–600°C	Widoczne nieliczne spękania ziaren, wyraźna zmiana zabarwienia na odcień różowy
	> 600–800°C	Wzrost liczby widocznych spękań i rozkruszenia ziaren, rozjaśnienie zabarwienia do szarego
KN (dolomit)	20–200°C	Brak widocznych zmian barwy i uszkodzeń
	> 200–600°C	Brak uszkodzeń, różowe zabarwienie części ziaren
	> 600–800°C	Wyraźne rozjaśnienie barwy, brak widocznych spękań, dezintegracja ziaren pod lekkim naciskiem
KN (granit)	20–200°C	Brak widocznych zmian barwy i uszkodzeń
	> 200–400°C	Brak uszkodzeń, różowe zabarwienie części ziaren
	> 400–600°C	Wyraźna zmiana zabarwienia na odcień różowy, część ziaren ulega przełamaniu pod naciskiem
	> 600–800°C	Rozjaśnienie barwy do szarej, ziarna rozpadają się pod naciskiem, widoczne spękania
KN (bazalt)	20–800°C	Brak widocznych zmian w barwie i makrostrukturze kruszywa

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

3.3.5. Podsumowanie wyników badań

Przeprowadzone badania dotyczyły ustalenia wpływu działania wysokiej temperatury w zakresie 20–800°C na właściwości kruszyw naturalnych. Na podstawie wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych kruszyw oraz obserwacji ich powierzchni ustalono, że skład mineralogiczny kruszywa bezpośrednio wpływa na jego odporność na działanie wysokiej temperatury. Oprócz uszkodzenia matrycy cementowej dezintegracja kruszywa naturalnego jest jedną z głównych przyczyn pogorszenia właściwości

betonu eksponowanego na wysoką temperaturę. Jak wynika z badań, dla kruszyw o różnym pochodzeniu graniczna temperatura jest inna, przy czym najbardziej odporne na wygrzewanie są kruszywa magmowe wylewne, reprezentowane w eksperymencie przez bazalt. Można stwierdzić, że graniczną temperaturą, przy której możliwe jest zachowanie integralności betonu z punktu widzenia trwałości ziarna kruszywa mineralnego, jest temperatura 600°C. W dalszym etapie kruszywa te stanowiły podstawę do przygotowania kruszyw z recyklingu.

3.4. Wpływ temperatury i metody obróbki na właściwości kruszyw z recyklingu

3.4.1. Cel badań

Celem zaplanowanych badań było ustalenie najkorzystniejszej temperatury wygrzewania gruzu betonowego w połączeniu z obróbką mechaniczną z uwagi na pozyskanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz możliwości kształtowania szczelnej strefy kontaktowej w nowym betonie. Kruszywa z recyklingu betonu poddano działaniu temperatury w zakresie 20–800°C i ustalono jej wpływ na ich właściwości fizyczno-mechaniczne. Efektem badań była identyfikacja produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji pozostałych na powierzchni kruszywa z recyklingu poddanego działaniu temperatury. Posłużyło to w dalszym etapie badań do opracowania oryginalnych schematów budowy strefy przejściowej kruszywo z recyklingu – zaczyn cementowy w nowym betonie w zależności od temperatury wygrzewania.

3.4.2. Metodyka badań

Badaniom poddano kruszywa z recyklingu betonu frakcji 4/16 mm przygotowane na bazie żwiru, dolomitu, granitu i bazaltu. Właściwości kruszyw naturalnych stanowiących bazę do wykonania gruzu betonowego zamieszczono w rozdziale 3.3.3. Dodatkowo po wygrzewaniu kruszywa poddano obróbce mechanicznej celem odspojenia zaprawy cementowej. Skład betonu do przygotowania kruszywa z recyklingu przedstawiono w tabeli 3.11.

Po 28 dniach dojrzewania próbki betonowe rozdrobniono w kruszarce szczękowej do uzyskania frakcji 0/20 mm. Tak wytworzony gruz betonowy poddano obróbkom:

- termiczno-mechanicznej: po rozdrobnieniu kruszywo prażono w temperaturach odpowiednio: 200°C, 400°C, 600°C i 800°C przez okres 2 godzin, a następnie poddano obróbce mechanicznej w bębnie Los Angeles (czas obróbki wynosił 15 minut – 500 obrotów z prędkością 33 obr./min, przy użyciu dwóch normowych kul o średnicy 45–59 mm oraz masie 440–445 g każda),

- mechanicznej: dla uproszczenia temperatura została oznaczona w eksperymencie jako 20°C, po rozdrobnieniu w kruszarce kruszywo poddano obróbce w bębnie Los Angeles w warunkach jak wyżej.

TABELA 3.11. Skład betonu na 1 m³ do przygotowania kruszyw z recyklingu

Składnik	Ilość, kg
1	2
Cement CEM 42,5 R	300
w/c	0,50
Woda	150
Piasek	599
Żwir frakcji 2/4 mm	200
Kruszywo naturalne (odpowiednio: żwir, dolomit, granit lub bazalt) frakcji 4/8 mm	599–667 (w zależności od gęstości kruszywa)
Kruszywo naturalne (odpowiednio: żwir, dolomit, granit lub bazalt) frakcji 8/16 mm	599–667 (w zależności od gęstości kruszywa)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Prażenie gruzu betonowego miało na celu termiczne oddzielenie zaprawy cementowej z powierzchni ziaren kruszywa z jednoczesnym rozkładem produktów hydratacji, a także karbonatyzacji cementu, natomiast obróbka mechaniczna miała za zadanie ostateczne usunięcie osłabionej zaprawy cementowej. W tabeli 3.12 przedstawiono szczegółowy plan badań.

TABELA 3.12. Plan eksperymentu

Seria	Rodzaj kruszywa	Rodzaj obróbki	
1	2	3	
1	Z recyklingu (KR)	20°C, obróbka mechaniczna	
2			na bazie żwiru
3			na bazie dolomitu
4			na bazie granitu
5–8	Z recyklingu (KR)	obróbka termiczno-mechaniczna (200°C, 400°C, 600°C i 800°C)	
9–12			na bazie bazaltu
13–16			na bazie żwiru
17–20			na bazie dolomitu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Po zakończeniu właściwego procesu obróbki materiał przesiano przez sita do uzyskania frakcji 4/16 mm i wykorzystano do badań właściwości fizyczno-mechanicznych w zakresach: gęstości właściwej według PN-EN 1097-7 [N18], gęstości objętościowej i nasiąkliwości zgodnie z PN-EN 1097-6 [N17] oraz wytrzymałości na miażdżenie na podstawie PN-B-06714-40:1978 [N12].

3.4.3. Właściwości kruszyw z recyklingu po prażeniu

Wartości średnie z wyników badań (dwa lub trzy powtórzenia) przedstawiono w tabeli 3.13.

TABELA 3.13. Wartości średnie z wyników badań kruszyw z recyklingu betonu

Rodzaj kruszywa	Temp. prażenia, °C	Gęstość właściwa, g/cm ³	Gęstość objętościowa, g/cm ³	Nasiąkliwość, %	Wskaźnik rozkruszenia, %
1	2	3	4	5	6
KR (żwir)	20	2,55	2,41	5,67	4,15
	200	2,57	2,45	3,21	3,99
	400	2,60	2,52	2,75	3,49
	600	2,62	2,61	1,67	2,44
	800	2,63	2,62	3,27	3,15
KR (dolomit)	20	2,70	2,68	4,77	4,63
	200	2,70	2,75	3,80	3,52
	400	2,75	2,75	2,41	3,49
	600	2,75	2,73	2,01	2,29
	800	2,69	2,64	5,78	16,16
KR (granit)	20	2,61	2,60	4,08	5,43
	200	2,63	2,61	3,71	5,11
	400	2,65	2,60	3,25	4,76
	600	2,66	2,63	2,45	3,21
	800	2,70	2,66	1,82	2,98
KR (bazalt)	20	2,72	2,70	5,24	5,32
	200	2,76	2,74	4,65	4,54
	400	2,77	2,82	3,15	4,21
	600	2,85	2,85	2,23	3,27
	800	2,86	2,85	2,11	3,25

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że kruszywa poddane jedynie obróbce mechanicznej (oznaczone jako 20°C) charakteryzowały się najsłabszymi właściwościami fizyczno-mechanicznymi. Wprowadzenie obróbki termicznej spowodowało w efekcie stopniowy wzrost gęstości kruszyw średnio o 3–5% wraz ze wzrostem temperatury prażenia, co było związane głównie z usuwaniem zaprawy cementowej obecnej na powierzchni ziaren kruszywa z recyklingu. Z kolei nasiąkliwość badanych kruszyw obniżała się i uzyskała poziom zbliżony do nasiąkliwości referencyjnych kruszyw naturalnych. Jest to również następstwo skutecznego usunięcia porowatej zaprawy cementowej. W przypadku kruszywa z recyklingu na bazie dolomitu prażonego w 800°C zaobserwowano dwukrotny wzrost nasiąkliwości, co prawdopodobnie wynikało z uszkodzenia struktury ziarna, podobnie jak to miało miejsce w przypadku dolomitu naturalnego. Potwierdza to też zdecydowanie wyższy wskaźnik rozkruszenia tego kruszywa – około trzyipółkrotny w porównaniu z kruszywem z recyklingu niepoddanym wygrzewaniu. Zasadniczo wskaźnik ten zmniejszał się wraz ze wzrostem temperatury prażenia, ponieważ coraz mniej zaprawy pozostawało w składzie kruszywa z recyklingu. Można także stwierdzić, że zaprawa cementowa w pewnym stopniu stanowiła warstwę ochronną kruszywa naturalnego przed szkodliwym wpływem działania wysokiej temperatury na samo ziarno.

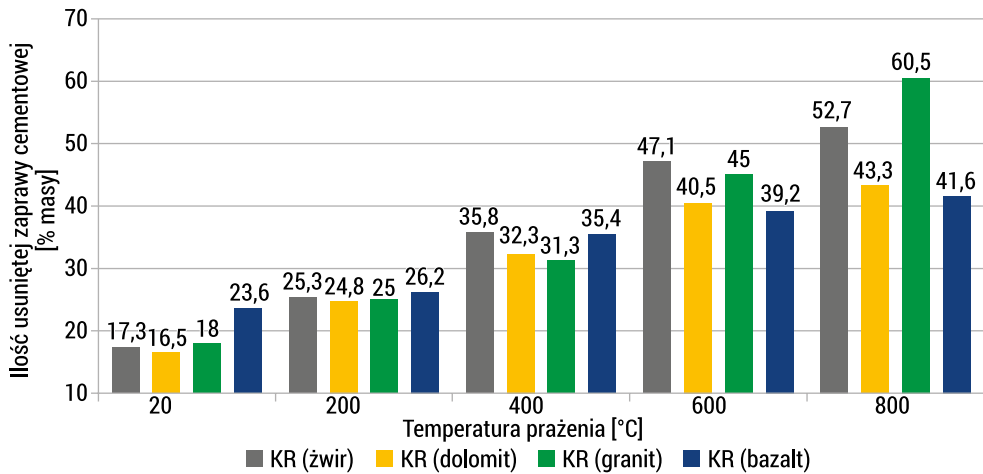
Kolejnym krokiem było ustalenie **ilości zaprawy cementowej** usuniętej z powierzchni kruszyw z recyklingu w wyniku zastosowania odpowiedniego rodzaju obróbki (mechaniczna: 20°C oraz termiczno-mechaniczna: 200–800°C). W tym celu kruszywo z recyklingu frakcji 4/16 mm o znanej masie (m_1) poddano odpowiedniej obróbce, a następnie, po oddzieleniu frakcji 0/4 mm, zważono (m_2), obliczając procentową zawartość zaprawy cementowej zgodnie z zależnością (3.6):

$$m_z = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

gdzie: m_z – zawartość zaprawy cementowej (0/4 mm), % masy; m_1 – masa kruszywa z recyklingu (4/16 mm) przed obróbką, g; m_2 – masa kruszywa z recyklingu (4/16 mm) po obróbce, g.

Na rys. 3.30 przedstawiono wartości średnie z wyników procentowej zawartości zaprawy cementowej oddzielonej z badanych kruszyw z recyklingu w wyniku obróbki mechanicznej (20°C) i termiczno-mechanicznej (200–800°C).

W wyniku zastosowania wyłącznie obróbki mechanicznej w bębnie LA (serie oznaczone jako 20°C) usunięto najmniej zaprawy cementowej z badanych kruszyw z recyklingu, bo tylko 16–18% masy, a w przypadku bazaltu około 24%. Zastosowanie dodatkowo czynnika termicznego odniosło wyraźnie lepszy efekt i spowodowało stopniowy wzrost ilości usuniętej zaprawy wraz ze wzrostem temperatury – osiągnięto poziom 39,2–47,1% (w zależności od rodzaju kruszywa) w temperaturze 600°C. W rezultacie uzyskano niemal całkowite wizualne oczyszczenie ziaren z zaprawy cementowej. Przy dalszym wygrzewaniu ziarna w kruszywie z recyklingu uszkodziły się, szczególnie dotyczyło to granitu i żwiru, co potwierdzają również obserwacje makrostruktury kruszyw naturalnych zawarte w tabeli 3.11.

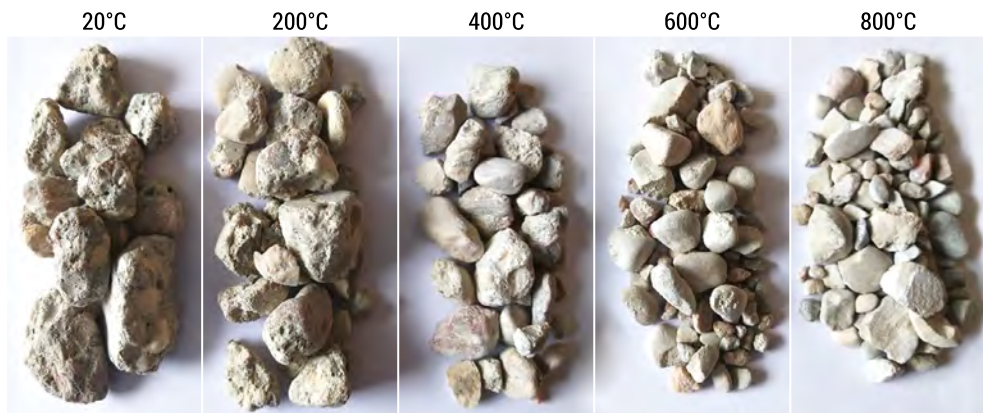


RYS. 3.30. Procentowa ilość usuniętej zaprawy cementowej (0/4 mm) z poszczególnych kruszyw z recyklingu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

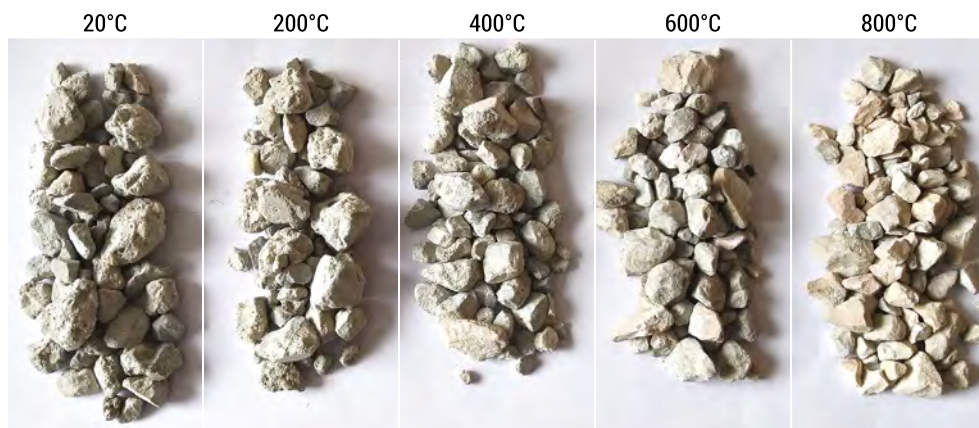
3.4.4. Charakterystyka opisowa kruszyw z recyklingu po prażeniu

Następnie wykonano charakterystykę opisową zmian zachodzących w makrostrukturze i zabarwieniu kruszyw naturalnych oraz z recyklingu poddanych obróbce mechanicznej i termiczno-mechanicznej na podstawie obserwacji nieuzbrojonym okiem. Na rys. 3.31–3.33 przedstawiono badane kruszywa poddane różnym typom obróbki.



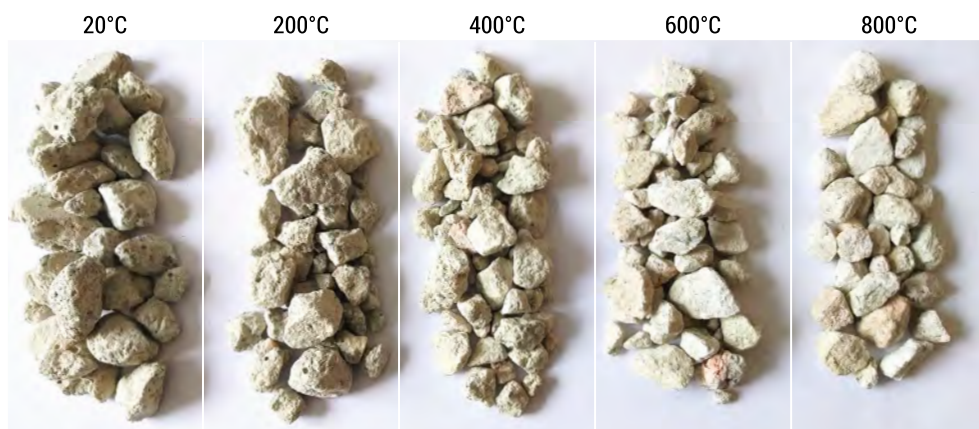
RYS. 3.31. Kruszywo z recyklingu na bazie żwiru po obróbce

ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.32. Kruszywo z recyklingu na bazie dolomitu po obróbce

ŹRÓDŁO: fot. autorka.



RYS. 3.33. Kruszywo z recyklingu na bazie granitu po obróbce

ŹRÓDŁO: fot. autorka.

W pracy nie zamieszczono zdjęć kruszywa z recyklingu na bazie bazaltu, ponieważ w wyniku stosowanej obróbki nie zaobserwowano w nim zmian w barwie ani w makrostrukturze, podobnie jak w przypadku bazaltu naturalnego.

Na podstawie obserwacji poszczególnych kruszyw z recyklingu sporządzono ich opisową charakterystykę, biorąc pod uwagę, analogicznie jak w przypadku kruszyw naturalnych, szczególnie widoczne uszkodzenia oraz zmianę barwy (tabela 3.14).

TABELA 3.14. Charakterystyka opisowa kruszyw z recyklingu poddanych różnym typom obróbki

Rodzaj kruszywa	Temperatura prażenia	Charakterystyka opisowa
1	2	3
KR (żwir)	20–200°C	Wysoka zawartość porowatej zaprawy cementowej
	> 200–400°C	Zmniejszenie ilości zaprawy, miejscami widoczne ziarna żwiru
	> 400–600°C	Ziarna skutecznie oczyszczone z zaprawy cementowej
	> 600–800°C	Częściowe rozdrobnienie ziaren naturalnych w wyniku obróbki mechanicznej
KR (dolomit)	20–200°C	Wysoka zawartość porowatej zaprawy cementowej
	> 200–400°C	Stopniowe zmniejszanie ilości zaprawy cementowej
	> 400–600°C	Wyraźne oczyszczenie ziaren dolomitu z zaprawy cementowej
	> 600–800°C	Rozjaśnienie barwy kruszywa, brak widocznych rys, wyraźna obecność ziaren przełamanych, śladowa obecność zaprawy na pojedynczych ziarnach
KR (granit)	20–200°C	Wysoka zawartość porowatej zaprawy cementowej
	> 200–400°C	Stopniowe zmniejszanie ilości zaprawy cementowej
	> 400–600°C	Wyraźne oczyszczenie ziaren granitu z zaprawy cementowej, widoczne ziarna kruszywa
	> 600–800°C	Brak widocznych uszkodzeń, śladowa obecność zaprawy na pojedynczych ziarnach
KR (bazalt)	20–200°C	Wysoka zawartość porowatej zaprawy cementowej
	> 200–400°C	Stopniowe zmniejszanie ilości zaprawy cementowej
	> 400–600°C	Wyraźne oczyszczenie ziaren bazaltu z zaprawy cementowej
	> 600–800°C	Brak widocznych uszkodzeń, śladowa obecność zaprawy na pojedynczych ziarnach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

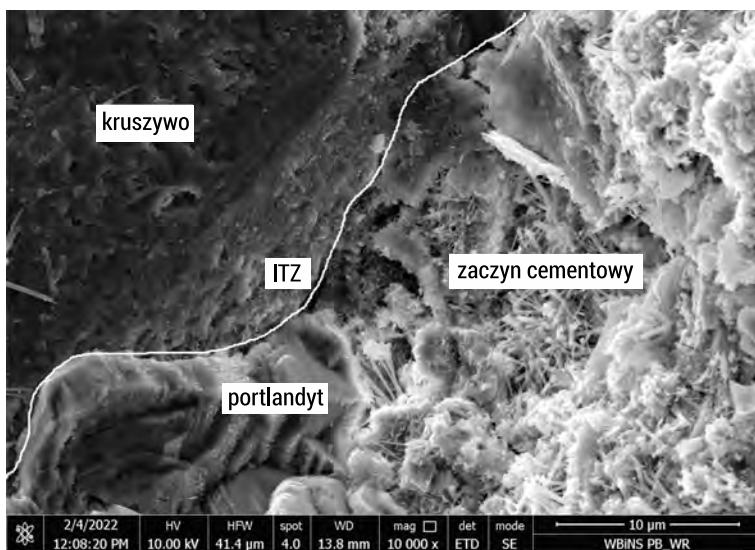
Na podstawie obserwacji kruszyw z recyklingu poddanych działaniu temperatury ustalono, że najwyższą zawartością zaprawy cementowej charakteryzowały się te poddane tylko obróbce mechanicznej. Wraz z zastosowaniem obróbki termiczno-mechanicznej zawartość tej zaprawy obniżała się stopniowo wraz ze wzrostem temperatury do wyraźnego oczyszczenia ziaren kruszywa naturalnego w 600°C. W wyższej temperaturze nie zaobserwowano poważnych destrukcyjnych zmian w strukturze ziaren, ale w przypadku żwiru i dolomitu zauważono ich rozdrobnienie w wyniku obróbki mechanicznej, co świadczy o zmianach w strukturze tych kruszyw do 800°C. Zauważono również, że zaprawa cementowa trudniej ulegała odspojeniu z powierzchni kruszyw łamanych, co potwierdza lepszą przyczepność mechaniczną matrycy cementowej do ich powierzchni w betonie w porównaniu z kruszywami żwirowymi.

3.4.5. Identyfikacja faz na powierzchni kruszywa z recyklingu po prażeniu

Kruszywo z recyklingu [KR (żwir)] uzyskane w wyniku obróbki mechanicznej i termiczno-mechanicznej, jak w rozdziale 3.5.2, poddano obserwacjom skaningowym mikroskopem elektronowym celem identyfikacji produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji pozostałych na powierzchni kruszywa oraz obserwacji ewentualnej strefy przejściowej. Na rys. 3.34–3.43 przedstawiono wybrane ich wyniki.

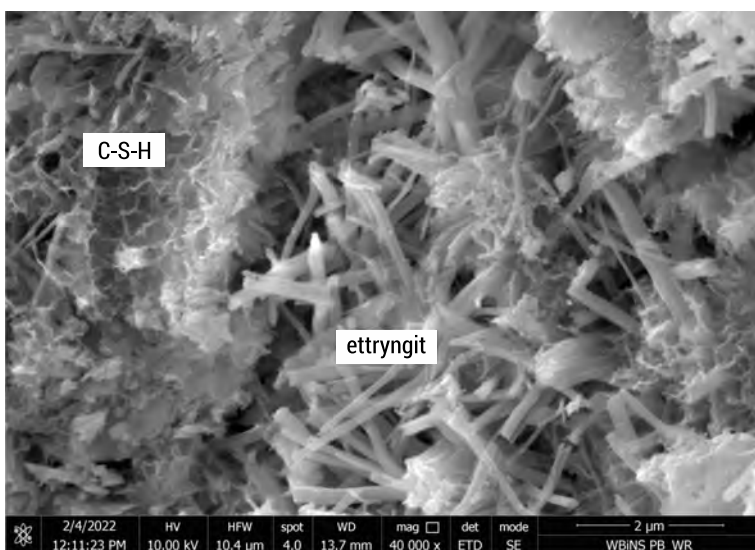
Obserwacje powierzchni kruszywa z recyklingu poddanego działaniu temperatur w zakresie 20–800°C wykazały zmienność jej struktury wraz ze wzrostem temperatury. Na rys. 3.34 przedstawiono strefę kontaktową w kruszywie z recyklingu, pomiędzy ziarnem a zaczynem cementowym, poddanym obróbce mechanicznej, czyli najpowszechniej stosowanej metodzie przetwarzania gruzu betonowego. Przede wszystkim widoczna strefa przejściowa (ITZ) wskazuje na znaczną zawartość zaprawy cementowej w takim kruszywie. Z obserwacji wynika, że rodzaj przyjętej obróbki (mechaniczna) spowodował pojawienie się ubytków i uszkodzeń w samej zaprawie cementowej, co zwykle jest przyczyną pogorszenia jakości betonu przygotowanego z udziałem takiego kruszywa. W strefie kontaktowej zaobserwowano lokalnie obecność portlandytu układającego się prostopadle do powierzchni ziarna, czyli tak zwany efekt ściany. Powierzchnia kruszywa pokryta była zaprawą (zaczynem), w której zauważono podstawowe produkty hydratacji cementu, takie jak ettryngit oraz fazę C-S-H w kształcie plastra miodu (rys. 3.35), co jest zgodne z prezentowanymi wynikami analizy XRD zmielonego zaczynu cementowego niepoddanego prażeniu (podrozdział 3.2.5). W kruszywie wygrzewanym w 200°C w strefie kontaktowej nadal obecny był portlandyt z charakterystycznymi kryształami ułożonymi prostopadle do powierzchni ziarna (rys. 3.36). Zaobserwowano również kalcyt, relikty klinkieru oraz fazę C-S-H (rys. 3.37). Nie stwierdzono natomiast ettryngitu, który zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami rozpada się do temperatury 100–120°C. Na powierzchni kruszywa wygrzanego w 400°C występowały głównie faza C-S-H, a także prawdopodobnie odmiany węglanu wapnia w postaci pałeczkowatego aragonitu oraz kryształów o mniejszym rozmiarze niż kalcyt, czyli waterytu (rys. 3.38). Zróżnicowane odmiany węglanu wapnia scharakteryzowano w pracach [23, 59].

Obecny był również wodorotlenek wapnia, co potwierdza teorię, że jego kryształy pozostają trwale do temperatury 400°C. Zauważono też nowe, niewystępujące wcześniej, a pojawiające się lokalnie produkty, które miały postać wydłużonych włókien o układzie uporządkowanym, tworzące charakterystyczne skupiska (rys. 3.39). Ustalono, że jest to włóknista faza C-S-H powstająca zwykle przy $C/S > 1,5$ (C-S-H II). W temperaturze 600°C nastąpiło odwodnienie wodorotlenku wapnia, którego szczątki z procesu rozkładu widoczne są na rys. 3.40. Dehydroksylacja portlandytu zalegającego w strefie kontaktowej jest główną przyczyną odspojenia zaprawy cementowej z powierzchni ziarna i poprawy jakości kruszywa. W wyniku rozpadu Ca(OH)_2 powstało wolne wapno.



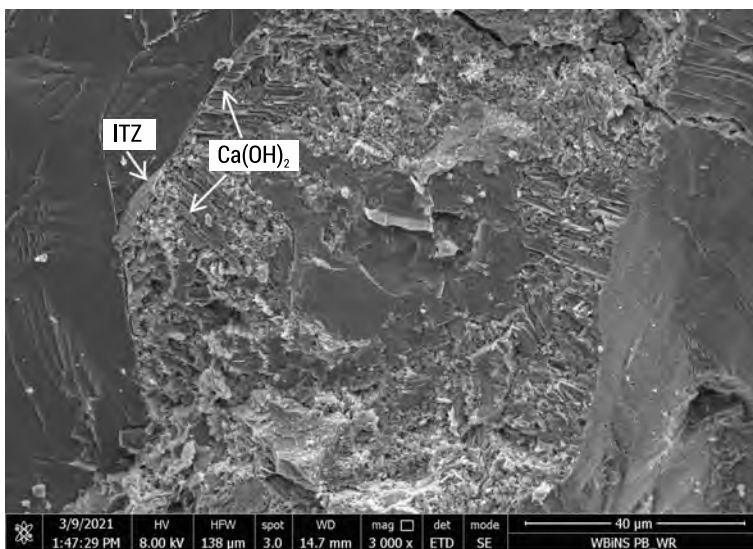
RYS. 3.34. Strefa kontaktowa w KR₂₀°C (× 10 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



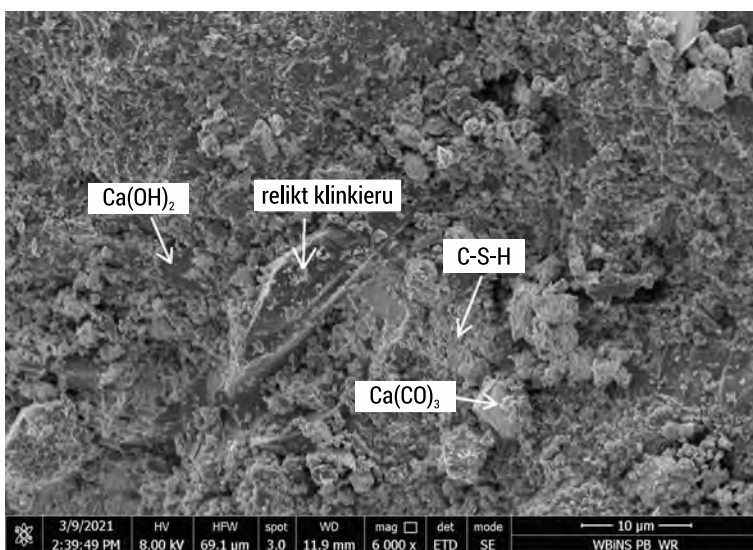
RYS. 3.35. Powierzchnia kruszywa z recyklingu KR₂₀°C (× 40 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



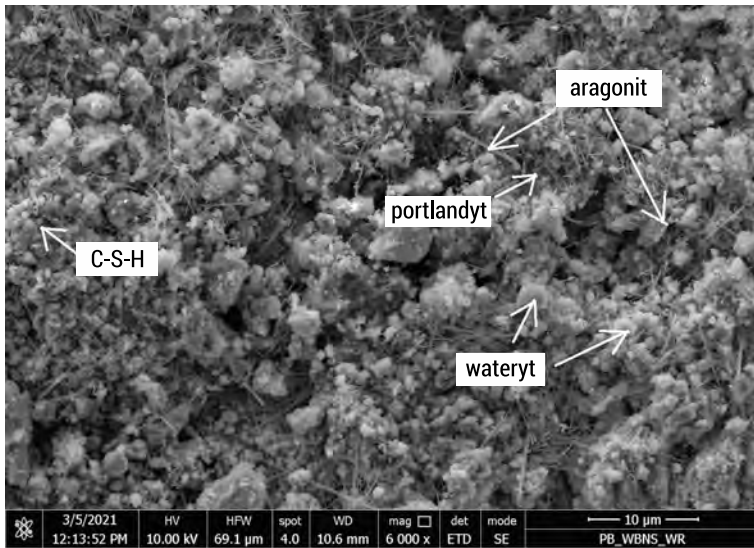
RYS. 3.36. Kruszywo z recyklingu KR₂₀₀°C (× 3000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



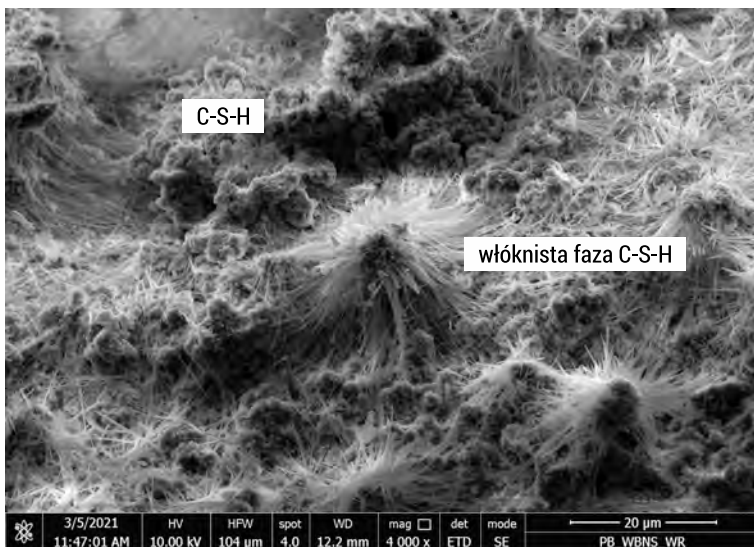
RYS. 3.37. Kruszywo z recyklingu KR₂₀₀°C (× 6000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



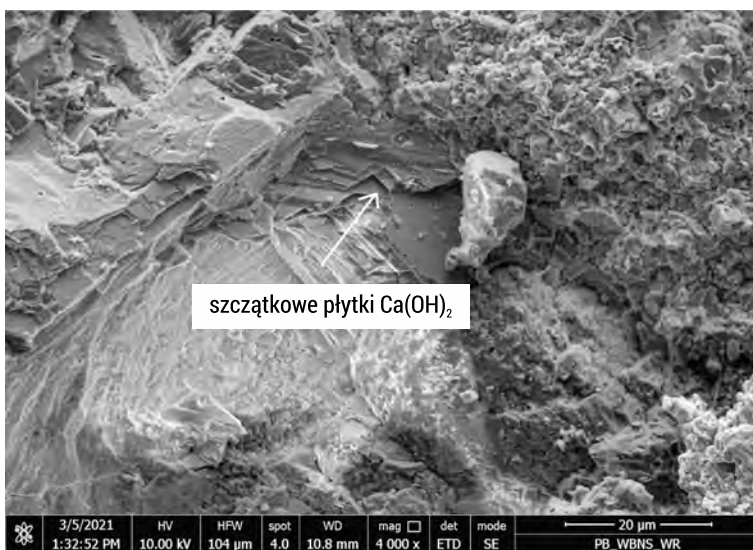
RYS. 3.38. Kruszywo z recyklingu KR_400°C (× 6000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



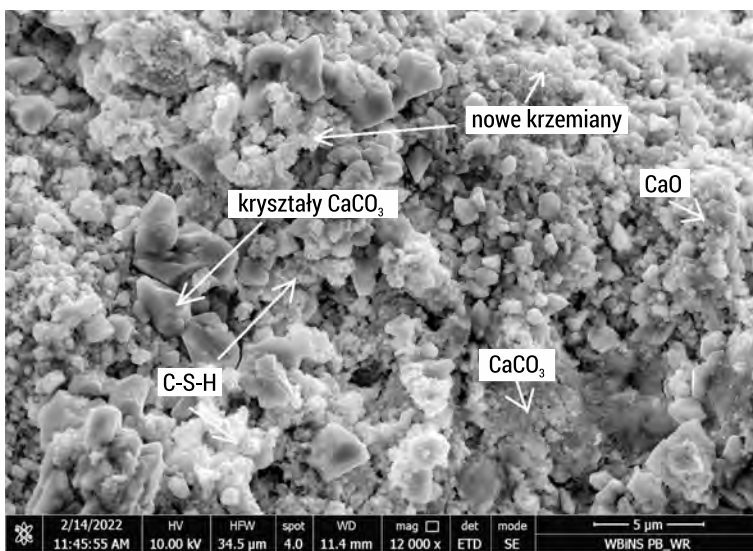
RYS. 3.39. Kruszywo z recyklingu KR_400°C (× 4000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



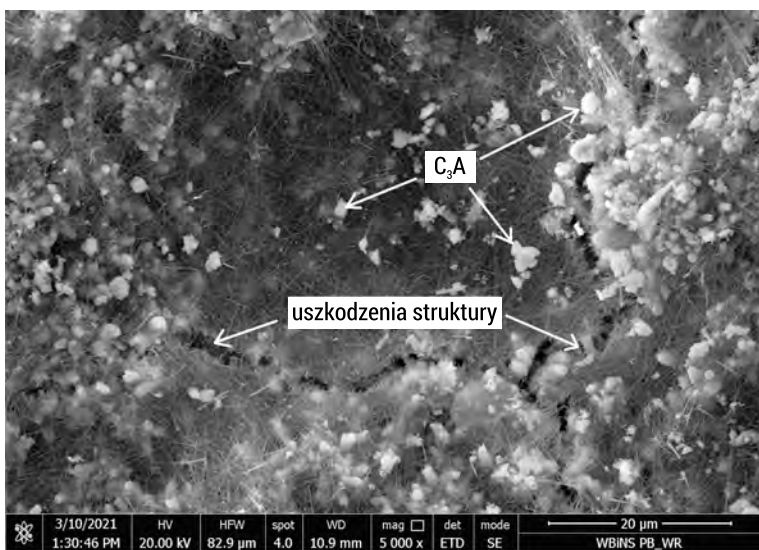
RYS. 3.40. Kruszywo z recyklingu KR_600°C (× 4000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



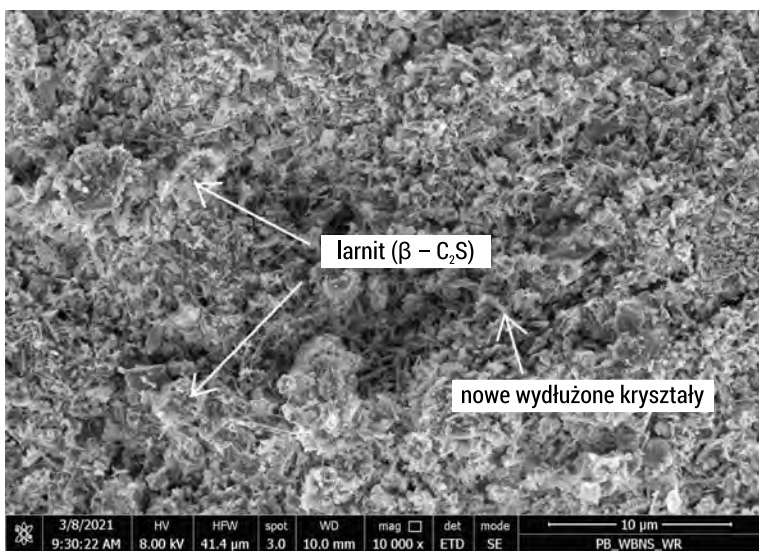
RYS. 3.41. Kruszywo z recyklingu KR_600°C (× 8000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.42. Kruszywo z recyklingu KR_{800°C} (× 5000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.43. Kruszywo z recyklingu KR_{800°C} (× 10 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

Poza tym zaobserwowano jeszcze uwodnione krzemiany wapnia w postaci plastra miodu, częściowo wytrawione termicznie, oraz nowe krzemiany o średnicy 0,5–1μm, będące produktem postępującego odwodnienia fazy C-S-H (rys. 3.41). W opinii Castellote i in. [28] część C-S-H rozpada się stopniowo w zakresie temperatur

200–700°C, zwiększając tym samym ilość kalcytu. W kruszywie wygrzewanym w 800°C widoczne są nieszczelności i uszkodzenia występujące na jego powierzchni (rys. 3.42), świadczące o destrukcyjnym wpływie wysokiej temperatury na beton. Zaobserwowano także niezidentyfikowane formy włókniste w postaci wydłużonych kryształów, przypominające kształtem ettryngit, oraz glinian trójwapniowy (C₃A) potwierdzony w badaniu XRD. Główną fazą widoczną na powierzchni kruszywa był belit – larnit (β -C₂S) powstały w wyniku niemal całkowitego odwodnienia żeluz C-S-H, co prowadzi do całkowitego zniszczenia betonu (rys. 3.43). Świadczą o tym również wyniki analizy dyfrakcyjnej prezentujące przemiany fazowe ogrzewanego zaczynu cementowego opisane w podrozdziale 3.2.5.

Peng i Huang [179] opracowali zależności opisujące stopień dehydratacji C-S-H w zakresie temperatur 600–800°C w zależności od czasu wygrzewania t (3.7)–(3.9):

$$600^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta y}{y_0} = -1,0 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,0013 t^2 - 0,36 t + 97,72; R = 0,990 \quad (3.7)$$

$$700^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta y}{y_0} = -2,0 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,002 t^2 - 0,67 t + 100,61; R = 0,999 \quad (3.8)$$

$$800^{\circ}\text{C} \quad \frac{\Delta y}{y_0} = -2,0 \cdot 10^{-8} t^5 + 8,0 \cdot 10^{-6} t^4 - 0,0015 t^3 + 0,13 t^2 - 5,47 t + 99,82; R = 0,998 \quad (3.9)$$

gdzie: Δy – zawartość C-S-H po wygrzewaniu, %; y_0 – początkowa zawartość C-S-H w zaczynie cementowym, %; t – czas wygrzewania w min.; R – współczynnik korelacji.

Stosując powyższe zależności (3.7)–(3.9) dla realizowanego eksperymentu, w wyniku wygrzewania kruszywa z recyklingu przez 120 minut, żel C-S-H ulega odwodnieniu w 28,5% (przy 600°C), w 54,5% (przy 700°C) oraz w 100% (przy 800°C). Należy jednak zauważyć, że powyższe równania zostały opracowane dla proszków o wysokiej powierzchni właściwej, co sprzyja uwalnianiu wody, a dla elementu betonowego proces dehydratacji żeluz C-S-H może przebiegać wolniej. W 800°C zaobserwowano też nowe, niezidentyfikowane formy w postaci wydłużonych kryształów, które nie pojawiały się w niższych temperaturach prażenia (rys. 3.43).

Powstaje pytanie, czy możliwe jest zregenerowanie produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji zaczynu cementowego i odzyskanie właściwości wytrzymałościowych betonu, a jeśli tak, to przy jakiej temperaturze wcześniejszego oddziaływania proces ten jest najbardziej efektywny? Jest to szczególnie ważne zagadnienie dla opracowania metodyki kształtowania nowej strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu. Z punktu widzenia trwałości betonu w nowej ITZ pomiędzy kruszywem z recyklingu a zaczynem cementowym powinny zachodzić nie tylko oddziaływania mechaniczne, lecz także chemiczne, przejawiające się kształtowaniem wspólnych produktów hydratacji.

3.4.6. Podsumowanie wyników badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań fizyczno-mechanicznych kruszyw z recyklingu ustalono najkorzystniejszą temperaturę wygrzewania gruzu betonowego równą 600°C, w której zaobserwowano niemal całkowite oczyszczenie ziaren kruszywa z zaprawy cementowej. Wpłynęło to na zdecydowaną poprawę jakości tych kruszyw i jednorodność ich cech. Powyżej temperatury 600°C następowało uszkodzenie struktury ziaren kruszyw naturalnych, co ustalono w rozdziale 3.3.

Obserwacje powierzchni kruszyw z recyklingu poddanych obróbce mechanicznej oraz termiczno-mechanicznej skaningowym mikroskopem elektronowym umożliwiły identyfikację produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji powstałych na powierzchni tych kruszyw wraz ze zmianą temperatury w zakresie 20–800°C. Szczególnie godny uwagi okazał się tu rozkład wodorotlenku wapnia w 600°C, stanowiącego ważny składnik w budowie strefy przejściowej kruszywo-zaczyn w gruzie betonowym. W kolejnych etapach badań posłużyło to do opracowania oryginalnych schematów budowy strefy przejściowej kruszywo z recyklingu po obróbce – nowy zaczyn cementowy w betonie w zależności od temperatury wygrzewania.

3.5. Ocena zdolności wyprażonego betonu cementowego do regeneracji

3.5.1. Cel badań

Celem badań było ustalenie najkorzystniejszej temperatury wygrzewania gruzu betonowego z uwagi na możliwość regeneracji betonu w efekcie ponownej pielęgnacji w wodzie. Pojęciem regeneracji w niniejszej pracy objęto zarówno kontynuację procesu hydratacji (dotyczy temperatury 20°C), jak i ewentualną odbudowę produktów, które uległy rozpadowi w wyniku odwodnienia bądź dekarbonatyzacji. Z punktu widzenia niniejszej pracy ważne jest ustalenie takiej temperatury wygrzewania betonu, która umożliwi jego najskuteczniejszą regenerację przejawiającą się wzrostem wytrzymałości na ściskanie w efekcie ponownej pielęgnacji (kontaktu z wodą). Analiza zmian zachodzących na powierzchni kruszywa z recyklingu oraz w samym zaczynie cementowym pozwoliła w dalszej kolejności na opracowanie oryginalnych schematów budowy strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu w zależności od temperatury wcześniejszej obróbki gruzu betonowego.

3.5.2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono w trzech następujących etapach dotyczących betonu, powierzchni kruszywa z recyklingu oraz zaczynu cementowego:

Etap 1. Badanie wytrzymałości betonu na ściskanie – betony wyprażone wcześniej w zakresie temperatur 20–1000°C poddano ponownej pielęgnacji w wodzie przez 28 dni, w wyniku czego ustalono zmiany wytrzymałości na ściskanie, między innymi stopień regeneracji.

Etap 2. Obserwacje SEM powierzchni kruszywa z recyklingu – ziarna kruszywa z recyklingu wcześniej wygrzewane w zakresie temperatur 20–800°C i poddane obróbce mechanicznej (jak w rozdziale 3.4) umieszczono w wodzie na okres 28 dni. Następnie obserwowano je przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego w celu identyfikacji produktów wykształconych na ich powierzchni.

Etap 3. Badanie zaczynu cementowego (poprzez analogię do zaczynu pozostałego na powierzchni kruszywa z recyklingu po prażeniu) – zmielone zaczyny cementowe wyprażone w zakresie temperatur 20–1000°C (jak w rozdziale 3.2) poddano pielęgnacji w wodzie przez 28 dni, następnie wysuszono i ponownie zmielono. Za pomocą analizy termicznej ustalono w nich zmiany zawartości wodorotlenku wapnia i węglanu wapnia w porównaniu z próbkami badanymi po trzech dniach po prażeniu.

3.5.3. Wpływ ponownej pielęgnacji na wytrzymałość wygrzewanego betonu na ściskanie

Dla ustalenia zmian wytrzymałości wyprażonego betonu na ściskanie po ponownym procesie hydratacji wykorzystano próbki przygotowane w rozdziale 3.1. Serie 1–6 oraz 7–12 wykonano na bazie grubego kruszywa, odpowiednio żwirowego i łamanego. Po prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C próbki umieszczono w wodzie na okres 28 dni i zbadano ich wytrzymałość na ściskanie. W tabeli 3.15 przedstawiono wartości średnie z wyników badań wytrzymałości na ściskanie betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C po 28 dniach dojrzewania ($f_{cm,28,pr.}$) oraz po ich 28-dniowej regeneracji w wodzie ($f_{cm,reg.}$). W nawiasach podano wartości odchyłeń standardowych dla poszczególnych serii. Stopień regeneracji $S_{reg.}$ (kol. 5) obliczono jako procentowy stosunek wytrzymałości na ściskanie betonu po regeneracji do wytrzymałości na ściskanie betonu kontrolnego (niepoddanego prażeniu). Zmianę wytrzymałości (Δf_{cm}) obliczono jako procentowy wpływ pielęgnacji na wytrzymałość na ściskanie betonu wcześniej poddanego prażeniu („+” wzrost, „-” spadek).

Wyniki badań wykazały, że ponowna pielęgnacja betonu po jego wcześniejszym wyprażeniu skutkuje wyraźnymi zmianami w wytrzymałości na ściskanie w zależności od temperatury ekspozycji. Kilkuprocentowy przyrost wytrzymałości w betonie niepoddanym prażeniu (20°C) jest naturalny i wynika z kontynuowania procesu hydratacji ziaren cementu wcześniej niezhydratyzowanych. Wyraźny jest natomiast spadek wytrzymałości na ściskanie próbek po regeneracji wyprażonych wcześniej w temperaturze 200°C, wynoszący 16,1% oraz 2,7% odpowiednio w przypadku betonu z kruszywem żwirowym i łamanym. W wyniku wcześniejszego działania temperatury nastąpiło szybkie parowanie wolnej wody (w około 105°C), odwodnienie

ettryngitu (do 200°C) i rozkład gipsu w zakresie temperatur 150–170°C. Główną przyczyną spadku wytrzymałości betonu na ściskanie po prażeniu w 200°C był więc wzrost objętości porów w zaczynie cementowym, który to problem nie został zlikwidowany poprzez pielęgnać w wodzie. Uzyskano jednak stopień regeneracji betonu w porównaniu z betonem kontrolnym (nieprażonym) na poziomie 78,1% oraz 83,8%, odpowiednio w obecności kruszywa żwirowego i łamanego. W badanych betonach wyprażonych w 400°C również nie odnotowano poprawy wytrzymałości na ściskanie w wyniku pielęgnać w wodzie przez 28 dni. Jest to spowodowane obserwowanym wcześniej wzrostem porowatości zaczynu cementowego oraz częściową, postępującą dehydratacją fazy C-S-H.

TABELA 3.15. Wpływ regeneracji betonu na wytrzymałość na ściskanie

Seria	Temperatura prażenia MPa	Wartości średnie z wyników badań			
		$f_{cm,28,pr.}$ MPa	$f_{cm,reg.}$ MPa	$S_{reg.} = \frac{f_{cm,reg.}}{f_{cm,28}} \cdot 100\%$	$\Delta f_{cm} \%$
1	2	3	4	5	6
1	20	67,18 (2,21)	69,26 (2,28)	103,0	+3,0
2	200	62,54 (1,75)	52,45 (1,47)	78,1	-16,1
3	400	54,17 (1,83)	49,66 (2,12)	73,9	-8,3
4	600	36,67 (1,84)	40,12 (3,56)	59,7	+9,4
5	800	11,28 (0,46)	–*	–	–
6	1000	<i>Zniszczenie próbki po wygrzewaniu</i>			
7	20	71,50 (1,71)	72,35 (2,42)	101,2	+1,2
8	200	61,64 (1,66)	59,95 (4,35)	83,8	-2,7
9	400	52,14 (4,27)	47,99 (4,12)	67,1	-8,0
10	600	41,66 (2,05)	49,82 (4,01)	69,7	+19,6
11	800	4,39 (0,31)	–*	–	–
12	1000	<i>Zniszczenie próbki po wygrzewaniu</i>			

* – próbki w 800°C rozpadły się po umieszczeniu w wodzie.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na uwagę zasługuje wyraźny wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie z kruszywem zarówno żwirowym, jak i łamanym – odpowiednio o 9,4% i 19,6% – po 28-dniowej regeneracji w wodzie przy wcześniejszej temperaturze prażenia równej 600°C. Jest to spowodowane przede wszystkim regeneracją wodorotlenku wapnia, który w efekcie prażenia uległ dehydroksylacji, tworząc tlenek wapnia i wodę. Jednak stopień regeneracji betonu w odniesieniu do serii kontrolnej wynosił w tym przypadku 59,7% oraz 69,7%, co świadczy o uszkodzeniu struktury betonu, zwłaszcza w strefie przejściowej. Dla porównania zdaniem Poona i in. [186] możliwe jest odzyskanie

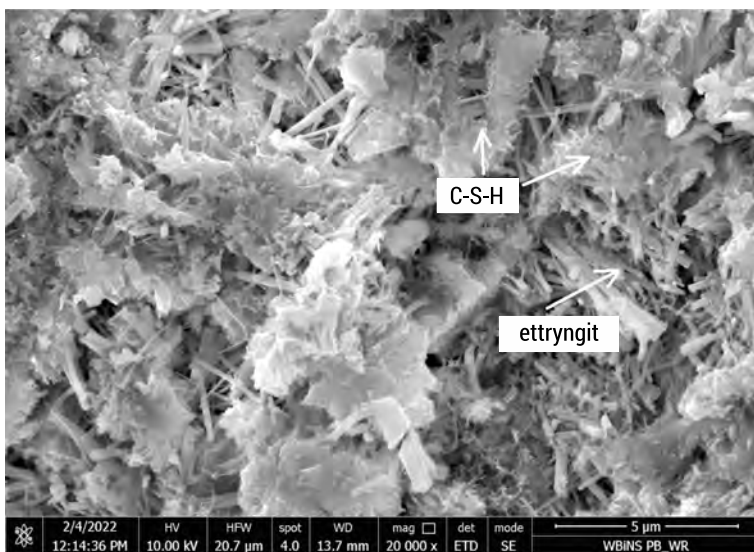
właściwości wytrzymałościowych przez beton nawet do poziomu 78% i 62% w stosunku do serii kontrolnej odpowiednio przy współczynniku w/c równym 0,30 i 0,50, ale zależy to od metody i czasu trwania regeneracji. Analiza przeprowadzona w rozdziale 3.5.5 wykazała, że wodorotlenek wapnia, który uległ niemal całkowitej dehidroksylacji w wyniku wygrzewania, zregenerował się do poziomu ponad 85% w odniesieniu do próby kontrolnej, czyli zaczynu cementowego niepoddanego prażeniu. W obecności wody nastąpiła powtórna hydratacja wolnego wapna, będącego wcześniejszym produktem rozpadu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Jednakże tworzenie się nowego portlandytu ma nieco inny charakter niż pierwotnie. Przede wszystkim zaobserwowano, że kryształy po regeneracji nie układają się prostopadle do ziarna kruszywa, a ich występowanie ma charakter nieuporządkowany (rys. 3.45 i rys. 3.47).

Nie udało się zaobserwować procesów regeneracji w betonie wygrzewanym do temperatury 800°C przez 4 godziny, ponieważ po umieszczeniu próbek w wodzie uległy one zniszczeniu. Było to głównie efektem odwodnienia żelu C-S-H, który jest podstawowym produktem hydratacji cementu. W wyniku jego rozpadu powstaje głównie $\beta\text{-C}_2\text{S}$ i czasem obserwowany C_3S . Jak wspomniano w rozdziale 1.6, część badaczy jest zdania, że dehydratacja fazy C-S-H postępuje stopniowo od temperatury 100°C do 900°C [80, 127]. Jednak prezentowane w tabeli 3.15 wyniki są bliższe opinii przedstawionej przez Penga i Huanga [179], według których tempo rozpadu uwodnionych krzemianów wapnia wykazuje wyraźny wzrost dopiero w zakresie temperatur od 600°C do 800°C, kiedy to następuje niemal całkowity zanik tej fazy już po 2 godzinach ekspozycji. Jest to główna przyczyna drastycznego spadku wytrzymałości betonu na ściskanie po prażeniu w 800°C. Dodatkowo w 800°C dekarbonatyzacji uległ również węglan wapnia, w wyniku czego powstało wolne wapno.

3.5.4. Wpływ ponownej pielęgnacji na kształtowanie powierzchni wygrzewanego kruszywa z recyklingu

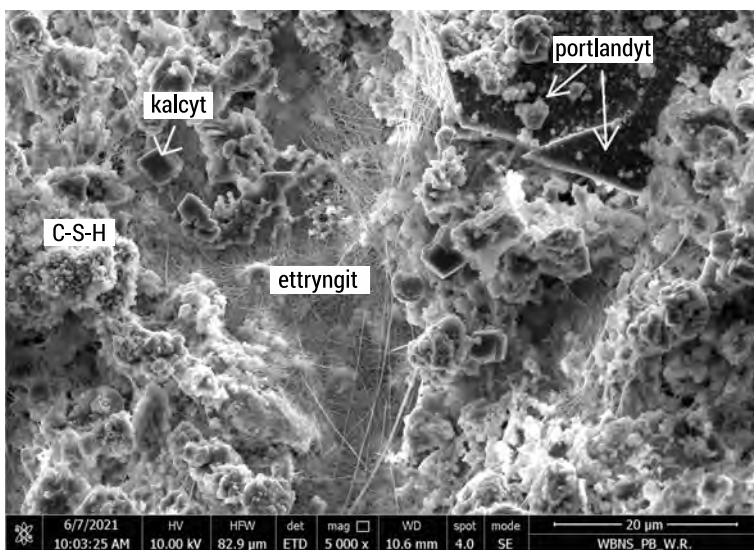
Do badań wykorzystano ziarna kruszywa z recyklingu wcześniej wygrzewane w zakresie temperatur 20–800°C (jak w rozdziale 3.4). Kruszywa te po ponownym umieszczeniu w wodzie na okres 28 dni poddano obserwacjom przy użyciu elektroнового mikroskopu skaningowego w celu identyfikacji produktów wykształconych na ich powierzchni. Obserwacje te przedstawiono na rys. 3.44–3.48.

Proces hydratacji cementu w kruszywie z recyklingu niepoddanym wcześniejszemu prażeniu (KR_20°C) przebiegał w czasie bez zakłóceń, prowadząc do dalszego wykształcania produktów tworzących się w procesie wiązania cementu, jak żel C-S-H czy ettryngit (rys. 3.44). Faza C-S-H uformowała się w kształt plastra miodu, podobnie jak to miało miejsce w badaniach Borštnera i in. [23]. W przypadku kruszywa wyprażonego w 200°C zaobserwowano przede wszystkim ponowne tworzenie się ettryngitu, który wcześniej uległ rozpadowi. Zauważono również pozostałe formy, takie jak portlandyt, żel C-S-H czy kalcyt, które pozostały stabilne w temperaturze 200°C (rys. 3.45).



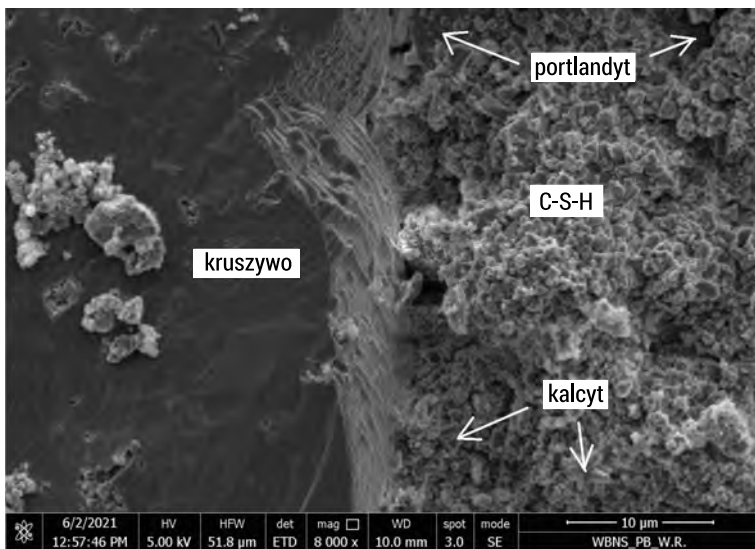
RYS. 3.44. KR_20°C po regeneracji (x20 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



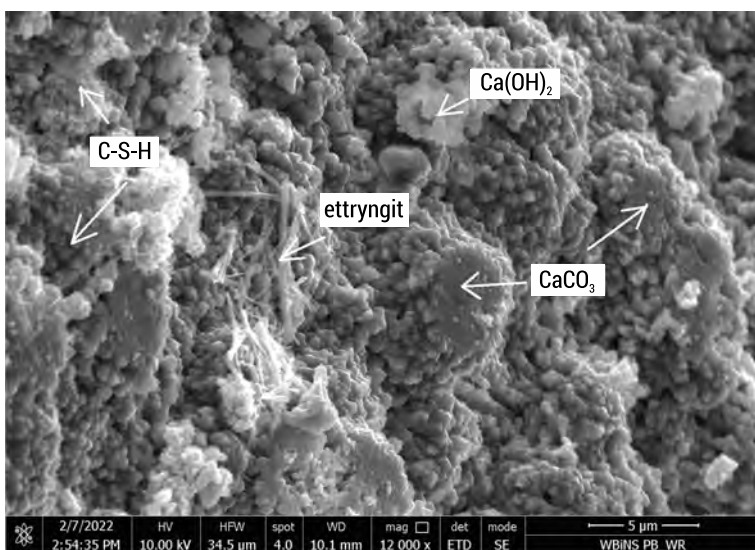
RYS. 3.45. KR_200°C po regeneracji (x5 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



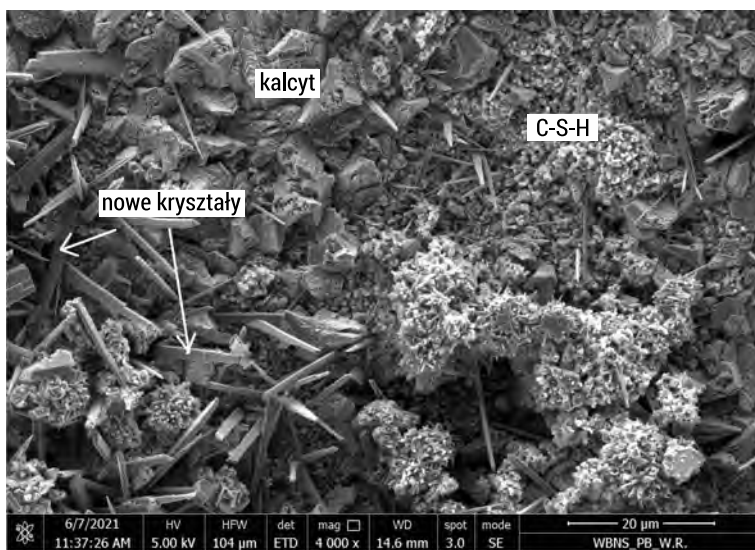
RYS. 3.46. KR_400°C po regeneracji (x8 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.47. KR_600°C po regeneracji (x12 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.



RYS. 3.48. KR_800°C po regeneracji (x4 000)

ŹRÓDŁO: fot. W. Rutkowska.

W kruszywie wyprażonym wcześniej w 400°C po regeneracji w wodzie można było zauważyć płytki portlandytu oraz kalcyt, które w zasadzie nie uległy zniszczeniu w wyniku wcześniejszego wygrzewania. Obecny był też żel C-S-H, natomiast można było zauważyć jego częściowe wytrawienie w postaci rozmytych krawędzi, będące efektem działania temperatury (rys. 3.46). Na powierzchni kruszywa z recyklingu wyprażonego w 600°C i poddanego regeneracji (rys. 3.47) ponownie zaobserwowano portlandyt jako efekt reakcji wolnego wapna z wodą. Będące produktem wyprażenia wapno teraz częściowo uczestniczy w procesie rehydratacji fazy C-S-H, ale przede wszystkim przyczynia się do formowania nowego wodorotlenku wapnia. Częściowo odwodniona faza C-S-H odbudowuje się w wyniku rehydratacji nowych krzemianów. Na rys. 3.47 zaobserwowano także ettryngit, który uległ ponownemu uwodnieniu. Z kolei na powierzchni kruszywa wyprażonego w 800°C po regeneracji (rys. 3.48) pojawiły się faza C-S-H oraz wydłużone kryształy ettryngitu. Kalcyt powstały w wyniku karbonatyzacji współistnieje z uwodnionymi fazami stałymi.

3.5.5. Wpływ ponownej pielęgnacji na kształtowanie faz w zaczynie cementowym

W ostatnim kroku ustalono zdolność do regeneracji produktów hydratacji i dekarbonatyzacji wyprażonego zaczynu cementowego pozostającego na powierzchni kruszywa z recyklingu.

Z uwagi na fizyczny brak możliwości pobrania wystarczającej do badań ilości zaczynu cementowego z powierzchni kruszywa poddanego obróbce termiczno-mechanicznej (uzyskane ziarna w niektórych temperaturach prażenia są niemal całkowicie oczyszczone z zaprawy) zastąpiono go przygotowanym w rozdziale 3.2 pracy zmielonym zaczynem cementowym, który po wyprażeniu w temperaturach 20–1000°C poddano pielęgnacji w wodzie przez 28 dni. Następnie próbki zostały wysuszone w 60°C i ponownie zmielone do 0,063 mm. Za pomocą analizy termicznej ustalono w nich zmiany zawartości wodorotlenku wapnia i węgla wapnia w porównaniu z próbkami badanymi odpowiednio po 3 dniach od wyprażenia.

W tabeli 3.16 przedstawiono wyniki analizy termicznej próbki cementu CEM I 42,5R oraz zmieszonego zaczynu cementowego prażonego w różnych temperaturach po 3 dniach po wygrzewaniu oraz po 28 dniach ponownej pielęgnacji w wodzie.

TABELA 3.16. Wyniki analizy termicznej wyprażonego cementu i zaczynu cementowego w zależności od czasu i warunków pielęgnacji

Temperatura prażenia, °C	Składnik zaczynu, % masy			
	3 dni po prażeniu ¹⁾		28 dni pielęgnacji w wodzie ²⁾	
	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
1	2	3	4	5
CEM I 42,5R	0,82	0,59	9,45	13,73
20	23,30	9,99	18,99	10,42
200	23,76	10,26	16,73	15,73
400	24,41	11,37	19,44	19,52
600	5,18	12,33	19,85	19,79
800	1,03	3,59	20,43	12,35
1000	0,00	0,05	14,43	10,46

¹⁾ zmieszany zaczyn po wyprażeniu przechowywany w zamkniętych pojemnikach do momentu badania.

²⁾ zmieszany zaczyn pielęgnowany przez 28 dni w wodzie, wysuszony i ponownie zmieszany.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wartości wyników zaprezentowanych w tabeli 3.16 wskazują, że w efekcie 28-dniowej pielęgnacji w wodzie w zaczynie cementowym poddanym wcześniej działaniu temperatur w zakresie 20–400°C nastąpił spadek zawartości wodorotlenku wapnia na rzecz tworzenia się węgla wapnia. Generalnie wysoka zawartość CaCO₃ w stosunkowo „młodych” zaczynach wynikała z faktu, że badane próbki były wcześniej rozdrobnione do frakcji pyłowej, co wpływało na szybki postęp ich karbonatyzacji. Z kolei portlandyt odwodniony w temperaturze 600°C i wyższej intensywnie się zregenerował (od 1,03% do ponad 20% masy przy 800°C). Jednak po wyprażeniu w 1000°C powstawanie nowego portlandytu w wyniku pielęgnacji wodnej było już utrudnione,

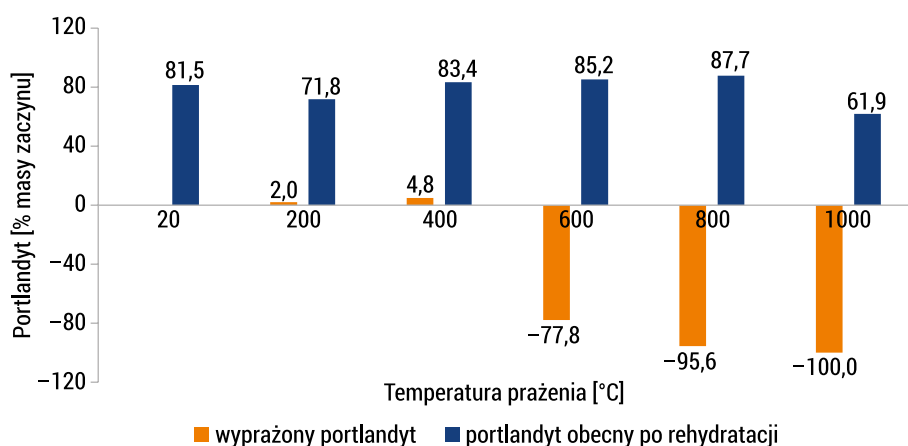
prawdopodobnie z uwagi na tworzenie się silnych wiązań ceramicznych powstających w wyniku spiekania, prowadzących do wzajemnego łączenia się ziaren, co zaobserwowano i omówiono w rozdziale 3.2. Z kolei węglan wapnia, który uległ niemal całkowitemu rozpadowi w 800°C, wykrył się ponownie, ale już w ograniczonym zakresie (do 10–12% masy), co oznacza, że część powstałego w procesie dekarbonatyzacji tlenku wapnia uczestniczyła również w tworzeniu portlandytu.

Na rys. 3.49 przedstawiono procentową ilość portlandytu, który uległ dehydroksylacji w wyniku działania temperatury (wyprażony portlandyt), oraz procentową ilość portlandytu obecnego po ponownym kontakcie z wodą (istniejącego i wytworzonego w wyniku ponownej hydratacji łącznie). Wielkości te obliczono w odniesieniu do próby kontrolnej, czyli zaczynu cementowego niepoddanego prażeniu (20°C), w którym zawartość Ca(OH)_2 wynosiła w tym przypadku 23,30% masy zaczynu, odpowiednio według zależności (3.10) i (3.11):

$$\text{Ca(OH)}_{2(\text{wypr})} = \frac{\text{Ca(OH)}_{2(20^\circ\text{C})} - \text{Ca(OH)}_{2(T^\circ\text{C})}}{\text{Ca(OH)}_{2(20^\circ\text{C})}} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

$$\text{Ca(OH)}_{2(\text{reg})} = \frac{\text{Ca(OH)}_{2(\text{reg}, T^\circ\text{C})}}{\text{Ca(OH)}_{2(20^\circ\text{C})}} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

gdzie: $\text{Ca(OH)}_{2(\text{wypr})}$ – ilość wyprażonego portlandytu, % masy; $\text{Ca(OH)}_{2(T^\circ\text{C})}$ – ilość portlandytu obecnego po prażeniu w temperaturze T, % masy; $\text{Ca(OH)}_{2(20^\circ\text{C})}$ – ilość portlandytu w próbce kontrolnej (20°C), % masy; $\text{Ca(OH)}_{2(\text{reg})}$ – całkowita ilość portlandytu obecnego po procesie rehydratacji, % masy; $\text{Ca(OH)}_{2(\text{reg}, T^\circ\text{C})}$ – ilość portlandytu obecnego po rehydratacji w zależności od wcześniejszej temperatury prażenia T, % masy.

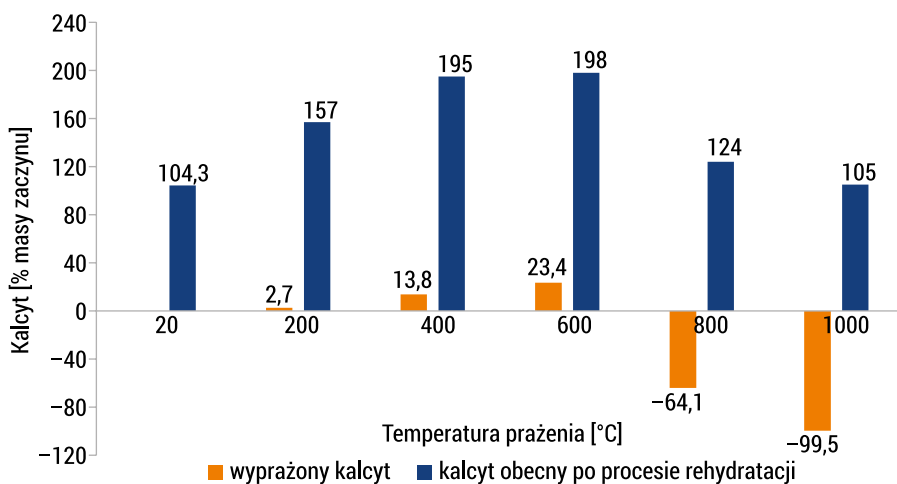


RYS. 3.49. Procentowa ilość portlandytu wyprażonego w zakresie temperatur 20–1000°C oraz obecnego po rehydratacji

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki przedstawione na rys. 3.49 potwierdzają, że rozpad wodorotlenku wapnia miał nagły charakter i nastąpił w 600°C. Obecność $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w wyższej temperaturze wynikała z warunków deponowania próbek, które przechowywano w szczelnych pojemnikach, ale z uwagi na wysoki stopień rozdrobnienia mogły reagować z wilgocią z otoczenia do momentu wykonania analizy termicznej. W wyniku pielęgnacji w wodzie nastąpiła rehydratacja portlandytu do poziomu powyżej 85% ilości początkowej (w porównaniu z zaczynem niepoddanym prażeniu: 20°C, kol. 2, tabela 3.16). Dotyczyło to głównie temperatur 600 i 800°C, ponieważ w niższych (do 400°C) portlandyt był generalnie stabilny, chociaż jego ilość zmniejszała się w czasie. Najgorzej regenerował się wodorotlenek wapnia wyprażony wcześniej w 1000°C, uzyskując poziom zaledwie 61,9% ilości początkowej.

Na rys. 3.50 przedstawiono zmiany zawartości węglanu wapnia w efekcie wygrzewania zaczynu cementowego do 1000°C oraz późniejszej jego pielęgnacji w wodzie w odniesieniu do próby kontrolnej, czyli zaczynu cementowego niepoddanego prażeniu (20°C, kol. 3, tabela 3.17). Obliczenia wykonano poprzez analogię zgodnie z zależnościami (3.10) i (3.11).



RYS. 3.50. Procentowa zawartość kalcytu wyprażonego w zakresie temperatur 20–1000°C oraz po procesie rehydratacji

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki przedstawione na rys. 3.50 wskazują, że kalcyt pozostawał stabilny do temperatury 600°C włącznie. Zaobserwowano nawet wzrost jego ilości podczas prażenia, jednak, podobnie jak w przypadku portlandytu, wynikało to z konieczności przechowywania próbek do momentu badania i rozdrobnienia materiału, co przyspieszyło proces karbonatyzacji. Dopiero w temperaturze 800°C nastąpiła wyraźna dekarbonatyzacja CaCO_3 (około 64% uległo rozpadowi), natomiast całkowity zanik kalcytu odnotowano w 1000°C. Wzrost ilości kalcytu po procesie pielęgnacji do temperatury 600°C wynikał z naturalnego procesu jego tworzenia, niezaburzonego oddziaływaniem

temperatury. Zaobserwowano również całkowitą regenerację CaCO_3 w zaczynach wyprażonych wcześniej w temperaturach 800 i 1000°C. Wynikało to z obecności wolnego wapna będącego efektem dehydratacji i dekarbonatyzacji, które ponownie reagowało z CO_2 .

3.5.6. Podsumowanie wyników badań

Przeprowadzone badania dotyczyły możliwości regeneracji betonu poddanego różnym temperaturom wygrzewania. Przeanalizowano możliwość odbudowy produktów, które uległy rozpadowi w wyniku odwodnienia bądź dekarbonatyzacji. Badania realizowano w trzech etapach: na betonach cementowych, kruszywach z recyklingu oraz na zaczynach cementowych. Ustalono, że wcześniejsze wyprażenie betonu w 600°C umożliwia jego najskuteczniejszą regenerację w efekcie 28-dniowej pielęgnacji w wodzie, przejawiającą się wzrostem wytrzymałości na ściskanie o 9,4% i 19,6%, odpowiednio przy użyciu kruszywa żwirowego i łamanego. Przyczynia się do tego głównie powtórna hydratacja wolnego wapna będącego wcześniejszym produktem rozpadu Ca(OH)_2 . Obserwacje kruszyw z recyklingu poddanych obróbce termiczno-mechanicznej i pielęgnacji w wodzie przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego potwierdziły regenerację wodorotlenku wapnia na ich powierzchni. Analiza termiczna zaczynów cementowych wykazała ponadto, że po prażeniu w 600°C i pielęgnacji w wodzie rehydratacja portlandytu osiągnęła poziom powyżej 85% ilości początkowej (w porównaniu z zaczynem niepoddanym prażeniu), natomiast węglan wapnia pozostał stabilny w tej temperaturze, ograniczając do minimum emisję dwutlenku węgla.

Obserwacje zmian zachodzących zarówno na powierzchni kruszywa z recyklingu, jak i w samym zaczynie cementowym pozwoliła w dalszej kolejności na opracowanie oryginalnych schematów budowy strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu w zależności od temperatury wcześniejszej obróbki gruzu betonowego.

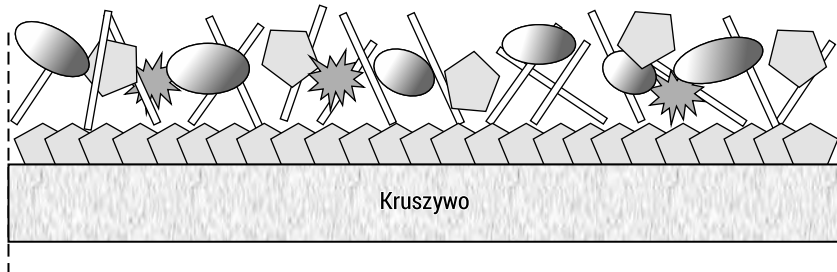
3.6. Mechanizmy kształtowania strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu

3.6.1. Schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu po obróbce termiczno-mechanicznej

Obserwacje powierzchni kruszywa z recyklingu po obróbce termiczno-mechanicznej w zakresie temperatur 20–800°C oraz przemiany fazowe zachodzące w zaczynie cementowym pozostałym na powierzchni tego kruszywa w wyniku regeneracji stały się przesłanką do podjęcia próby wyjaśnienia mechanizmów kształtowania się strefy

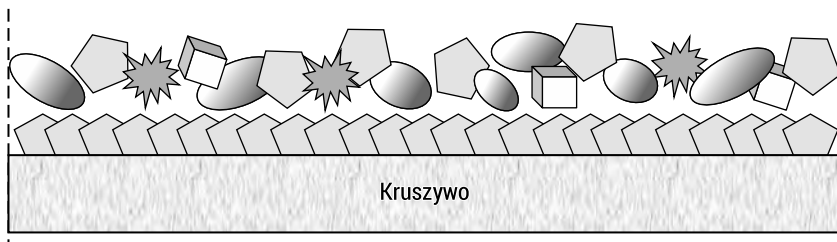
kontaktowej pomiędzy powierzchnią tego kruszywa a nowym zaczynem cementowym. Jakość tej strefy ma decydujące znaczenie w aspekcie poprawy parametrów fizyczno-mechanicznych betonu, dlatego temu zagadnieniu poświęcono należną mu uwagę.

Na rys. 3.51–3.55 przedstawiono zaproponowane przez autorkę schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu po poddaniu go obróbce termiczno-mechanicznej w zakresie temperatur 20–800°C, opracowane na podstawie wyników badań własnych prezentowanych w poprzednich rozdziałach.



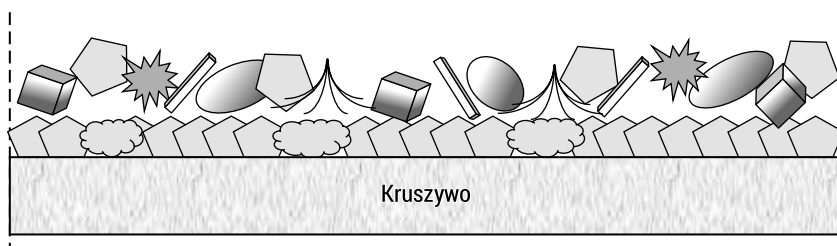
RYS. 3.51. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce mechanicznej w 20°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



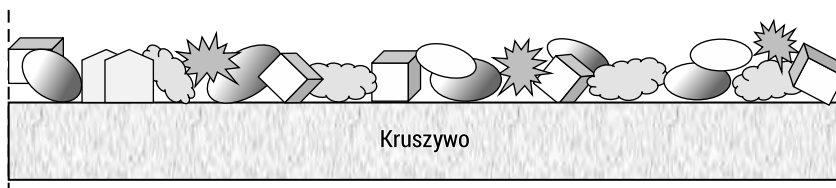
RYS. 3.52. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 200°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



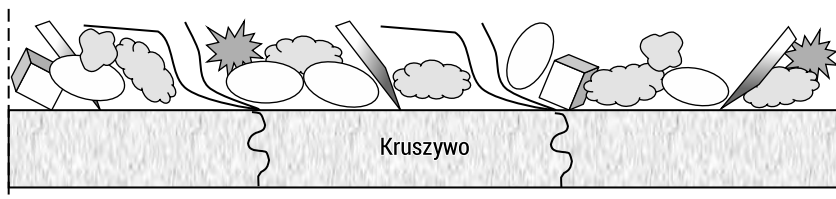
RYS. 3.53. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 400°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 3.54. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 600°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 3.55. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 800°C

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W tabeli 3.17 zamieszczono objaśnienia symboli graficznych użytych do sporządzenia schematów.













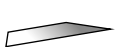

Strefa kontaktowa w kruszywie z recyklingu poddanym wyłącznie obróbce mechanicznej przypomina budowę tę w betonie cementowym. Przy powierzchni ziarna kruszywa w sposób regularny układają się kryształy portlandytu, które tworzą tak zwany efekt ściany. Pomiędzy warstwą wodorotlenku wapnia oraz powierzchnią ziarna tworzy się zwykle szczelina, która osłabia wiązanie w strefie kontaktowej. W dalej zalegających warstwach „starego” zaczynu cementowego występują podstawowe produkty hydratacji cementu, takie jak ettryngit oraz faza C-S-H. Szczególnie obecność pałeczkowatego ettryngitu blokuje rozwój fazy C-S-H w kierunku ziarna, zwiększając tym samym porowatość kruszywa z recyklingu. Jest to podstawowa przyczyna pogorszenia właściwości betonu przygotowanego z udziałem kruszywa poddanego wyłącznie obróbce mechanicznej, co opisano w rozdziale 1.3.

Po wyprażeniu w 200°C w zaczynie cementowym otaczającym powierzchnię kruszywa nie występuje już ettryngit, który rozpada się do temperatury 100–120°C, natomiast wciąż widoczna jest warstwa wodorotlenku wapnia przy powierzchni ziarna. Zaobserwowano również kalcyt oraz fazę C-S-H. Dehydratacja ettryngitu przyczynia się do zredukowania zawartości zaprawy cementowej w kruszywie z recyklingu, jednak nadal jej ilość jest znacząca i wpływa niekorzystnie na właściwości kruszywa (rozdział 3.4.3).

Na powierzchni kruszywa wygrzanego w 400°C występowały głównie faza C-S-H oraz odmiany węglanu wapnia w postaci pałeczkowatego aragonitu i kryształów o mniejszym rozmiarze niż kalcyt, czyli waterytu. Wciąż obecna jest warstwa

wodorotlenku wapnia, chociaż w temperaturze 400°C rozpoczyna się częściowa dehidroksylacja i pojawia się tlenek wapnia, co prawdopodobnie jest główną przyczyną dalszego zredukowania warstwy zaprawy w kruszywie z recyklingu o około 10% w odniesieniu do ilości zaprawy usuniętej w 200°C.

TABELA 3.17. Objasnienie symboli graficznych

Symbol	Opis	Symbol	Opis
	Szczątkowy wodorotlenek wapnia		Żel C-S-H
	Kalcyt		Larnit (β -C ₂ S)
	Wateryt		Tlenek wapnia
	Aragonit		Wodorotlenek wapnia (portlandyt)
	Niezhydratyzowane ziarna cementu		Ettryngit
	Włóknista faza C-S-H		Glinian trójwapniowy (C ₃ A)
	Nowe wydłużone kryształy		Uszkodzenie struktury

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Dopiero w temperaturze 600°C „efekt ściany” niemal całkowicie zanika, a w miejscu portlandytu pojawia się tlenek wapnia będący efektem jego całkowitej dehidroksylacji. W niektórych przypadkach zaobserwowano jednak występowanie szczątkowych płytek Ca(OH)₂, z tego też względu umieszczono je na schemacie. Główną fazę na powierzchni kruszywa z recyklingu stanowią uwodnione krzemiany wapnia typu C-S-H, które częściowo uległy odwodnieniu, tworząc nowe krzemiany w postaci larnitu. Wykazano również obecność charakterystycznych form kalcytu, który rozkłada się znacząco dopiero w wyższej temperaturze. Po wyprażeniu kruszywa w 600°C ilość usuniętej zaprawy stanowi około 40–47% jego początkowej masy, a powierzchnia ziarna jest niemal całkowicie oczyszczona. Pozostałe na powierzchni fazy stanowią zwartą strukturę zawierającą wapno, które może tworzyć wiązania chemiczne z nowym zaczynem cementowym w betonie.

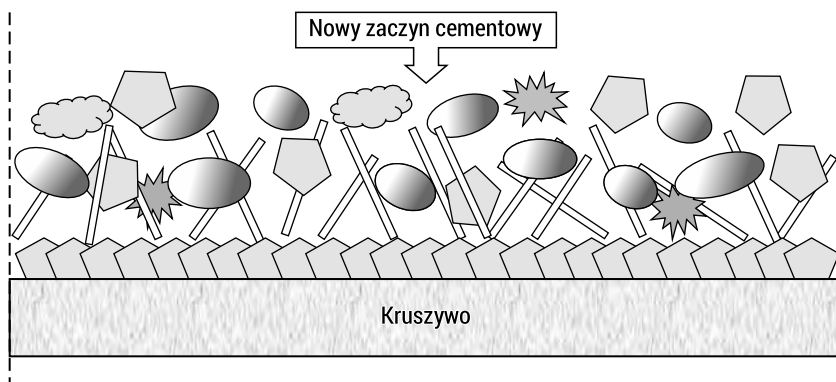
W kruszywie wygrzewanym w 800°C widoczne są już uszkodzenia struktury występujące na jego powierzchni, świadczące o destrukcyjnym wpływie wysokiej

temperatury na matrycę cementową i na samo ziarno kruszywa (rys. 3.42). Potwierdza to również wzrost ilości usuniętej zaprawy, co wynika przede wszystkim ze zniszczenia struktury niektórych ziaren naturalnych w kruszywie z recyklingu. Zaobserwowano także niezidentyfikowane formy włókniste w postaci wydłużonych kryształów, przypominające kształtem ettryngit, oraz glinian trójwapniowy (C_3A). Główną fazę widoczną na powierzchni kruszywa stanowi larnit ($\beta-C_2S$) powstały w wyniku niemal całkowitego odwodnienia żelu C-S-H.

Można więc stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania kruszywa z recyklingu zmniejsza się nie tylko ilość pozostałego na powierzchni ziarna zaczynu cementowego, co zaprezentowano na rys. 3.30, lecz także kształtowanie produktów hydratacji i dehydratacji oraz karbonatyzacji obecnych na powierzchni ziarna. Niektóre z tych przemian są korzystne z punktu widzenia poprawy jakości kruszywa z recyklingu i wykazują zdolność do tworzenia wiązań chemicznych z nowym zaczynem cementowym w betonie, inne zaś pogarszają strukturę tego kruszywa, co przejawia się osłabieniem parametrów kompozytu cementowego przygotowanego z jego udziałem.

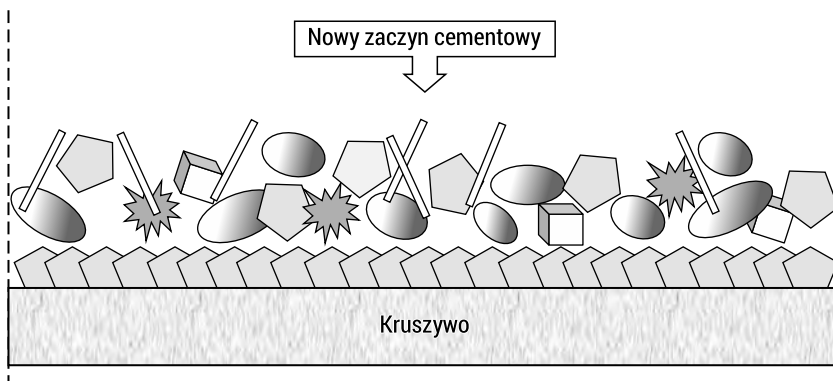
3.6.2. Mechanizmy kształtowania strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu

Na podstawie przeprowadzonych w rozdziale 3.5 badań dotyczących możliwości regeneracji produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji zaczynu cementowego po procesie obróbki mechanicznej ($20^\circ C$) i termiczno-mechanicznej w zakresie temperatur $200-800^\circ C$ podjęto próbę opracowania schematów budowy strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu a nowym zaczynem cementowym, które zaprezentowano na rys. 3.56–3.60.



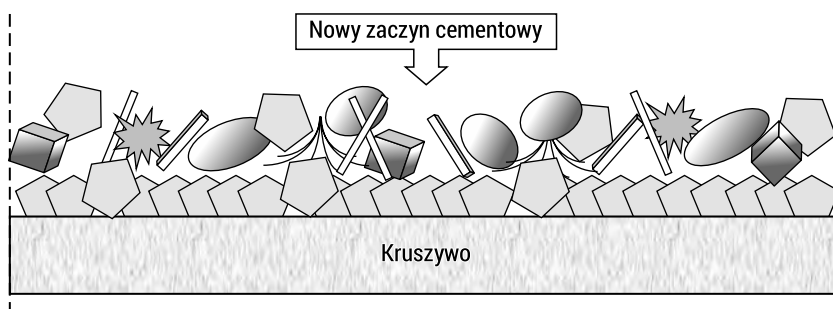
RYS. 3.56. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce mechanicznej ($20^\circ C$) a nowym zaczynem cementowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



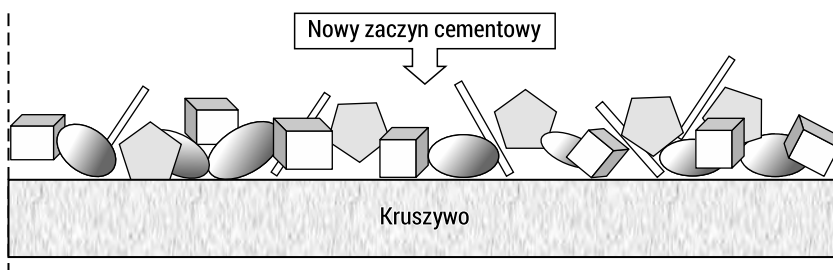
RYS. 3.57. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (200°C) a nowym zaczynem cementowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



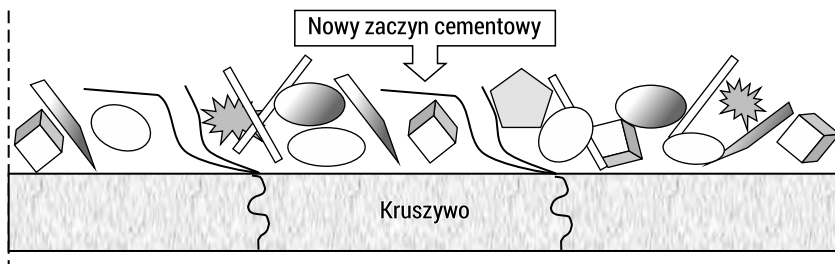
RYS. 3.58. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (400°C) a nowym zaczynem cementowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 3.59. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (600°C) a nowym zaczynem cementowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 3.60. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (800°C) a nowym zaczynem cementowym

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Obecność pałeczek ettryngitu w „starym” zaczynie cementowym pozostającym w znacznej ilości na powierzchni kruszywa z recyklingu poddanego obróbce mechanicznej uniemożliwia przenikanie do niego nowego zaczynu cementowego i rozwój fazy C-S-H. Powoduje to wzrost porowatości strefy kontaktowej w porównaniu z pozostałą częścią matrycy cementowej, co przyczynia się bezpośrednio do pogorszenia właściwości fizycznych i mechanicznych betonu. Z tego względu kruszywa z recyklingu powstałe w wyniku oddziaływania mechanicznego są zalecane do betonów niskich klas wytrzymałości, co omówiono szczegółowo w rozdziale 1.2.3.

W przypadku kruszywa z recyklingu wyprażonego wcześniej w 200°C w wyniku kontaktu z nowym zaczynem cementowym zaobserwowano przede wszystkim ponowne tworzenie się ettryngitu, który wcześniej uległ rozpadowi. Pozostałe fazy, takie jak portlandyt, żel C-S-H czy kalcyt, pozostały stabilne w temperaturze 200°C. Należy zauważyć że produkty hydratacji pochodzące z nowego zaczynu cementowego mają możliwość rozwijania się częściowo w porowatej strukturze „starego” zaczynu cementowego, umożliwiając mechaniczne zakotwienie.

Zasadniczo metodyka kształtowania strefy kontaktowej w betonie z kruszywem z recyklingu poddanym prażeniu w 400°C jest zbliżona do poprzedniej (przy 200°C). Jest to spowodowane tym, że w przedziale 200–400°C nie następują w betonie żadne istotne przemiany fazowe oprócz rozpoczynającej się dehydratacji fazy C-S-H, która jednak w większości jest zachowana. Warstwa „starej” zaprawy cementowej w kruszywie z recyklingu jest mniejsza i głównie to jest przyczyną tworzenia bardziej zwartej strefy kontaktowej z nowym zaczynem, w której oddziaływania mają głównie charakter mechaniczny.

W przypadku betonu z kruszywem z recyklingu wyprażonym w 600°C budowa strefy kontaktowej kształtuje się w odmienny sposób. Z uwagi na brak efektu ściany oraz brak ettryngitu po wyprażeniu kruszywa strefa ta nie wykazuje odmiennych właściwości od pozostałej części matrycy cementowej. Tlenek wapnia obecny na powierzchni kruszywa, a powstały w wyniku dehydroksylacji wodorotlenku wapnia, reagując z wodą zawartą w nowym zaczynie cementowym, tworzy ponownie portlandyt, który formuje się w sposób rozproszony i przenika się z innymi fazami.

Natomiast regenerujący się ettryngit nie utrudnia procesu rozwoju żelu C-S-H w strefie kontaktowej, ponieważ uwodnione krzemiany wapnia wytworzyły się tam już wcześniej. Wynika z tego, że oprócz oddziaływania mechanicznego pomiędzy kruszywem z recyklingu a nowym zaczynem cementowym następuje również zespolenie chemiczne. To może tłumaczyć chociażby wysoką wytrzymałość na zginanie i na ściskanie kompozytów z kruszywem z recyklingu po obróbce termiczno-mechanicznej w 600°C, przewyższającą wytrzymałość betonu kontrolnego. Tego typu kruszywa bardzo dobrej jakości mogą być stosowane nawet do betonów wysokich wytrzymałości, co wykazano w rozdziale 4.1.

Z kolei strefa kontaktowa w betonie zawierającym kruszywo z recyklingu wyprążone w 800°C tworzy się poprzez regenerację fazy C-S-H i ettryngitu. Wzrosła również ilość kalcytu, prawdopodobnie w wyniku reakcji wolnego wapna z CO₂. Jednak strefa ta jest osłabiona z uwagi na rysy i spękania występujące w kruszywie z recyklingu. Można spodziewać się propagacji uszkodzeń w kierunku nowego zaczynu, co oznacza, że kruszywo poddane prażeniu w tak wysokiej temperaturze nie powinno być stosowane jako zamiennik kruszywa naturalnego w betonie.

3.6.3. Podsumowanie wyników badań

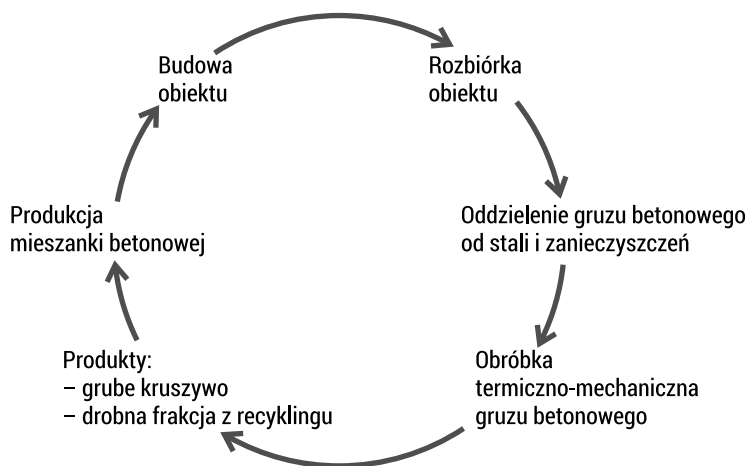
W rozdziale zaproponowano autorskie schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w zakresie temperatur 20–800°C. Potwierdza to wpływ wygrzewania gruzu betonowego na jakość uzyskiwanych kruszyw. Na tej podstawie opracowano też mechanizmy kształtowania strefy przejściowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym różnym temperaturom prażenia a nowym zaczynem cementowym. Produkty dehydratacji i dekarbonatyzacji pozostałe na powierzchni kruszywa mają decydujące znaczenie w procesie tworzenia się tej strefy w nowym betonie. Ustalono, że do temperatury 400°C oddziaływania pomiędzy produktami obecnymi na powierzchni kruszywa z recyklingu a nowym zaczynem cementowym mają charakter głównie mechaniczny, natomiast po prażeniu w 600°C następuje dodatkowo ich chemiczne zespolenie. Ma to zasadniczy wpływ na właściwości kompozytów cementowych przygotowanych z udziałem tego rodzaju kruszyw.

3.7. Parametry procesu przetwarzania gruzu betonowego

3.7.1. Schemat procesu obróbki gruzu betonowego

Na podstawie poprzednich etapów badań zdefiniowano parametry procesu przetwarzania gruzu betonowego umożliwiające pozyskanie kruszywa grubego wysokiej jakości oraz aktywnej frakcji drobnej. Zdecydowano o zastosowaniu termiczno-mechanicznej metody przetwarzania gruzu betonowego dającej, zdaniem autorki, najwyższy stopień oczyszczenia ziaren kruszywa z zaprawy cementowej. Doświadczalnie ustalono, że temperatura wygrzewania na poziomie 600°C wpływa najkorzystniej na stopień oczyszczenia kruszywa bez zmian w strukturze ziarna. Dodatkowo w wyniku procesu odwodnienia produktów hydratacji cementu uzyskana frakcja drobna odzyskuje częściowo właściwości pucolanowe, rozszerzając tym samym możliwości jej powtórnego zastosowania.

Na rys. 3.61 przedstawiono schemat cyklu życia obiektu budowlanego uwzględniający zamknięty obieg betonu dzięki zastosowaniu termiczno-mechanicznej obróbki gruzu. Po rozbiórce obiektu taki gruz otrzymuje drugie życie i po odpowiednim przekształceniu w kruszywo grube i frakcję drobną stanowi wartościowy składnik nowej mieszanki betonowej.



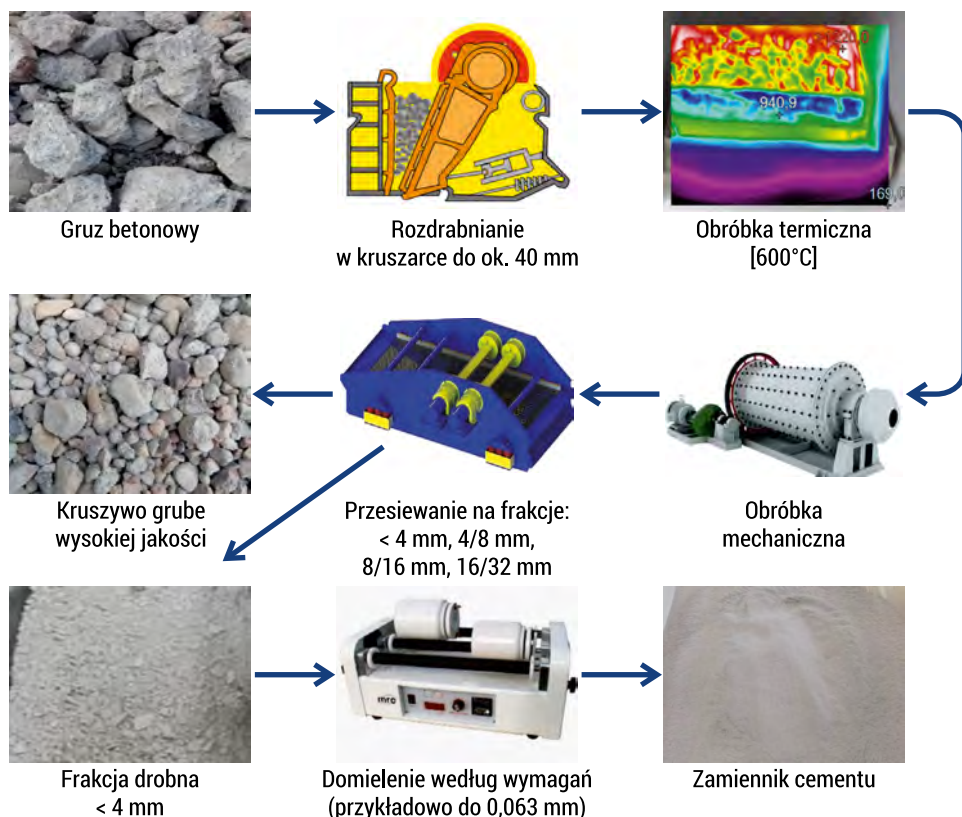
RYS. 3.61. Cykl życia obiektu budowlanego uwzględniający obróbkę termiczno-mechaniczną gruzu betonowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Kruszywo grube odzyskane w procesie obróbki termiczno-mechanicznej przy odpowiedniej temperaturze wygrzewania równej 600°C charakteryzuje się wysoką jakością i w znacznym stopniu może zastąpić kruszywo naturalne w betonie,

nawet wysokiej wytrzymałości, co wykazano w badaniach weryfikujących w rozdziale 4.1. Frakcja drobna również może być użyta jako częściowy zamiennik cementu, co potwierdzono doświadczalnie w rozdziałach 4.2 i 4.3.

Na rys. 3.62 przedstawiono ideowy schemat procesu wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz drobnej frakcji o właściwościach pucolanowych.



RYS. 3.62. Ideowy schemat procesu wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz drobnej frakcji o właściwościach pucolanowych oparty na zdefiniowanych parametrach obróbki gruzu betonowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Pełny proces zaproponowanej obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego opiera się na czterech głównych etapach, które w warunkach laboratoryjnych można zrealizować w następujący sposób:

- 1) w pierwszym etapie gruz betonowy (pochodzący z rozbiórki lub budowy) zostaje rozkruszony w kruszarce, zwykle szcękowej, do wymiarów < 40 mm;
- 2) w drugim etapie rozdrobniony gruz zostaje umieszczony w piecu i wygrzewany w temperaturze 600°C przez 4 godziny;

- 3) w trzecim etapie po wyjęciu z pieca gruz zostaje umieszczony w bębnie, gdzie zostaje poddany obróbce mechanicznej o stałych parametrach (500 obrotów bębna z prędkością 33 obr./min, co odpowiada 15 minutom) w celu finalnego odspojenia zaprawy cementowej z powierzchni ziaren kruszywa bez ich uszkodzenia;
- 4) w czwartym etapie materiał zostaje przesiany przez sito o boku oczka 4 mm celem oddzielenia frakcji drobnej < 4 mm od grubej (≥ 4 mm).

Kruszywo grube o rozmiarach ≥ 4 mm dodatkowo podzielone zostaje na wymagane frakcje, jak 4/8 mm, 8/16 mm i 16/32 mm. Jest to kruszywo wysokiej jakości, które w nowym betonie ma korzystniejszy wpływ na jego właściwości mechaniczne niż kruszywo naturalne. Wskazane jest, aby frakcja drobna została domielona według planowanego zastosowania, najlepiej do 0,125 mm lub nawet do 0,063 mm, co poprawia jej aktywność pucolanową i rozszerza wachlarz możliwości zastosowania.

3.7.2. Podsumowanie wyników badań

W efekcie przeprowadzonych badań opracowano najkorzystniejsze parametry obróbki gruzu betonowego (wygrzewanie w 600°C oraz oddziaływanie mechaniczne przez 15 min) w aspekcie wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz aktywnej frakcji drobnej. Umożliwi to wprowadzenie uzyskanych materiałów z recyklingu do zamkniętego obiegu betonu, bez tworzenia dodatkowych odpadów. Zdaniem autorki może to całkowicie zmienić dotychczasowe podejście do zagadnienia recyklingu gruzu betonowego. Zarówno kruszywo z recyklingu, dzięki jego wysokiej jakości, jak i drobna frakcja z recyklingu o właściwościach pucolanowych mogą stanowić wartościowe substytuty surowców naturalnych.

W dalszej fazie badań opracowane parametry obróbki termiczno-mechanicznej zostaną zweryfikowane pod kątem zastosowania wytworzonego kruszywa z recyklingu i aktywnej frakcji drobnej w kompozytach cementowych.

4. Właściwości kompozytów cementowych z materiałami z recyklingu – faza weryfikacji

4.1. Zastosowanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości do betonów cementowych

4.1.1. Cel badań

W rozdziale 3.4 pracy ustalono, że wyprażanie gruzu betonowego w 600°C w połączeniu z obróbką mechaniczną pozwala na uzyskanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości o najlepszych parametrach zbliżonych do kruszywa naturalnego.

Zaplanowane w tej części pracy badania miały na celu weryfikację parametrów obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego w aspekcie kształtowania wybranych właściwości betonu przygotowanego na bazie grubego kruszywa z recyklingu.

4.1.2. Metodyka badań

Do realizacji celu opracowano eksperyment badawczy z trzema czynnikami zmiennymi na trzech poziomach każdy. Czynniki i ich zakresy zmienności dobrano tak, aby mogły mieć wpływ na zmiany właściwości betonu z grubym kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (tabela 4.1).

TABELA 4.1. Czynniki przyjęte w planie eksperymentu wraz z ich poziomami zmienności

X_1	Temperatura prażenia gruzu betonowego, °C	300	600	900
X_2	Czas trwania obróbki mechanicznej, min (<i>liczba obrotów</i>)	5 (165 obr.)	10 (330 obr.)	15 (500 obr.)
X_3	Zawartość grubego kruszywa z recyklingu (4/8 mm i 8/16 mm), % objętości kruszywa naturalnego	20	40	60

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W rozdziale 3.5 pracy jednoznacznie wykazano, że najkorzystniejszą temperaturą prażenia z uwagi na stopień oczyszczenia kruszywa z zaprawy cementowej przy jednoczesnym braku szkodliwego wpływu na strukturę ziarna jest temperatura 600°C. Ponowne zaplanowanie w niniejszym eksperymencie zróżnicowanych poziomów temperatury prażenia gruzu (X_1) w postaci 300°C, 600°C i 900°C miało na celu ustalenie, czy zastosowanie kruszywa z recyklingu najwyższej jakości przekłada się w rezultacie na otrzymanie najkorzystniejszych parametrów fizyczno-mechanicznych betonu, czy też przy innej temperaturze wygrzewania kruszywa możliwe jest uzyskanie kompozytu o porównywalnych właściwościach. Z kolei czas trwania obróbki mechanicznej (X_2) zróżnicowano w zakresie 5, 10 i 15 minut, co wiąże się z różną liczbą obrotów bębna Los Angeles (tabela 4.1). W rozdziale 3.4 pracy przy optymalizowaniu temperatury wygrzewania gruzu betonowego pod kątem uzyskania kruszywa o najlepszych cechach parametry obróbki mechanicznej pozostawały na stałym poziomie: 500 obrotów bębna z prędkością 33 obr./min, co odpowiada 15 minutom. W bieżącym eksperymencie rozważono możliwość ograniczenia czasu trwania tej obróbki i wpływu tej zmiany na jakość uzyskanego kruszywa z recyklingu oraz właściwości betonu. Jest to ważne zagadnienie przede wszystkim z punktu widzenia ograniczenia kosztów procesu. Jako trzecią zmienną w eksperymencie X_3 przyjęto procentową zawartość grubego kruszywa z recyklingu podzielonego na frakcje 4/8 mm i 8/16 mm używanego w charakterze zamiennika analogicznych frakcji kruszywa naturalnego. Maksymalny zakres stosowania ustalono na 60% objętości kruszywa naturalnego.

Na podstawie wyżej wymienionych zmiennych postanowiono przeprowadzić eksperyment z zastosowaniem planu Hartleya PS/DS-P:Ha3 przy obszarze zmienności na sześcianie [185]. Plan badań obejmował 12 podstawowych serii badawczych oraz 2 serie kontrolne. W tabeli 4.2 przedstawiono szczegółowy plan eksperymentu. W pierwszej serii kontrolnej (S13_20_0_60) zastosowano kruszywo z recyklingu w ilości 60% niepoddane żadnej dodatkowej obróbce, natomiast druga seria kontrolna (S14_KN_100) zawierała wyłącznie kruszywo naturalne.

TABELA 4.2. Plan eksperymentu

Seria	Wartości wielkości wejściowych		
	X_1 °C	X_2 min	X_3 %
1	2	3	4
S1_300_15_40	300	15	40
S2_600_10_20	600	10	20
S3_900_15_20	900	15	20
S4_300_5_60	300	5	60
S5_900_15_60	900	15	60
S6_600_5_40	600	5	40

Seria	Wartości wielkości wejściowych		
	X_1 °C	X_2 min	X_3 %
1	2	3	4
S7_300_15_60	300	15	60
S8_300_5_20	300	5	20
S9_900_5_60	900	5	60
S10_900_5_20	900	5	20
S11_300_10_40	300	10	40
S12_300_15_20	300	15	20
S13_20_0_60	Seria kontrolna_kruszywo z recyklingu bez obróbki		
S14_KN_100	Seria kontrolna_kruszywo naturalne		

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W tabeli 4.3 przedstawiono recepturę mieszanki betonowej w zależności od procentowej zawartości kruszywa z recyklingu, przy założeniu stałej ilości cementu CEM I 42,5R równej 400 kg/m^3 oraz stałym współczynnikiem $w/c = 0,40$.

TABELA 4.3. Skład mieszanki betonowej w zależności od zawartości kruszywa z recyklingu

Składnik	Zawartość kruszywa grubego z recyklingu, % masy			
	0	20	40	60
1	2	3	4	5
Cement CEM I 42,5R, kg	400,0			
Woda, kg	158,0			
w/c, -	0,40			
Superplastyfikator, kg	2,0			
Piasek 0/2 mm, kg	659,4			
Kruszywo żwirowe 2/4 mm, kg	164,9			
Kruszywo granitowe 4/8 mm, kg	453,6	362,9	272,2	181,4
Kruszywo granitowe 8/16 mm, kg	721,6	577,3	433,0	288,7
Kruszywo z recyklingu 4/8 mm, kg	0,0	82,9	165,8	248,7
Kruszywo z recyklingu 8/16 mm, kg	0,0	131,9	263,8	395,7

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ustalony skład odpowiada betonom wysokiej wytrzymałości, które znajdują się zwykle poza obszarem stosowania kruszyw z recyklingu. Jednakże kruszywa zaproponowane w niniejszej pracy charakteryzuje szczególnie wysoka jakość, dlatego podjęto próbę sprawdzenia ich przydatności do betonów wysokowartościowych. Z uwagi

na niską wartość współczynnika w/c konieczne było zastosowanie superplastyfikatora na bazie polikarboksylianów w ilości 0,5% masy cementu. Właściwości użytego cementu CEM I 42,5R zamieszczono w tabeli 4.4.

TABELA 4.4. Właściwości cementu CEM I 42,5R

Cecha	Wymagania normowe	Wynik oznaczenia	Norma badawcza
1	2	3	4
Początek wiązania, min	≥ 60	187	PN-EN 196-3
Koniec wiązania, min	–	248	PN-EN 196-4
Powierzchnia właściwa, cm ² /g	–	3746	PN-EN 196-6
Stałość objętości, mm	≤ 10	1,6	PN-EN 196-3
Wytrzymałość na ściskanie, MPa			PN-EN 196-1
– po 2 dniach	≥ 20,0	25,6	
– po 28 dniach	≥ 42,5 ≤ 62,5	54,3	
Zawartość SO ₃ , %	≤ 4,0	2,98	PN-EN 196-2
Zawartość Cl, %	≤ 0,1	0,079	PN-EN 196-21
Pozostałość nierozpuszczalna, %	≤ 5,0	0,79	PN-EN 196-2
Strata prażenia, %	≤ 5,0	3,24	PN-EN 196-2
Zawartość alkaliów jako Na ₂ O _{eq} , %	–	0,60	PN-EN 196-21
Gęstość właściwa, g/cm ³	–	3,10	PN-EN 196-6

ŹRÓDŁO: [284].

Do realizacji badań użyto najbardziej powszechnego i dostępnego w okresie ich realizacji cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Zastosowano również kruszywa naturalne w postaci piasku 0/2 mm, żwiru 2/4 mm oraz granitu frakcji 4/8 mm i 8/16 mm.

Kruszywo z recyklingu pozyskano z rozdrobnienia około trzyletnich próbek betonowych przygotowywanych podczas realizacji inwestycji przez jedną z lokalnych firm budowlanych. Skład betonu z przeznaczeniem na kruszywo wraz z wynikami wytrzymałości na ściskanie i zginanie zamieszczono w tabeli 4.5.

Próbki betonowe wstępnie rozdrobniono w laboratoryjnej kruszarce szczękowej do wymiaru ziarna < 20 mm, a następnie za pomocą przesiewacza wibracyjnego materiał przesiano przez sito 4 mm w celu oddzielenia frakcji drobnej, która stanowiła około 18% masy początkowej. Uzyskane kruszywo grube 4/20 mm przeznaczone do dalszych badań przedstawiono na rys. 4.1.

TABELA 4.5. Skład betonu z przeznaczeniem na kruszywo z recyklingu

Składnik	Ilość, kg	f_{cm} (MPa); (odch. stand.)	Klasa betonu	f_{tkm} (MPa); (odch. stand.)
1	2	3	4	5
Cement siarczanoodporny CEM I 42,5 N HSR/NA	360	67,0 (8,56)	C 35/45	7,6 (0,58)
Woda	144			
Piasek 0/2	641			
Granit 2/8 mm	450			
Granit 8/16 mm	720			
Plastyfikator	3,20			
Superplastyfikator	2,48			
Domieszka napowietrzająca	2,98			

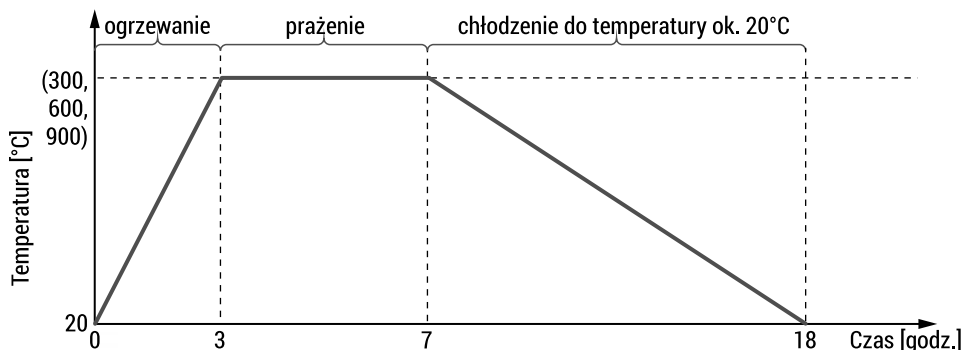
ŹRÓDŁO: opracowanie własne na podstawie informacji uzyskanych od producenta betonu.



RYS. 4.1. Kruszywo grube z recyklingu frakcji 4/20 mm

ŹRÓDŁO: fot. autorka.

W dalszym etapie kruszywo frakcji 4/20 mm poddano obróbce termicznej w ustalonej planem eksperymentu temperaturze (300°C, 600°C lub 900°C) przez 4 godziny w celu równomiernego wygrzania całej masy materiału. Cykl obróbki termicznej gruzu betonowego w piecu przedstawiono na rys. 4.2.



RYS. 4.2. Cykl obróbki termicznej gruzu betonowego

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Ostatnim etapem poprawy jakości kruszywa była obróbka mechaniczna w bębnie Los Angeles. Czas obróbki ustalono odpowiednio na 5, 10 lub 15 min. Pozwoliło to na końcowe odseparowanie zaprawy cementowej z powierzchni ziaren kruszywa grubego. Następnie materiał po obróbce przesiano w celu wydzielenia frakcji 4/8 mm i 8/16 mm niezbędnych do dalszych badań. Nadziarno (> 16 mm), które stanowiło do 4% masy wsadu, ostatecznie przyłączono do frakcji 8/16 mm. Procentowe zawartości poszczególnych frakcji stanowiące procent masy materiału przed obróbką w zależności od temperatury prażenia i czasu trwania obróbki mechanicznej przedstawiono w tabeli 4.6.

TABELA 4.6. Procentowa zawartość frakcji uzyskanych w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej

Temp. prażenia, °C	Czas trwania obróbki mechanicznej, min (liczba obrotów bębna)	Zawartość poszczególnych frakcji, % masy wsadu		
		< 4 mm	4/8 mm	8/16 mm (z nadziarnem)
1	2	3	4	5
300	5 (165 obr.)	24	35	41
300	10 (330 obr.)	32	31	37
300	15 (500 obr.)	36	30	34
600	5 (165 obr.)	35	30	35
600	10 (330 obr.)	38	29	33
600	15 (500 obr.)	42	27	31
900	5 (165 obr.)	81	13	6
900	10 (330 obr.)	95	3	2
900	15 (500 obr.)	96	2	2

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych wyników zauważono, że ścieralność zaprawy cementowej (< 4 mm) z powierzchni kruszywa rosła stopniowo wraz z temperaturą i czasem obróbki termiczno-mechanicznej do momentu wyprażenia kruszywa w temperaturze 900°C. Wówczas nastąpił gwałtowny wzrost ścieralności – po obróbce mechanicznej od 81% do 96% wsadu przeszło przez sito 4 mm. Okazało się, że prażenie w tej temperaturze zniszczyło strukturę granitu, co jest zgodne z wynikami otrzymanymi w rozdziale 3.3. Najefektywniejsze w eksperymencie, z uwagi na stopień oczyszczenia kruszywa z recyklingu, okazało się jego prażenie w 600°C, co potwierdza rezultaty przedstawione w rozdziale 3.4 pracy. Wykazano również, że czas obróbki mechanicznej powiązany z liczbą obrotów bębna miał wpływ na stopień oczyszczenia kruszywa z recyklingu z zaprawy. Czynnikiem ten był szczególnie istotny przy niższej temperaturze wygrzewania (w tym wypadku 300°C), podczas której odnotowano wzrost ilości usuniętej zaprawy o 50% wraz z wydłużeniem czasu obróbki mechanicznej z 5 do 15 min. Przy temperaturze 600°C ilość usuniętej zaprawy wzrosła już tylko o 20% wraz z wydłużeniem czasu obróbki do 15 min. Potwierdza to skuteczność samej obróbki termicznej w 600°C, w której następuje dekompozycja kruszywa z recyklingu szczególnie w miejscu strefy kontaktowej. Ilość zaprawy usuniętej w 300°C po 500 obrotach bębna (15 min) była zbliżona do ilości usuniętej zaprawy w 600°C po 165 obrotach (5 min).

Wraz ze wzrostem ilości frakcji drobnej (< 4 mm) stopniowo zmniejszał się udział frakcji 4/8 mm i 8/16 mm, natomiast w temperaturze 900°C uzyskano niewielkie ilości tego materiału z powodu uszkodzenia struktury ziarna kruszywa.

Badania wytworzonego w ten sposób kruszywa z recyklingu oraz kruszywa naturalnego granitowego wykonano w zakresie gęstości nasypowej w stanie suchym i nasyconym zgodnie z PN-EN 1097-3:2000 [N16] oraz nasiąkliwości według PN-EN 1097-6:2002 [N17], przy czym każde z tych oznaczeń wykonano dla trzech powtórzeń. Do realizacji eksperymentu przygotowano próbki betonowe prostopadłościennie o wymiarach 100 × 100 × 100 mm, 100 × 100 × 500 mm oraz cylindryczne o wymiarach Ø 150 × 300 mm, które pielęgnowano w wodzie w warunkach laboratoryjnych do uzyskania wieku 28 dni. Badania mieszanki betonowej i betonu zrealizowano zgodnie z wykazem zamieszczonym w tabeli 4.7.

TABELA 4.7. Wykaz wykonanych badań właściwości mieszanki betonowej i betonu

Nazwa badania	Wymiary próbki, mm	Liczba powtórzeń, szt.	Podstawa badania
1	2	3	4
Badanie konsystencji metodą opadu stożka, cm	-	2	PN-EN 12350-2:2019-07 [N19]
Badanie gęstości objętościowej mieszanki betonowej, g/cm ³	-	3	PN-EN 12350-6:2019-08 [N20]

Nazwa badania	Wymiary próbki, mm	Liczba powtórzeń, szt.	Podstawa badania
1	2	3	4
Badanie wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,28}$), MPa	100 × 100 × 100	6	PN-EN 12390-3:2019-07 [N22]
Badanie wytrzymałości na zginanie ($f_{lm,28}$), MPa	100 × 100 × 500	4	PN-EN 12390-5:2019-08 [N23]
Badanie modułu sprężystości (E), GPa	∅ 150 × 300	4	PN-EN 12390-13:2021-12 [N21]
Badanie gęstości objętościowej (D_{obj}), g/cm ³	100 × 100 × 100	4	PN-EN 12390-7:2019-08 [N24]
Badanie nasiąkliwości (N), % masy	100 × 100 × 100	4	PN-B-06250:1988 [N10]
Badanie przepuszczalności wody (WP), mm	100 × 100 × 100	3	PN-EN 12390-8:2019-08 [N25]
Badanie kapilarnego podciągania wody (KP), % masy	100 × 100 × 100	3	PN-EN 772-11:2011 [N33] ¹⁾

¹⁾ Badanie *KP* przeprowadzono przez analogię do wytycznych normy [N33], na podstawie procentowego przyrostu masy próbki wywołanego ilością wody pochłoniętej w czasie przez dolną powierzchnię próbki zanurzonej na głębokość 3 cm. Ściany boczne zaizolowano wcześniej parafiną.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4.1.3. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 4.8 przedstawiono wyniki badania kruszywa z recyklingu oraz kruszywa naturalnego granitowego w zakresie gęstości nasypowej w stanie suchym i nasyconym oraz nasiąkliwości wraz z odchyleniem standardowym wyników badań.

Powyższe wyniki wskazują, że kruszywa z recyklingu prażone w temperaturze 600°C charakteryzowały się gęstością nasypową najbardziej zbliżoną do kruszywa naturalnego, zarówno w stanie suchym, jak i nasyconym. Również jego nasiąkliwość była najniższa spośród badanych kruszyw z recyklingu i wynosiła nieco ponad 3%. Tylko nieznacznie gorsze wyniki uzyskano w przypadku kruszyw prażonych w temperaturze 300°C, co koresponduje też z ilością usuniętej zaprawy (tabela 4.6). Należy zauważyć, że kruszywo z recyklingu niepoddane obróbce termiczno-mechanicznej odznaczało się zdecydowanie najniższą gęstością nasypową, do czego przyczyniły się głównie jego rozwinięta powierzchnia spowodowana obecnością zaprawy cementowej oraz nieregularny kształt utrudniający szczelne upakowanie ziaren. O znacznej pozostałości zaprawy cementowej na powierzchni kruszyw niepoddanych obróbce świadczy również 18-procentowy wzrost gęstości nasypowej w stanie nasyconym

w stosunku do stanu wysuszonego. Z kolei prażenie kruszywa w temperaturze 900°C spowodowało uszkodzenie struktury ziaren, których rozpad na mniejsze fragmenty wpłynął na wzrost gęstości nasypowej w stosunku do kruszywa nieprażonego poprzez lepsze upakowanie cząstek w cylindrze pomiarowym. Jednakże nadal materiał ten charakteryzował się stosunkowo wysoką nasiąkliwością, około pięć–sześć razy wyższą w porównaniu z kruszywem naturalnym.

TABELA 4.8. Właściwości kruszywa z recyklingu (KR) po różnych rodzajach obróbki i kruszywa naturalnego granitowego (KN)

Rodzaj kruszywa	Temperatura prażenia	Fracja	Gęstość nasypowa				Nasiąkliwość, N	S(N)
			w stanie suchym, ρ_{ns}	S(ρ_{ns})	w stanie nasyconym, ρ_{nn}	S(ρ_{nn})		
	°C	mm	g/cm ³				%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
KR po obróbce termiczno-mechanicznej	300	4/8	1,21	0,025	1,26	0,047	3,8	0,208
	300	8/16	1,19	0,025	1,24	0,047	3,5	0,100
	600	4/8	1,26	0,040	1,29	0,031	3,1	0,265
	600	8/16	1,24	0,049	1,26	0,035	3,3	0,153
	900	4/8	1,16	0,032	1,20	0,038	6,0	0,700
	900	8/16	1,14	0,036	1,21	0,040	8,0	0,306
KR bez obróbki	–	4/8	0,93	0,049	1,10	0,131	6,8	0,252
	–	8/16	0,92	0,047	1,08	0,121	7,8	0,200
KN (granit)	–	4/8	1,30	0,055	1,31	0,059	1,3	0,020
	–	8/16	1,28	0,025	1,29	0,010	1,3	0,032

S(x) – odchylenie standardowe.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wartości średnie z wyników badania konsystencji mieszanek betonowych zmierzonej na dwóch próbach metodą opadu stożka według normy PN-EN 12350-2:2019-07 [N19] oraz gęstości objętościowej wraz z wartościami odchyłeń standardowych przeprowadzonej na trzech próbach zgodnie z PN-EN 12350-6:2019-08 [N20] zostały zaprezentowane w tabeli 4.9.

Na podstawie analizy wyników można zauważyć, że obecność kruszywa z recyklingu miała znaczący wpływ na konsystencję mieszanki betonowej. Największy opad stożka równy 22,5 cm i odpowiadający klasie konsystencji S5 zanotowano w przypadku serii kontrolnej (S14_KN_100). Korespondowało to z najwyższą gęstością objętościową mieszanki betonowej, co wynikało z obecności w składzie wyłącznie kruszywa naturalnego. Dla próbek serii zawierających 60% kruszywa recyklingowego

prażonego w 900°C (S5_900_15_60 i S9_900_5_60) nie ustalono klasy konsystencji, gdyż nie zaobserwowano tu opadu stożka. Jak już wspomniano, kruszywo z recyklingu uległo znacznemu uszkodzeniu w tak wysokiej temperaturze, o czym świadczy chociażby jego wysoka nasiąkliwość rzędu 6–8%. W serii zawierającej kruszywo z recyklingu niepoddane obróbce (S13_20_0_60) uzyskano klasę konsystencji S3, co potwierdza pogorszenie urabialności mieszanki betonowej w obecności kruszywa zawierającego najwięcej porowatej zaprawy cementowej na powierzchni ziaren. W pozostałych seriach konsystencje były zbliżone do siebie i odpowiadały klasie S4. Następnie próbki betonowe poddano badaniom właściwości fizyczno-mechanicznych po 28 dniach dojrzewania.

TABELA 4.9. Właściwości mieszanek betonowych

Seria	Opad stożka, cm	Klasa konsystencji	Gęstość objętościowa, g/cm ³ (S(D ₀))
1	2	3	4
S1_300_15_40	17,5	S4	2,37 (0,015)
S2_600_10_20	21,0	S5	2,34 (0,025)
S3_900_15_20	17,0	S4	2,33 (0,021)
S4_300_5_60	17,5	S4	2,29 (0,010)
S5_900_15_60	0,0	–	2,28 (0,036)
S6_600_5_40	18,5	S4	2,37 (0,026)
S7_300_15_60	20,0	S4	2,35 (0,030)
S8_300_5_20	18,0	S4	2,37 (0,017)
S9_900_5_60	0,0	–	2,27 (0,017)
S10_900_5_20	16,0	S4	2,33 (0,021)
S11_300_10_40	18,0	S4	2,35 (0,026)
S12_300_15_20	20,0	S4	2,39 (0,042)
S13_20_0_60	14,0	S3	2,34 (0,032)
S14_KN_100	22,5	S5	2,42 (0,025)

S(x) – odchylenie standardowe.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W tabeli 4.10 przedstawiono średnie wartości z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych betonu wraz z obliczonym odchyleniem standardowym S(x) dla poszczególnych 12 serii eksperymentu oraz 2 serii kontrolnych według planu badań zamieszczonego w tabeli 4.2.

TABELA 4.10. Średnie wartości z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych betonu

Seria	$f_{cm,28}$	$S(f_{cm,28})$	$f_{fm,28}$	$S(f_{fm,28})$	E	S(E)	D_{obj}	$S(D_{obj})$	N	S(N)	WP	S(WP)	KP
	MPa	MPa	MPa	MPa									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
S1_300_15_40	71,50	5,00	7,60	0,70	37,2	1,47	2,31	0,016	4,0	0,0704	50	2,00	3,08
S2_600_10_20	68,00	2,16	7,74	0,15	37,5	0,85	2,29	0,024	3,9	0,1720	40	3,00	3,06
S3_900_15_20	51,00	1,83	7,07	0,19	34,6	1,27	2,26	0,014	4,6	0,1431	50	2,50	3,20
S4_300_5_60	49,00	0,82	8,26	0,70	36,3	1,22	2,23	0,021	4,5	0,1112	55	0,00	3,25
S5_900_15_60	46,75	2,99	6,63	0,21	33,1	2,27	2,23	0,027	4,8	0,3057	65	2,50	3,68
S6_600_5_40	70,00	1,83	8,59	0,26	38,7	0,68	2,28	0,020	4,0	0,1056	43	4,50	2,98
S7_300_15_60	66,25	6,85	8,53	0,39	36,5	1,28	2,28	0,009	4,4	0,3493	45	2,50	3,10
S8_300_5_20	73,50	3,70	7,53	0,40	36,6	1,16	2,29	0,040	4,2	0,2373	43	2,50	3,21
S9_900_5_60	59,25	2,50	6,82	0,70	32,9	1,60	2,22	0,020	5,0	0,0809	63	2,50	3,97
S10_900_5_20	56,50	1,29	6,88	0,21	35,2	0,92	2,28	0,019	4,5	0,3051	48	2,50	3,00
S11_300_10_40	67,50	4,36	7,91	0,40	36,9	0,95	2,28	0,017	4,1	0,1231	52	5,00	3,48
S12_300_15_20	59,00	4,90	7,17	0,74	38,3	1,32	2,30	0,040	4,2	0,2934	43	3,00	3,15
S13_20_0_60	55,25	2,34	6,79	0,36	31,2	2,31	2,25	0,027	5,6	0,2899	75	2,65	4,19
S14_KN_100	60,50	1,75	5,98	0,18	38,5	1,78	2,31	0,032	3,7	0,1835	48	2,00	3,11

S(x) – odchylenie standardowe.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki badań poddano analizie statystycznej w celu określenia istotnego wpływu czynników (X_1, X_2, X_3) na właściwości betonów oraz ustalenia modelu matematycznego opisującego zmiany właściwości fizyczno-mechanicznych betonów w zależności od wartości tych czynników. Analiza statystyczna obejmowała kolejno: ocenę jednorodności wariancji, analizę wariancji, obliczenie współczynników równania regresji i ocenę ich istotności oraz ustalenie adekwatności modelu do danych eksperymentalnych. Analizy przeprowadzono przy użyciu programu Statistica. Z uwagi na obszerność uzyskanych wyników zaprezentowano je w pracy wybiórczo, ponieważ zdaniem autorki jest to wiedza dostępna w literaturze nawiązującej do tych zagadnień. Jako funkcję opisującą zmiany właściwości fizyczno-mechanicznych betonów w eksperymencie przyjęto wielomian drugiego stopnia w postaci (4.1):

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 \quad (4.1)$$

gdzie: b_{ij} – współczynniki równania regresji dla zmiennych X_i, X_j ; $i, j = 1, 2, 3$.

Jednorodność rzędu wariancji poszczególnych prób sprawdzono za pomocą testu Cochran–Coxa, który zakłada porównanie wartości obliczeniowej kryterium (G) z wartością krytyczną $G_{kryt(\alpha, N_p, n-1)}$ według zależności (4.2) [185]:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} < G_{kryt(\alpha, N_p, n-1)} \quad (4.2)$$

gdzie: $G_{kryt(\alpha, N_p, n-1)}$ – krytyczna wartość kryterium Cochran–Coxa; S_i^2 – wariancja w i -tej próbie; S_{max}^2 – maksymalna wariancja z N_p prób; n – liczba pomiarów powtórzonych w próbie; N_p – liczba prób w eksperymencie; α – poziom istotności równy 0,05.

We wszystkich badanych parametrach nierówność (4.2) została spełniona, tak więc nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej H_0 o jednorodności wariancji (wobec hipotezy alternatywnej H_1 : wariancje różnią się istotnie) [92]. Dodatkowo jednorodność wariancji potwierdzono również testem Levene’a w programie Statistica 13, który jest mocnym testem statystycznym do sprawdzenia takiej hipotezy. Jeżeli test ten pokazuje statystyczną istotność, to hipotezę H_0 należy odrzucić [219]. Następnie na podstawie jednoczynnikowego testu ANOVA sprawdzono istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami wyników badań uzyskanych w poszczególnych seriach. W dalszej kolejności przeprowadzono ocenę istotności wpływu czynników X_1, X_2 i X_3 zgodnie z kryterium F Snedecora, a ocenę istotności współczynników wielomianu aproksymującego zweryfikowano za pomocą testu t-Studenta, które to metody opisano chociażby w pracy [185].

Analiza statystyczna wyników badań wykazała, że na wszystkie badane właściwości fizyczno-mechaniczne betonów, z wyjątkiem modułu sprężystości, istotny wpływ miały dwa czynniki – temperatura prażenia (X_1) i zawartość kruszywa z recyklingu (X_3). Natomiast czas obróbki mechanicznej nie wpływał statystycznie istotnie

na żadną z badanych cech, co jest w pewnej kolizji z wynikami zaprezentowanymi w tabeli 4.6. Wynika to z faktu, że wpływ pozostałych czynników na zmienność cech betonu jest zdecydowanie większy niż czas obróbki, jednak zmienna X_2 ma swój efekt praktyczny, co przejawia się chociażby w zmienności cech kruszywa z recyklingu (tabela 4.8) i nie należy go całkowicie pomijać. Z uwagi na niekompletny plan badań analiza porównawcza została opracowana na podstawie ustalonych statystycznie równań regresji.

W tabeli 4.11 przedstawiono modele matematyczne opisujące zmiany poszczególnych właściwości betonu, uwzględniające tylko statystycznie istotne współczynniki regresji przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Opracowano je na potrzeby przeprowadzenia analizy uzyskanych wyników badań z uwagi na zastosowanie niekompletnego planu eksperymentu. Współczynnik determinacji R^2 , który jest miarą stopnia, w jakim równanie regresji wyjaśnia kształtowanie się zmiennej zależnej, obliczono ze wzoru (4.3) [185]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.3)$$

gdzie: y_i – i-ta obserwacja zmiennej y ; \hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej y (ustalona według modelu); \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej y .

Współczynnik ten przyjmuje wartości z zakresu $<0; 1>$, gdzie wartość bliższa jedności oznacza lepsze dopasowanie modelu do danych empirycznych.

TABELA 4.11. Równania regresji dla poszczególnych cech betonu w eksperymencie

Cecha	Równanie	R^2 *)
1	2	3
Wytrzymałość na ściskanie, $f_{cm,28}$, MPa	$= 46,2 + 0,07X_1 - 0,00007X_1^2 - 0,01X_3^2 - 0,002X_1X_2 + 0,03X_2X_3$	0,70
Wytrzymałość na zginanie, $f_{tm,28}$, MPa	$= 4,45 + 0,013X_1 + 0,07X_3 - 0,000003X_1^2 - 0,00005X_1X_3$	0,69
Moduł Younga, E , GPa	$= 27,77 + 0,03X_1 - 0,00003X_1^2$	0,84
Gęstość objętościowa, D , g/cm ³	$= 2,25 - 0,0002X_1 - 0,02X_3$	0,88
Nasiąkliwość, N , % masy	$= 5,73 - 0,005X_1 + 0,000005X_1^2 + 0,0005X_3^2$	0,99
Wodoprzepuszczalność, WP , mm	$= 54,20 - 0,15x_1 + 0,77x_3 + 0,00012x_1^2 - 0,007x_3^2$	0,97
Podciąganie kapilarne, KP , % masy	Nie ustalono równania regresji – zamiennie analizowano dynamikę podciągania kapilarnego w czasie	-

*) – współczynnik determinacji obliczony według zależności (4.3).

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania

Wobec spełnienia nierówności (4.2), gdzie $G = 0,298 < G_{kryt(0,95,12,5)} = 0,396$, ustalono, że wariancje w poszczególnych seriach badania wytrzymałości na ściskanie są jednorodne. Na podstawie jednoczynnikowego testu ANOVA stwierdzono, że średnie wartości z wyników badań w seriach różnią się między sobą z prawdopodobieństwem 95%, co pozwoliło na ocenę istotności wpływu zaplanowanych w eksperymencie zmiennych na badaną cechę betonu. W tabeli 4.12 przedstawiono wyniki jednowymiarowych testów istotności wpływu zmiennych X_1 , X_2 i X_3 na wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach.

TABELA 4.12. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla $f_{c,28}$

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla $f_{c,28}$				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	131099,3	1	131099,3	2723,449	0,000000
X_1	710,8	2	355,4	7,383	0,001826
X_2	57,7	2	28,8	0,599	0,553955
X_3	478,7	2	239,4	4,973	0,011654
Błąd	1973,6	41	48,1		

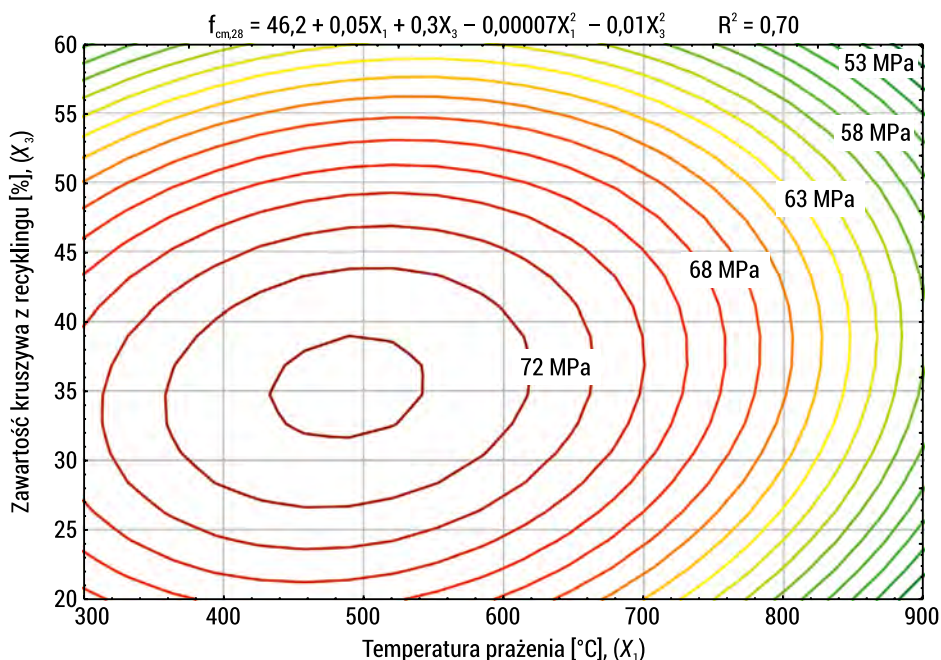
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki potwierdziły statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) oraz zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) na wytrzymałość betonu na ściskanie wobec braku istotnego wpływu czasu trwania obróbki mechanicznej (X_2). Błąd standardowy estymacji (SE_e) będący miarą dopasowania modelu zamieszczonego w tabeli 4.11 do rzeczywistych wartości zmiennej wyniósł 5,77 MPa.

Na rys. 4.3 przedstawiono zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od temperatury prażenia (X_1) i zawartości kruszywa z recyklingu (X_3). Z kolei na rys. 4.4 zamieszczono średnie wartości z wyników wytrzymałości uzyskane dla poszczególnych serii badawczych w porównaniu z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).

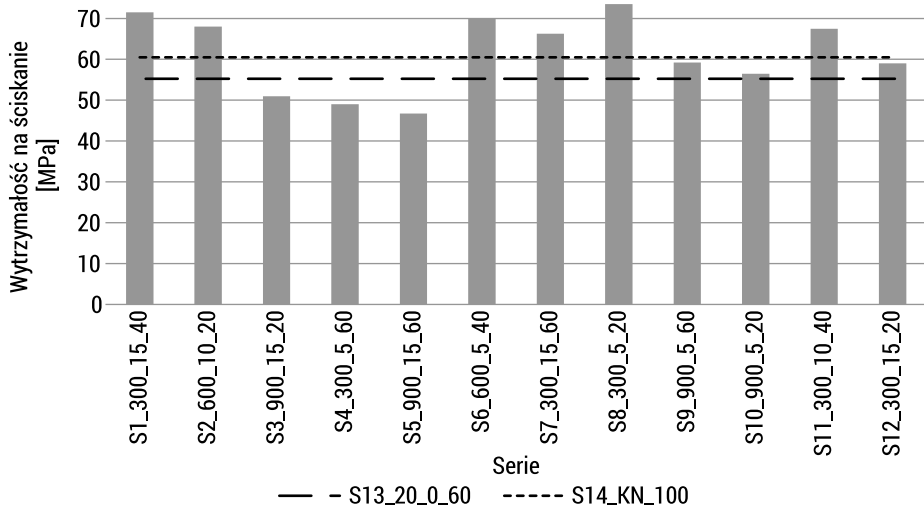
Na podstawie zależności przedstawionej na rys. 4.3 można stwierdzić, że obróbka termiczna kruszywa z recyklingu korzystnie wpłynęła na wytrzymałość betonu na ściskanie, szczególnie w zakresie temperatur od 300°C do 600°C i wzrastała wraz ze zbliżaniem się do temperatury 600°C. Wynika to przede wszystkim z wysokiego stopnia oczyszczenia kruszywa z recyklingu w tej temperaturze i jego niskiej nasiąkliwości. Kilkoprocentowy wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie nawet przy zawartości 60% kruszywa z recyklingu prażonego w 600°C w porównaniu z serią kontrolną (S14_KN_100) należy tłumaczyć wyjątkowym mechanizmem kształtowania nowej strefy kontaktowej w betonie, który ma charakter nie tylko mechaniczny, lecz także chemiczny, co dokładniej opisano w rozdziale 3.7. Należy

też zauważyć, że kruszywa z recyklingu wyprażone w 300°C również korzystnie wpłynęły na wytrzymałość betonu na ściskanie w porównaniu z serią kontrolną (rys. 4.4). Szczególnie jest to widoczne przy ich mniejszej zawartości (do 20%) albo przy dłuższej trwającej obróbce mechanicznej, chociaż statystycznie czynnik ten okazał się nieistotny. Zwiększenie zawartości kruszywa z recyklingu po wygrzewaniu w 300°C do 60% powoduje generalnie obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie o około 17%. Wynika to głównie z budowy nowej strefy kontaktowej w betonie, w której obserwuje się ponowne tworzenie ettryngitu, ale pozostałe fazy, takie jak portlandyt, żel C-S-H czy kalcyt, są niezmiennie, co umożliwia tylko pewne połączenie mechaniczne pomiędzy starym zaczynem obecnym na powierzchni kruszywa z recyklingu a nowym. W wyższej temperaturze (900°C) nastąpiło uszkodzenie struktury kruszywa, w efekcie czego nastąpił spadek wytrzymałości na ściskanie średnio o około 20% w porównaniu z serią kontrolną (S14_KN_100). Ma to również potwierdzenie w ilości zaprawy cementowej odseparowanej z powierzchni kruszywa po jego obróbce termiczno-mechanicznej (tabela 4.6). Jak wynika z rys. 4.4, w obecności 60% kruszywa z recyklingu niepoddanego obróbce (S13_20_0_60) uzyskano średnio o około 9% niższe wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu w porównaniu z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).



RYS. 4.3. Zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1) i zawartości kruszywa (X_3) (przy $X_2 = 10$ min)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.4. Średnie wartości z wyników wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z seriami kontrolnymi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W badaniach literaturowych w obecności grubego kruszywa z recyklingu obserwowano zwykle spadek wytrzymałości betonu na ściskanie nawet do 40% w porównaniu z seriami kontrolnymi [202], co szczegółowo omówiono w rozdziale 1.3.1. Niektórzy badacze sformułowali wniosek, że do uzyskania wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem z recyklingu porównywalnej z betonem kontrolnym należy zwiększyć ilość cementu w recepturze o około 8% [55]. Wyniki uzyskane w zrealizowanym eksperymencie są zdecydowanie bardziej korzystne niż prezentowane przez innych autorów, szczególnie w obecności kruszywa z recyklingu po prażeniu w 600°C (nawet w ilości do 60%).

Wytrzymałość na zginanie

Na podstawie nierówności (4.2), gdzie $G = 0,204 < G_{kryt(0,95,12,3)} = 0,584$, ustalono, że wariancje w poszczególnych seriach badania wytrzymałości na zginanie są jednorodne. Potwierdzono również, że średnie wartości z wyników badań w eksperymencie różnią się istotnie. W tabeli 4.13 przedstawiono wyniki jednowymiarowych testów istotności wpływu zmiennych, na wytrzymałość betonu na zginanie po 28 dniach.

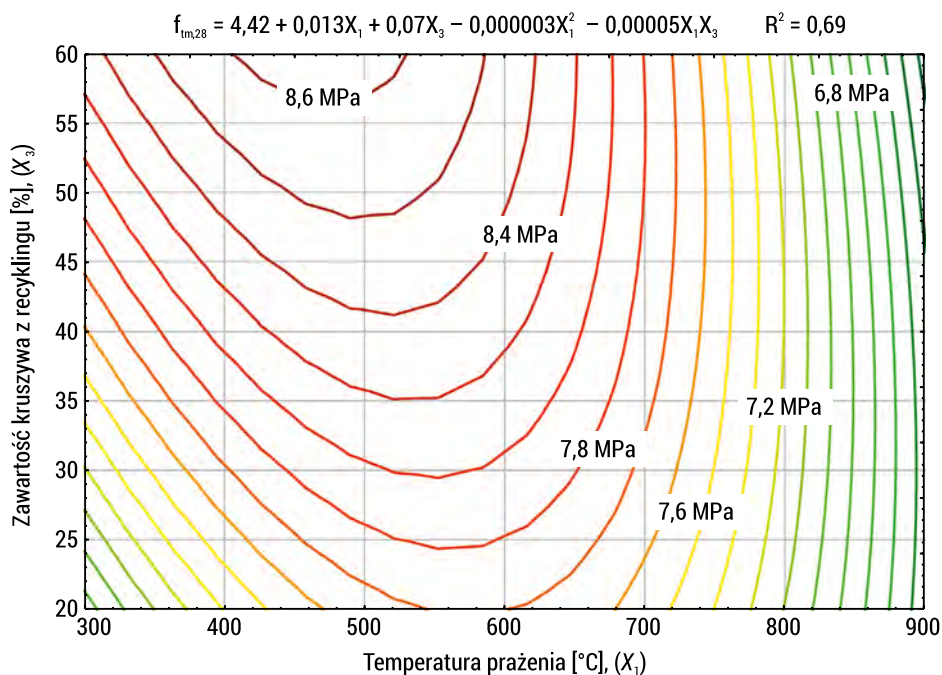
Wyniki, podobnie jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie, potwierdziły statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) oraz zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) na wytrzymałość betonu na zginanie wobec braku istotnego wpływu czasu trwania obróbki mechanicznej (X_2). Błąd standardowy estymacji (SE_e) będący miarą dopasowania modelu zamieszczonego w tabeli 4.11 do rzeczywistych wartości zmiennej wyniósł 0,49 MPa.

Na rys. 4.5 i 4.6 przedstawiono odpowiednio zmiany wytrzymałości betonu na zginanie w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1) i zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) oraz średnie wartości wyników wytrzymałości na zginanie uzyskane dla poszczególnych serii badawczych w porównaniu z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).

TABELA 4.13. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla $f_{t,28}$

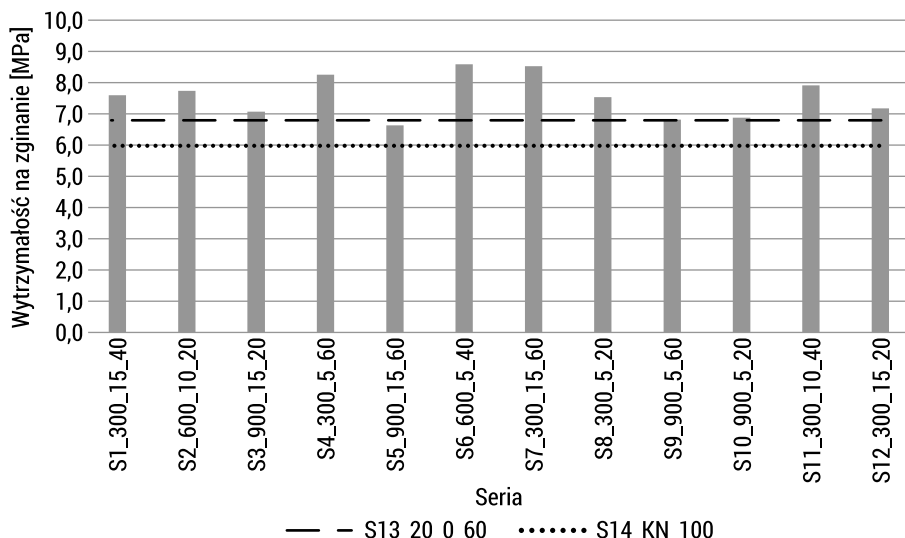
Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla $f_{t,28}$				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	494,8225	1	494,8225	2178,280	0,000000
X_1	2,5052	2	1,2526	5,514	0,004435
X_2	0,0848	2	0,0424	0,187	0,835206
X_3	0,4321	2	0,2161	0,951	0,049661
Błąd	1,1358	5	0,2272		

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.5. Zmiany wytrzymałości na zginanie betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3 (przy $X_2 = 10$ min)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.6. Średnie wartości z wyników wytrzymałości na zginanie w porównaniu z seriami kontrolnymi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

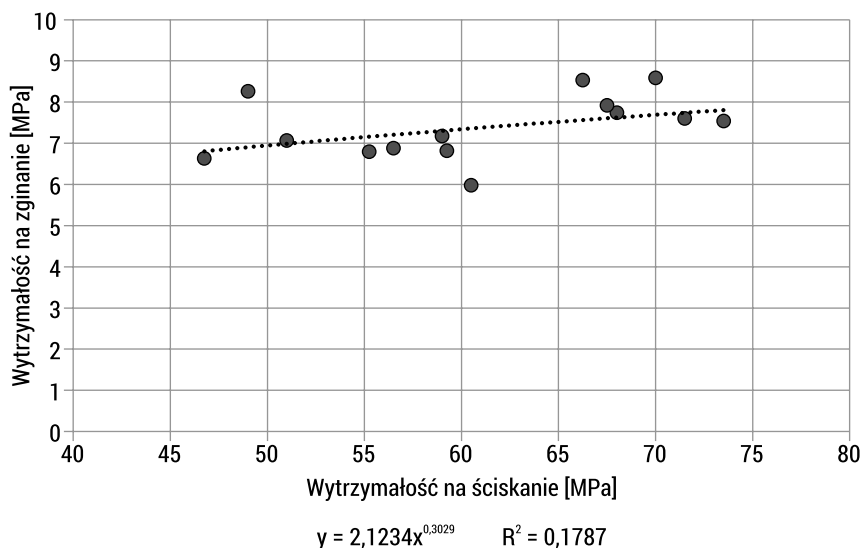
Z rys. 4.5 wynika, że najwyższą wytrzymałość na zginanie uzyskały serie z kruszywem z recyklingu poddany obróbce w zakresie 300–600°C, ze wskazaniem na 600°C. Pokrywa się to z wynikami wytrzymałości na ściskanie. Interesujące jest to, że betony z kruszywem z recyklingu wykształtowały wyższą wytrzymałość na zginanie w całym eksperymencie niż z kruszywem naturalnym, włączając w to również serię z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60), (rys. 4.6). Niektórzy autorzy także zauważyli korzystny wpływ obecności porowatej zaprawy cementowej w kruszywie z recyklingu na ten parametr betonu. Jednakże prezentowane w literaturze opinie są rozbieżne, co dokładniej przeanalizowano w rozdziale 1.3. Z punktu widzenia ich autorów ważne jest, aby kruszywo z recyklingu dozować do betonu w stanie nasyconym, co kształtuje bardziej zwartą strefę kontaktową poprzez ułatwienie procesu hydratacji cementu [53, 55, 58, 74, 76, 110].

Na rys. 4.7 przedstawiono zależność wytrzymałości na ściskanie betonu od jego wytrzymałości na zginanie w poszczególnych seriach eksperymentu. Dla poprawy przejrzystości prezentacji wyniki wartości na osi x rozpoczęto od 40 MPa.

Z rys. 4.7 wynika, że w przypadku betonów zawierających kruszywo z recyklingu wyprężone w temperaturach 300, 600 i 900°C nie zaobserwowano korelacji pomiędzy wytrzymałością betonu na zginanie f_t i na ściskanie f_c . Zwykle wytrzymałości te są od siebie ściśle zależne, chociaż nie wprost proporcjonalnie, co zaprezentowano chociażby w pracy [120] w postaci równania (4.4):

$$f_t = 0,41 \sqrt{f_{c,cube}}^3 \quad (4.4)$$

gdzie: f_t – wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu, MPa; $f_{c,cube}$ – wytrzymałość na ściskanie na próbkach kostkowych, MPa.



RYS. 4.7. Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Stosunkowo wysoki współczynnik korelacji pomiędzy wytrzymałością betonu na zginanie i na ściskanie na poziomie 0,76 zauważyła również Konopska-Piechurska i in. [109]. Z kolei w normie PN-EN 1992-1-1:2008 [N29] nie podano bezpośredniego odniesienia do wytrzymałości betonu na zginanie, ale określono zależności analityczne wytrzymałości na rozciąganie osiowe od wytrzymałości walcowej na ściskanie według (4.5) i (4.6):

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{(2/3)} \quad \text{dla } \leq C50/60 \quad (4.5)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + 0,1 f_{cm}) \quad \text{dla } > C50/60 \quad (4.6)$$

gdzie: f_{ctm} – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe, MPa; f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu po 28 dniach, MPa; f_{cm} – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości walcowej na ściskanie betonu, MPa.

Z powyższych obserwacji wynika, że korelacja pomiędzy wytrzymałością betonu na zginanie i na ściskanie ma zwykle postać wykładniczą, co oznacza, że wraz ze wzrostem f_c rośnie też f_t , ale tempo tego wzrostu jest malejące. Uzyskane w eksperymencie wyniki betonu z kruszywem z recyklingu nie potwierdzają tej prawidłowości, natomiast przyczynić się do tego mogły inne czynniki, jak chociażby rodzaj zastosowanego kruszywa grubego i drobnego, jego uziarnienie, warunki pielęgnacji

betonu czy kształt badanych próbek [164]. Należy jednak zauważyć, że we wszystkich 14 seriach eksperymentu wytrzymałość betonu na zginanie stanowiła od 10% (w serii S14_KN_100) do 11–14% (w seriach z kruszywem z recyklingu) jego wytrzymałości na ściskanie. Zwykle przyjmuje się w uproszczeniu, że stosunek f_t / f_c wynosi około 10%, przy czym z zależności zamieszczonych w normie PN-EN 1992-1-1:2008 [N29] wynika, że kształtuje się on w granicach 7–8%. Oznacza to, że obecność kruszywa z recyklingu wysokiej jakości wpływa na wzrost wytrzymałości betonu na zginanie z uwagi na lepszą przyczepność rozwiniętej powierzchni ziarna do matrycy cementowej.

Badanie modułu sprężystości

Ważnymi czynnikami kształtującymi właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe betonu są przyczepność pomiędzy zaczynem cementowym a ziarnem kruszywa grubego oraz mikrostruktura warstwy przejściowej w obszarze, gdzie występuje koncentracja naprężeń z powodu różnicy modułów sprężystości stwardniałego zaczynu i kruszywa.

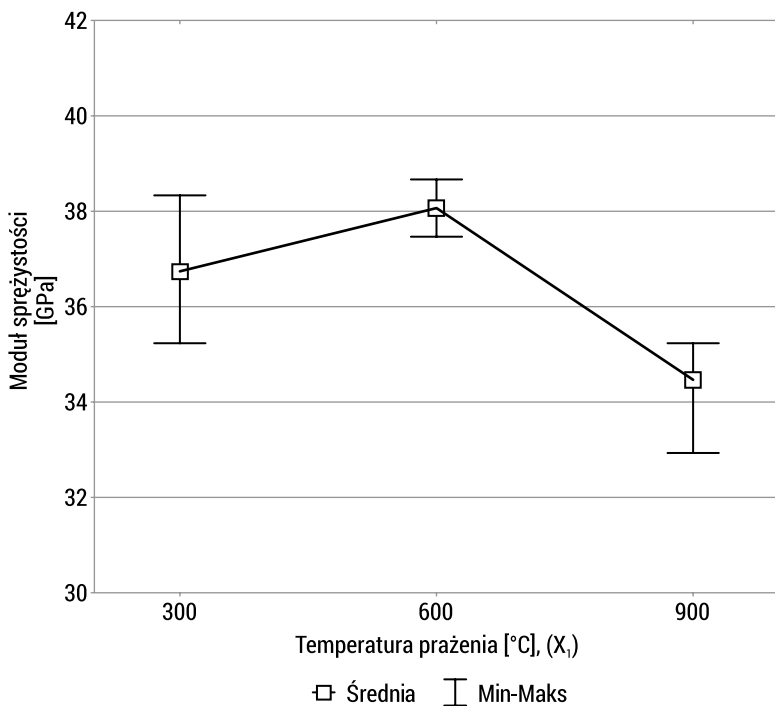
Na podstawie nierówności (4.2), gdzie $G = 0,249 < G_{kryt(0,95,12,3)} = 0,584$, ustalono, że wariancje w poszczególnych seriach badania modułu sprężystości są jednorodne. Potwierdzono również istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami wyników badań w seriach. W tabeli 4.14 przedstawiono wyniki jednowymiarowych testów istotności wpływu zmiennych X_1 , X_2 i X_3 na wartość modułu Younga (E).

TABELA 4.14. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla modułu E

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla modułu E				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	494,8225	1	494,8225	2178,280	0,000000
X_1	2,5052	2	1,2526	5,514	0,049350
X_2	0,0848	2	0,0424	0,187	0,835206
X_3	0,4321	2	0,2161	0,951	0,446613
Błąd	1,1358	5	0,2272		

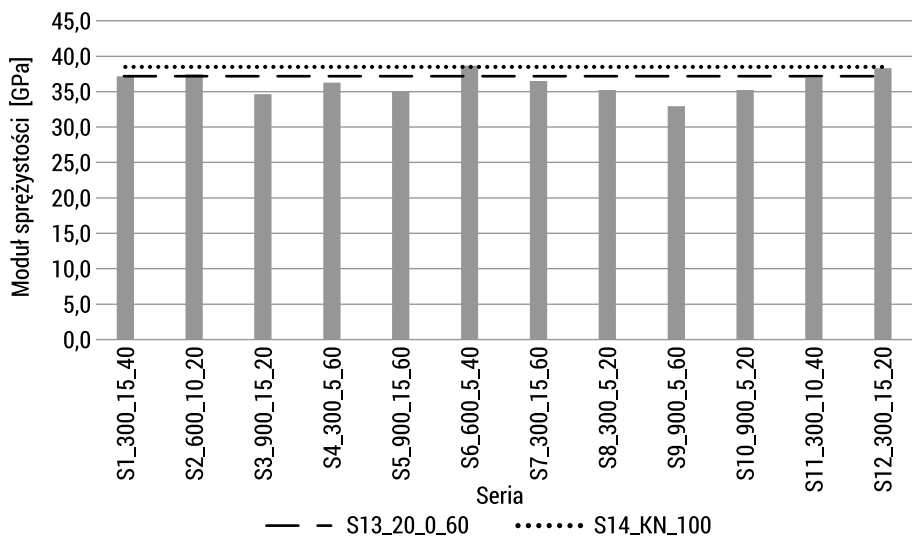
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki potwierdziły wyłącznie statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) na wartość modułu sprężystości, dlatego na rys. 4.8 i 4.9 przedstawiono odpowiednio zmiany wartości tego parametru w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1) oraz średnie wartości z wyników badania modułu sprężystości uzyskane dla poszczególnych serii badawczych w porównaniu z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100). Błąd standardowy estymacji wyniósł w tym badaniu 0,89 GPa.



RYS. 4.8. Zmiany modułu sprężystości betonu w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1)

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

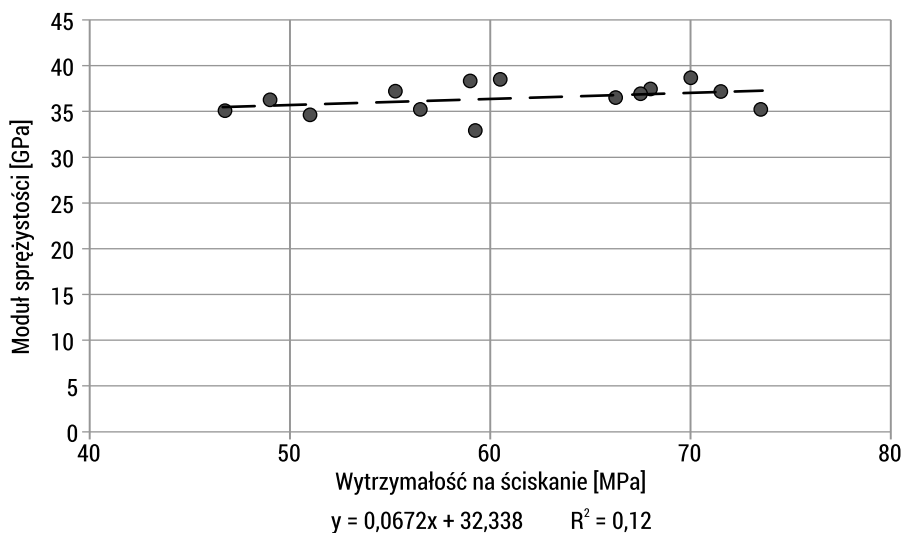


RYS. 4.9. Średnie wartości z wyników modułu sprężystości w porównaniu z seriami kontrolnymi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z danych przedstawionych na rys. 4.8 i 4.9 wynika, że największy moduł sprężystości zaobserwowano dla serii z kruszywem z recyklingu prażonym w temperaturze 600°C. Proces obróbki termiczno-mechanicznej spowodował usunięcie z powierzchni kruszywa części starej zaprawy cementowej, co poprawiło jego przyczepność do nowego zaczynu. W ten sposób uzyskano wartość modułu sprężystości równą 38 GPa porównywalną z serią kontrolną. W przypadku obecności kruszywa prażonego w 300°C zauważono około 4-procentowy spadek modułu sprężystości betonu również w odniesieniu do serii kontrolnej. Wyjątkiem są serie z kruszywem prażonym w temperaturze 900°C, gdzie odnotowano uszkodzenie struktury kruszywa i pogorszenie badanej właściwości betonu nawet o około 14% w porównaniu z serią kontrolną (S14_KN_100).

W badaniach prezentowanych w literaturze zwykle obserwowano spadek wartości modułu sprężystości w obecności kruszywa z recyklingu nawet o około 25% [66], tłumacząc to większą podatnością tych kruszyw na odkształcenia niż naturalnych z powodu obecności zaprawy cementowej [47]. Na rys. 4.10 przedstawiono zależność modułu sprężystości dla poszczególnych 14 serii od wytrzymałości betonu na ściskanie.



RYS. 4.10. Zależność wartości modułu sprężystości od wytrzymałości betonu na ściskanie

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z równania zamieszczonego na rys. 4.10 opisującego zależność wynika, że w eksperymencie nie wystąpiła korelacja między wytrzymałością betonu na ściskanie a modułem sprężystości. Najwyższą wartość modułu Younga uzyskano w serii z kruszywem prażonym w 600°C i była ona najbardziej zbliżona do serii kontrolnej (S14_KN_100) z kruszywem naturalnym. W większości serii moduł sprężystości osiągnął niższe wyniki w porównaniu z obliczonymi na podstawie zależności normowej (4.7) [N29] nawet o 10%.

$$E = 22(0,1f_{cm})^{0,3} \quad (4.7)$$

gdzie: E – moduł sprężystości, GPa; f_{cm} – średnia wartość z wyników badania wytrzymałości walcowej na ściskanie betonu, MPa.

W większości serii wartość E zmniejszyła się w granicach 3–10% w porównaniu z serią kontrolną. W seriach z kruszywem prażonym w 900°C spadek ten wynosił 14%. Nie ma to jednak potwierdzenia w badaniach innych autorów, którzy uzyskali znacznie większe spadki modułu Younga wraz ze wzrostem zawartości grubego kruszywa z recyklingu [44, 215]. Przy zawartości kruszywa z recyklingu w ilości 100% odnotowano spadek modułu sprężystości o 33% głównie z uwagi na obniżoną gęstość tego kruszywa [215]. Potwierdza to wysoką jakość kruszywa uzyskanego w wyniku zaproponowanej obróbki termiczno-mechanicznej.

Gęstość objętościowa

Na podstawie nierówności (4.2), gdzie $G = 0,215 < G_{kryt(0,95,12,3)} = 0,584$, ustalono, że wariancje w poszczególnych seriach badania gęstości objętościowej są jednorodne. Wobec potwierdzonej istotności różnic pomiędzy średnimi wartościami wyników badań w seriach przeprowadzono jednowymiarowe testy istotności wpływu zmiennych X_1 , X_2 i X_3 na wartość gęstości objętościowej betonu przy poziomie istotności równym 0,10, które zaprezentowano w tabeli 4.15.

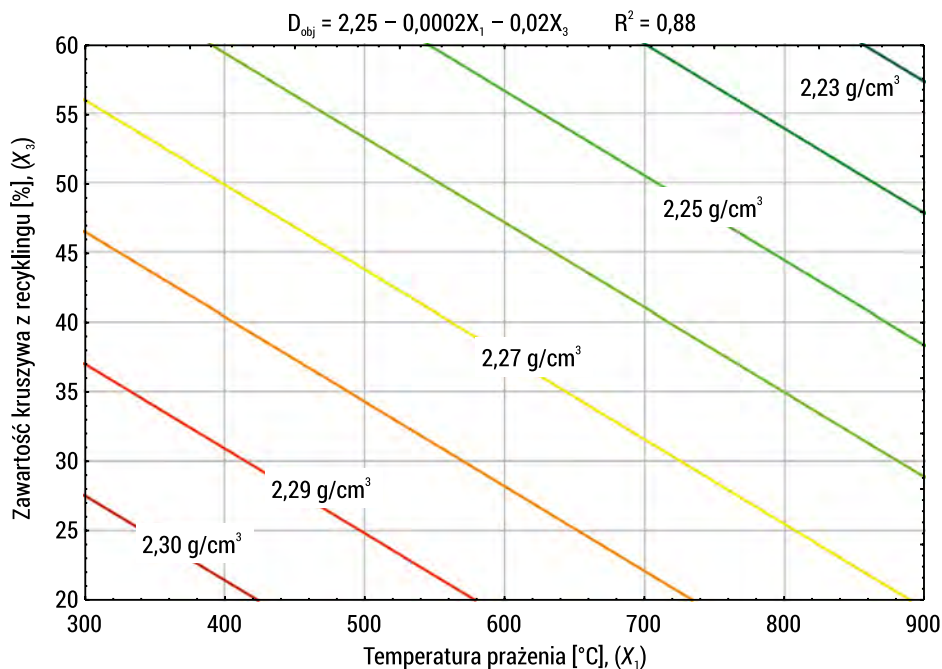
TABELA 4.15. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla D_{obj}

Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla D_{obj}				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	43,77771	1	43,77771	128608,6	0,000000
X_1	0,00227	2	0,00113	3,3	0,090205
X_2	0,00047	2	0,00023	0,7	0,544827
X_3	0,00414	2	0,00207	6,1	0,045760
Błąd	0,00170	5	0,00034		

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

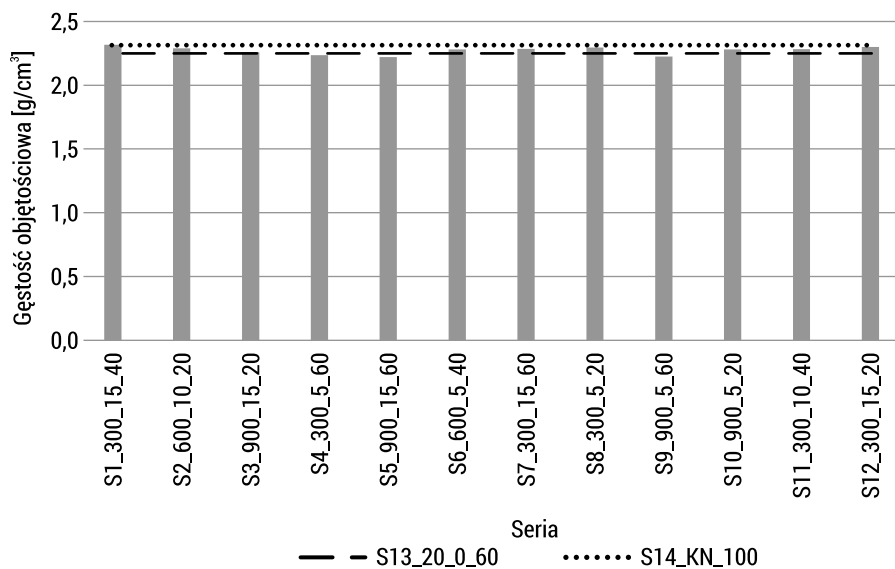
Wyniki potwierdziły wyłącznie statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) oraz zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) na gęstość objętościową betonu przy jednoczesnym braku wpływu czasu trwania obróbki mechanicznej (X_2). Błąd standardowy estymacji wyniósł 0,23 g/cm³.

Na rys. 4.11 i 4.12 przedstawiono odpowiednio zmiany wartości tego parametru w zależności od statystycznie istotnych czynników oraz średnie wartości wyników badania gęstości objętościowej uzyskane dla poszczególnych serii badawczych w porównaniu z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).



RYS. 4.11. Zmiany gęstości objętościowej betonu w zależności od X_1 i X_3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.12. Średnie wartości z wyników gęstości objętościowej w porównaniu z seriami kontrolnymi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z rys. 4.12 wynika, że najwyższą gęstością charakteryzował się beton z kruszywem naturalnym, co wynika z najwyższej gęstości obecnego w nim granitu. Wzrost zawartości kruszywa z recyklingu wpłynął na obniżenie gęstości betonu. Jednakże należy zauważyć, że różnice w gęstości betonu w całym eksperymencie są niewielkie i sięgają rzędu 4%, co jest efektem dobrej jakości gruzu uzyskanego z betonu źródłowego.

Nasiąkliwość

Wobec spełnienia nierówności (4.2), gdzie $G = 0,184 < G_{kryt(0,95,12,3)} = 0,584$, stwierdzono, że wariancje w poszczególnych seriach badania nasiąkliwości są jednorodne. Potwierdzono również, że różnice pomiędzy średnimi wartościami wyników badań w seriach są istotne. W tabeli 4.16 przedstawiono wyniki jednowymiarowych testów istotności wpływu zmiennych X_1 , X_2 i X_3 na nasiąkliwość betonu.

TABELA 4.16. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla N

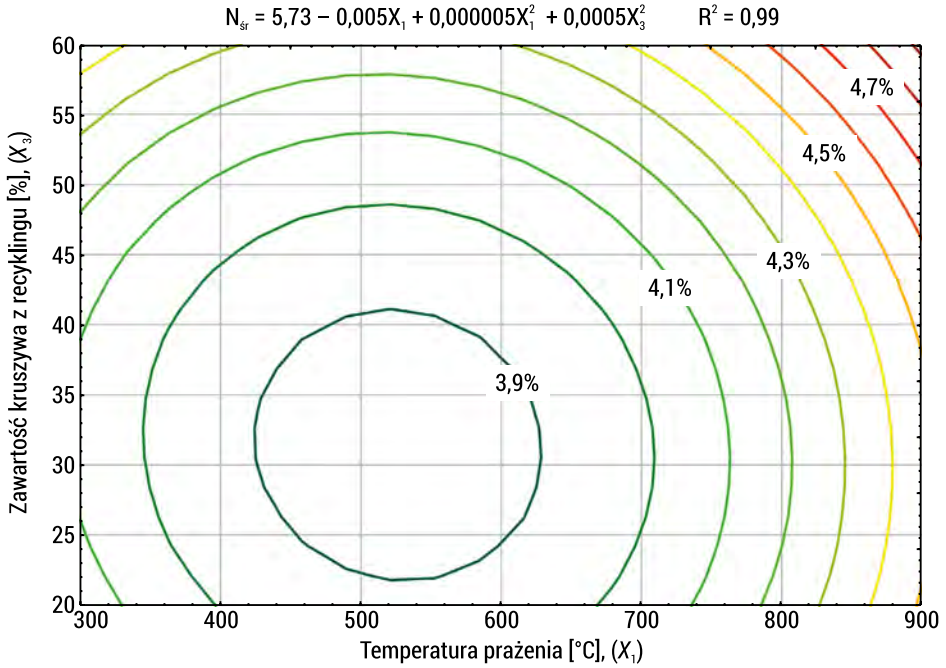
Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla N				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	157,3724	1	157,3724	20925,89	0,000000
X_1	0,4345	2	0,2172	28,89	0,001791
X_2	0,0232	2	0,0116	1,54	0,300754
X_3	0,2716	2	0,1358	18,06	0,005156
Błąd	157,3724	1	157,3724	20925,89	0,000000

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki potwierdziły statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) oraz zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) na nasiąkliwość betonu wobec braku istotnego wpływu czasu trwania obróbki mechanicznej (X_2). Błąd standardowy estymacji kształtował się na poziomie 0,26%.

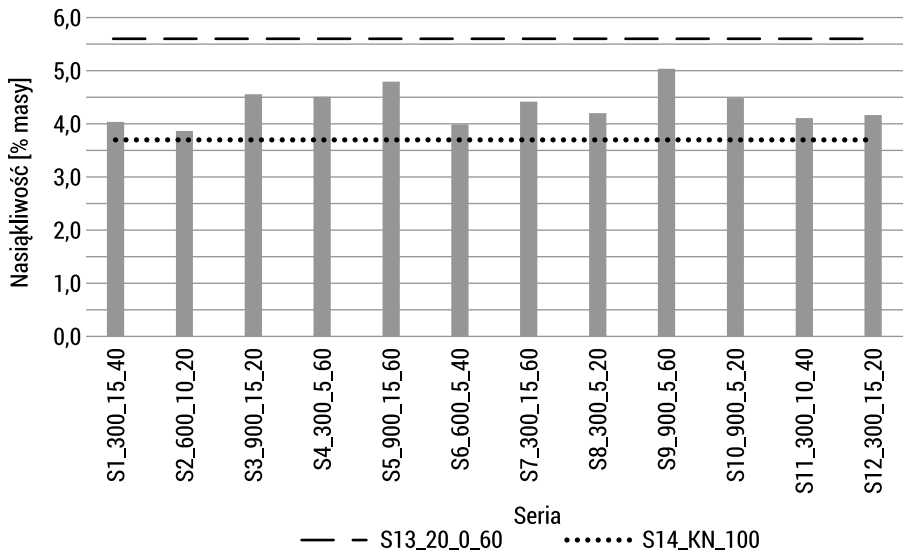
Zmiany nasiąkliwości betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3 przedstawiono na rys. 4.13. Na rys. 4.14 zamieszczono porównanie średnich wartości wyników z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).

Najniższą nasiąkliwość betonu zaobserwowano w przypadku zastosowania 20–40% kruszywa z recyklingu poddanego prażeniu w temperaturze 600°C. W takim wypadku nasiąkliwość zbliża się do uzyskanej dla betonu kontrolnego ($\leq 4\%$). Jet to spowodowane skutecznym usunięciem porowatej zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa z recyklingu. Wysoka nasiąkliwość tej zaprawy stwarza wiele problemów związanych z ustaleniem ilości wody dodanej do mieszanki betonowej z kruszywem z recyklingu w celu uzyskania wymaganej konsystencji. W serii zawierającej kruszywo niepoddane obróbce (S13_20_0_60) nasiąkliwość betonu w odniesieniu do serii kontrolnej z kruszywem naturalnym wzrosła z 3,7% do 5,6%.



RYS. 4.13. Zmiany nasiąkliwości betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.14. Średnie wartości z wyników nasiąkliwości w porównaniu z seriami kontrolnymi

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Nawet kilkukrotnie wyższą nasiąkliwość betonów z kruszywem z recyklingu w porównaniu z naturalnym zaobserwowali inni badacze [99, 113, 126, 191, 259]. Usunięcie zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa w wyniku zaproponowanej obróbki ułatwia proces projektowania i wykonania mieszanki betonowej oraz poprawia właściwości betonu z kruszywem z recyklingu, zbliżając je do właściwości betonu kontrolnego.

Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem (wodoprzepuszczalność)

Wobec spełnienia nierówności (4.2), gdzie $G = 0,458 < G_{kryt(0,95,12,3)} = 0,584$, stwierdzono, że wariancje w poszczególnych seriach badania głębokości penetracji wody są jednorodne. Potwierdzono również, że różnice pomiędzy średnimi wartościami wyników badań w seriach są istotne. W tabeli 4.17 przedstawiono wyniki jednowymiarowych testów istotności wpływu zmiennych X_1 , X_2 i X_3 na tę cechę betonu

TABELA 4.17. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla wodoprzepuszczalności (WP)

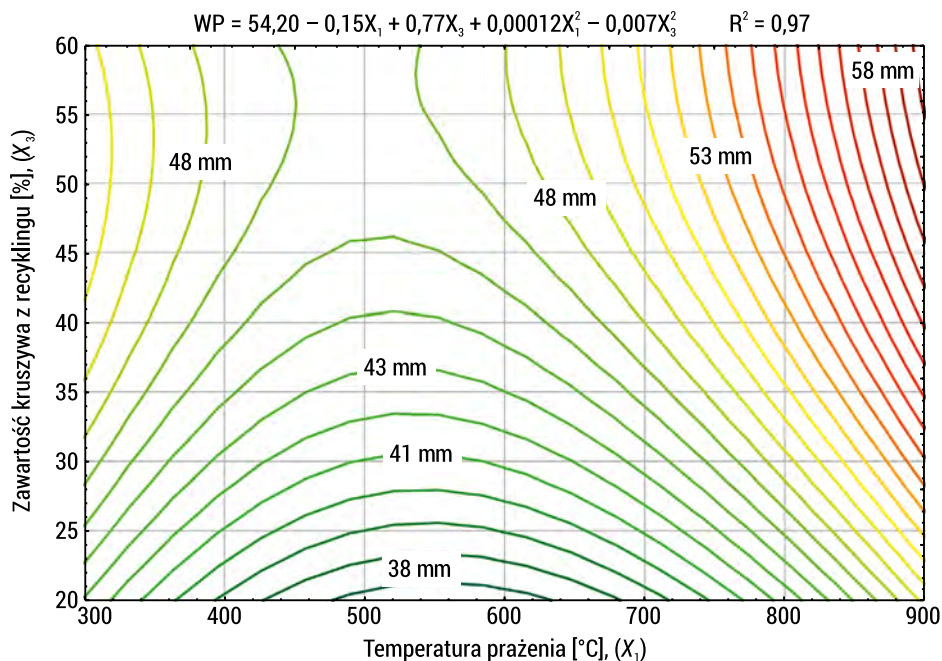
Efekt	Jednowymiarowe testy istotności dla WP				
	SS	Stopnie swobody	MS	F	P
Wyraz wolny	21300,03	1	21300,03	1236,999	0,000000
X_1	272,40	2	136,20	7,910	0,028266
X_2	18,95	2	9,47	0,550	0,608176
X_3	266,66	2	133,33	7,743	0,029428
Błąd	86,10	5	17,22		

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki potwierdziły statystycznie istotny wpływ temperatury prażenia (X_1) oraz zawartości kruszywa z recyklingu (X_3) na głębokość penetracji betonu przez wodę pod ciśnieniem wobec braku istotnego wpływu czasu trwania obróbki mechanicznej (X_2). Błąd estymacji w tym badaniu wyniósł 3,39 mm.

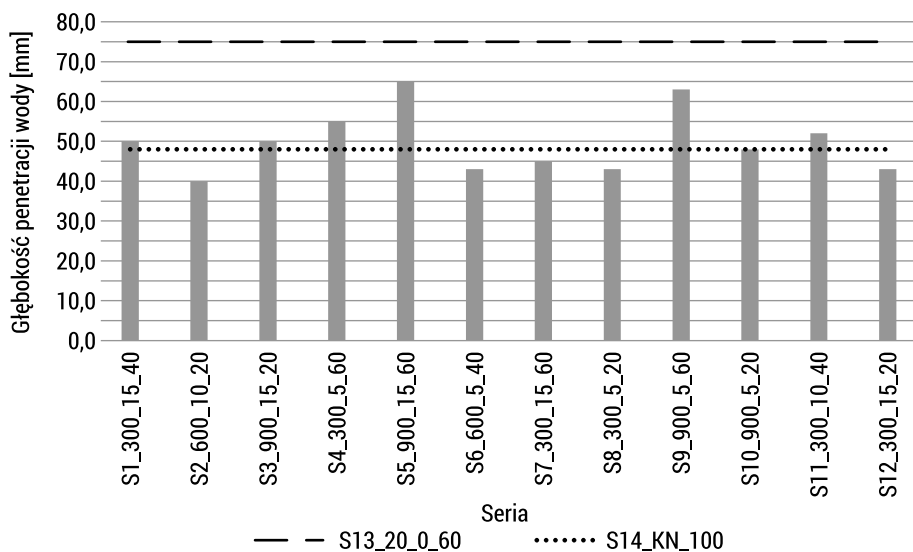
Zmiany wartości wodoprzepuszczalności betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3 przedstawiono na rys. 4.15. Na rys. 4.16 zamieszczono porównanie średnich wartości wyników z serią z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) i z serią kontrolną z kruszywem naturalnym (S14_KN_100).

Jak wynika z rys. 4.15, głębokość penetracji wody pod ciśnieniem rośnie wraz ze wzrostem zawartości kruszywa z recyklingu. Można też stwierdzić, że obróbka termiczno-mechaniczna kruszywa z recyklingu do temperatury 600°C wpłynęła korzystnie na kapilarną strukturę betonu, zmniejszając głębokość penetracji wody w porównaniu z betonem kontrolnym o 6–10%. Wynikać to może z tworzenia się szczelnej strefy kontaktowej w betonie z takim kruszywem, gdzie produkty dehydratacji pozostałe na powierzchni ziarna wchodzi w reakcję chemiczną z nowym zaczynem cementowym, tworząc zwartą strukturę.



RYS. 4.15. Zmiany wodoprzepuszczalności betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.16. Średnie wartości z wyników głębokości penetracji wody przez beton w porównaniu z seriami kontrolnymi

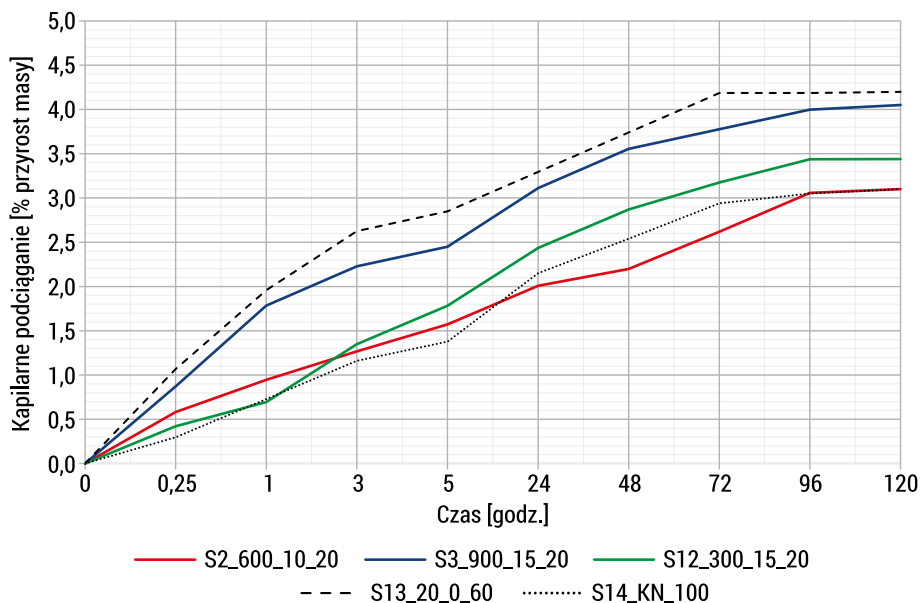
ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Metodykę kształtowania tej strefy kontaktowej opisano w rozdziale 1.5. Jak można przypuszczać, największą głębokość penetracji wody równą 75 mm uzyskano dla serii z kruszywem z recyklingu niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) z uwagi na najwyższą zawartość porowatej zaprawy cementowej wyraźnie pogarszającej wodoszczelność betonu (rys. 4.16). Podobnie niekorzystne wyniki uzyskano dla serii zawierających 60% kruszywa z recyklingu prażonego w 900°C. Jak wcześniej stwierdzono, zabieg ten uszkodził strukturę ziaren kruszywa, co spowodowało wzrost ich porowatości i przepuszczalności wody. Należy też zauważyć, że głębokość penetracji wody pod ciśnieniem zaobserwowana w eksperymencie jest znacząca, biorąc pod uwagę, że współczynnik w/c betonu wynosił 0,40. Norma przedmiotowa PN-EN 12390-8:2019-08 [N24] nie podaje jednak sposobu przygotowania próbek przed badaniem, szczególnie w zakresie konieczności i sposobu ich suszenia. Wodoprzepuszczalność betonu zależy nie tylko od jego porowatości, lecz także od wielkości, rozkładu, kształtu, „krętości” i ciągłości porów [164]. Z tego względu należałoby przeanalizować strukturę porów w badanym betonie, aby wyjaśnić zaobserwowaną znaczącą głębokość penetracji wody.

Kapilarne podciąganie wody

W przypadku tego badania nie opracowano równania regresji opisującego zmiany wartości kapilarnego podciągania wody, ponieważ uwzględniono tu dodatkowy czynnik w postaci czasu przeprowadzenia pomiaru w zakresie od 0 do 120 godzin. Zdaniem autorki obserwacja dynamiki podciągania kapilarnego wody w tym wypadku jest bardziej istotna poznawczo niż analiza ilości wchłoniętej wody w końcowej fazie eksperymentu. Na rys. 4.17 przedstawiono wartości średnie wyników badania kapilarnego podciągania wody przez beton wyrażone procentowym przyrostem masy próbek w czasie. Z uwagi na wymaganą przejrzystość zaprezentowano rezultaty dotyczące wybranych serii w eksperymencie różniących się temperaturą prażenia przy ilości kruszywa z recyklingu równej 20% oraz dla obu serii porównawczych.

Z zależności przedstawionych na rys. 4.17 wynika, że największą tendencję do kapilarnego podciągania wody wykazały betony z kruszywem niepoddanym obróbce (S13_20_0_60) oraz z kruszywem prażonym w 900°C (seria S3_900_15_20). Jest to zbieżne z wynikami uzyskanymi w przypadku badania wodoprzepuszczalności. Należy zauważyć, że przebieg podciągania wody w tych seriach był intensywniejszy, szczególnie w pierwszych godzinach badania, na co miała wpływ obecność zaprawy cementowej o porowatej strukturze. Również wyniki badań innych autorów potwierdziły znaczny wzrost kapilarnego podciągania wody w przypadku kruszyw z recyklingu w porównaniu z kruszywem naturalnym [113, 271]. W serii (S12_300_15_20) z kruszywem prażonym w 300°C odnotowano nieco większe kapilarne podciąganie wody niż w serii zawierającej kruszywo wyprażone w 600°C (S2_600_10_20), co wynika z niedostatecznego stopnia oczyszczenia kruszywa z recyklingu z zaprawy cementowej i kształtowania strefy kontaktowej w nowym betonie. W serii (S2_600_10_20) przebieg badania był zbliżony do wyników uzyskanych dla betonu kontrolnego, co potwierdza, że pozostałe na powierzchni kruszywa produkty dehydratacji weszły w reakcję z nowym zaczynem, tworząc zwartą strukturę w obszarze strefy kontaktowej.



RYS. 4.17. Średnie wartości z wyników kapilarnego podciągania wody dla wybranych serii

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4.1.4. Podsumowanie wyników badań

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że odpowiednia obróbka termiczno-mechaniczna gruzu betonowego sprzyja uzyskaniu grubego kruszywa z recyklingu wysokiej jakości, o parametrach zbliżonych do kruszywa naturalnego. Dzięki temu może być ono stosowane jako wartościowy składnik betonów cementowych nawet wysokiej wytrzymałości (powyżej 60 MPa). W eksperymencie ustalono, że przy zastąpieniu 60% grubego kruszywa naturalnego (granitu) kruszywem z recyklingu poddanym prażeniu w temperaturze 600°C możliwe jest uzyskanie betonu o parametrach zbliżonych do betonu kontrolnego, a w przypadku wytrzymałości na ściskanie i zginanie nawet lepszych. Należy również zauważyć, że przy badanych cechach betonu czas trwania obróbki mechanicznej kruszywa z recyklingu po prażeniu nie był czynnikiem wpływającym statystycznie istotnie na te właściwości. Zdaniem autorki wniosek ten nie jest dostatecznie satysfakcjonujący, ponieważ określenie czasu trwania obróbki mechanicznej praktycznie zależne jest od temperatury wygrzewania. W 600°C całkowicie wystarczająca jest obróbka trwająca maksymalnie 5 minut, przy czym jest ona niezbędna dla mechanicznego oddzielenia zaprawy cementowej z powierzchni ziarna kruszywa. Samo wyprażenie uszkadza strefę kontaktową w gruzie betonowym, ale nie powoduje automatycznego rozdzielania ziaren od zaprawy cementowej. W niższych temperaturach,

takich jak 300°C, czas trwania obróbki mechanicznej jest czynnikiem zasadniczym w usuwaniu tej zaprawy z powierzchni kruszywa z recyklingu, co potwierdzono wynikami prezentowanymi w tabeli 4.6. Oddziaływanie na kruszywo z recyklingu temperaturą rzędu 300°C powoduje częściową dehydratację niektórych faz występujących w zaczynie cementowym, jak ettryngit czy gips, co częściowo osłabia ich strukturę, ale nie jest wystarczająco skuteczne bez towarzyszenia wydłużonej obróbki mechanicznej (do 15 minut). Zaobserwowano również, że w wyniku stosowania kruszywa prażonego w temperaturze 600°C możliwe jest uzyskanie nawet lepszych parametrów betonu w porównaniu z serią kontrolną, co miało miejsce chociażby w przypadku wytrzymałości na ściskanie i na zginanie. Odpowiada za to ukształtowanie powierzchni kruszywa z recyklingu po prażeniu w 600°C, dzięki czemu w strefie kontaktowej tworzą się trwałe wiązania z nowym zaczynem cementowym. W eksperymencie potwierdzono, że temperatura wygrzewania równa 900°C spowodowała dodatkowo uszkodzenie ziaren granitu, co było główną przyczyną zdecydowanego pogorszenia zarówno właściwości kruszywa, konsystencji mieszanki betonowej, jak i właściwości stwardniałego betonu i nie jest ona zalecana do stosowania.

4.2. Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant I

4.2.1. Cel badań

Przeprowadzone badania miały na celu weryfikację parametrów metody przetwarzania gruzu betonowego, głównie w zakresie temperatury jego wyprażania, pod kątem wpływu na właściwości pucolanowe uzyskanej frakcji drobnej z recyklingu w aspekcie kształtowania wybranych właściwości kompozytu cementowego. Ważnym aspektem eksperymentu było określenie współczynnika aktywności pucolanowej metodą fizyczną. Frakcję drobną stanowił przygotowany do tego celu zmielony zaczyn cementowy, który zastosowano w charakterze zamiennika części spoiwa.

4.2.2. Metodyka badań

Do realizacji badań wykorzystano zmielony zaczyn cementowy będący odpowiednikiem drobnej frakcji z recyklingu, przygotowany według procedury opisanej w rozdziale 3.3, gdzie podano również właściwości fizyczno-mechaniczne, chemiczne i mikrostrukturalne tego materiału. Eksperyment badawczy obejmował wykonanie

9 serii podstawowych oraz serię 10 – kontrolną z cementem CEM I 42,5R (pozbawioną zmielonego zaczynu cementowego [ZC]). Próbkę miały formę beleczek o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm. W eksperymencie zaplanowano dwie zmienne:

- X_1 – temperatura wygrzewania: 20°C (brak wygrzewania), 200°C, 400°C, 600°C, 800°C oraz 1000°C,
- X_2 – procentowa zawartość zmielonego zaczynu cementowego: 0%, 25% i 50% masy cementu.

Czynniki i ich zakresy zmienności dobrano tak, aby mogły mieć wpływ na zmiany właściwości kompozytu cementowego. Temperatury wygrzewania są analogiczne jak w rozdziale 3.3, natomiast ilość zmielonego zaczynu cementowego jako zamiennika cementu określono na poziomie 0% (dla serii porównawczej), 25% dla ustalenia jego aktywności pucolanowej oraz 50%, co wynikało z metodyki planowania eksperymentu. Plan eksperymentu przedstawiono w tabeli 4.18.

TABELA 4.18. Plan eksperymentu

Nr serii	Wartości zmiennych	
	X_1 , °C	X_2 , % m.c.
1	2	3
S1_20°_25%	20	25
S2_200°_25%	200	25
S3_400°_25%	400	25
S4_600°_25%	600	25
S5_800°_25%	800	25
S6_1000°_25%	1000	25
S7_20°_50%	20	50
S8_400°_50%	400	50
S9_800°_50%	800	50
S10_CEM_100%	seria kontrolna	

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Docelowy skład zaprawy cementowej na trzy beleczki dla poszczególnych serii bazował na składzie normowej zaprawy cementowej (tabela 4.19, kol. 4). W seriach S1–S6 zastąpiono wagowo 25% cementu zmielonym zaczynem cementowym (ZC), a w seriach S7–S9 odpowiednio 50%. Serię ostatnią, S10, przygotowano na bazie cementu CEM I 42,5R. Skład zaprawy cementowej w zależności od serii badawczej zamieszczono w tabeli 4.19.

TABELA 4.19. Skład zaprawy cementowej na trzy beleczki

Składnik	Seria		
	S1-S6	S7-S9	S10 (kontrolna)
1	2	3	4
Cement CEM I 42,5R (c), g	337,5	225,0	450,0
Zaczyn cementowy (ZC), g	112,5	225,0	0
w/(c + ZC)	0,50	0,50	0,50
Woda, g	225,0	225,0	225,0
Piasek normowy CEN, g	1350,0	1350,0	1350,0

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

W eksperymencie użyto najbardziej powszechnego i dostępnego w okresie realizacji badań cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, którego właściwości podano w tabeli 4.4. Do realizacji planu badań przygotowano beleczki z zaprawy cementowej o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm, które po rozformowaniu pielęgnowano w wodzie w warunkach laboratoryjnych do uzyskania wieku niezbędnego do wykonania badań. Badania zapraw cementowych ze zmielonym zaczynem cementowym zrealizowano zgodnie z wykazem zamieszczonym w tabeli 4.20.

TABELA 4.20. Wykaz wykonanych badań właściwości zaprawy cementowej

Nazwa badania	Wymiary próbki, mm	Liczba powtórzeń, szt.	Podstawa badania
1	2	3	4
Badanie wytrzymałości na ściskanie po 7, 28 i 90 dniach (R_c), MPa	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-EN 196-1:2016-07 [N27]
Badanie wytrzymałości na zginanie po 7, 28 i 90 dniach (R_f), MPa	$40 \times 40 \times 160$ (połówki)	6	PN-EN 196-1:2016-07 [N27]
Badanie wskaźnika aktywności po 28 i 90 dniach (WA), %	–	3	PN-EN 450-1:2012 [N32]
Badanie nasiąkliwości (N), %	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-B-04500:1985 [N11]
Badanie gęstości objętościowej (D_o), g/cm ³	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-EN 1015-10:2001 [N13]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4.2.3. Wyniki badań i ich analiza

W tabeli 4.21 przedstawiono wartości średnie z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych zapraw cementowych przygotowanych z użyciem zmielonego zaczynu cementowego prażonego w temperaturach 20–1000°C (stanowiącego w pracy odpowiednik drobnej frakcji z recyklingu pozbawionej zanieczyszczeń i wtrąceń kruszywa) w ilości 25% i 50% masy cementu oraz zaprawy kontrolnej (seria S10_CEM), na podstawie planu badań zamieszczonego w tabeli 4.18. Podano również odchylenia standardowe wyników w poszczególnych seriach.

W odniesieniu do wyników przedstawionych w tabeli 4.21 można stwierdzić, że wytrzymałość zapraw na zginanie i na ściskanie rosła w czasie we wszystkich seriach badawczych. Natomiast najwyższą wytrzymałość zarówno na zginanie, jak i na ściskanie w eksperymencie w porównaniu z zaprawą kontrolną (S10_CEM) odnotowano w serii S4_600°_25%, zawierającej 25% zmielonego zaczynu cementowego wyprażonego w 600°C. Stanowiły one 80–87% oraz 70–84% wytrzymałości serii kontrolnej odpowiednio na zginanie i na ściskanie w zależności od czasu dojrzewania. Przy zastosowaniu 25% zaczynu prażonego w 800°C i w 1000°C odnotowano spadek wytrzymałości na ściskanie rzędu 45–50% w porównaniu z serią kontrolną, co świadczy o tym, że dekarbonatyzacja węgla wapnia zawartego w drobnej frakcji z recyklingu w wyniku wygrzewania wpływa niekorzystnie na właściwości wytrzymałościowe nowych kompozytów.

Najmniejszą nasiąkliwość równą 8,5% uzyskano w przypadku serii kontrolnej, natomiast najbardziej do niej zbliżoną nasiąkliwość, równą 8,6%, odnotowano w serii S4_600°_25%, zawierającej 25% zmielonego zaczynu wyprażonego w 600°C. Odpowiada to też najwyższej uzyskanej wytrzymałości na zginanie i na ściskanie (nie biorąc pod uwagę serii kontrolnej). Wyraźny wzrost nasiąkliwości kompozytu nawet do 16,4% związany był z zastosowaniem zmielonego zaczynu w ilości 50% masy cementu. Wynikało to ze wzrostu porowatości tego zaczynu w efekcie prażenia, czego dowodem jest chociażby jego mała gęstość nasypowa (tabela 3.6). Także gęstość objętościowa kompozytów zawierających 50% zmielonego zaczynu cementowego spadła i osiągnęła najniższą wartość w serii S9_800°_50% równą 1,84 g/cm³, co stanowi 17-procentową redukcję w porównaniu z serią kontrolną.

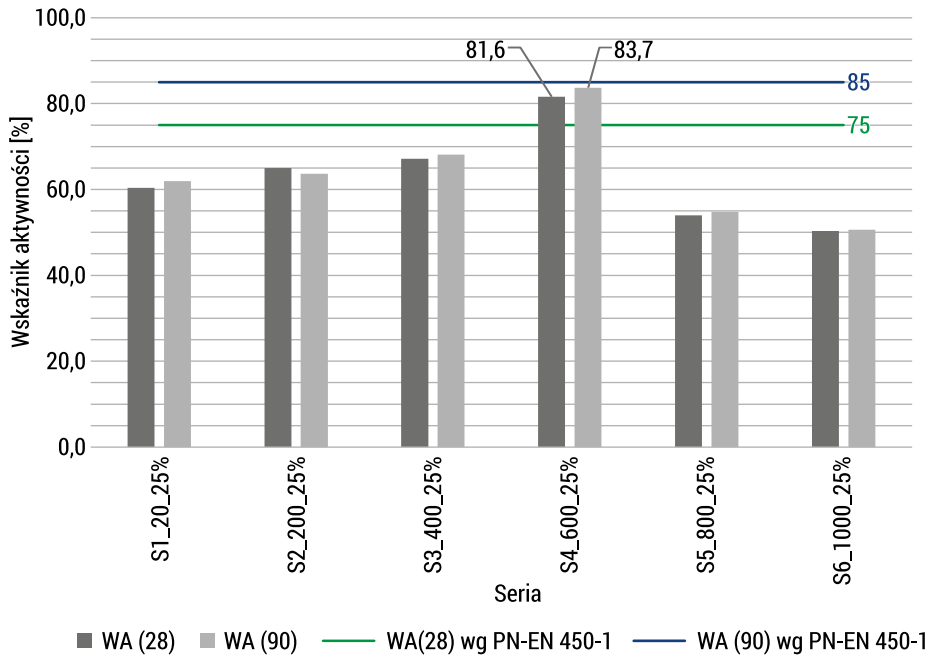
Jednym z istotnych parametrów jakościowych dodatków droбноziarnistych stosowanych do betonu według normy PN-EN 450-1 [N29] jest wskaźnik aktywności (WA). Wyraża on stosunek procentowy wytrzymałości na ściskanie beleczek ze znormalizowanej zaprawy (wykonanych z użyciem 75% masy cementu porównawczego i 25% masy dodatku – w realizowanym eksperymencie był to zmielony zaczyn cementowy poddany wygrzewaniu) do wytrzymałości na ściskanie badanych beleczek ze znormalizowanej zaprawy, będących w tym samym wieku, wykonanych z użyciem 100% cementu porównawczego. Na rys. 4.18 przedstawiono procentowe wartości wskaźnika aktywności zmielonego zaczynu cementowego poddanego obróbce termicznej na podstawie wyników badania wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych odpowiednio po 28 i 90 dniach dojrzewania.

TABELA 4.21. Wartości średnie z wyników badań właściwości kompozytów cementowych

Nr serii	Wytrzymałość na zginanie R_n MPa				Wytrzymałość na ściskanie R_c MPa				WA ^{*)} %		Nasiąkli- wość N_z %		Gęstość objętościowa, D_z , g/cm ³					
	$S(R_{f,7})$		$S(R_{f,28})$		$S(R_{f,90})$		$S(R_{c,7})$		$S(R_{c,28})$		$S(R_{c,90})$		28 dni		90 dni			
	7 dni	28 dni	90 dni	7 dni	28 dni	90 dni	7 dni	28 dni	90 dni	28 dni	90 dni	N_z	$S(N_z)$	D_z	$S(D_z)$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
S1_20°_25%	5,33	0,25	6,32	0,20	6,38	0,21	25,21	1,54	30,25	3,36	32,41	1,39	60,4	62,0	9,4	0,02	2,08	0,02
S2_200°_25%	5,49	0,55	6,50	0,47	7,22	0,36	22,85	1,48	32,58	2,34	33,28	1,42	65,0	63,6	9,2	0,18	2,07	0,03
S3_400°_25%	5,25	0,20	6,75	0,23	6,99	0,25	26,90	1,33	33,64	1,11	35,65	1,25	67,1	68,2	9,3	0,05	2,10	0,02
S4_600°_25%	5,74	0,35	6,78	0,26	7,58	0,21	28,82	1,42	40,91	1,95	43,78	2,78	81,6	83,7	8,6	0,14	2,19	0,01
S5_800°_25%	5,68	0,35	6,93	0,46	6,97	0,35	22,86	2,90	27,04	3,86	28,65	3,21	54,0	54,8	8,7	0,16	2,14	0,04
S6_1000°_25%	5,52	0,36	7,07	0,51	7,11	0,17	22,15	3,58	25,23	5,18	26,47	4,75	50,3	50,6	8,9	0,13	2,12	0,02
S7_20°_50%	3,91	0,21	4,52	0,31	5,00	0,24	11,76	1,21	15,41	1,55	15,28	2,64	30,7	29,2	10,7	0,11	2,03	0,02
S8_400°_50%	3,33	0,35	3,71	0,15	3,77	0,35	11,22	2,20	15,26	1,76	16,63	1,25	30,4	31,8	11,3	0,25	1,95	0,02
S9_800°_50%	1,08	0,17	1,19	0,07	1,41	0,35	2,04	0,66	2,45	1,22	2,54	1,54	4,9	4,9	16,4	0,26	1,84	0,03
S10_CEM	6,91	0,24	8,46	0,12	8,74	0,21	41,20	1,62	50,12	3,29	52,31	2,33	-	-	8,5	0,14	2,21	0,01

*) – wskaźnik aktywności WA obliczono na podstawie wartości średnich z wyników badań wytrzymałości na ściskanie po 28 i 90 dniach, dlatego nie podano odchy-
leń standardowych.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.



RYS. 4.18. Wskaźnik aktywności (WA) dla serii S1–S6 po 28 i 90 dniach dojrzewania

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 450-1 materiał można uznać za pucolanowy, jeśli wskaźnik aktywności po 28 i 90 dniach osiągnie odpowiednio nie mniej niż 75 i 85% wytrzymałości zaprawy wykonanej na cemencie porównawczym. Jak wynika z rys. 4.18, w serii czwartej ze zmielonym zaczynem będącym odpowiednikiem drobnej frakcji z recyklingu betonu, wyprażonym w temperaturze 600°C, wskaźnik aktywności po 28 dniach wynosił 81,6% i spełniał wymagane kryteria. Natomiast wartość WA po 90 dniach wyniosła 83,7% i była niewiele niższa od wymaganego minimalnego poziomu równego 85%. Pozostałe wskaźniki aktywności ustalone w innych seriach badawczych wyraźnie odbiegały poziomem od wymagań normy PN-EN 450-1 [N32]. W określaniu pucolanowości materiałów droбноziarnistych ważną rolę odgrywają głównie ich skład chemiczny i powierzchnia właściwa, jednak jest to problem złożony. Materiał pucolanowy wchodzi w reakcje chemiczne z wodorotlenkiem wapnia, tworząc produkty o narastającej wytrzymałości, trwałe w środowisku wodnym [40]. Im większa jest ilość związanego $\text{Ca}(\text{OH})_2$, i im szybciej postępuje ten proces, tym większa jest aktywność pucolanowa danego materiału. Na podstawie składu chemicznego badanych zaczynów cementowych (tabela 3.8) ustalono, że tlenki, takie jak CaO , SiO_2 , Al_2O_3 i Fe_2O_3 , stanowią około 91% udziału w składzie stosowanego cementu CEM I 42,5R, natomiast w przypadku zmielonego zaczynu cementowego niepoddanego prażeniu stanowią już tylko 76,7%. Należy jednak zauważyć, że udział tych tlenków rośnie stopniowo wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania, osiągając poziom 92,6% przy temperaturze 1000°C. Wpływa

na to głównie sukcesywny wzrost zawartości reaktywnego wapnia, reaktywnej krzemionki oraz tlenku glinu wynikający z postępujących procesów dehydratacji i dekarbonatyzacji (w zależności od temperatury prażenia). Szczególnie tlenki wapnia i krzemu w obecności wody zarobowej przyczyniają się do formowania fazy C-S-H. Również reaktywna krzemionka może reagować z wodorotlenkiem wapnia, w efekcie czego powstaje faza C-S-H lub C-A-S-H (z przyłączeniem glinianów), co prowadzi do uszczelnienia struktury kompozytu. Spośród wielu dostępnych procedur badania pucolanowości materiałów za najbardziej wiarygodne uznaje się metody fizyczne, które umożliwiają bezpośrednią ocenę wpływu pucolanu na właściwości kompozytu [235], tak jak to miało miejsce w przypadku wykonanego eksperymentu. Istotnym uzupełnieniem tego badania mogłoby być określenie ubytku wodorotlenku wapnia na podstawie analizy termicznej po tych samych okresach czasowych, niestety nie zostało ono wykonane w ramach prezentowanych badań.

4.2.4. Podsumowanie wyników badań

Na podstawie uzyskanych wyników nie można stwierdzić, że drobna frakcja z recyklingu poddana prażeniu w 600°C jest dodatkiem pucolanowym, ale wykazano jednoznacznie, że temperatura wygrzewania ma wpływ na skład chemiczny badanych zaczynów, a szczególnie na zawartość w nich podstawowych tlenków odpowiadających za reakcję pucolanową, głównie wapnia i krzemu, jak też glinu i żelaza. Mogą one reagować z wodorotlenkiem wapnia w nowym zaczynie cementowym, tworząc fazę C-S-H, co prowadzi do zagęszczenia struktury kompozytu i wzrostu wytrzymałości na ściskanie i trwałości. Dodatkowo znaczna powierzchnia właściwa tych proszków (> 3000 cm²/g według metody Baine'a), zbliżona do powierzchni badanego cementu, przyczyniła się do zwiększenia ich aktywności.

4.3. Zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych – wariant II

4.3.1. Cel badań

Przeprowadzone badania miały na celu weryfikację parametrów metody przetwarzania gruzu betonowego, głównie w zakresie zawartości i stosowania drobnej frakcji z recyklingu w aspekcie kształtowania wybranych właściwości kompozytu cementowego. W rozdziale 3 pracy zdefiniowano najkorzystniejszą temperaturę prażenia gruzu z uwagi na możliwość uzyskania kruszywa wysokiej jakości oraz frakcji drobnej,

którą można zastąpić część cementu w kompozycie. W poprzednim eksperymencie potwierdzono, że temperatura prażenia na poziomie 600°C wpływa najkorzystniej na właściwości pucolanowe drobnej frakcji. W bieżącym eksperymencie badawczym w charakterze zamiennika części cementu zastosowano frakcję drobną pochodzącą z recyklingu około 20-letnich elementów betonowych, które po rozdrobnieniu wyprażono w 600°C i poddano obróbce mechanicznej przez 5 min w bębnie Los Angeles. Czas obróbki ustalono w rozdziale 4.1.

4.3.2. Metodyka badań

Rozdrobnioną drobną frakcję z recyklingu (DFR) otrzymano w wyniku przekruszenia 20-letnich krawężników betonowych o wymiarach 200 × 300 × 1200 mm. Po wstępnym rozdrobnieniu w kruszarce laboratoryjnej do frakcji 0/20 mm gruz wyprażono w piecu ceramicznym w temperaturze 600°C przez 3 godziny i poddano obróbce mechanicznej w bębnie Los Angeles przez 5 min (165 obr.). W końcowym etapie odseparowano frakcję drobną poniżej 4 mm, która stanowiła 42% masy wsadu, i domielono ją w młynku kulowym do uziarnienia maksymalnie 0,125 mm.

Eksperyment badawczy obejmował wykonanie 9 serii. Próbkę miały formę beleczek o wymiarach 40 × 40 × 160 mm. W eksperymencie zaplanowano dwie zmienne:

- X_1 – procentowa zawartość drobnej frakcji z recyklingu (DFR): (0–30%) masy cementu,
- X_2 – procentowa zawartość superplastyfikatora (SP): (0–0,50%) masy cementu i drobnej frakcji z recyklingu łącznie.

Czynniki i ich zakresy zmienności dobrano tak, aby mogły mieć wpływ na zmiany właściwości kompozytu cementowego. Zakres stosowania drobnej frakcji z recyklingu jako zmiennej X_1 zmniejszono w stosunku do wariantu I realizowanego w rozdziale 4.2 z uwagi na to, że przedmiotowym materiałem była tu rozdrobniona zaprawa, czyli zawierająca również drobne kruszywo i ewentualne zanieczyszczenia, a nie przygotowany w laboratorium zaczyn cementowy. Ustalono maksymalną ilość jej użycia na 30% masy spoiwa. Z uwagi na możliwość wystąpienia problemów z urabialnością zaprawy cementowej zawierającej drobną frakcję z recyklingu zdecydowano o wprowadzeniu do eksperymentu zmiennej ilości superplastyfikatora jako czynnika X_2 . Zgodnie z zaleceniami producenta optymalna jego ilość wynosi 0,80% masy cementu. W eksperymencie na podstawie oceny konsystencji próbnych zarobów ograniczono stosowanie superplastyfikatora maksymalnie do 0,50% łącznej masy cementu i DFR. Przy większej zawartości superplastyfikatora zaobserwowano tendencję do rozsegregowania składników w seriach bez DFR podczas zagęszczania. Plan eksperymentu zawierający 9 serii badawczych przedstawiono w tabeli 4.22.

TABELA 4.22. Plan eksperymentu

Nr serii	Wartości zmiennych	
	X_1 , % m.c.	X_2 , % m. (c + DFR)
1	2	3
S1_0_0	0	0
S2_0_0,25	0	0,25
S3_0_0,50	0	0,50
S4_15_0	15	0
S5_15_0,25	15	0,25
S6_15_0,50	15	0,50
S7_30_0	30	0
S8_30_0,25	30	0,25
S9_30_0,50	30	0,50

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyjściowy skład zaprawy cementowej na trzy beleczi dla poszczególnych serii bazował na składzie normowej zaprawy cementowej. W seriach S1–S3 zastosowano tylko cement CEM I 42,5R, natomiast w kolejnych seriach badawczych 15% i 30% masy cementu zastąpiono wagowo drobną frakcją z recyklingu. W poszczególnych seriach zmieniano zakres stosowania superplastyfikatora. Skład zaprawy cementowej w zależności od serii badawczej zamieszczono w tabeli 4.23.

TABELA 4.23. Skład zaprawy cementowej na trzy beleczi o wym. 40 × 40 × 160 mm

Seria	Cement CEM I 42,5R, g	DFR, g	w/(c + DFR)	Woda, g	SP, g	Piasek 0/2 mm, g
1	2	3	4	5	6	7
S1_0_0	450	0	0,50	225	0	1350
S2_0_0,25	450	0	0,50	223,87	1,13	1350
S3_0_0,50	450	0	0,50	222,75	2,25	1350
S4_20_0	382,5	67,5	0,50	225	0	1350
S5_20_0,25	382,5	67,5	0,50	223,87	1,13	1350
S6_20_0,50	382,5	67,5	0,50	222,75	2,25	1350
S7_40_0	315	135	0,50	225	0	1350
S8_40_0,25	315	135	0,50	223,87	1,13	1350
S9_40_0,50	315	135	0,50	222,75	2,25	1350

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Do realizacji planu badań przygotowano beleczki z zaprawy cementowej o wymiarach $40 \times 40 \times 160$ mm, zgodnie z procedurą określoną normą PN-EN 196-1:2016-07 [N27]. Próbki po rozformowaniu pielęgnowano w wodzie w warunkach laboratoryjnych do uzyskania wieku niezbędnego do wykonania badań. Badania właściwości drobnej frakcji z recyklingu oraz zapraw cementowych ze zmieloną DFR zrealizowano zgodnie z wykazem zamieszczonym w tabeli 4.24.

TABELA 4.24. Wykaz wykonanych badań właściwości DFR i zaprawy cementowej

Nazwa badania	Wymiary próbki, mm	Liczba powtórzeń, szt.	Podstawa badania
1	2	3	4
Badanie powierzchni właściwej metodą Blaine'a, cm^2/g	-	3	PN-EN 196-6 [N28]
Badanie gęstości piknometrycznej, g/cm^3	-	3	PN-EN 1097-7 [N18]
Badanie gęstości nasypowej w stanie luźnym, g/cm^3	-	3	PN-EN 1097-3 [N16]
Badanie gęstości nasypowej w stanie zagęszczonym, g/cm^3	-	3	PN-EN 1097-3 [N16]
Badanie gęstości objętościowej zaprawy (D_{oz}), g/cm^3	-	3	PN-EN 1015-6:2000 [N15]
Badanie konsystencji zaprawy metodą stolika rozplwy (R), cm	-	2	PN-EN 1015-3:2000 [N14]
Badanie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach (R_c), MPa	$40 \times 40 \times 160$ (połówki)	6	PN-EN 196-1:2016-07 [N27]
Badanie wytrzymałości na zginanie po 28 dniach (R_t), MPa	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-EN 196-1:2016-07 [N27]
Badanie nasiąkliwości (N), %	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-B-04500:1985 [N11]
Badanie gęstości objętościowej (D_o), g/cm^3	$40 \times 40 \times 160$	3	PN-EN 1015-10:2001 [N13]

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

4.3.3. Wyniki badań i ich analiza

Badania zmielonej drobnej frakcji z recyklingu stosowanej w eksperymencie w charakterze zamiennika cementu przeprowadzono w laboratorium uczelni. Wartości średnie z wyników badań obliczone na podstawie trzech pomiarów wraz z wielkością odchyłeń standardowych podano w tabeli 4.25.

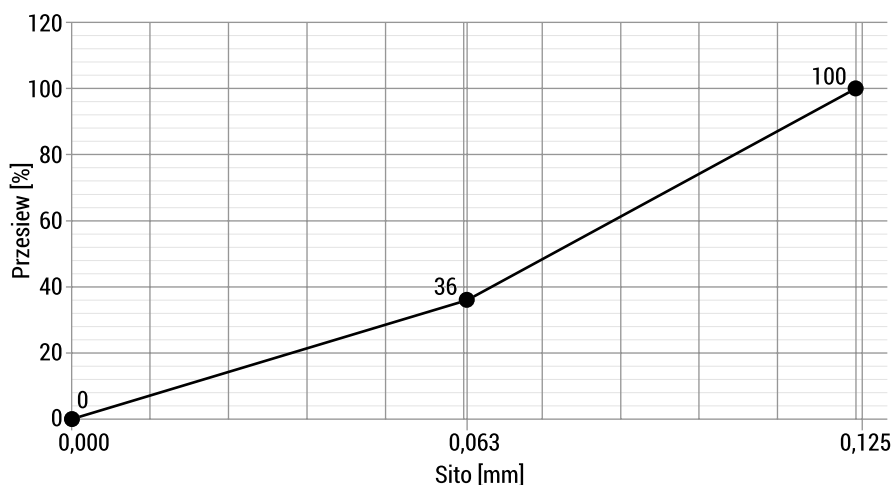
TABELA 4.25. Wartości średnie z wyników badań właściwości fizycznych drobnej frakcji z recyklingu

Drobna frakcja z recyklingu	Powierzchnia właściwa według Blaine'a	Gęstość piknometryczna	Gęstość nasypowa w stanie luźnym	Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym
	cm ² /g	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³
1	2	3	4	5
DFR_600°C	3 157,5 (32,83)	2,61 (0,021)	1,25 (0,007)	1,46 (0,004)

W nawiasach podano wartości odchyłeń standardowych.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Wyniki analizy sitowej drobnej frakcji z recyklingu przeznaczonej do badań przedstawiono na rys. 4.19.



RYS. 4.19. Analiza sitowa drobnej frakcji z recyklingu

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z informacji przedstawionych na rys. 4.19 wynika, że 64% drobnego materiału z recyklingu stanowiła frakcja 0,063/0,125 mm. Jest to rezultatem trudności pojawiających się w domielaniu materiału, szczególnie z uwagi na obecność w nim ziaren kruszywa drobnego.

W tabeli 4.26 przedstawiono wartości średnie z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych zapraw cementowych przygotowanych z użyciem zmielonej drobnej frakcji z recyklingu w ilości 0%, 15% i 30% masy cementu, na podstawie planu badań zamieszczonego w tabeli 4.22. Podano również odchylenia standardowe wyników w poszczególnych seriach.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 4.26 można stwierdzić, że zastosowanie drobnej frakcji z recyklingu w ilości 15% masy cementu spowodowało obniżenie gęstości objętościowej zaprawy średnio o około 3%, co było wynikiem mniejszej gęstości DFR w porównaniu z cementem. Zastąpienie 30% masy cementu drobną frakcją z recyklingu wywołało już nieproporcjonalnie większy, bo około 10-procentowy spadek gęstości objętościowej, co było rezultatem pogorszenia warunków zagęszczania zaprawy z uwagi na obecność porowatej DFR. Zależność tę zaobserwowali również inni autorzy [101]. Ten niekorzystny wpływ został zredukowany obecnością superplastyfikatora, który, zapobiegając aglomeracji ziaren spoiwa, poprawiał ich ułożenie w zaprawie. Było to zauważalne podczas badania konsystencji zaprawy metodą stolika rozplýwu, podczas której w obecności 0,50% superplastyfikatora odnotowano zwiększenie średnicy rozplýwu o 14–17% w porównaniu z seriami, w których nie stosowano superplastyfikatora w składzie. Należy też zauważyć, że superplastyfikator szczególnie korzystnie wpływał na konsystencję zaprawy w seriach zawierających drobną frakcję z recyklingu.

Wyniki przedstawione w tabeli 4.26 stanowią podstawę wniosku, że w obecności 15% drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika cementu odnotowano spadek wytrzymałości kompozytu na ściskanie po 28 dniach średnio o 10%, natomiast porównywalne wyniki uzyskano w serii kontrolnej (S1_0_0) i w serii (S6_15_0,50). Oznacza to, że możliwe jest uzyskanie zbliżonej do serii kontrolnej wytrzymałości na ściskanie przy dozowaniu DFR w ilości 15% masy cementu, ale niezbędne jest przy tym użycie superplastyfikatora. Z kolei przy zastosowaniu 30% DFR wytrzymałość na ściskanie uległa wyraźnemu osłabieniu nawet o 53% w porównaniu z serią przygotowaną tylko z cementem. Obecność 0,50% superplastyfikatora, analogicznie jak w przypadku właściwości świeżej zaprawy, wpływała generalnie korzystnie na wytrzymałość na ściskanie, szczególnie jednak wpływ ten był widoczny w seriach zawierających 30% DFR. Zastosowanie 0,50% superplastyfikatora (S9_30_0,50) doprowadziło do zwiększenia wytrzymałości na ściskanie nawet o 44% w porównaniu z serią bez SP (S7_30_0), nadal jednak wytrzymałość ta była niższa o 41% w odniesieniu do serii z cementem (S3_0_0,50).

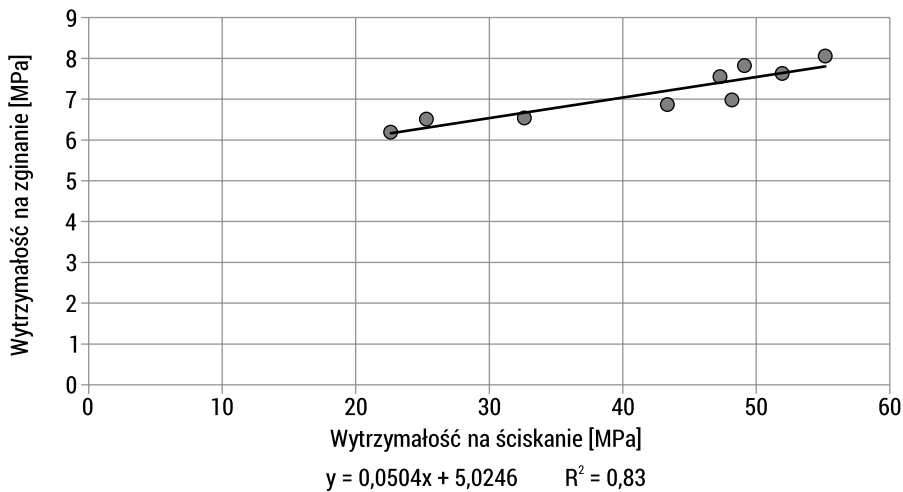
TABELA 4.26. Wartości średnie z wyników badań właściwości kompozytów cementowych

Nr serii	Gęstość objętościowa zaprawy, g/cm ³		Konsystencja (rozplływ), cm		Wytrzymałość na zginanie R _p , MPa		Wytrzymałość na ściskanie R _c , MPa		Nasiąkliwość, % masy		Gęstość objętościowa, g/cm ³	
	D _{oz}	S(D _{oz})	R	S(R)	28 dni	S(R _{f,28})	28 dni	S(R _{c,28})	N _z	S(N _z)	D _z	S(D _z)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S1_0_0	2,17	0,064	16,25	0,354	6,98	0,255	48,19	3,447	9,7	1,706	2,12	0,021
S2_0_0,25	2,24	0,020	17,25	0,354	7,63	0,180	51,96	5,264	8,3	1,293	2,14	0,032
S3_0_0,50	2,25	0,010	18,50	0,707	8,06	0,344	55,17	1,487	7,5	0,495	2,19	0,021
S4_15_0	2,06	0,047	15,25	0,354	6,87	0,179	43,36	2,640	10,2	0,100	2,08	0,010
S5_15_0,25	2,17	0,015	16,25	0,354	7,55	0,382	47,29	2,294	9,5	0,059	2,07	0,047
S6_15_0,50	2,20	0,021	17,75	1,061	7,82	0,591	49,13	3,382	8,4	0,439	2,10	0,021
S7_30_0	1,93	0,021	14,25	0,354	6,19	0,111	22,64	4,538	12,5	0,465	1,84	0,026
S8_30_0,25	2,01	0,026	15,25	0,354	6,51	0,392	25,31	2,711	10,6	0,530	1,95	0,021
S9_30_0,50	2,03	0,021	16,75	0,354	6,54	0,469	32,65	4,805	9,0	0,560	2,00	0,036

S(x) – odchylenie standardowe.

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Najwyższą wytrzymałością na zginanie charakteryzowała się seria kontrolna z cementem (S3_0_0,50), jednak w obecności 15% drobnej frakcji z recyklingu zaobserwowano tylko niewielkie pogorszenie tego parametru, bo średnio o około 2%. Przy zastosowaniu 30% DFR jako zamiennika cementu wytrzymałość na zginanie spadła o około 15% wobec serii kontrolnej, tak więc pogorszenie tej wytrzymałości nie jest proporcjonalne do zawartości DFR. Odnotowano również korzystny wpływ obecności superplastyfikatora na badaną cechę. Na rys. 4.20 przedstawiono korelację pomiędzy wynikami wytrzymałości kompozytu na zginanie i na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.



RYS. 4.20. Zależność pomiędzy wytrzymałością kompozytu na ściskanie i na zginanie po 28 dniach

ŹRÓDŁO: opracowanie własne.

Z zależności przedstawionej na rys. 4.20 wynika, że w eksperymencie wystąpiła dobra korelacja pomiędzy wytrzymałością na zginanie i na ściskanie, na co wskazuje wysoka wartość współczynnika determinacji równa 0,83. Należy zauważyć, że wytrzymałość badanych kompozytów na zginanie stanowiła od 14% (przy braku DFR) do nawet 27% (przy 30% DFR) wytrzymałości na ściskanie i jak wynika z tabeli 4.26, stosunek ten zwiększał się wraz ze wzrostem zawartości drobnej frakcji z recyklingu.

Nasiąkliwość kompozytów w eksperymencie kształtowała się w granicach 7,5–12,5% ich masy. Największy jej wzrost zaobserwowano w serii zawierającej 30% DFR przy braku obecności superplastyfikatora (S7_30_0). Zastosowanie SP w ilości 0,5% masy cementu wpłynęło na obniżenie nasiąkliwości kompozytu z 12,5% do 9,0%. Wynikało to ze zmniejszenia ilości porów w kompozycie z uwagi na ograniczenie ilości użytej wody oraz z lepszego upakowania cząstek w efekcie działania superplastyfikatora. W przypadku badania gęstości objętościowej kompozytów zaobserwowano zbliżone zjawiska jak przy gęstości objętościowej świeżej zaprawy.

4.3.4. Podsumowanie wyników badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że istnieje możliwość zastąpienia 15% cementu drobną frakcją pochodzącą z recyklingu odpadów betonowych. Aby uzyskać porównywalne parametry kompozytu, niezbędne jest zastosowanie superplastyfikatora w ilości 0,5% masy spoiwa. Uzyskane wyniki nie mają potwierdzenia w tych prezentowanych przez innych badaczy [22], którzy nie zalecają użycia tego drobnego materiału odpadowego jako zamiennika cementu. Skład tlenkowy drobnej frakcji z recyklingu oraz proces dehydratacji i dehydroksylacji następujący w wyniku prażenia w 600°C wpływają na poprawę jej właściwości pucolanowych. Rozszerza to wachlarz możliwych zastosowań tej frakcji w kompozytach z częściową zamianą cementu włącznie. Zwiększenie stopnia zastąpienia cementu frakcją z recyklingu ponad 15% jest bezzasadne praktycznie, ponieważ nie ma fizycznej możliwości wyprodukowania takiej ilości materiału z recyklingu, aby sprostać zapotrzebowaniu, biorąc pod uwagę obecne i przyszłe zużycie cementu.

Podsumowanie i wnioski

Recykling odpadów betonowych jest zjawiskiem analizowanym od dziesiątków lat, szczególnie w krajach wysoko rozwiniętych. Ma on wiele korzyści środowiskowych, przede wszystkim zmniejsza zależność od surowców naturalnych, ogranicza konieczność rozbudowy istniejących i tworzenia nowych składowisk, a co najważniejsze – wpisuje się w założenia neutralności klimatycznej. Jednak liczne prezentowane w literaturze wyniki badań wskazują, że kruszywa wytworzone z gruzu betonowego są słabej jakości, głównie ze względu na obecność w nich porowatej zaprawy cementowej. Dlatego też zwykle są stosowane jako materiał niezwiązany do warstw drogowych czy drenażowych, wpisując się tym samym w zasadę downcyclingu, czyli użycia odpadu w zastosowaniach o mniejszym znaczeniu w porównaniu z materiałem wyjściowym.

Jak wykazano w przeglądzie literatury, strefa przejściowa pomiędzy ziarnem kruszywa a zaczynem cementowym jest zwykle najsłabszym miejscem w betonie i to właśnie jej uszkodzenie prowadzi do skutecznej dezintegracji gruzu betonowego przejawiającego się oddzieleniem zaprawy cementowej od powierzchni kruszywa. Przeanalizowane na podstawie dostępnych źródeł metody przetwarzania gruzu nie są wystarczająco efektywne, ponieważ nie naruszają budowy strefy przejściowej, a jedynie za pomocą różnego rodzaju czynników oddziałujących, jak na przykład ścieranie czy miażdżenie, wpływają na częściowe usunięcie najsłabszych fragmentów zaprawy cementowej z powierzchni kruszywa. W zdecydowanej większości nie podejmują problemu zagospodarowania drobnej frakcji powstałej po oddzieleniu tej zaprawy.

Podłożem do opracowania najsukuteczniejszej metody recyklingu gruzu betonowego w niniejszej pracy stał się destrukcyjny wpływ wysokiej temperatury na beton. Na podstawie badań eksperymentalnych ustalono taką temperaturę, która osłabia przyczepność zaprawy cementowej do kruszywa oraz powoduje zmiany fizyczne i chemiczne w samym zaczynie, bez jednoczesnego szkodliwego wpływu na strukturę ziarna kruszywa. Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji produktów hydratacji cementu zalegających w strefie przejściowej w betonie wyszczególniono te, które decydują o jej trwałości. W drodze badań doświadczalnych przeanalizowano wpływ temperatury w zakresie 20–1000°C na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu oraz na jego poszczególne składniki, takie jak zaczyn cementowy i ziarno kruszywa naturalnego. Wykazano doświadczalnie skuteczność stosowania obróbki termiczno-mechanicznej na właściwości i stopień oczyszczenia ziaren kruszywa z recyklingu z zaprawy cementowej w porównaniu z obróbką mechaniczną. Zaobserwowano,

że zaprawa cementowa trudniej ulegała odspojeniu z kruszyw łamanych, co potwierdza lepszą przyczepność mechaniczną matrycy cementowej do ich powierzchni w betonie w porównaniu z kruszywami żwirowymi.

Dobór odpowiedniej temperatury wygrzewania gruzu betonowego w procesie obróbki termiczno-mechanicznej został ukierunkowany na możliwość regeneracji produktów dehydratacji i dekarbonatyzacji zaczynu cementowego i możliwość odzyskania właściwości wytrzymałościowych betonu w wyniku dalszej pielęgnacji. Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury zaproponowano schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w zakresie 20–800°C oraz schematy kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym prażeniu a nowym zaczynem cementowym.

Zaproponowana metoda obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego umożliwia wytworzenie kruszywa grubego wysokiej jakości oraz aktywnej frakcji drobnej, które mogą być użyte do produkcji nowej mieszanki betonowej. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów badawczych wykazały korzystny wpływ obecności takiego kruszywa w betonie cementowym nawet wysokiej wytrzymałości. Uzyskane kruszywo po obróbce termiczno-mechanicznej charakteryzuje się wysoką jakością w porównaniu z powszechnie wytwarzanym kruszywem z recyklingu i może być stosowane w większym udziale procentowym jako zamiennik grubego kruszywa naturalnego w klasie ekspozycji XO i w pozostałych klasach ekspozycji opisanych w PN-EN 206 [N31] z uwagi na wysoką ich gęstość w stanie suchym powyżej 2,5 kg/dm³ (obecnie zgodnie z PN-EN 12620+A1:2010 [N26] dla kruszyw z recyklingu typu A gęstość ta powinna być większa niż 2,1 kg/dm³). Można również stwierdzić, że kruszywo z recyklingu uzyskane w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej charakteryzuje się właściwościami lepszymi w betonie niż kruszywo naturalne. Świadczy o tym chociażby poprawa właściwości wytrzymałościowych betonów cementowych zawierających kruszywo z recyklingu wysokiej jakości, nawet w porównaniu z betonem kontrolnym. Przyczynia się do tego omówiony wcześniej model kształtowania nowej strefy kontaktowej w kompozycie, dzięki pozostałości na powierzchni kruszywa po obróbce produktów dehydratacji i karbonatyzacji cementu. Poprawiają one przyczepność kruszywa do matrycy cementowej oraz wchodzi w reakcję z nowym zaczynem.

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Na podstawie analizy wpływu wygrzewania gruzu betonowego w zakresie 20–1000°C zdefiniowano temperaturę równą 600°C jako najkorzystniejszą z punktu widzenia dezintegracji betonu, polegającej na odseparowaniu zaczynu cementowego od ziaren kruszywa bez ich uszkodzenia. W efekcie możliwe jest uzyskanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości o parametrach zbliżonych do kruszywa naturalnego.
2. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że prażenie gruzu betonowego w zakresie 20–1000°C istotnie wpływa na właściwości drobnej frakcji uzyskanej

po oczyszczeniu kruszywa z recyklingu z zaprawy cementowej. Ustalono temperaturę wygrzewania równą 600°C jako najkorzystniejszą z uwagi na kształtowanie składu chemicznego odseparowanej drobnej frakcji z recyklingu, a szczególnie na zawartość tlenków odpowiedzialnych za przebieg reakcji puolanowej.

3. Na podstawie wyników badań doświadczalnych opracowano i doświadczalnie zweryfikowano najkorzystniejsze parametry metody przetwarzania gruzu betonowego w aspekcie uzyskania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości i aktywnej frakcji drobnej do zastosowania w kompozytach cementowych.
4. Wykazano, że kruszywo z recyklingu uzyskane w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego z uwagi na wysoką jakość może stanowić zamiennik kruszywa naturalnego do 60% nawet w betonach wysokowartościowych.
5. Ustalono, że możliwe jest użycie drobnej frakcji z recyklingu uzyskanej w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej gruzu betonowego jako zamiennika spoiwa w kompozytach cementowych w ilości do 15% masy. Konieczne jest jednak jej domielenie do 0,125 mm (lub 0,063 mm), co korzystnie wpływa na jej właściwości puolanowe.
6. Zaproponowano oryginalne schematy budowy strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu wyprażonym w różnych temperaturach w zakresie 20–800°C a nowym zaczynem cementowym wraz z metodologią ich kształtowania.
7. Wykazano, że wygrzewanie gruzu betonowego w 600°C z uwagi na obecność produktów dehydratacji na powierzchni kruszywa z recyklingu umożliwia występowanie nie tylko oddziaływania mechanicznego pomiędzy powierzchnią kruszywa a nowym zaczynem cementowym, lecz także następuje ich chemiczne zespolenie. Wpływa to korzystnie na jakość strefy kontaktowej i właściwości kompozytów.
8. Zaobserwowano, że temperatura dehydroksylacji portlandytu wtórnego wykształconego w wyniku rehydratacji betonu jest niższa od temperatury, w której następuje rozpad portlandytu pierwotnego, i kształtuje się w przedziale 398–424°C. Ma to szczególne znaczenie w przypadku ustalenia dopuszczalnej krotności wprowadzenia do obiegu tego typu odpadów betonowych, szczególnie w przypadku konieczności zapewnienia wymaganej klasy odporności pożarowej.

Podczas realizacji badań pojawiły się również następujące wnioski praktyczne:

1. Rozbiórka obiektów powinna być prowadzona w sposób selektywny, z wcześniejszym odseparowaniem odpadów, które mogą wpłynąć niekorzystnie na jakość wytworzonego kruszywa z recyklingu i drobnej frakcji z recyklingu. Udział niektórych odpadów organicznych wpłynie na zmniejszenie zużycia energii cieplnej w procesie prażenia gruzu betonowego.
2. Wstępne rozkruszanie gruzu betonowego po rozbiórce zalecane jest bezpośrednio przed procesem obróbki termiczno-mechanicznej z uwagi na szybki postęp karbonatyzacji w rozdrobnionym materiale.

3. Oczyszczenie kruszywa z recyklingu z zaprawy cementowej skutecznie wpłynie na ograniczenie zmienności jego parametrów, co w przyszłości ułatwiłoby jego certyfikację i tym samym powszechne stosowanie w betonie.
4. Zaproponowana metoda przetwarzania gruzu betonowego ma charakter kompleksowy, pozwala na wykorzystanie wszystkich materiałów, nie generując przy tym trudnych do zagospodarowania odpadów.

Zastosowanie kruszywa z recyklingu i frakcji drobnej jako zamiennika spoiwa wytycza możliwy kierunek do ograniczenia emisyjności betonu w kontekście ochrony środowiska naturalnego. Podstawowym problemem w zaproponowanym procesie jest temperatura prażenia gruzu na poziomie 600°C, co podnosi jego energochłonność. W temperaturze tej jednak nie następuje dekarbonatyzacja, co nie wywołuje dodatkowej emisji CO₂, a obecne dążenia w kierunku stosowania energii odnawialnej mają szansę uczynić proces bardziej ekologicznym. Jest to temat otwarty, wymagający szeroko zakrojonych analiz kosztowych i środowiskowych, co nie było przedmiotem niniejszej pracy, ale w przyszłości będzie jej cennym uzupełnieniem.

Z uwagi na konieczność prażenia gruzu w temperaturze 600°C możliwe jest wprowadzenie modyfikacji parametrów obróbki w kierunku obniżenia temperatury wygrzewania, co wpłynie na częściowe pogorszenie jakości składników, jednak ograniczy zużycie niezbędnej energii. Jest to otwarta droga do dalszych badań i analiz.

Bibliografia

1. Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites*, 24(2), 269–279, Article PII S0958-9465(01)00012-9. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
2. Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. (2009). Recykling betonu konstrukcyjnego – cz. II. *Inżynier Budownictwa*, 3, 61–64.
3. Akbarnezhad, A., Ong, K., Zhang, M., Tam, C., Foo, T. (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3469–3479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038>
4. Al Fadul, M.A., Mackie, K.R. (2018). Numerical Analysis of Coupled Heat and Mass Transfer Phenomena in Concrete at Elevated Temperatures. *Transport in Porous Media*, 122(2), 437–458. <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1017-2>
5. Al-Bayati, H., Das, P., Tighe, S., Baaj, H. (2016). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 112, 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>
6. Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., Ehrlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 609–613. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>
7. Ali, F., Nadjai, A., Abu-Tair, A. (2011). Explosive spalling of normal strength concrete slabs subjected to severe fire. *Materials and Structures*, 44(5), 943–956. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9678-5>
8. Ali, M., Dinkha, Y., Haido, J. (2017). Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders. *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech*, 20(2), 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.12.004>
9. Alite, M., Abu-Omar, H., Agurcia, M., Jacome, M., Kenney, J., Tapia, A., Siebel, M. (2023). Construction and demolition waste management in Kosovo: a survey of challenges and opportunities on the road to circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25, 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01577-5>
10. Alonso, C., Fernandez, L. (2004). Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of Materials Science*, 39(9), 3015–3024. <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000025827.65956.18>
11. Alsheyab, M. (2022). Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(3), 2129–2138. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03217-1>
12. Amran, M., Huang, S., Onaizi, A., Murali, G., Abdelgader, H. (2022). Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 341, Article ARTN 127902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127902>

13. Antunes, M., Santos, R.A.O., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R.B., Colaço, R.A.O. (2022). Alternative Clinker Technologies for Reducing Carbon Emissions in Cement Industry: A Critical Review. *Materials*, 15(1), 209. <https://doi.org/10.3390/ma15010209>
14. Awchat, G., Kumthekar, M. (2021). Cost-benefit Analysis of Using Recycled Coarse Aggregate in Plain and Fibre Reinforced Concrete. *Advances in Science and Technology-Research Journal*, 15(3), 233–242. <https://doi.org/10.12913/22998624/139205>
15. Babalola, O., Awoyera, P., Tran, M., Le, D., Olalusi, O., Vilorio, A., Ovallos-Gazabon, D. (2020). Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete with ternary binder system and optimized mix proportion. *Journal of Materials Research and Technology-Jmrt*, 9(3), 6521–6532. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.038>
16. Baker, G. (1996). The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete. *Materials and Structures*, 29(190), 383–388. <https://doi.org/10.1007/BF02486347>
17. Barnes, B.D., Diamond, S., Dolch, W.L. (1978). The contact zone between portland cement paste and glass “aggregate” surfaces. *Cement and Concrete Research*, 8(2), 233–243. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(78\)90012-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(78)90012-1)
18. Bednarek, Z., Drzymała, T. (2008). Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 36, 61–84
19. Bednarek, Z., Krzywobłocka-Laurów, R., Drzymała, T. (2009). Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 38, 5–27.
20. 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(15), 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
21. Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Stutzman, P.E. (1992). *Computer modelling of the interfacial zone in concrete*. Interfaces in Cementitious Composites, France
22. Bordy, A., Younsi, A., Aggoun, S., Fiorio, B. (2017). Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker. *Construction and Building Materials*, 132, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.080>
23. Borstnar, M., Daneu, N., Dolenc, S. (2020). Phase development and hydration kinetics of belite-calcium sulfoaluminate cements at different curing temperatures. *Ceramics International*, 46(18), 29421–29428. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.029>
24. Bouarroudj, M., Remond, S., Michel, F., Zhao, Z., Bulteel, D., Courard, L. (2019). Use of a reference limestone fine aggregate to study the fresh and hard behavior of mortar made with recycled fine aggregate. *Materials and Structures*, 52(1), Article ARTN 18. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1325-1>
25. Bru, K., Touze, S., Bourgeois, F., Lippiatt, N., Menard, Y. (2014). Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*, 126, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.009>
26. Buyle-Bodin, F., Hadjieva-Zaharieva, R. (2002). Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete. *Materials and Structures*, 35(252), 504–509. <https://doi.org/10.1007/BF02483138>
27. Cantero, B., del Bosque, I., de Rojas, M., Matias, A., Medina, C. (2022). Durability of concretes bearing construction and demolition waste as cement and coarse aggregate substitutes. *Cement & Concrete Composites*, 134, Article ARTN 104722. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104722>

28. Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1633–1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
29. Cembureau. The European Cement Association (2020). *Activity Report*. <https://cembureau.eu/media/m2ugw54y/cembureau-2020-activity-report.pdf> (dostęp 12.10.2022)
30. Cheng, F., Kodur, V., Wang, T. (2004). Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 84–90. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:1\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:1(84))
31. Choi, H., Lim, M., Choi, H., Kitagaki, R., Noguchi, T. (2014). Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. *Journal of Environmental Protection*, 05(07), 14, Article 46338. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.57060>
32. Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., Carrara, M., Pastore, T., Coppola, L. (2022). Pathways towards sustainable concrete. *Cement and Concrete Research*, 154, Article ARTN 106718. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>
33. Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2869–2876. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004>
34. Culfik, M., Ozturan, T. (2002). Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 809–816, Article PII S0008-8846(02)00709-3. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00709-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00709-3)
35. Cwirzen, A., Penttala, V. (2005). Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.009>
36. da Silva, S., Cimadon, F., Borges, P., Schiavon, J., Possan, E., Andrade, J. (2022). Relationship between the mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste. *Case Studies in Construction Materials*, 16, Article ARTN e00860. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00860>
37. de Brito, J., Saikia, N. (2013). *Recycled Aggregate in Concrete. Use of Industrial, Construction and Demolition Waste*. Springer London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>
38. de Juan, M., Gutierrez, P. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>
39. Deb, S., Manghnani, M., Ross, K., Livingston, R., Monteiro, P. (2003). Raman scattering and X-ray diffraction study of the thermal decomposition of an ettringite-group crystal. *Physics and Chemistry of Minerals*, 30(1), 31–38. <https://doi.org/10.1007/s00269-002-0279-x>
40. Deja, J., Gawlicki, M., Kohutek, Z. B., Kotwica, Ł., Łagosz, A., Mróz, R., Pichór, W. (2020). *Beton. Technologie i metody badań*. Stowarzyszenie Producentów Cementu.
41. Delagrave, A., Bigas, J., Ollivier, J., Marchand, J., Pigeon, M. (1997). Influence of the interfacial zone on the chloride diffusivity of mortars. *Advanced Cement Based Materials*, 5(3–4), 86–92. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)00008-9)
42. Deng, X., Xue, L., Wang, R., Gao, X. (2019). Freeze-proof durability of concrete incorporating recycled coarse aggregate. *Archives of Civil Engineering*, 65(4), 63–80. <https://doi.org/10.2478/ace-2019-0047>

43. Diamond, S., Huang, J. (2001). The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations. *Cement & Concrete Composites*, 23(2–3), 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00065-2)
44. Dilbas, H., Cakir, O., Simsek, M. (2017). Recycled Aggregate Concretes (RACs) for Structural Use: An Evaluation on Elasticity Modulus and Energy Capacities. *International Journal of Civil Engineering*, 15(2A), 247–261. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0077-3>
45. Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y., Azevedo, C. (2016). Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire. *Construction and Building Materials*, 113, 456–469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>
46. Domagała, L. (2011). The influence of porous aggregate on microstructure of the interfacial transition zone in lightweight concrete. *Cement Wapno Beton*, 16(2), 101
47. Domingo-Cabo, A., Lazaro, C., Lopez-Gayarre, F., Serrano-Lopez, M., Serna, P., Castano-Tabares, J. (2009). Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2545–2553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018>
48. Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – Application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27–42. <https://doi.org/10.3151/jact.5.27>
49. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (2008), 2008/98/WE, z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy
50. Elsharief, A., Cohen, M., Olek, J. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1837–1849. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9)
51. Engel, H., Purta, M., Speelman, E., Szarek, G., van der Pluijm, P. (2020). *Neutralna emisja 2050*. McKinsey&Company
52. Environmental Protection Agency (2020). *Construction and Demolition Debris Management in the United States*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/final_cd-eol-management_2015_508.pdf (dostęp 7.07.2023)
53. Etxeberria, M., Mari, A., Vazquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40(5), 529–541. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5>
54. Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A. (2006). Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58(10), 683–690. <https://doi.org/10.1680/macr.2006.58.10.683>
55. Etxeberria, M., Vazquez, E., Mari, A., Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
56. European Aggregates Association – UEPG (2020–2021). *Annual review 2020–2021*. https://www.aggregates-europe.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf (dostęp 13.12.2022)
57. Eurostat (2021). *Waste statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (dostęp 9.07.2023)
58. Evangelista, L., de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 29(5), 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>

59. Farage, M., Sercombe, J., Galle, C. (2003). Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 degrees C. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1047–1056. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00005-X)
60. Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., Habert, G. (2018). A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry. Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000301843>
61. Forero, J. A., Brito, J. D., Evangelista, L., Pereira, C. (2022). Improvement of the Quality of Recycled Concrete Aggregate Subjected to Chemical Treatments: A Review. *Materials*, 15(8), 2740. doi:10.3390/ma15082740
62. Garbacz, A., Urbańska, P. (2021). Ślad węglowy betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 4, 56–61.
63. Garboczi, E., Bentz, D. (1997). Analytical formulas for interfacial transition zone properties. *Advanced Cement Based Materials*, 6(3–4), 99–108. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)81592-1](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)81592-1)
64. Garside, M. (2021). *Cement production worldwide from 1995 to 2020* (Statista, Issue). <https://www.statista.com> (dostęp 1.03.2023)
65. Gastaldi, D., Canonico, F., Capelli, L., Buzzi, L., Boccaleri, E., Irico, S. (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste. *Cement & Concrete Composites*, 61, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.010>
66. Geng, Y., Wang, Q., Wang, Y., Zhang, H. (2019). Influence of service time of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 52(5), Article ARTN 97. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1395-0>
67. Ginga, C., Ongpeng, J., Daly, M. (2020). Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials*, 13(13), Article ARTN 2970. <https://doi.org/10.3390/ma13132970>
68. Ghufuran, M., Khan, K., Ullah, F., Nasir, A., Al Alahmadi, A., Alzaed, A., Alwetaishi, M. (2022). Circular Economy in the Construction Industry: A Step towards Sustainable Development. *Buildings*, 12(7), Article ARTN 1004. <https://doi.org/10.3390/buildings12071004>
69. Główny Urząd Statystyczny (2021). *Ochrona środowiska 2021*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2021,1,22.html> (dostęp 4.03.2023)
70. Główny Urząd Statystyczny (2022). *Ochrona środowiska 2022*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2022,1,23.html> (dostęp 4.04.2023)
71. Golewski, G. (2018). Evaluation of morphology and size of cracks of the Interfacial Transition Zone (ITZ) in concrete containing fly ash (FA). *Journal of Hazardous Materials*, 357, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.016>
72. Gołaszewska, M., Klemczak, B., Gołaszewski, J. (2021). Thermal Properties of Calcium Sulphoaluminate Cement as an Alternative to Ordinary Portland Cement. *Materials*, 14(22), 7011. <https://doi.org/10.3390/ma14227011>
73. Gomes, M., de Brito, J. (2009). Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Materials and Structures*, 42(5), 663–675. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9411-9>

74. Gomez-Soberon, J. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate – An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1301–1311, Article PII S0008-8846(02)00795-0. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00795-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00795-0)
75. Gonzalez-Fonteboia, B., Martinez-Abella, F. (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43(4), 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.008>
76. Gonzalez-Fonteboia, B., Martinez-Abella, F., Eiras-Lopez, J., Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and Structures*, 44(10), 1759–1771. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9736-7>
77. Gołda, A., Król, A. (2006). Drugie życie betonu. *Budownictwo-Technologie-Architektura, październik-grudzień*, 44–47
78. Grandet, J., Ollivier, J.P. (1980). Etude de la formation du monocarboaluminate de calcium hydrate au contact d'un granulats calcaire dans une pate de ciment portland. *Cement and Concrete Research*, 10(6), 759–770. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846\(80\)90004-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0008-8846(80)90004-6)
79. Guo, Z., Chen, C., Lehman, D., Xiao, W., Zheng, S., Fan, B. (2020). Mechanical and durability behaviours of concrete made with recycled coarse and fine aggregates. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(2), 171–189. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1371083>
80. Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 61(1), 145–154. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>
81. Hamad, B., Dawi, A., Daou, A., Chehab, G. (2018). Studies of the effect of recycled aggregates on flexural, shear, and bond splitting beam structural behavior. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00186. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00186>
82. Haneefa, K., Santhanam, M., Parida, F. (2013). Review of concrete performance at elevated temperature and hot sodium exposure applications in nuclear industry. *Nuclear Engineering and Design*, 258, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.018>
83. Harutyunyan, V., Abovyan, E., Monteiro, P., Mkrtchyan, V., Balyan, M., Aivazyan, A. (2003). X-ray diffraction investigations of microstructure of calcium hydroxide crystallites in the interfacial transition zone of concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(12), 2162–2166. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03625.x>
84. Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski, K., Mijowska, E. (2017). The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavy-weight aggregates. *Construction and Building Materials*, 137, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.003>
85. Hossain, M., Poon, C., Lo, I., Cheng, J. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources Conservation and Recycling*, 109, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>
86. Hu, J., Stroeven, P. (2004). Properties of the interfacial transition zone in model concrete. *Interface Science*, 12(4), 389–397. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042337.39900.fb>
87. Ismail, S., Abd Hamid, M., Yaacob, Z., Nifa, F., Lin, C., Hussain, A. (2018). Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates On The Mechanical Properties Of High-Strength Mortars. *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Science and Technology (Icast'18), 2016*, Article ARTN 020059. <https://doi.org/10.1063/1.5055461>

88. Ismail, S., Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464–476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.014>
89. Jarmontowicz, A., Krzywobłocka-Laurów, R. (1986). *Instrukcja ITB nr 279 Wytyczne szacowania temperatury betonu po nagrzwie na podstawie badań laboratoryjnych*.
90. Jasiczak, J., Mikołajczyk, P. (1997). *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami: przegląd tendencji krajowych i zagranicznych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
91. Jaskowska-Lemanska, J. (2019). Impurities of recycled concrete aggregate – types, origin and influence on the concrete strength parameters. *4th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium – Wmcaus*, 603, Article ARTN 042056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/4/042056>
92. Jańczewski, D., Różycki, C., Synoradzki, L. (2010). *Projektowanie procesów technologicznych: matematyczne metody planowania eksperymentów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
93. Jia, Z., Han, Y., Zhang, Y., Qiu, C., Hu, C., Li, Z. (2017). Quantitative Characterization and Elastic Properties of Interfacial Transition Zone around Coarse Aggregate in Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 32(4), 838–844. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1677-8>
94. Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., Tam, V. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, 263, Article ARTN 121265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
95. Kaplan, G., Bayraktar, O., Gholampour, A., Gencel, O., Koksai, F., Ozbakkaloglu, T. (2021). Mechanical and durability properties of steel fiber-reinforced concrete containing coarse recycled concrete aggregate. *Structural Concrete*, 22(5), 2791–2812. <https://doi.org/10.1002/suco.202100028>
96. Karaś, S., Klimek, B. (2014). Badania stuletniego betonu z mostu na ul. Zamojskiej w Lublinie. *Budownictwo i Architektura*, 13(2), 109–118
97. Kasai, Y., Liu, T., Meyer, C. (2004). Recent trends in recycling of concrete waste and use of recycled aggregate concrete in Japan. *Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Development*, 219, 11–33. doi: 10.14359/13136
98. Katz, A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), 703–711. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01033-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01033-5)
99. Kessal, O., Belagraa, L., Noui, A., Maafi, N., Bouzid, A. (2020). Performance study of eco-concrete based on waste demolition as recycled aggregates. *Materials International*, 2, 0123–0130. <https://doi.org/10.33263/Materials22.123130>
100. Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.017>
101. Kim, Y., Choi, Y. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, 30, 500–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>
102. Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S., Nayak, S., Dutta, S. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>

103. Kliszczewicz, A. (2004). Recykling betonów konstrukcyjnych – badania krajowe (Recycling of Structural concrete – results of the Polish research). Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Wisła.
104. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) (2022). *Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022. Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2020*. https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2022_raport_syntetyczny_PL.pdf (dostęp 15.01.2023)
105. Komisja Europejska (2011). *Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – Sr1, Final Report Task 2*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0c9ecefcd07a-492e-a7e1-6d355b16dde4> (dostęp 7.06.2023)
106. Komisja Europejska (2016). *Protokół UE dotyczący gospodarowania odpadami z budowy i rozbiórki*. <https://ec.europa.eu/> (dostęp 8.05.2023)
107. Komisja Europejska (2019). *Europejski Zielony Ład*. Bruksela, 2019. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF (dostęp 3.06.2023)
108. Komisja Europejska (2020). *Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pl/ip_20_420 (dostęp 6.02.2023)
109. Konopska-Piechurska, M., Jackiewicz-Rek, W., Łukowski, P. (2014). Korelacje pomiędzy wytrzymałościami na ściskanie i rozciąganie dla betonów do nawierzchni dwuwarstwowych z eksponowanym kruszywem. *Budownictwo i Architektura*, 13(4), 137–144
110. Kou, S., Poon, C. (2008). Mechanical properties of 5-year-old concrete prepared with recycled aggregates obtained from three different sources. *Magazine of Concrete Research*, 60(1), 57–64. <https://doi.org/10.1680/macrc.2007.00052>
111. Kou, S., Poon, C. (2010). Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 32(8), 649–654. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003>
112. Kou, S., Poon, C., Agrela, F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement & Concrete Composites*, 33(8), 788–795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>
113. Kou, S.C., Poon, C. S. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032>
114. Kowalski, R. (2019). *Konstrukcje żelbetowe w warunkach pożarowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA
115. Kozioł, W., Kawalec, P. (2008). Kruszywa budowlane i drogowe w Polsce i Unii Europejskiej. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 62–65
116. Kozioł, W., Machniak, Ł., Borcz, A., Baic, I. (2016). Górnictwo kruszyw w Polsce – szanse i zagrożenia. *Inżynieria Mineralna*, 175–182
117. Kozłowska, O., Sołomacha, M., Walentek, I. (2016). Nowe dane o zasobach kruszyw piaskowo-żwirowych dla inwestycji drogowych i kubaturowych w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 32(1), 103–118. <https://doi.org/DOI10.1515/gospo-2016-0004>
118. Krol, A., Giergiczny, Z., Kuterasingka-Warwas, J. (2020). Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI. *Materials*, 13(10), Article ARTN 2257. <https://doi.org/10.3390/ma13102257>

119. Krzywobłocka-Laurów, R. (1998). *Instrukcja ITB nr 357/98 Badania składu fazowego betonu*
120. Kubissa, J., Kubissa, W. (2005). *Wyznaczanie wytrzymałości betonu na rozciąganie w próbie zginania XIII Seminarium polsko-ukraińskie „Theoretical Foundations of Civil Engineering”, Dnepropetrovsk–Warsaw*
121. Kumar, R., Gurram, S., Minocha, A. (2017). Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69(24), 1288–1295. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00030>
122. Kumutha, R., Vijai, K. (2008). Effect of recycled coarse aggregates in properties of concrete. *Journal of Green Building*, 3(4), 130–137. <https://doi.org/10.3992/jgb.3.4.130>
123. Kurdowski, W. (2010). *Chemia cementu i betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków
124. Kuroda, Y., Hashida, H., Uchiyama, N., Nachi, Y., Yamazaki, N., Yoshiaki, M. (2004). A Closed-Loop Concrete System on a Construction Site. *Technical Research Report. Institute of Technology, Shimizu Corporation*, 79, 1–10
125. Kuś, A., Tomaszewski, M., Jackiewicz-Rek, W., Drzymała, T. (2014). *Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na właściwości napowietrzonych betonów wysokowartościowych*, VIII Międzynarodowa Konferencja Dni Betonu, Wisła, 13–15 października 2014 r.
126. Kwan, W., Ramli, M., Kam, K., Sulieman, M. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>
127. Lee, J., Xi, Y., Willam, K., Jung, Y. (2009). A multiscale model for modulus of elasticity of concrete at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 39(9), 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.008>
128. Leemann, A., Loser, R., Munch, B. (2010). Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composites*, 32(2), 116–120. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.007>
129. Li, J., Xiao, H., Zhou, Y. (2009). Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1287–1291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.019>
130. Li, Q. (2015). Chemical Composition and Microstructure of Hydration Products of Hardened White Portland Cement Pastes Containing Admixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 30(4), 758–767. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1224-4>
131. Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S., Shah, S. (2012). Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. *Construction and Building Materials*, 35, 1045–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022>
132. Liao, K., Chang, P., Peng, Y., Yang, C. (2004). A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 977–989. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.019>
133. Lima, R.C.A., Caetano, L.F., Filho, L.C.P.S. (2005). Microstructural changes of high density concretes exposed to high temperatures. W: *Concrete for Transportation Infrastructure* (297–306). Thomas Telford Publishing
134. Limbachiya, M.C. (2010). Recycled aggregates: Production, properties and value-added sustainable applications. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 25, 1011–1016. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0140-x>

135. Linss, E., Mueller, A. (2004). High-performance sonic impulses – an alternative method for processing of concrete. *International Journal of Mineral Processing*, 74, S199–S208. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.016>
136. Lippiatt, N., Bourgeois, F. (2012). Investigation of microwave-assisted concrete recycling using single-particle testing. *Minerals Engineering*, 31, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.017>
137. Lotfi, S., Deja, J., Rem, P., Mroz, R., van Roekel, E., van der Stelt, H. (2014). Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources Conservation and Recycling*, 87, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.010>
138. Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mroz, R., Deja, J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. *Construction and Building Materials*, 95, 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.021>
139. Lotfi, S., Rem, P., Deja, J., Mroz, R. (2017). An experimental study on the relation between input variables and output quality of a new concrete recycling process. *Construction and Building Materials*, 137, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.085>
140. Lotfy, A., Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement & Concrete Composites*, 61, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009>
141. Ma, H., Li, Z. (2014). Multi-Aggregate Approach for Modeling Interfacial Transition Zone in Concrete. *Aci Materials Journal*, 111(2), 189–199. doi: 10.14359/51686501
142. Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature. A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
143. Ma, X.W., Han, Z.X., Li, X.Y., Meng, F.L. (2009). Thermal Treatment of Waste Concrete and the Rehydration Properties of the Dehydrated Cement Paste. *Journal of Qingdao Technological University*, 30, 93–97.
144. Mahmood, W., Khan, A., Ayub, T. (2022). Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 2111–2130. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00692-x>
145. Makul, N. (2021). A review on methods to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(2), 65–91.
146. Marinkovic, S., Radonjanin, V., Malesev, M., Ignjatovic, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
147. Martinez, I., Etxeberria, M., Pavon, E., Diaz, N. (2018). Influence of Demolition Waste Fine Particles on the Properties of Recycled Aggregate Masonry Mortar. *International Journal of Civil Engineering*, 16(9A), 1213–1226. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0280-x>
148. Martirena, F., Castano, T., Alujas, A., Orozco-Morales, R., Martinez, L., Linsel, S. (2017). Improving quality of coarse recycled aggregates through cement coating. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6(1), 69–84. <https://doi.org/10.1080/21650373.2016.1234983>
149. Maso, J.C. (1980). *The bond between aggregates and hydrates cement pastes*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris

150. Mehta, P.K. (1973). Effect of Lime on Hydration of Pastes Containing Gypsum and Calcium Aluminates or Calcium Sulfoaluminate. *Journal of the American Ceramic Society*, 56(6), 315–319
151. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2014). *Concrete. Microstructure, Properties and Materials* (Fourth Edition ed.). McGraw-Hill
152. Memon, S., Shah, S., Khushnood, R., Baloch, W. (2019). Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature – A review. *Construction and Building Materials*, 199, 435–455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.040>
153. Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
154. Min, L., Qian, C., Wei, S. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.007>
155. Mohamedbhai, G.T.G. (1986). Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 38(136), 151–158. <https://doi.org/10.1680/mac.1986.38.136.151>
156. Mondal, P., Shah, S., Marks, L., Bittnar, Z., Bartos, P., Nemecek, J.,... Zeman, J. (2009). Nanomechanical Properties of Interfacial Transition Zone in Concrete. *Nanotechnology in Construction 3, Proceedings*, 315. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8_42
157. Monteiro, P.J.M. (1986). *Improvement of the Aggregate-Cement Paste Transition Zone by Grain Refinement of Hydration Products*, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brazil
158. Mulder, E., de Jong, T., Feenstra, L. (2007). Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. *Waste Management*, 27(10), 1408–1415. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.013>
159. Müller, A., Winkler, A. Characteristics of processed concrete rubble. W: *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate* (109–119). <https://doi.org/10.1680/scuorca.27268.0009>
160. Nadeem, A., Memon, S., Lo, T. (2014). The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 62, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.073>
161. Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T. (2000). *Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance Parameters of Recycled Aggregate Concrete*, Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona
162. 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.008>
163. Nayana, A.Y., Kavitha, S. (2017). Evaluation of CO₂ emissions for greenconcrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(5), 703–708
164. Neville, A.M. (2000). *Właściwości betonu* (wyd. 4). Stowarzyszenie Producentów Cementu. Kraków
165. Nezerka, V., Bily, P., Hrbek, V., Fladr, J. (2019). Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement & Concrete Composites*, 103, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012>

166. Nocuń-Wczelik, W., Wiśniewska, J., Murzyn, P., Kapelusznna, E., Trybalska, B., Malata, G. (2019). Mikrostruktura i skład fazowy starych zaczynów cementowych. *Materiały Ceramiczne*, 71(1), 3–16
167. Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 7 października 2022 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2023 (2022)
168. Oikonomou, N. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27(2), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
169. Ollivier, J., Maso, J., Bourdette, B. (1995). Interfacial transition zone in concrete. *Advanced Cement Based Materials*, 2(1), 30–38
170. Ollivier, J.P., Grandet, J. (1982). *Processus de formation de l'auréole de transition: sequence of formation of the aureole of transition*, Liaison pâtes de ciment matériaux associés, Colloque international, Toulouse
171. Olorunsogo, F., Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 179–185, Article PII S0008-8846(01)00653-6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00653-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00653-6)
172. Ozawa, M., Uchida, S., Kamada, T., Morimoto, H. (2012). Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 37, 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.070>
173. Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., de Brito, J. (2013). Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (47), 1–6. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.1>
174. Padmini, A., Ramamurthy, K., Mathews, M. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>
175. Pandurangan, K., Dayanithy, A., Prakash, S. (2016). Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093>
176. Pawluczuk, E. (2010). *Wpływ kruszywa z recyklingu na właściwości betonu recepturowego*, rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka
177. Pawluczuk, E. (2011). Kształtowanie strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn w betonach recyklingowych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2, 369–376.
178. Pedro, D., de Brito, J., Evangelista, L. (2017). Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. *Construction and Building Materials*, 154, 294–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>
179. Peng, G., Huang, Z. (2008). Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 22(4), 593–599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.002>
180. Phan, L., Carino, N. (1998). Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), 58–64. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(58\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(58))
181. Pichór, W.J.D. (1999). *Budowa strefy kontaktowej włókno-zaczyn w kompozytach cementowych z włóknami polimerowymi*, Konferencja Materiały budowlane – nowe kierunki w chemii i technologii, Kraków, AGH

182. Ping, X., Beaudoin, J.J., Brousseau, R. (1991). Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland-cement paste interface. *Cement and Concrete Research*, 21(6), 999–1005
183. Pizoń J., Gołaszewski J., Alwaeli M., Szwan P. (2020). Properties of Concrete with Recycled Concrete Aggregate Containing Metallurgical Sludge Waste. *Materials*, 13(6), 1448, doi:10.3390/ma13061448
184. Plechawski, S. (2019). Odporność betonu na pękanie w temperaturach pożarowych. *Przegląd Budowlany*, 90(7–8), 90–96.
185. Polański, Z. (1984). *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN
186. Poon, C., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y. (2001). Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1307–1318. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00582-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00582-8)
187. Poon, C., Shui, Z., 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
188. Poudyal, L., Adhikari, K. (2021). Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production. *Resources, Environment and Sustainability*, 4, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100024>
189. Pulkit, U., Adhikary, S. (2022). Effect of micro-structural changes on concrete properties at elevated temperature: Current knowledge and outlook. *Structural Concrete*, 23(4), 1995–2014. <https://doi.org/10.1002/suco.202000365>
190. Raman, J., Ramasamy, V. (2021). Augmentation of dissimilar techniques for enhancing the concrete properties with recycled coarse aggregate and manufactured sand. *Journal of Materials Research and Technology-Jmrt*, 14, 1180–1190. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.094>
191. Rao, M., Bhattacharyya, S., Barai, S. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*, 44(1), 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>
192. Razaqpur, A.G., Fathifazl, G., Isgor, B., Abbas, A., Fournier, B., Foo, S. (2010). How to produce high quality concrete mixes with recycled concrete aggregate. *2nd International Conference on Waste Engineering Management, ICWEM 2010*, 73, 11–35
193. Reddy, N.S., Lahoti, M. (2023). A succinct review on the durability of treated recycled concrete aggregates. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25356–25366. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18168-w>
194. Report (2007). *Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling*, fib Bulletin, 38
195. Rodriguez-Robles, D., Garcia-Gonzalez, J., Juan-Valdes, A., Moran-del Pozo, J., Guerra-Romero, M. (2015). Effect of mixed recycled aggregates on mechanical properties of recycled concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67(5), 247–256. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00217>
196. Rodriguez-Robles, D., Van den Heede, P., De Belie, N., De Brito, J., Agrela, F. (2019). Life cycle assessment applied to recycled aggregate concrete. *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, 207–256. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00009-9>
197. Roychand, R., De Silva, S., Setunge, S. (2018). Nanosilica Modified High-Volume Fly Ash and Slag Cement Composite: Environmentally Friendly Alternative to OPC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4), Article ARTN 04018043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002220)

198. Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów, Dz.U. poz. 1923, (2020)
199. Ryu, J. (2002). Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Journal of Materials Science Letters*, 21(20), 1565–1567. <https://doi.org/10.1023/A:1020349011716>
200. Sabeur, H., Platret, G., Vincent, J. (2016). Composition and microstructural changes in an aged cement pastes upon two heating-cooling regimes, as studied by thermal analysis and X-ray diffraction. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126(3), 1023–1043. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5639-8>
201. Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., Taylor, A. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 707–712. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00476-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00476-2)
202. Sani, D., Moriconi, G., Fava, G., Corinaldesi, V. (2005). Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management*, 25(2), 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.006>
203. Saravanakumar, P., Abhiram, K., Manoj, B. (2016). Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 111, 611–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>
204. Savva, A., Manita, P., Sideris, K. (2005). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 27(2), 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013>
205. Schoon, J., De Buysser, K., Van Driessche, I., De Belie, N. (2015). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production. *Cement & Concrete Composites*, 58, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.003>
206. Scrivener, K. (2004). Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement & Concrete Composites*, 26(8), 935–945. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.029>
207. Scrivener, K., Crumbie, A., Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
208. Scrivener, K.L., Bentur, A., Pratt, P.L. (1988). Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes. *Advances in Cement Research*, 1(4), 230–237. <https://doi.org/10.1680/adcr.1988.1.4.230>
209. Serres, N., Braymand, S., Feugeas, F. (2016). Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 5, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.11.004>
210. Shahan, W., Yang, J., Su, H., Mo, K., Li, L., Xie, J. (2019). Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A review. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(4), 151–167. <https://doi.org/10.3151/jact.17.151>
211. Shi, C., Wu, Z., Cao, Z., Ling, T., Zheng, J. (2018). Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement & Concrete Composites*, 86, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013>
212. Shima, H., Matsuhashi, R., Yoshida, Y., Tateyashiki, H. (2004). Life Cycle Analysis of High Quality Recycled Aggregate Produced by Heating and Rubbing Method. *IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems*, 123(10), 1680–1687.

213. Shima, H., Tateyashiki, H., Matsubashi, R., Yoshida, Y. (2005). An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3, 53–67.
214. Short, N., Purkiss, J., Guise, S. (2001). Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. *Construction and Building Materials*, 15(1), 9–15. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00065-9)
215. Silva, R., de Brito, J., Dhir, R. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171–2186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>
216. Sim, J., Park, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, 31(11), 2352–2360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>
217. Simeonov, P., Ahmad, S. (1995). Effect of transition zone on the elastic behavior of cement-based composites. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 165–176. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00124-H](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00124-H)
218. Spišáková, M., Mésároš, P., Mandičák, T. (2021). Construction Waste Audit in the Framework of Sustainable Waste Management in Construction Projects – Case Study. *Buildings*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/buildings11020061>
219. Stanisz, A. (2006). *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*
220. Stowarzyszenie Producentów Cementu (2011). *Rola cementu w niskoemisyjnej gospodarce do roku 2050*. <https://lowcarboneconomy.cembureau.eu/wp-content/uploads/2018/09/Gospodarka-niskoemisyjna-2050-Sektor-cementowy.pdf> (dostęp 5.02.2023)
221. Sui, Y., Mueller, A. (2012). Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete. *Materials and Structures*, 45(10), 1487–1495
222. Szewski, A., Budziszewski, A. (2023). *Ewidencja odpadów 2023, Poradnik BDO. Ewidencja odpadów oraz sprawozdawczość odpadowa*
223. Ślosarczyk, A., Klapiszewska, I.Ł.K. (2022). Influence of nanosilica and binary oxide systems on the selected physical and mechanical properties of cement composites. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 58(2)
224. Tałaj, M. (2022). *Ocena trwałości betonów niskoemisyjnych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska. https://bip.polsl.pl/wp-content/uploads/sites/4/2022/09/Praca-doktorska-M.Talaj_.pdf (dostęp 11.10.2023)
225. Tam, V., Gao, X., Tam, C. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.025>
226. Tam, V., Gao, X., Tam, C., Chan, C. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(3), 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.009>
227. Tam, V., Kotrayothar, D., Xiao, J. (2015). Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 100, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.013>
228. Tam, V., Soomro, M., Evangelista, A. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272–292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>

229. Tam, V., Tam, C. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA(s) and TSMA(sc). *Construction and Building Materials*, 22(10), 2068–2077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.024>
230. Tam, V., Tam, C., Le, K. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources Conservation and Recycling*, 50(1), 82–101. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012>
231. Tam, V., Tam, C., Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1928–1939. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.040>
232. Tantawy, M.A. (2017). Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 5(11), 33–48
233. Tasong, W., Lynsdale, C., Cripps, J. (1999). Aggregate-cement paste interface Part I. Influence of aggregate geochemistry. *Cement and Concrete Research*, 29(7), 1019–1025. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00086-1)
234. Thomas, M., Osińska, M., Ślosarczyk, A. (2022). Long-Term Behavior of Cement Mortars Based on Municipal Solid Waste Slag and Natural Zeolite – A Comprehensive Physico-Mechanical, Structural and Chemical Assessment. *Materials*, 15(3)
235. Tkaczewska, E. (2011). Metody badań aktywności pucolanowej dodatków mineralnych. *Materiały Ceramiczne*, 63(3), 536–541
236. Tkaczewska, E. (2020). Possibility of use of mixture of siliceous and calcareous fly ash for production of portland-composite cement CEM II/B-M (V-W) 52.5. *Roads and Bridges. Drogi i Mosty*, 19(4), 267–282. <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.017>
237. Toumi, B., Resheidat, M. (2010). Influence of High Temperatures on Surface Cracking of Concrete Studied by Image Scanning Technique. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(2), 155–163
238. Tsujino, M., Noguchi, T., Tamura, M., Kanematsu, M., Maruyama, I. (2007). Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 13–25. <https://doi.org/10.3151/jact.5.13>
239. Tufail, M., Shahzada, K., Gencturk, B., Wei, J. (2017). Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 17–28
240. Ulsen, C., Tseng, E., Angulo, S., Landmann, M., Contessotto, R., Balbo, J., Kahn, H. (2019). Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>
241. United Nations Environment Programme (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zeroemission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41133>
242. van der Heijden, G., Bijnen, R., Pel, L., Huinink, H. (2007). Moisture transport in heated concrete, as studied by NMR, and its consequences for fire spalling. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 894–901. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.004>
243. van der Heijden, G.H.A., Huinink, H.P., Pel, L., Kopinga, K. (2011). One-dimensional scanning of moisture in heated porous building materials with NMR. *Journal of Magnetic Resonance*, 208(2), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2010.11.010>

244. Vazquez-Calle, K., Guillen-Mena, V., Quesada-Molina, F. (2022). Analysis of the Embodied Energy and CO₂ Emissions of Ready-Mixed Concrete: A Case Study in Cuenca, Ecuador. *Materials*, 15(14), Article ARTN 4896. <https://doi.org/10.3390/ma15144896>
245. Viczian, I., Foldvari, M. (2013). Handbook of the thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. *Central European Geology*, 56, 397.
246. Vysvaril, M., Bayer, P., Chroma, M., Rovnanikova, P. (2014). Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 54, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021>
247. Wang, B., Yan, L., Fu, Q., Kasal, B. (2021). A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Resources Conservation and Recycling*, 171, Article ARTN 105565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>
248. Wang, G., Zhang, C., Zhang, B., Li, Q., Shui, Z. (2015). Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste. *Fire and Materials*, 39(8), 741–750. <https://doi.org/10.1002/fam.2269>
249. Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., Guo, J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432–441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>
250. Wang, R., Yu, N., Li, Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 242, Article ARTN 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>
251. Wei, W., Shao, Z., Qiao, R., Chen, W., Zhou, H., Yuan, Y. (2021). Recent development of microwave applications for concrete treatment. *Construction and Building Materials*, 269, Article ARTN 121224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121224>
252. Wolska-Kotańska, C. (2005). Właściwości i zastosowanie kruszywa z recyklingu betonu. *Autostrady*, 3, 18–22
253. Xiao, J., Li, W., Poon, C. (2012). Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China. A review. *Science China-Technological Sciences*, 55(6), 1463–1480. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4786-9>
254. Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D., Shah, S. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement & Concrete Composites*, 37, 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006>
255. Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Shah, S. (2012). Crack Propagation in Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Compressive Loading. *Aci Materials Journal*, 109(4), 451–461
256. Xie, Y., Corr, D., Jin, F., Zhou, H., Shah, S. (2015). Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). *Cement & Concrete Composites*, 55, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.002>
257. Xing, Z., Beaucour, A., Hebert, R., Noumowe, A., Ledesert, B. (2015). Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 95, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.060>
258. Xu, J., Wang, B., Zuo, J. (2017). Modification effects of nanosilica on the interfacial transition zone in concrete: A multiscale approach. *Cement & Concrete Composites*, 81, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.003>
259. Xuan, D., Zhan, B., Poon, C. (2017). Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 84, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015>

260. Yanagibashi, K., Inoue, K., Seko, S., Tsuji, D. (2005). *A study on cyclic use of aggregate for structural concrete* World Sustainable Building Conference, Tokyo
261. Yanagibashi, K., Yonezawa, T., Arakawa, K., Yamada, M. (2015). A new concrete recycling technique for coarse aggregate regeneration process. W: *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction* (511–522). <https://doi.org/10.1680/scc.31777.0052>
262. Yang, R., Gui, Q., Lemarchand, E., Fen-Chong, T., Li, K. (2015). Micromechanical Modeling of Transport Properties of Cement-Based Composites: Role of Interfacial Transition Zone and Air Voids. *Transport in Porous Media*, 110(3), 591–611. <https://doi.org/10.1007/s11242-015-0574-x>
263. Yang, Y., Kang, Z., Zhan, B., Gao, P., Yu, Q., Wang, J., Chen, Y. (2022). Short Review on the Application of Recycled Powder in Cement-Based Materials: Preparation, Performance and Activity Excitation. *Buildings*, 12(10), Article ARTN 1568. <https://doi.org/10.3390/buildings12101568>
264. Yaprak, H., Aruntas, H. Y., Demir, I., Simsek, O., Durmus, G. (2011). Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(10), 2455–2461
265. Ye, T., Xianyu, J.I.N., Nanguo, J.I.N. (2018). Investigation on the transport properties of chlorides in concrete II Numerical simulation. *MATEC Web Conf.*, 199
266. Yoda, K., Harada, M., Sakuramoto, F. (2015). Field application and advantage of concrete recycled in-situ recycling systems. W: *Recycling and Reuse of Waste Materials* (437–446). <https://doi.org/10.1680/rarowm.32521.0045>
267. Yonezawa, T., Kamiyama, Y., Yanagibashi, K., Kojima, M., Arakawa, K., Yamada, M. (2001). A Study on a Technology for Producing High Quality Recycled Coarse Aggregate. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 50(8), 835–842
268. Yu, Z., Shan, Y., Huang, Q., Sun, X. (2019). Failure Criteria and Mechanical Properties of Recycled Concrete with Different Replacement Ratios of Coarse Aggregates under Multiaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), Article ARTN 04019216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002869](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002869)
269. Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E. (2003). Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, 25(2), 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00010-0)
270. Zając, B., Gołębiowska, I. (2010). Nowoczesne metody recyklingu betonu. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 5, 136–137
271. Zega, C., Di Maio, A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), 2336–2340. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>
272. Zegardło, B., Andrzejuk, W., Barnat-Hunek, D., Nitychoruk, J. (2017). Możliwości wykorzystania odpadów z ceramiki sanitarnej w mieszkankach mineralno-asfaltowych. *Materiały Budowlane*, 12, 24–26
273. Zhang, B., Tan, H., Shen, W., Xu, G., Ma, B., Ji, X. (2018). Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability. *Cement & Concrete Composites*, 92, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012>

274. Zhang, J., Shi, C., Li, Y., Pan, X., Poon, C., Xie, Z. (2015). Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), Article ARTN 04015029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001296](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001296)
275. Zhang, J., Zhang, L., Xu, B., Yuan, J. (2023). Influences of Carbonated Recycled Concrete Fines on Cement Hydration. *Buildings*, 13(4), Article ARTN 926. <https://doi.org/10.3390/buildings13040926>
276. Zhang, Q., Ye, G. (2012). Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110(1), 153–158. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2303-9>
277. Zhang, Q., Ye, G., Fai, L. (2011). Microstructure Analysis of Heated Portland Cement Paste. *Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (Easec12)*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.105>
278. Zhang, W., Qian, H., Sun, Q., Chen, Y. (2015). Experimental study of the effect of high temperature on primary wave velocity and microstructure of limestone. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 5739–5748. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4591-4>
279. Zhang, Y., Liu, H., Tong, R., Ren, J. (2019). Effect of nano silica on freeze-thaw resistance of cement-fly ash mortars, cured in corrosive condition at different temperature. *Cement Wapno Beton*, 2, 137–153. <https://doi.org/doi://10.32047/CWB.2019.24.2.6>
280. Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>
281. Zhou, Q., Glasser, F. (2001). Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at < 120 degrees C. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1333–1339. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00558-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00558-0)
282. Zimbelmann, R. (1985). A contribution to the problem of cement-aggregate bond. *Cement and Concrete Research*, 15(5), 801–808. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90146-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90146-2)
283. <https://sprzedajemy.pl/kruszywo-betonowe-0-63-gruz-betonowy-beton-kruszony-przekrus-warszawa-2-a1d299-nr64020528> (dostęp 4.05.2023)
284. <https://www.cemex.pl/cem-i-42-5-r> (dostęp 6.05.2023)

Normy i wytyczne

1. AS 1141.6.2-1996 Methods for sampling and testing aggregates, Method 6.2: Particle density and water absorption of coarse aggregate – Pycnometer method
2. BS 8500: Part 2: 2002: Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete
3. CSIRO-HB 155. Guide to the use of recycled concrete and masonry materials, 2002. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
4. DIN 4226-100:2002 – Aggregates for concrete and mortar – part 100: Recycled aggregates
5. ISO 13320:2009 – Particle size analysis – Laser diffraction methods
6. ISO 14067: 2013 – Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication
7. JIS A 5021, 2005 – Recycled aggregate for concrete-class H
8. LNEC-E471 – Portuguese National Laboratory of Civil Engineering (LNEC – 2006), E 471. Guidelines for the use of recycled concrete aggregate in hydraulic binder concrete
9. PN-EN 1015-3:2000 – Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)
10. PN-88/B-06250 – Beton zwykły
11. PN-B-04500:1985 – Zaprawy budowlane – Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych
12. PN-B-06714-40:1978 – Kruszywa mineralne – Badania – Oznaczanie wytrzymałości na miążdżenie
13. PN-EN 1015-10:2001 – Metody badań zapraw do murów – Część 10: Określenie gęstości wysuszonej stwardniałej zaprawy
14. PN-EN 1015-3:2000 – Metody badań zapraw do murów – Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)
15. PN-EN 1015-6:2000 – Metody badań zapraw do murów – Określenie gęstości objętościowej świeżej zaprawy
16. PN-EN 1097-3:2000 – Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości
17. PN-EN 1097-6:2002 – Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczanie gęstości ziaren i nasiąkliwości
18. PN-EN 1097-7:2001 – Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna
19. PN-EN 12350-2:2019-07 – Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
20. PN-EN 12350-6:2019-08 – Badania mieszanki betonowej – Część 6: Gęstość

21. PN-EN 12390-13:2021-12 – Badania betonu – Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu
22. PN-EN 12390-3:2019-07 – Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
23. PN-EN 12390-5:2019-08 – Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
24. PN-EN 12390-7:2019-08 – Badania betonu – Część 7: Gęstość betonu
25. PN-EN 12390-8:2019-08 – Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
26. PN-EN 12620+A1:2010 – Kruszywa do betonu
27. PN-EN 196-1:2016-07 – Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
28. PN-EN 196-6:2019-01 – Metody badania cementu – Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia
29. PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
30. PN-EN 1992-1-2:2008/NA:2010 – Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-2: Reguły ogólne – Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
31. PN-EN 206:2014 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
32. PN-EN 450-1:2012 – Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
33. PN-EN 772-11:2011 – Metody badań elementów murowych – Część 11: Określenie absorpcji wody elementów murowych z betonu kruszywowego, kamienia sztucznego i kamienia naturalnego spowodowanej podciąganiem kapilarnym oraz początkowej absorpcji wody elementów murowych ceramicznych
34. RILEM Recommendation. Specifications for concrete with recycled aggregates, 1994
35. Works Bureau Technical Circular 12/2002: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates

Spis tabel

Tabela 1.1.	Przykłady zastosowania materiałów z budowy i rozbiorke	16
Tabela 1.2.	Właściwości kruszyw z recyklingu gruzu betonowego.....	28
Tabela 1.3.	Wymagania w zakresie właściwości i stosowania kruszywa z recyklingu w różnych krajach.....	30
Tabela 1.4.	Maksymalny procent zastąpienia kruszyw grubych (% masowo).....	32
Tabela 1.5.	Tendencje w zmianach właściwości betonów z kruszywem z recyklingu.....	34
Tabela 1.6.	Właściwości kruszywa z recyklingu przed namacaniem i po namacaniu w roztworach kwasów.....	46
Tabela 1.7.	Zmiany fazowe zachodzące w betonie podczas wygrzewania	63
Tabela 2.1.	Program badań eksperymentalnych.....	68
Tabela 3.1.	Plan badań.....	72
Tabela 3.2.	Receptury mieszanki betonowej na 1 m ³	73
Tabela 3.3.	Wartości średnie z wyników badań poszczególnych cech betonów wraz z odchyleniem standardowym $S(x)$	74
Tabela 3.4.	Charakterystyka betonu poddanego prażeniu w zakresie temperatur 20–1000°C	79
Tabela 3.5.	Wartości średnie z wyników badań właściwości fizycznych cementu i zmielonego zaczynu cementowego.....	87
Tabela 3.6.	Wyniki analizy termicznej cementu i zaczynu cementowego po trzech dniach od wyprażenia.....	95
Tabela 3.7.	Wyniki analizy termicznej zaczynów cementowych wyseparowanych z betonów różnego pochodzenia.....	97
Tabela 3.8.	Skład chemiczny cementu i zmielonego zaczynu cementowego poddanego działaniu temperatur w zakresie 20–1000°C	100
Tabela 3.9.	Wartości średnie z wyników badań właściwości kruszyw naturalnych.....	104
Tabela 3.10.	Charakterystyka opisowa kruszyw poddanych obróbce termicznej.....	107
Tabela 3.11.	Skład betonu na 1 m ³ do przygotowania kruszyw z recyklingu	109
Tabela 3.12.	Plan eksperymentu.....	109
Tabela 3.13.	Wartości średnie z wyników badań kruszyw z recyklingu betonu.....	110

Tabela 3.14. Charakterystyka opisowa kruszyw z recyklingu poddanych różnym typom obróbki	114
Tabela 3.15. Wpływ regeneracji betonu na wytrzymałość na ściskanie	124
Tabela 3.16. Wyniki analizy termicznej wyprażonego cementu i zaczynu cementowego w zależności od czasu i warunków pielęgnacji	129
Tabela 3.17. Objasnienie symboli graficznych	135
Tabela 4.1. Czynniki przyjęte w planie eksperymentu wraz z ich poziomami zmienności.....	143
Tabela 4.2. Plan eksperymentu.....	144
Tabela 4.3. Skład mieszanki betonowej w zależności od zawartości kruszywa z recyklingu	145
Tabela 4.4. Właściwości cementu CEM I 42,5R.....	146
Tabela 4.5. Skład betonu z przeznaczeniem na kruszywo z recyklingu	147
Tabela 4.6. Procentowa zawartość frakcji uzyskanych w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej.....	148
Tabela 4.7. Wykaz wykonanych badań właściwości mieszanki betonowej i betonu	149
Tabela 4.8. Właściwości kruszywa z recyklingu (KR) po różnych rodzajach obróbki i kruszywa naturalnego granitowego (KN).....	151
Tabela 4.9. Właściwości mieszanek betonowych.....	152
Tabela 4.10. Średnie wartości z wyników badań właściwości fizyczno-mechanicznych betonu	153
Tabela 4.11. Równania regresji dla poszczególnych cech betonu w eksperymencie	155
Tabela 4.12. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla $f_{c,28}$	156
Tabela 4.13. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla $f_{t,28}$	159
Tabela 4.14. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla modułu E	162
Tabela 4.15. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla D_{obj}	165
Tabela 4.16. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla N	167
Tabela 4.17. Wyniki jednowymiarowych testów istotności X_1 , X_2 i X_3 dla wodoprzepuszczalności (WP)	169
Tabela 4.18. Plan eksperymentu	174
Tabela 4.19. Skład zaprawy cementowej na trzy beleczki.....	175
Tabela 4.20. Wykaz wykonanych badań właściwości zaprawy cementowej	175
Tabela 4.21. Wartości średnie z wyników badań właściwości kompozytów cementowych.....	177
Tabela 4.22. Plan eksperymentu.....	181
Tabela 4.23. Skład zaprawy cementowej na trzy beleczki o wym. $40 \times 40 \times 160$ mm.....	181
Tabela 4.24. Wykaz wykonanych badań właściwości DFR i zaprawy cementowej.....	182

Tabela 4.25. Wartości średnie z wyników badań właściwości fizycznych drobnej frakcji z recyklingu	183
Tabela 4.26. Wartości średnie z wyników badań właściwości kompozytów cementowych ..	185

Spis rysunków

Rys. 1.1.	Ilość odpadów budowlanych z budowy i rozbiórki generowana przez wybrane kraje w 2018 roku (dane dla Indii i Rosji pochodzą z 2016 roku, a dla Brazylii i Australii z 2017 roku)	14
Rys. 1.2.	Skład odpadów budowlanych w Europie	15
Rys. 1.3.	Osiągnięty poziom odzysku i recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki w wybranych krajach Unii Europejskiej w 2018 roku	16
Rys. 1.4.	Korzyści z recyklingu odpadów z budowy i rozbiórki	17
Rys. 1.5.	Całkowita produkcja kruszyw oraz kruszyw z recyklingu w wybranych krajach w 2019 roku	19
Rys. 1.6.	Schemat ideowy zamkniętego obiegu kruszywa w budownictwie.....	20
Rys. 1.7.	Procentowy rozkład emisji CO ₂ przy produkcji betonu.....	22
Rys. 1.8.	Zużycie energii przy wytworzeniu 1 m ³ betonu odpowiednio z kruszywem naturalnym i z recyklingu, w zależności od odległości transportu tych kruszyw	24
Rys. 1.9.	Proces recyklingu gruzu betonowego	26
Rys. 1.10.	Proces recyklingu gruzu betonowego z dwustopniowym rozkruszaniem.....	27
Rys. 1.11.	Wytrzymałość betonu na rozciąganie po 28 dniach i 5 latach dojrzewania przy różnej zawartości grubego kruszywa z recyklingu	35
Rys. 1.12.	Nasiąkliwość betonu w zależności od zawartości kruszywa z recyklingu (BKN – beton z kruszywem naturalnym, BKR – beton z kruszywem z recyklingu)	36
Rys. 1.13.	Skurcz betonu kontrolnego (BK) oraz betonu zawierającego grube kruszywo z recyklingu (BR) w ilości 25%, 50%, 75% i 100%.....	38
Rys. 1.14.	Zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie przy różnej zawartości drobnej frakcji z recyklingu jako zamiennika piasku	39
Rys. 1.15.	Nowoczesne metody poprawy jakości kruszywa z recyklingu	41
Rys. 1.16.	Zaawansowane metody recyklingu gruzu betonowego: a) metoda mimośrodowego ścierania; b) metoda młyna śrubowego; c) metoda koncentracji grawitacyjnej; d) metoda ogrzewania i tarcia	42
Rys. 1.17.	Schemat klasyfikacji materiałów na sucho	43

Rys. 1.18. Wpływ temperatury wygrzewania gruzu na jakość kruszywa z recyklingu betonu	45
Rys. 1.19. Porównanie krzywych naprężenie–odkształcenie dla kruszywa, zaczynu cementowego i betonu.....	50
Rys. 1.20. Porowatość międzyfazowej strefy przejściowej w modelowym betonie z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej z detekcją elektronów wstecznie rozproszonych, w zależności od: a) wielkości kruszywa, b) stanu nasycenia kruszywa (SSD – stan nasycony powierzchniowo suchy), c) konsystencji zaczynu, d) współczynnika w/c.....	52
Rys. 1.21. Powierzchnia nieuwodnionego cementu w % w zależności od odległości od ziarna kruszywa w 3-dniowym betonie	54
Rys. 1.22. Wybrane modele strefy kontaktowej kruszywo–zaczyn w betonie.....	56
Rys. 1.22. Wybrane modele strefy kontaktowej kruszywo–zaczyn w betonie	57
Rys. 1.23. Efekt ściany i jednostronnego wzrostu produktów hydratacji na niereaktywnym kruszywie.....	59
Rys. 1.24. Strefy kontaktowe w betonie z kruszywem z recyklingu	60
Rys. 1.25. Procentowa zawartość fazy C-S-H w zależności od czasu oddziaływania temperatury 600–800°C w odniesieniu do wartości wyjściowej	64
Rys. 3.1. Procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszywem żwirowym i łamanym podczas wygrzewania w zakresie temperatur 20–1000°C	75
Rys. 3.2. Próbkki betonowe 100 × 100 × 100 mm na kruszywie żwirowym po wygrzewaniu w temperaturze 20–1000°C	77
Rys. 3.3. Próbkki betonowe 100 × 100 × 100 mm na kruszywie łamanym po wygrzewaniu w temperaturze 20–1000°C.....	77
Rys. 3.4. Przełamy próbek (serie 1–6) wygrzewanych w temperaturach według planu badań.....	78
Rys. 3.5. Przełamy próbek (serie 7–12) wygrzewanych w temperaturach według planu badań	78
Rys. 3.6. Analiza termiczna zaprawy cementowej_20°C.....	80
Rys. 3.7. Analiza termiczna zaprawy cementowej_200°C.....	81
Rys. 3.8. Analiza termiczna zaprawy cementowej_400°C.....	81
Rys. 3.9. Analiza termiczna zaprawy cementowej_600°C.....	82
Rys. 3.10. Analiza termiczna zaprawy cementowej_800°C.....	82
Rys. 3.11. Analiza termiczna zaprawy cementowej_1000°C.....	83
Rys. 3.12. Uszkodzenie strefy kontaktowej w betonie wyprażonym w 600°C, × 200.....	84
Rys. 3.13. Zbrylony zaczyn cementowy po wyprażeniu w temperaturze 1000°C.....	86
Rys. 3.14. Rozkład wielkości cząstek cementu i zmielonych zaczynów cementowych wygrzewanych w różnych temperaturach.....	88

Rys. 3.15. Skumulowany udział procentowy wielkości cząstek cementu i zmielonych zaczynów cementowych wygrzewanych w różnych temperaturach.....	88
Rys. 3.16. Obraz SEM zmielonego zaczynu (ZC_1000°C), × 10 000.....	89
Rys. 3.17. Analiza EDS zmielonego zaczynu (ZC_1000°C).....	90
Rys. 3.18. Analiza termiczna cementu CEM I 42,5 R.....	91
Rys. 3.19. Analiza termiczna ZC_20°C.....	91
Rys. 3.20. Analiza termiczna ZC_200°C.....	92
Rys. 3.21. Analiza termiczna ZC_400°C.....	92
Rys. 3.22. Analiza termiczna ZC_600°C.....	93
Rys. 3.23. Analiza termiczna ZC_800°C.....	93
Rys. 3.24. Analiza termiczna ZC_800°C i ZC_1000°C.....	94
Rys. 3.25. Krzywe TG zaczynu cementowego poddanego różnym temperaturom prażenia	94
Rys. 3.26. Dyfraktogramy próbek cementu i zaczynu cementowego prażonych w temperaturach 20–1000°C	99
Rys. 3.27. Kruszywo żwirowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C.....	105
Rys. 3.28. Kruszywo dolomitowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C.....	106
Rys. 3.29. Kruszywo granitowe po obróbce w zakresie temperatur 20–800°C	106
Rys. 3.30. Procentowa ilość usuniętej zaprawy cementowej (0/4 mm) z poszczególnych kruszyw z recyklingu.....	112
Rys. 3.31. Kruszywo z recyklingu na bazie żwiru po obróbce.....	112
Rys. 3.32. Kruszywo z recyklingu na bazie dolomitu po obróbce.....	113
Rys. 3.33. Kruszywo z recyklingu na bazie granitu po obróbce	113
Rys. 3.34. Strefa kontaktowa w KR_20°C (× 10 000)	116
Rys. 3.35. Powierzchnia kruszywa z recyklingu KR_20°C (× 40 000).....	116
Rys. 3.36. Kruszywo z recyklingu KR_200°C (× 3000)	117
Rys. 3.37. Kruszywo z recyklingu KR_200°C (× 6000)	117
Rys. 3.38. Kruszywo z recyklingu KR_400°C (× 6000)	118
Rys. 3.39. Kruszywo z recyklingu KR_400°C (× 4000)	118
Rys. 3.40. Kruszywo z recyklingu KR_600°C (× 4000)	119
Rys. 3.41. Kruszywo z recyklingu KR_600°C (× 8000)	119
Rys. 3.42. Kruszywo z recyklingu KR_800°C (× 5000)	120
Rys. 3.43. Kruszywo z recyklingu KR_800°C (× 10 000)	120
Rys. 3.44. KR_20°C po regeneracji (x20 000)	126

Rys. 3.45. KR_200°C po regeneracji (x5 000)	126
Rys. 3.46. KR_400°C po regeneracji (x8 000)	127
Rys. 3.47. KR_600°C po regeneracji (x12 000)	127
Rys. 3.48. KR_800°C po regeneracji (x4 000)	128
Rys. 3.49. Procentowa ilość portlandytu wyprażonego w zakresie temperatur 20–1000°C oraz obecnego po rehydratacji	130
Rys. 3.50. Procentowa zawartość kalcytu wyprażonego w zakresie temperatur 20–1000°C oraz po procesie rehydratacji.....	131
Rys. 3.51. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce mechanicznej w 20°C.....	133
Rys. 3.52. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 200°C	133
Rys. 3.53. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 400°C	133
Rys. 3.54. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 600°C	134
Rys. 3.55. Schemat budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w 800°C	134
Rys. 3.56. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce mechanicznej (20°C) a nowym zaczynem cementowym	136
Rys. 3.57. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (200°C) a nowym zaczynem cementowym	137
Rys. 3.58. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (400°C) a nowym zaczynem cementowym	137
Rys. 3.59. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (600°C) a nowym zaczynem cementowym	137
Rys. 3.60. Schemat kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem z recyklingu poddanym obróbce termiczno-mechanicznej (800°C) a nowym zaczynem cementowym	138
Rys. 3.61. Cykl życia obiektu budowlanego uwzględniający obróbkę termiczno-mechaniczną gruzu betonowego.....	140
Rys. 3.62. Ideowy schemat procesu wytwarzania kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz drobnej frakcji o właściwościach pucolanowych oparty na zdefiniowanych parametrach obróbki gruzu betonowego.....	141
Rys. 4.1. Kruszywo grube z recyklingu frakcji 4/20 mm.....	147
Rys. 4.2. Cykl obróbki termicznej gruzu betonowego	148

Rys. 4.3.	Zmiany wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1) i zawartości kruszywa (X_3) (przy $X_2 = 10$ min).....	157
Rys. 4.4.	Średnie wartości z wyników wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	158
Rys. 4.5.	Zmiany wytrzymałości na zginanie betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3 (przy $X_2 = 10$ min).....	159
Rys. 4.6.	Średnie wartości z wyników wytrzymałości na zginanie w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	160
Rys. 4.7.	Zależność między wytrzymałością na zginanie a wytrzymałością na ściskanie.....	161
Rys. 4.8.	Zmiany modułu sprężystości betonu w zależności od temperatury prażenia gruzu (X_1).....	163
Rys. 4.9.	Średnie wartości z wyników modułu sprężystości w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	163
Rys. 4.10.	Zależność wartości modułu sprężystości od wytrzymałości betonu na ściskanie.....	164
Rys. 4.11.	Zmiany gęstości objętościowej betonu w zależności od X_1 i X_3	166
Rys. 4.12.	Średnie wartości z wyników gęstości objętościowej w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	166
Rys. 4.13.	Zmiany nasiąkliwości betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3	168
Rys. 4.14.	Średnie wartości z wyników nasiąkliwości w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	168
Rys. 4.15.	Zmiany wodoprzepuszczalności betonu w zależności od zmiennych X_1 i X_3	170
Rys. 4.16.	Średnie wartości z wyników głębokości penetracji wody przez beton w porównaniu z seriami kontrolnymi.....	170
Rys. 4.17.	Średnie wartości z wyników kapilarnego podciągania wody dla wybranych serii.....	172
Rys. 4.18.	Wskaźnik aktywności (WA) dla serii S1–S6 po 28 i 90 dniach dojrzewania.....	178
Rys. 4.19.	Analiza sitowa drobnej frakcji z recyklingu.....	183
Rys. 4.20.	Zależność pomiędzy wytrzymałością kompozytu na ściskanie i na zginanie po 28 dniach.....	186

Streszczenie

Wpływ temperatury prażenia gruzu betonowego na jakość kruszywa recyklingowego i właściwości pucolanowe recyklingowej zaprawy cementowej

Recykling odpadów budowlanych ze względu na sukcesywny wzrost ich ilości stał się obecnie ważnym problemem społecznym, ekonomicznym i środowiskowym na całym świecie. Z jednej strony stale rosnące zużywanie surowców nieodnawialnych, a z drugiej ogromne ilości produkowanych odpadów wymagających zagospodarowania wymuszają podjęcie działań naprawczych zmierzających do wprowadzenia tych odpadów do obiegu zamkniętego. Szczególnie podatny na ponowne wykorzystanie jest gruz betonowy, którego potencjał odzysku jest wysoki. Z uwagi na brak efektywnych metod recyklingu gruzu betonowego kruszywo uzyskane po rozdrobnieniu w kruszarce jest słabej jakości, co spowodowane jest głównie obecnością starej zaprawy cementowej w tym kruszywie.

Z uwagi na to, że strefa przejściowa pomiędzy ziarnem kruszywa a zaczynem cementowym jest zwykle najsłabszym miejscem w betonie, to właśnie jej uszkodzenie prowadzi do skutecznego oddzielenia zaprawy cementowej od powierzchni kruszywa. Za najkorzystniejszą metodę dekompozycji gruzu betonowego, rozumianą jako utratę integralności kruszywa i zaprawy cementowej, uznano jego wygrzewanie w wysokiej temperaturze. Istotne jest ustalenie takiej temperatury, która nie tylko osłabi przyczepność zaczynu cementowego do kruszywa, lecz także jednocześnie spowoduje zmiany fizyczne i chemiczne w samym zaczynie, modyfikując jego właściwości pucolanowe oraz nie uszkodzi struktury samego ziarna.

Realizowane badania podzielono na dwie części: fazę I stanowiły badania poznawcze, a fazę II badania weryfikujące. W fazie I określono między innymi wpływ temperatury w zakresie od 20°C do 1000°C na właściwości fizyczno-mechaniczne i chemiczne betonu cementowego, na przemiany fazowe zachodzące w samym zaczynie cementowym oraz właściwości kruszyw naturalnych i przygotowanych z ich udziałem kruszyw z recyklingu. W efekcie uzyskano parametry obróbki gruzu betonowego umożliwiające wyprodukowanie kruszywa z recyklingu wysokiej jakości oraz frakcji drobnej o właściwościach pucolanowych. Doświadczalnie ustalono również taką temperaturę wygrzewania betonu, która umożliwi najsukuteczniejszą jego regenerację przejawiającą się wzrostem wytrzymałości na ściskanie w efekcie ponownej pielęgnacji w wodzie. Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostruktury opracowano oryginalne schematy budowy powierzchni ziarna kruszywa z recyklingu poddanego obróbce termiczno-mechanicznej w zakresie temperatur 20–800°C oraz schematy

kształtowania się strefy kontaktowej w betonie pomiędzy kruszywem poddanym prażeniu a nowym zaczynem cementowym.

W fazie II zrealizowano badania weryfikujące w odniesieniu do zidentyfikowanych w I fazie badań parametrów metody przetwarzania gruzu betonowego w kruszywo z recyklingu wysokiej jakości i frakcję drobną w aspekcie możliwości ich stosowania w kompozytach cementowych. Potwierdzono możliwość uzyskania właściwości betonu z takim kruszywem porównywalnych do betonu kontrolnego, a w zakresie wytrzymałości na ściskanie i zginanie nawet lepsze. Wykazano również, że frakcja drobna z recyklingu wytworzona z zaprawy cementowej odseparowanej z powierzchni kruszywa z recyklingu w wyniku obróbki termiczno-mechanicznej może stanowić zamiennik cementu w kompozytach nawet do 15%, bez pogorszenia właściwości, pod warunkiem równoczesnego zastosowania superplastyfikatora.

Na zakończenie sformułowano wnioski stanowiące wkład w dyscyplinę naukową oraz wnioski praktyczne, które pojawiły się w trakcie realizacji badań.

Summary

Influence of concrete rubble calcination temperature on the quality of recycled aggregate and pozzolanic properties of recycled cement mortar

Recycling of construction waste, due to the successive increase in its quantity, is currently an important social, economic and environmental problem all over the world. On the one hand, the ever-increasing consumption of non-renewable raw materials, and on the other hand, the huge amounts of waste produced that require management, make it necessary to take corrective measures aimed at introducing these wastes into a closed circuit. Particularly susceptible to reuse is concrete rubble whose recovery potential is high. Due to the lack of effective methods of recycling concrete rubble, the aggregate obtained after crushing is of poor quality, which is mainly due to the presence of old cement mortar in this aggregate.


Due to the fact that the transition zone between the aggregate grain and the cement paste is usually the weakest point in the concrete, its damage leads to the effective separation of the cement mortar from the aggregate surface. The most advantageous method of decomposition of concrete rubble, understood as the loss of aggregate and cement mortar integrity, was its roasting at high temperature. It is important to set a temperature that will not only weaken the adhesion of the cement paste to the aggregate, but at the same time will cause physical and chemical changes in the paste, modifying its pozzolanic properties and at the same time will not damage the structure of the grain.

The conducted research was divided into two parts: stage I was cognitive research and stage II was verification research. In stage I, the influence of temperature in the range from 20°C to 1000°C on the physical, mechanical and chemical properties of cement concrete, on phase transformations taking place in the cement paste and the properties of natural aggregates and recycled aggregates prepared with their participation were determined. As a result, parameters for the processing of concrete rubble were obtained, enabling the production of high-quality recycled aggregate and a fine fraction with pozzolanic properties. The temperature of concrete calcination was also established experimentally, which will enable its most effective regeneration, evinced by an increase in compressive strength as a result of re-curing in water. On the basis of the conducted microstructure studies, original diagrams of the surface structure of recycled aggregate subjected to thermal and mechanical treatment in the temperature range of 20–800°C and diagrams of the formation of the contact zone in concrete between the calcinated aggregate and the new cement paste were developed.

In stage II, verification tests were carried out in relation to the parameters of the method of processing concrete rubble into high-quality recycled aggregate and fine fraction identified in the stage I of research in terms of their possible use in cement composites. It was confirmed that the properties of concrete with such aggregate could be comparable to the control concrete, and even better in terms of compressive and bending strength. It was also shown that the recycled fine fraction produced from old cement mortar separated from the surface of recycled aggregate as a result of thermal and mechanical treatment can replace cement in composites up to 15% without deterioration of properties, provided that a superplasticizer is used at the same time.

At the end, the conclusions constituting the author's contribution to the scientific discipline and practical conclusions that emerged during the research were formulated.



 Politechnika
Białostocka