

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Politechniki Wrocławskiej

**Wpływ odpadowej mączki granitowej  
i krzemionkowego popiołu lotnego na  
wybrane właściwości kompozytów  
cementowych**

**Raport serii PRE nr 1 / 2023**

**Praca doktorska**

Adrian Chajec

Słowa kluczowe:

odpadowa mączka granitowa

krzemionkowy popiół lotny

cementowa warstwa wierzchnia

kompozyt cementowy

podłogi

Promotor: dr hab. inż. Łukasz Sadowski, profesor uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Magdalena Piechówka-  
Mielnik

Wrocław, marzec 2023

Autor:

mgr inż. Adrian Chajec

.....

Politechnika Wrocławska

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Tel. +48 721 020 350

e-mail: [adrian.chajec@pwr.edu.pl](mailto:adrian.chajec@pwr.edu.pl)

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w marcu 2023 r.

Lista odbiorców:	Recenzenci	3 egz.
	Promotor	1 egz.
	Promotor pomocniczy	1 egz.
	Autor	1 egz.
	CWiINT PWr	1 egz.
	Archiwum W-2	2 egz.
	Razem	9 egz.

### *Podziękowania*

*Szczególne podziękowania pragnę złożyć mojej żonie Sybilli, której zrozumienie, empatia oraz poświęcenie pozwoliło mi zrealizować tę rozprawę.*

*Dr hab. inż. Łukaszowi Sadowskiemu, prof. uczelni dziękuję za odkrycie przede mną tej niesamowitej drogi życiowej oraz za wszelkie rady i motywację.*

*Niniejsza rozprawa doktorska powstała na podstawie rezultatów projektu LIDER XI nr LIDER/35/0130/L-11/19/NCBR/2020 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju p.t.: "Wykorzystanie odpadowej mączki granitowej do produkcji wybranych wyrobów budowlanych".*

## Spis treści

Spis treści .....	4
Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie .....	8
Wykaz ważniejszych definicji stosowanych w rozprawie .....	12
<b>1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY .....</b>	<b>13</b>
<b>2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY .....</b>	<b>18</b>
2.1. Cele rozprawy .....	18
2.2. Zakres rozprawy .....	18
<b>3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE .....</b>	<b>20</b>
3.1. Mączka granitowa .....	20
3.1.1. Wprowadzenie .....	20
3.1.2. Właściwości chemiczne i fizyczne mączki granitowej .....	23
3.1.3. Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości mieszanek cementowych .....	30
3.1.4. Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości kompozytów cementowych .....	34
3.2. Krzemionkowy popiół lotny .....	44
3.2.1. Wprowadzenie .....	44
3.2.2. Właściwości chemiczne i fizyczne krzemionkowego popiołu lotnego .....	49
3.2.3. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanek cementowych .....	53
3.2.4. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości kompozytów cementowych .....	58
3.3. Jednoczesny dodatek mączek mineralnych oraz krzemionkowego popiołu lotnego .....	64
3.3.1. Wprowadzenie .....	64
3.3.2. Stosowane dotychczas konfiguracje materiałowe oraz ich wpływ na właściwości mieszanki cementowej oraz kompozytu cementowego .....	67
3.4. Podstawowe informacje o cementowych warstwach wierzchnich w podłogach .....	77
3.5. Omówienie podstawowych właściwości cementowej warstwy wierzchniej w podłogach .....	81
3.6. Wpływ dodatków na wybrane właściwości cementowej warstwy wierzchniej .....	82
3.6.1. Przegląd zastosowań dodatków do zaprawy cementowej stanowiącej warstwę wierzchnią w układach warstwowych z kompozytów cementowych .....	83
3.7. Podsumowanie rozpoznania literaturowego .....	85

---

<b>4. OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW, ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH I STOSOWANA W ROZPRAWIE METODOLOGIA .....</b>	<b>89</b>
4.1. Zakres badań własnych .....	89
4.2. Mieszanki cementowe .....	92
4.2.1. Zaczyny cementowe.....	94
4.2.2. Zaprawy cementowe .....	94
4.3. Próbki kompozytów cementowych i ich przechowywanie .....	95
4.4. Statystyczna analiza wyników badań.....	98
4.5. Badania właściwości zastosowanych materiałów .....	100
4.5.1. Krzywa uziarnienia .....	100
4.5.2. Gęstość nasypowa.....	101
4.5.3. Skład chemiczny .....	102
4.5.4. Powierzchnia właściwa ziaren .....	103
4.5.5. Właściwości morfologiczne ziaren .....	104
4.6. Badania właściwości mieszanek cementowych .....	106
4.6.1. Konsystencja mieszanki.....	106
4.6.2. Wodożądność.....	107
4.6.3. Gęstość objętościowa.....	107
4.6.4. Początek i koniec czasu wiązania .....	108
4.6.5. Odsączanie wody z mieszanki cementowej.....	110
4.6.6. Gęstość upakowania składników .....	111
4.7. Badania kompozytów cementowych.....	112
4.7.1. Gęstość objętościowa.....	112
4.7.2. Porowatość objętościowa.....	113
4.7.3. Nasiąkliwość masowa.....	114
4.7.4. Wytrzymałość na ściskanie.....	115
4.7.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu .....	116
4.7.6. Odporność na ścieranie .....	117
4.7.7. Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu .....	118

4.7.8. Jednorodność stwardniałego kompozytu .....	121
4.7.9. Analiza ekonomiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych.....	122
4.7.10. Analiza ekologiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych .....	123
<b>5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA .....</b>	<b>126</b>
5.1. Wyniki badań właściwości zastosowanych materiałów.....	126
5.1.1. Krzywa uziarnienia .....	126
5.1.2. Gęstość nasypowa.....	127
5.1.3. Skład chemiczny .....	128
5.1.4. Powierzchnia właściwa ziaren .....	129
5.1.5. Właściwości morfologiczne ziaren .....	130
5.2. Wyniki badań właściwości mieszanek cementowych.....	131
5.2.1. Konsystencja mieszanki.....	131
5.2.2. Wodoządnosc.....	133
5.2.3. Gęstość objętościowa.....	134
5.2.4. Początek i koniec czasu wiązania .....	136
5.2.5. Odsączanie wody z mieszanki cementowej.....	138
5.2.6. Gęstość upakowania składników .....	145
5.3. Wyniki badań kompozytów cementowych .....	148
5.3.1. Gęstość objętościowa.....	148
5.3.2. Porowatość objętościowa.....	150
5.3.3. Nasiąkliwość masowa .....	151
5.3.4. Wytrzymałość na ściskanie.....	153
5.3.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu .....	159
5.3.6. Odporność na ścieranie .....	165
5.3.7. Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu .....	170
5.3.8. Jednorodność stwardniałego kompozytu .....	173
5.3.9. Analiza ekonomiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych.....	177
5.3.10. Analiza ekologiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych.....	182
<b>6. WDROŻENIE UZYSKANYCH REZULTATÓW Z BADAŃ WŁASNYCH.....</b>	<b>186</b>

---

<b>7. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE .....</b>	<b>192</b>
7.1. Podsumowanie .....	192
7.2. Wnioski .....	197
7.3. Konkluzja końcowa.....	200
7.4. Proponowane kierunki dalszych badań .....	200
<b>Zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej .....</b>	<b>203</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>204</b>
<b>Streszczenie .....</b>	<b>219</b>
<b>Summary .....</b>	<b>220</b>

## Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie

$A$	– powierzchnia wierzchu mieszanki cementowej w wiaderku pomiarowym ( $\text{cm}^2$ )
$A_{ks}$	– powierzchnia krążka stalowego wykorzystanego do badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu ( $\text{m}^2$ )
$A_k$	– powierzchnia przyłożenia siły w badaniu wytrzymałości na ściskanie ( $\text{m}^2$ )
$AR$	– współczynnik proporcji (-)
$Ar$	– współczynnik powierzchni (-)
$C_B$	– współczynnik natężenia odsączania wody z mieszanki cementowej (-)
$ECO_2$ serii	– określona emisyjność serii badawczej ( $\text{kg CO}_2$ )
$ECO_2$ składnik	– emisja $\text{CO}_2$ związana z wykorzystaniem danego składnika w mieszance ( $\text{kg CO}_2$ )
$ECO_2$ źródła	– jednostkowa emisja $\text{CO}_2$ związana z analizowanym składnikiem mieszanki cementowej ( $\text{kg CO}_2/\text{kg}$ )
$ECO_2R$ serii	– współczynnik emisyjności dla analizowanej serii mieszanki cementowej (%)
$F_h$	– maksymalna odczytana siła w trakcie zniszczenia próbki (MN)
$F_n$	– maksymalna siła niszcząca odczytana w badaniu wytrzymałości na ściskanie lub wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (MN)
$K$	– stała aparatu Blaine’a
$MPR$ serii	– wskaźnik wydajności mechanicznej danej serii kompozytów cementowych (%)
$R$	– okrągłość (-)
$R_B$	– współczynnik odsączania wody z mieszanki cementowej ( $\text{ml}/\text{cm}^2\text{s}$ )
$S$	– powierzchnia właściwa ziaren ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
$V_1$	– objętość odsączonej wody z mieszanki cementowej (ml)
$V_2$	– całkowita objętość odsączonej wody (ml)
$V_3$	– objętość mieszanki cementowej w wiaderku pomiarowym wykorzystanej do badania (ml)
$V_{cyl}$	– pojemność cylindra pomiarowego ( $\text{cm}^3$ )
$V_k$	– objętość próbki kompozytu cementowego ( $\text{cm}^3$ )
$V_{k,s}$	– objętość suchej próbki kompozytu cementowego ( $\text{m}^3$ )
$V_{pk}$	– objętość porów w próbce kompozytu cementowego ( $\text{cm}^3$ )
$a, b$	– wymiary rozplywu mieszanki cementowej (mm)



## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ STOSOWANYCH W ROZPRAWIE

---

$c_{CEM}$	– koszt materiałowy cementu do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł)
$c_{FA}$	– koszt materiałowy popiołu lotnego do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł)
$c_{GP}$	– koszt materiałowy mączki granitowej do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł)
$c_L$	– prędkość przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej (m/s)
$cor f_{cm,0}$	– wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego po ekspozycji na korozję chemiczną (MPa)
$cor f_{cm,1}$	– wytrzymałość na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem po ekspozycji na korozję chemiczną (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa)
$c_{rynek}$	– cena jednostkowa składnika (na podstawie ofert rynkowych) (zł)
$c_{serii}$	– koszt materiałowy wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł)
$c_{składnik}$	– koszt składnika serii kompozytów cementowych (zł · kg/m <sup>3</sup> )
$c_{woda}$	– koszt materiałowy wody do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł)
$d_1$	– szerokość próbki kompozytu (cm)
$d_2$	– wysokość próbki kompozytu (cm)
$d_p$	– odległość pomiędzy głowicami pomiarowymi betonoskopu (m)
$d_x$	– procentowa zawartość materiału sypkiego przechodzącego przez sito o wymiarze x (%)
$e$	– porowatość warstwy badanego materiału (%)
$f_{cm,0}$	– wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego (MPa)
$f_{cm,1}$	– wytrzymałość na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa)
$f_{cm,ref}$	– wytrzymałość na ściskanie serii referencyjnej (MPa)
$f_{cm,serii}$	– wytrzymałość na ściskanie danej serii kompozytów cementowych (MPa)
$f_{ctm,0}$	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu referencyjnego (MPa)
$f_{ctm,1}$	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego mączką granitową / popiołem lotnym charakteryzujący się najbardziej pozytywnym wynikiem (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa)
$f_{ctm,ref}$	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu serii referencyjnej (MPa)

$f_{ctm,serii}$	– wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu danej serii kompozytów cementowych (MPa)
$f_h$	– przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu (MPa)
$l$	– rozstaw podpór (cm)
$m_l$	– masa suchego cylindra pomiarowego (g)
$m_{2,b}$	– masa cylindra pomiarowego oraz próbki materiału sypkiego w stanie luźnym (g)
$m_c$	– masa całkowita badanej próbki materiału sypkiego (g)
$m_{k,s}$	– masa próbki kompozytu cementowego w stanie suchym (g)
$m_{k,w}$	– masa próbki kompozytu cementowego w stanie nasyconym wodą (g)
$m_m$	– masa cylindra pomiarowego wypełnionego w 100% mieszanką cementową (kg)
$m_{\dot{s},1}$	– masa próbki kompozytu cementowego przed ścieraniem (g)
$m_{\dot{s},2}$	– masa próbki kompozytu cementowego po ścieraniu (po 4,8,16,24 cyklach) (g)
$n_{m,k}$	– nasiąkliwość objętościowa kompozytu cementowego (%)
$p_{v,k}$	– porowatość objętościowa kompozytu cementowego (%)
$r_m$	– rozplływ mieszanki cementowej oznaczony metodą stolika rozplwywu (mm)
$t_B$	– czas w którym występuje odsączenie wody z mieszanki cementowej w jednorodnej formie (s)
$t$	– zmierzony czas (s)
$t_0$	– czas rozpoczęcia badania (czas zero) (min)
$t_1$	– czas początku wiązania mieszanki cementowej (min)
$t_2$	– czas końca wiązania mieszanki cementowej (min)
$t_c$	– czas przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej od głowicy nadawczej do odbiorczej (s)
$t_{kw}$	– czas końca wiązania mieszanki cementowej (min)
$t_{pw}$	– czas początku wiązania mieszanki cementowej (min)
$u_{k,\dot{s}}$	– ubytek masy próbki kompozytu cementowego w procesie ścierania (po 4, 8, 12, 16 cyklach ścierania) (%)
$v_{p,0}$	– porowatość objętościowa kompozytu referencyjnego (%)
$v_{p,1}$	– porowatość objętościowa kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największa redukcja/najmniejszy wzrost) (%)
$w_{a,0}$	– nasiąkliwość kompozytu referencyjnego (%)

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ STOSOWANYCH W ROZPRAWIE

---

$w_{a,1}$	– nasiąkliwość kompozytu modyfikowanego mączką granitową / popiołem lotnym charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (najniższy wzrost/największa redukcja) (%)
$z_{\text{składnik}}$	– zawartość składnika w serii kompozytów cementowych ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sum m_{1,x 1...n}$	– suma masy próbki pozostała na analizowanym sicie o wymiarze x oraz sitach powyżej niego (g)
$\eta$	– lepkość powietrza ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
$\rho$	– gęstość cementu ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_b$	– gęstość nasypowa materiału sypkiego w stanie luźnym ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_k$	– gęstość objętościowa suchego kompozytu cementowego ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_m$	– gęstość objętościowa mieszanki cementowej ( $\text{kg/m}^3$ )

## Wykaz ważniejszych definicji stosowanych w rozprawie

Cement	– spoiwo hydrauliczne, które wykazuje właściwości wiążące. Produkowany jest z surowców mineralnych, a po zmieszaniu z wodą daje zaczyn, który twardnieje w wyniku hydratacji
Kompozyt cementowy	– materiał utworzony z dwóch lub większej liczby różnych materiałów, w taki sposób, że ma właściwości wyjątkowe i/lub lepsze w stosunku do komponentów składowych osobno lub wynikających z prostego sumowania ich właściwości. Podstawowym jego składnikiem jest cement
Krzemionkowy popiół lotny	– produkt powstający w wyniku spalania paliw energetycznych (głównie węgla kamiennego), charakteryzujący się tym, że zawartość tlenku krzemu (IV) ( $\text{SiO}_2$ ) wynosi 44-52% oraz tlenku glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) wynosi 20-29%
Odpadowa mączka granitowa	– produkt uboczny powstający w wyniku obróbki (cięcia) skał granitowych, charakteryzujący się tym, że zawartość dwutlenku krzemu ( $\text{SiO}_2$ ) wynosi 50-80% oraz tlenku glinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) wynosi 10-20%, a jego ziarna są mniejsze niż 2mm
Cementowa warstwa wierzchnia	– warstwa wierzchnia podłogi, wykonana z cementu
Krzywa uziarnienia	– rozkład wielkości ziaren materiału określony w wyniku analizy sitowej
Gęstość nasypowa w stanie luźnym	– iloraz niezagęszczonej masy suchego kruszywa wypełniającego określony pojemnik do objętości tego pojemnika
Powierzchnia właściwa ziaren	– powierzchnia ciała stałego przypadająca na jego ilość, w przypadku badanych w rozprawie materiałów należy ją rozumieć jako wielkość powierzchni zewnętrznej ziarna przypadająca na jego masę
Właściwości morfologiczne ziaren	– parametry opisujące kształt, wielkość, okrągłość dwuwymiarowej projekcji rzutu ziarna
Odsączanie wody z mieszanki cementowej	– naturalne, samoczynne, grawitacyjne oddzielanie się wody od zaczynu cementowego po ułożeniu mieszanki cementowej w miejscu wbudowania
Gęstość upakowania składników mieszanki cementowej	– pomierzona masa jednostki objętości materiału wraz z zawartymi w niej porami i pustkami powietrznymi dla ściśle określonego wskaźnika w/c

## 1. WPROWADZENIE W PROBLEMATYKĘ ROZPRAWY

Cement produkowany jest z surowców naturalnych takich jak margiel, glina czy wapień [36]. Ograniczone pokłady tych materiałów mają wpływ na znaczące trudności w zapewnieniu ciągłości dostaw. Dodatkowo, część surowców wykorzystywana w produkcji cementu znajduje się na terytorium sąsiednich względem Polski krajów. Sankcje Unii Europejskiej, pandemia COVID-19 oraz wojna w Ukrainie zerwały łańcuchy dostaw surowców, przez co przemysł cementowy boryka się z trudnościami w produkcji cementu. Dostępność cementu, jego wpływ na środowisko, energochłonność produkcji oraz zwiększające się ceny, to czynniki wywołujące coraz częstsze próby poszukiwania alternatywnych materiałów, które pozwolą zastąpić część zużywanego cementu w mieszankach cementowych, pozwalających jednocześnie uniknąć pogorszenia ich właściwości [41]. Jednym ze znanych materiałów wykorzystywanych w tym celu jest krzemionkowy popiół lotny.

Krzemionkowy popiół lotny jest produktem ubocznym powstającym w wyniku spalania węgla kamiennego na cele energetyczne oraz ciepłownicze. Charakterystyka tego materiału, jego aktywność chemiczna oraz właściwości pucolanowe spowodowały, że od co najmniej kilkudziesięciu lat jest on aktywnie badany i wykorzystywany w przemyśle betonowym. Niemniej jednak jego popularność wzrosła tak znacząco, że w niektórych krajach wysokorozwiniętych jego cena zbliżyła się do ceny cementu, a sam popiół stał się towarem deficytowym. Kłopoty te są dodatkowo wzmacniane przez politykę Unii Europejskiej związaną z dążeniem do neutralności klimatycznej, która m.in. wymaga na krajach członkowskich rezygnację z wytwarzania energii za pomocą spalania paliw kopalnych (a jest to przecież podstawowy sposób produkcji krzemionkowego popiołu lotnego). Należy mieć także na uwadze, że COVID-19, wojna w Ukrainie oraz kryzys energetyczny spowodowały, że Polska zaczęła importować znaczne ilości węgla kamiennego, który często jest dużo niższej jakości niż rodzimy surowiec. Jakość węgla kamiennego powiązana jest bezpośrednio z jakością krzemionkowego popiołu lotnego powstałego w wyniku jego spalania, więc można wnioskować, że jakość popiołu będzie w najbliższych latach spadać. Trudno też stwierdzić, że krzemionkowy popiół lotny, który stosowany jest od lat może pozwolić na odwrócenie negatywnego trendu na rynku materiałów budowlanych, który wywołują sankcje europejskie oraz kryzys energetyczny. Należy oczekiwać, że wszystkie wymienione wcześniej problemy związane z węglem kamiennym, a co z tym związane produkcją krzemionkowego popiołu lotnego mogą doprowadzić do zmniejszania się dostępności tego materiału i stopniowego odchodzenia od jego wykorzystania w kompozytach cementowych.

Wraz z rozwojem przemysłowym na całym świecie z roku na rok wzrasta zapotrzebowanie na surowce mineralne takie jak granit, bazalt, marmur czy sjenit. Budowa dróg, budynków czy placów składowych wymaga wykorzystania wielkich pokładów kruszywa, który produkowany jest ze skał naturalnych. Polska jest także jednym z liderów światowych wśród producentów wyrobów i materiałów kamieniarskich. Oprócz dużej liczby produkowanych wyrobów kamieniarskich w kraju, w Polsce

rozwinął się też przemysł obróbki skał granitowych. Na Dolnym Śląsku w okolicy Strzegomia powstało zagłębie rzemieślników trudniących się tym fachem. Wszystko to spowodowało, że z roku na rok rosną pokłady odpadu granitowego (zwanego odpadową mączką granitową), który ma marginalne wykorzystanie przemysłowe.

Problemy ze składowaniem mączki granitowej na hałdach nie ograniczają się jedynie do dostępnego do tego celu miejsca, ale przede wszystkim mają one negatywny wpływ na środowisko w swojej okolicy prowadząc przy tym do pylicy, raka płuc, zapylenia roślin, zwierząt i budynków, ale także osuwisk, zapadlisk czy przenoszenia ich cząstek przez wiatr. Jednym ze sposobów utylizacji tego odpadu może być wykorzystanie go do produkcji kompozytów cementowych.

Pierwsze badania wykorzystania odpadowej mączki granitowej w kompozytach cementowych wskazują istotne zagadnienia do rozwiązania w celu umożliwienia produkcji tak modyfikowanych kompozytów. Pogorszenie się konsystencji mieszanki (bardziej gęsta), skrócenie czasu wiązania, zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie to niektóre ze znanych problemów. Z drugiej strony obserwuje się, że mączką granitową poprawia gęstość objętościową mieszanki oraz zwiększa odporność na ścieranie kompozytu. Należy też stwierdzić, że tematyka modyfikowania mieszanki cementowej dodatkiem mączki granitowej (w tym odpadowej), jest znana od lat, a obecny stan wiedzy w tej tematyce pozwala wskazać, że jej podstawowy wpływ na właściwości mieszanki i kompozytu cementowego zostały poznane i nie stanowią one znaczącej nowości.

Mając na uwadze powyższe, wydaje się zatem zasadne sprawdzenie jednoczesnego zastosowania krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w kompozytach cementowych, gdyż takie rozwiązanie może wpasować się w idee kształtujące innowacyjne rozwiązania w technice budowlanej [35]. Może to bowiem pozwolić na zmniejszenie zapotrzebowania na cement w mieszance, wywołując w niej pozytywny efekt oddziaływania popiołu lotnego, który zredukuje negatywne aspekty dodatku mączki granitowej oraz wspomogą jej pozytywne oddziaływanie. Znane jest z literatury, że modyfikacja mieszanki krzemionkowym popiołem lotnym prowadzi do zmiany jej konsystencji na bardziej płynną, podczas gdy mieszanki modyfikowane odpadową mączką granitową wykazują trend przeciwny. Jednoczesny dodatek tych dwóch materiałów może zatem pozwolić na neutralizację ich skrajnych wpływów na mieszankę cementową, prowadząc przy tym do bardziej optymalnych właściwości kompozytów cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg. Jest to poparte faktem, że kompozyty cementowe, w których zastąpiono część cementu dodatkiem mączki skalnej zwykle mają niższe właściwości mechaniczne niż kompozyty niemodyfikowane. Zatem takie rozwiązanie nie jest odpowiednie do kompozytów stosowanych w elementach konstrukcyjnych obiektów budowlanych, natomiast może być właściwe dla warstwy wierzchniej w podłogach, gdyż nie wymagają one wysokich właściwości mechanicznych kompozytu. Fakt, że takie jednoczesne wykorzystanie tych dwóch materiałów nie zostało jeszcze zbadane i przeanalizowane przez badaczy, należy oceniać jako istotną lukę badawczą, której wypełnienie może pozwolić odnalezienie

nowatorskiego ich wykorzystania w kompozytach cementowych do stosowania w warstwach wierzchnich podłóg.

Podłoga jest to element pomieszczeń budynku, który zwykle składa się z warstwy wierzchniej (posadzki), która wykonana jest na warstwie podkładowej (podkładzie). Podkład układa się na przygotowanym wcześniej podłożu gruntowym, służy ona do przejmowania obciążeń działających na warstwę wierzchnią i przekazywania ich na podłoże gruntowe. Grunt pod podkładem pełni rolę oparcia konstrukcyjnego dla podłogi oraz innych elementów budynku, które przekazują na niego obciążenia.

Warstwę wierzchnią i podkładową wykonuje się zazwyczaj z betonu, a pomiędzy nimi występuje powierzchnia zespolenia [75]. Właściwości warstwy wierzchniej projektuje się z uwzględnieniem przeznaczenia podłogi. Podłogi z kompozytów cementowych wykonuje się obecnie powszechnie w większości obiektach budowlanych. Są szczególnie często wykorzystywane w budynkach mieszkalnych, placówkach medycznych, halach przemysłowych czy galeriach handlowych. Z racji występowania zróżnicowanych warunków użytkowania podłóg, warstwa wierzchnia musi posiadać odpowiednio dobrane właściwości i powinny cechować się wysoką trwałością oraz niską awaryjnością [74]. Niestety, ale w podłogach identyfikuje się częste defekty i awarie powszechnie znane w elementach wykonywanych horyzontalnie (płytkach). Zwykle do uszkodzenia cementowej warstwy wierzchniej prowadzi niewłaściwy dobór kompozycji materiałowej mieszanki z której jest ona wykonana, błędy wykonawcze lub zmiana warunków eksploatacji [139].

Warstwa wierzchnia podłóg zwykle wykonywana jest z zapraw cementowych. Identyfikuje się zatem w warstwach wierzchnich typowe dla betonu problemy takie jak niska wytrzymałość na rozciąganie, niejednorodność kompozytu w funkcji jego grubości z racji migracji wody po ułożeniu mieszanki w miejscu wbudowania czy problem odsączanej wody z mieszanki po jej ułożeniu [138]. Mogłoby się wydawać, że częściowe zastąpienie cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego w kompozycji materiałowej cementowej warstwy wierzchniej pozwoli na poprawę jej właściwości (podobnie jak ma to miejsce w konstrukcyjnych płytach żelbetowych, gdzie redukuje on ilość emitowanego ciepła przez mieszankę oraz reguluje dynamikę przyrostu wytrzymałości, zmniejszając także skurcz plastyczny), jednak w warstwach wierzchnich może on dodatkowo prowadzić do zwiększonego odsączania wody z mieszanki, a co z tym związane niejednorodnością właściwości cementowej warstwy wierzchniej. Z drugiej strony, modyfikacja cementowej warstwy wierzchniej dodatkiem mączek mineralnych pozwala na zmniejszenie się odsączania wody z mieszanki oraz poprawia jednorodność kompozytu. Wydaje się zatem, że jednoczesny dodatek obu tych materiałów może korzystnie wpłynąć na właściwości cementowej warstwy wierzchniej. Zauważa się też w literaturze [45], że dodatki w formie proszków pozwalają na ograniczenie odsączania wody z mieszanki cementowej, poprawiając jej jednorodność i zwiększając właściwości stwardniałego kompozytu cementowego. Badacze z całego świata koncentrują swoje badania na sposobie rozwiązania

opisanych problemów poprzez np. modyfikację kompozycji materiałowych mieszanek stosowanych do wykonywania cementowej warstwy wierzchniej podłóg.

Wszystkie wyżej opisane problemy prowadzą do konkluzji, że wykorzystanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej może nie tylko pozwolić zredukować negatywny wpływ na środowisko stosowania cementu, ale też zmniejszyć jego konsumpcję w mieszankach cementowych wykorzystywanych do wykonywania warstwy wierzchniej podłóg. W konsekwencji możliwe jest, że stosowanie jednoczesnego dodatku popiołu i mączki granitowej może polepszyć właściwości kompozytów cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg.

Rozprawa liczy 7 rozdziałów. W rozdziale 1 omówiono wprowadzenie w problematykę rozprawy.

W rozdziale 2 zdefiniowano cele i zakres rozprawy.

Rozdział 3 przedstawia rozpoznanie literaturowe związane z tematyką rozprawy. Rozpoznanie rozpoczęto od opisu sposobu powstawania oraz problemów związanych ze składowaniem odpadowej mączki granitowej. Scharakteryzowano jej wpływ na właściwości mieszanki cementowej oraz stwardniałego kompozytu cementowego. Następnie opisano krzemionkowy popiół lotny, zdefiniowano związaną z nim problematykę oraz określono jego wpływ na właściwości mieszanki cementowej i stwardniałego kompozytu cementowego. Kolejno, zamieszczono przegląd stosowanych kompozycji materiałowych w których wykorzystano jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i innego dodatku mineralnego (z racji braku wcześniejszego zastosowania połączenia popiołu lotnego i mączki granitowej) oraz ich wpływu na właściwości mieszanki i kompozytu cementowego. Wykonano przegląd właściwości cementowej warstwy wierzchniej oraz opisano dodatki stosowane do modyfikacji kompozycji materiałowych stosowanych do jej produkcji. Zakończeniem rozdziału 3 jest podsumowanie wykonanego przeglądu literaturowego.

W rozdziale 4 opisano wykorzystaną w badaniach metodykę badawczą oraz określono ogólny i szczegółowy plan badań.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki badań własnych wraz z ich analizą. W skład opisanych badań wszedł opis wpływu dodatku mączki granitowej, popiołu lotnego oraz ich jednoczesnego dodatku na takie właściwości mieszanki cementowej jak jej konsystencja, gęstość objętościowa, czasy wiązania, odsączanie wody z mieszanki czy gęstość upakowania składników. Następnie opisano wyniki badań właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych dla cementowej warstwy wierzchniej modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej. Określono wpływ różnych sposobów pielęgnacji na uzyskane wyniki badań. W tej części pracy wykonano także analizę ekonomiczno – mechaniczną oraz ekologiczno – mechaniczną, które mają służyć porównaniu poszczególnych wyników z uwzględnieniem szerszego kontekstu niż tylko właściwości mechaniczne kompozytu.



Rozdział 6 stanowi opis wdrożenia wyników badań uzyskanych w rozprawie w praktyce budowlanej wykonywania cementowej warstwy wierzchniej podłóg garaży podziemnych modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wraz z ich porównaniem do serii referencyjnej (niemodyfikowanej).

W rozdziale 7 zamieszczono podsumowanie oraz wnioski i uwagi końcowe z przeprowadzonych badań i analiz. Zaproponowano także dalsze kierunki badań związanych z tematyką rozprawy doktorskiej.

Rozprawę kończy zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej, wykaz literatury, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz zestawienie rysunków i tabel.

W wyniku prac nad tematyką rozprawy, sporządzono 2 zgłoszenia patentowe [P1-P2], których doktorant jest współtwórcą, w tym jedno z nich uzyskało już decyzję o przyznaniu patentu [P1]. Opublikowano też 6 prac naukowych (w tym 3 z Impact Factor) w których doktorant jest autorem lub współautorem [A1-A4,M1-M2].

## 2. CELE I ZAKRES ROZPRAWY

### 2.1. Cele rozprawy

Ogólnym celem naukowym rozprawy jest ocena wpływu odpadowej mączki granitowej i krzemionkowego popiołu lotnego na wybrane właściwości kompozytów cementowych. W szczególności celem jest ocena wpływu dodatku odpadowej mączki granitowej i krzemionkowego popiołu lotnego na takie właściwości kompozytów cementowych jak:

- **właściwości mieszanki cementowej** (konsystencja, wodożądność, gęstość objętościowa, czas początku i końca wiązania, odsączenie wody z mieszanki cementowej, gęstość upakowania składników),
- **właściwości fizyczne stwardniałego kompozytu cementowego** (gęstość objętościowa, porowatość objętościowa, nasiąkliwość masowa),
- **właściwości wytrzymałościowe stwardniałego kompozytu cementowego** (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu),
- **właściwości adhezyjne stwardniałego kompozytu cementowego** (przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu),
- **właściwości funkcjonalne stwardniałego kompozytu cementowego** (odporność na ścieranie, jednorodność kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej).

Celem aplikacyjnym jest wyselekcjonowanie na drodze badawczej takiej ilości jednoczesnego dodatku odpadowej mączki granitowej i krzemionkowego popiołu lotnego, dla której zauważalna będzie poprawa podstawowych właściwości kompozytów cementowych, co posłuży do wskazania najbardziej optymalnych kompozycji materiałowych pod względem kosztu ich wytworzenia, ich właściwości mechanicznych oraz związanej z nimi emisyjności dwutlenku węgla. Dodatkowo, celem aplikacyjnym jest też określenie wpływu różnych warunków przechowywania kompozytów cementowych na ich właściwości.

### 2.2. Zakres rozprawy

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

1. Dokonanie krytycznego przeglądu literaturowego, który będzie dotyczył między innymi: analizę właściwości krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, identyfikację podstawowej problematyki związanej z tymi materiałami, analizę ich wpływu na właściwości mieszanki oraz kompozytu cementowego, zdefiniowanie wpływu jednoczesnego dodatku

- krzemionkowego popiołu lotnego oraz innego dodatku mineralnego na właściwości mieszanki oraz kompozytu cementowego.
2. Wykonanie analizy właściwości zastosowanych materiałów (cementu, krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej, kruszywa drobnego) wykorzystanych do badań, ze szczególnym uwzględnieniem właściwości ziaren tych materiałów (krzywa uziarnienia, właściwości morfologiczne ziaren, gęstość nasypowa).
  3. Wykonanie badań własnych jedenastu serii mieszanek cementowych, które na celu mają określenie wpływu krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej oraz ich jednoczesnego dodatku na takie właściwości jak: konsystencja, gęstość objętościowa, początek i koniec czasu wiązania, odsączenie wody z mieszanki cementowej, gęstość upakowania składników mieszanki, określenie ich wzajemnych zależności oraz powiązanie wpływu materiałów z właściwościami ich ziaren, porównanie uzyskanych wyników z wynikami serii referencyjnej (niemodyfikowanej).
  4. Badania zaczynów cementowych wykonanych zgodnie z założeniami badawczymi, których skład modyfikowany będzie dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej oraz ich jednoczesnym dodatkiem, określenie wpływu tych materiałów na takie właściwości jak: gęstość objętościowa, porowatość objętościowa, nasiąkliwość masowa, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, odporność na ścieranie, analiza uzyskanych wyników w oparciu o wcześniej zaobserwowane właściwości materiałów oraz mieszanek cementowych, porównanie uzyskanych wyników do serii referencyjnej, opis wpływu różnych warunków pielęgnacji zaczynów cementowych na ich właściwości.
  5. Badania zapraw cementowych wykonanych zgodnie z założeniami badawczymi, których skład modyfikowany będzie dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej oraz ich jednoczesnym dodatkiem, określenie wpływu tych materiałów na takie właściwości jak: gęstość objętościowa, porowatość objętościowa, nasiąkliwość masowa, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, odporność na ścieranie, przyczepność cementowej warstwy wierzchniej do podkładu, jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości warstwy, analiza uzyskanych wyników w oparciu o wcześniej zaobserwowane właściwości materiałów oraz mieszanek cementowych oraz zaczynów cementowych, porównanie uzyskanych wyników do serii referencyjnej, opis wpływu różnych warunków pielęgnacji zapraw cementowych na ich właściwości.
  6. Wykonanie analizy wytrzymałościowo – kosztowej oraz wytrzymałościowo – ekonomicznej na podstawie której wyselekcjonowane zostaną serie badawcze, które pozwalają na osiągnięcie najbardziej korzystnych wyników właściwości kompozytów cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg.
  7. Podsumowanie, wyciągnięcie wniosków naukowych i praktycznych oraz podanie kierunków dalszych badań.

### 3. ROZPOZNANIE LITERATUROWE

#### 3.1. Mączka granitowa

##### 3.1.1. Wprowadzenie

Rosnący od lat problem z dostępnością cementu, kryzys energetyczny czy zerwane łańcuchy dostaw przez konflikt w Ukrainie powodują, że przemysł cementowy boryka się z istotnymi trudnościami z produkcją cementu. Pandemia COVID-19 oraz wzrastające znacząco koszty transportu materiałów dodatkowo obciążają branżę cementową. Od lat rosąca konsumpcja cementu rok do roku powoduje, że producenci tego materiału nie są w stanie zaspokoić potrzeb rynkowych. Próby zastąpienia części cementu w mieszankach cementowych są także istotne dla środowiska oraz mogą pozwolić uzyskać dodatkowe korzyści ekonomicznej, jednak opisane wcześniej wydarzenia dodatkowo przyspieszyły poszukiwania materiałów pozwalających na zastąpienie cementu [107]. Dodatkowo utrudniony dostęp do surowców oraz zwiększające się koszty transportu wywierają mocny wpływ na ceny cementu. Coraz częściej zauważalnym wyzwaniem stawianym przed branżą cementową jest redukcja ilości emitowanego dwutlenku węgla w procesie produkcji cementu. Wszystko to powoduje, że zarówno dostępność cementu jest znacznie ograniczona, a jego cena wynoszona jest na historyczne maksima.

Rozwinięty przemysł przetwórstwa skał granitowych ma negatywny wpływ na środowisko naturalne [152]. Ogromna ilość produkowanego odpadu granitowego wymaga bowiem jego przemysłowego wykorzystania. Dotychczas odpadowa mączka granitowa nie miała istotnego zastosowania w przemyśle [88]. Co prawda znane są przykłady wykorzystania tego materiału jako jedna z warstw podbudowy nawierzchni z kostki betonowej lub granitowej, jednak są to zastosowania rzadkie. Brak przemysłowego zastosowania odpadu granitowego spowodował, że firmy zajmujące się przetwórstwem skał granitowych składują ten odpad na hałdach lub wykorzystują go do zasypywania kopalni odkrywkowych [80]. Odpadowa mączka granitowa charakteryzuje się mialkim uziarnieniem oraz wysoką zawartością krzemu i ma szkodliwe oddziaływanie na zdrowie ludzi oraz środowisko naturalne. Znane są z literatury przykłady wywoływania przez materiały sypkie z wysoką zawartością krzemu chorób układu oddechowego (pylica, nowotwór płuc) [37]. Opisano także istotny wpływ odpadowych mączek mineralnych składowanych na hałdach na środowisko naturalne. Prowadzi to do zapylenia roślin, zmiany pH gleby oraz wody, a także osuwisk czy zapadania się w hałdach ludzi i zwierząt. Problem środowiskowy, który związany jest z odpadową mączką granitową obrazuje Rysunek 1.



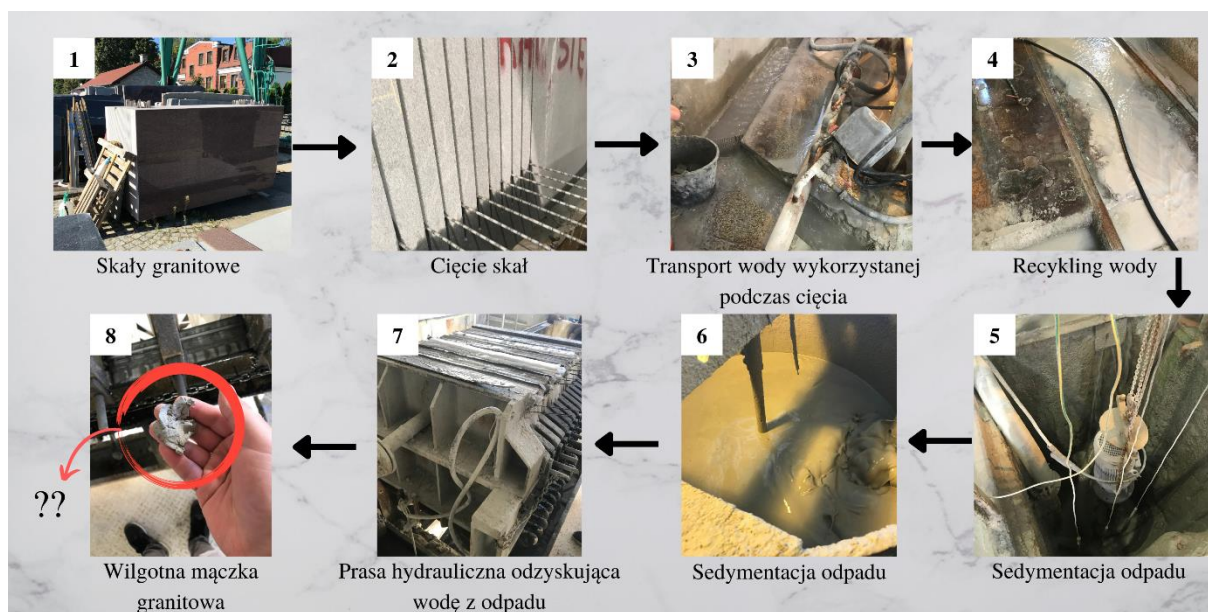
Rysunek 1. Problem środowiskowy związany ze składowaniem mączek mineralnych na hałdach:

- a) proces powstawania i składowania odpadu mineralnego b) fotografie składowisk odpadów mineralnych na hałdach c) zaleganie odpadowych mączek mineralnych w krajach europejskich (opracowanie własne autora, na rysunku b) wykorzystano fotografie ze źródła [78])

Cały proces związany z wydobyciem oraz przetwarzaniem skał mineralnych (w tym granitu) obarczony jest wysokimi kosztami środowiskowymi (Rysunek 1a). Kopalnie odkrywkowe degradują teren naturalny czego następstwem jest jego wieloletnie wyłączenie z użytkowania [66]. Wydobycie oraz transport materiałów realizowane jest zwykle z wykorzystaniem ciężkiego sprzętu, który emituje ogromne ilości dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) [42]. Obróbka skał granitowych jest energochłonna ponieważ wymaga zastosowania ogromnych urządzeń do ich cięcia, szlifowania lub kruszenia. Po przetworzeniu odpady muszą zostać przetransportowane na miejsce składowania, a gotowe produkty na miejsce wykorzystania, co po raz kolejny prowadzi do znaczącej emisji  $\text{CO}_2$  do atmosfery [130]. Składowanie odpadów mineralnych na hałdach (Rysunek 1b) jest znaczącym problemem środowiskowym, z którym należy aktywnie walczyć poprzez poszukiwanie przemysłowego zastosowania tego typu materiałów [43]. Zaleganie mączek mineralnych staje się obecnie znaczącym problemem w większości krajów europejskich (Rysunek 1c). Za zaskakujące można przyjąć wyniki opisujące ilości zalegającego materiału odpadowego w krajach skandynawskich (szczególnie w Finlandii i Szwecji). Jest to podyktowane nikłym zastosowaniem przemysłowym w tym rejonie mineralnych materiałów odpadowych oraz stosunkowo niską populacją ludności w tych krajach. Wysoką ilość zalegającego odpadu mączek mineralnych obserwuje się też w krajach Europy południowo – wschodniej, jednak kraje w tym rejonie zajmują tereny góryste, w których rozwinięty jest przemysł związany z obróbką skał mineralnych, co może tłumaczyć podwyższoną ilość zalegających odpadów.

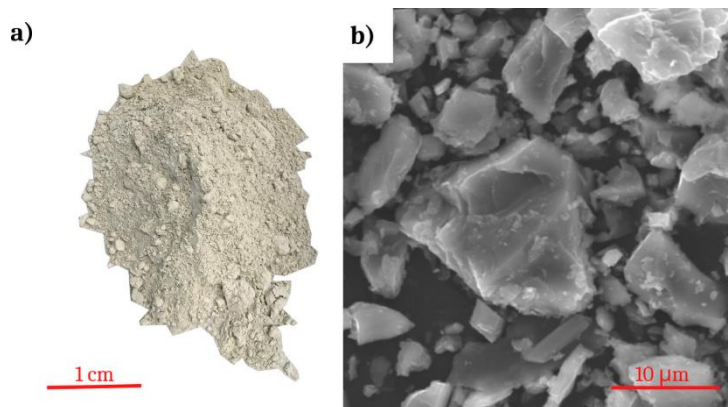
Odpadowa mączka granitowa jest produktem ubocznym powstającym w procesie obróbki skał granitowych. Granit jest skałą jawnokrystaliczną, powstałą w wyniku zastygnięcia płynnej magmy we wnętrzu ziemi. Skład chemiczny tej skały tworzą głównie takie związki chemiczne jak: tlenek krzemu (IV), tlenek glinu (III), tlenek wapnia (II) oraz pozostałe, których zawartość w skale zwykle nie przekracza 5% (każdego z nich). Skała granitowa charakteryzuje się wysokimi właściwościami

fizycznymi takimi jak gęstość objętościowa (ok. 2600kg/m<sup>3</sup>) [121], niska nasiąkliwość (0,49%) [51], wytrzymałość na zginanie (ok. 15 MPa) [62], wytrzymałość na ściskanie (ok. 140 MPa) [51]. Wszystkie te elementy powodują, że granit jest chętnie wykorzystywany w przemyśle kamieniarskim oraz budowlanym. Region dolnego śląska charakteryzuje się zaleganiem największych pokładów skał granitowych w Polsce. Na tym obszarze wydobywa i przetwarza się około 90% skał granitowych wykorzystywanych w naszym kraju. Niestety jednak, wraz z rozwojem tej profesji znacząco wzrosła też ilość produkowanego odpadu powstającego w wyniku obróbki skał granitowych. Takim odpadem jest mączka granitowa. Proces powstawania tego materiału przedstawiono na Rysunek 2. Bloki skał granitowych (wymiary 1x1x2 m) są cięte na wąskie płyty za pomocą pił diamentowych (zdjęcie 2). Cięcie odbywa się przy udziale wody, zatem istotne dla producentów jest aby zapewnić możliwość jej recyklingu. Jednocześnie woda jest także nośnikiem materiału usuniętego przez piły diamentowe (zdjęcia 3,4). Zabrudzona woda trafia następnie do zbiornika sedymentacyjnego, w którym przebiega proces oczyszczania wody z wykorzystaniem procesu sedymentacji (zdjęcie 5,6). Materiał, który zbiera się w dnie zbiornika podlega dodatkowo usunięciu resztek wody za pomocą prasy hydraulicznej (zdjęcie 7). W wyniku tego procesu powstaje materiał odpadowy o konsystencji plastycznej (zdjęcie 8), który po osuszeniu na świeżym powietrzu przyjmuje formę sypkiej mączki granitowej.



Rysunek 2. Proces technologiczny obróbki skał granitowych w wyniku którego powstaje odpadowa mączka granitowa (opracowanie własne na podstawie fotografii autora)

Istnieje kilka rodzajów odpadowej mączki granitowej – powstająca w wyniku cięcia skał granitowych, ich kruszenia lub szlifowania. Ze względu na znaczącą ilość zalegającej odpadowej mączki granitowej na Dolnym Śląsku, powstającej w wyniku cięcia skał granitowych, autor zdecydował się korzystać z tego rodzaju odpadu w swojej pracy badawczej. Rysunek 3 przedstawia fotografie odpadowej mączki granitowej.

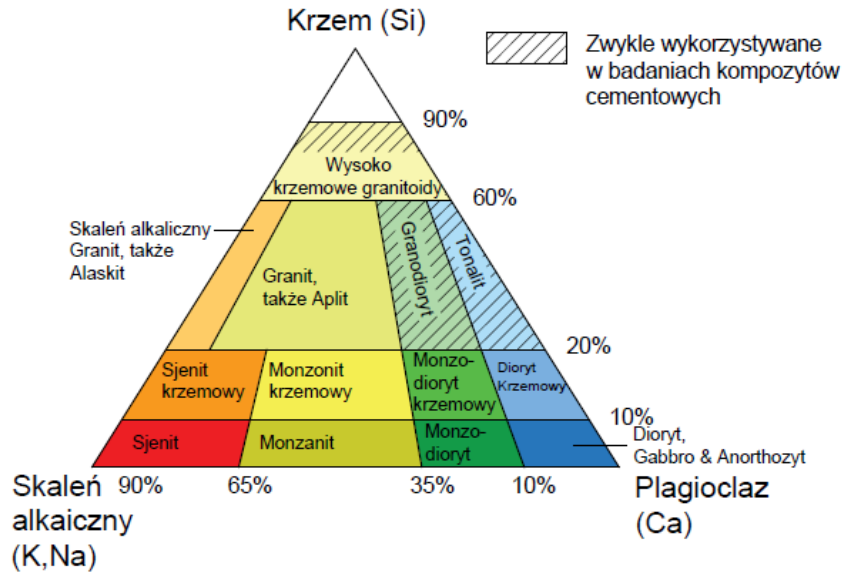


Rysunek 3. Opadowa mączka granitowa: a) w formie sypkiej b) obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (opracowanie własne, na podstawie fotografii autora)

Badacze z całego świata prowadzą badania związane z wykorzystaniem tego typu odpadów w nowoczesnej inżynierii materiałowej. Zauważono, że jednym z przemysłów, w którym wykorzystanie odpadowych mączek mineralnych ma znaczący potencjał jest budownictwo [157]. Odnotowano pierwsze próby stosowania odpadowych mączek mineralnych w kompozytach cementowych, wykorzystując ją jako substytut części cementu lub kruszywa drobnego. Niemniej jednak większość z tych prób ma charakter badań podstawowych i nie stanowią systematycznej odpowiedzi nad problemem badawczym: czy mączka granitowa może zostać zutylizowana w kompozytach cementowych wykorzystywanych w przemyśle budowlanym? Zdaje się, że dodatek odpadowej mączki granitowej nie pozwala na osiągnięcie zwiększonych właściwości kompozytów cementowych. Punkt 3.4 rozprawy przybliży tematykę wykorzystania odpadowej mączki granitowej w kompozytach cementowych oraz podsumuje i porówna literaturowe wyniki badań w tym temacie opublikowane przez badaczy.

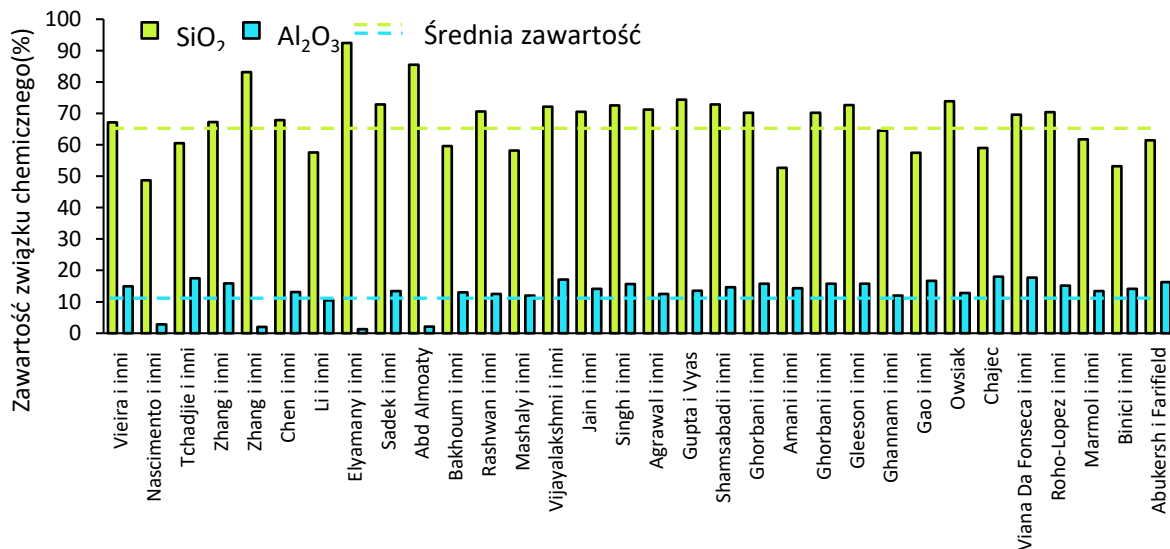
### 3.1.2. Właściwości chemiczne i fizyczne mączki granitowej

Skład chemiczny skały granitowej jest jej najważniejszą właściwością, która determinuje możliwość jej wykorzystania w przemyśle [129]. Rysunek 4 przedstawia podział grupy skał granitowych na ich typy w zależności od ich składu chemicznego. Należy podkreślić, że do produkcji kompozytów cementowych zwykle wykorzystuje się tylko ich trzy rodzaje (Wysoko krzemowe granitoidy, Granodiority oraz Tonalit). Wpływ na to mają zalecenia spełnienia minimalnej zawartości krzemu w skale (minimum 50%) oraz niskiej zawartości minerałów o odczynie zasadowym (mniej niż 20%) dla dodatków mineralnych stosowanych w kompozytach cementowych.



Rysunek 4. Klasyfikacja chemiczna skał granitowych (opracowanie własne na podstawie [151])

Właściwości chemiczne skał granitowych są kluczowe przy ocenie możliwości wykorzystania odpadowej mączki granitowej w produkcji kompozytów cementowych. Zauważono, że zależnie od zawartości tlenku krzemu (IV) oraz tlenku glinu (III) modyfikacja kompozytów cementowych dodatkami mączki granitowej prowadzi do różnych efektów. W celu przedstawienia porównania składu chemicznego mączki granitowej wykorzystywanej w różnych pracach naukowych przygotowano Rysunek 5.



Rysunek 5. Zawartość tlenku krzemu (IV) oraz tlenku glinu (III) w mączce granitowej wykorzystywanej w badaniach opisanych w literaturze [1, 2, 57–59, 62, 68, 86, 105, 108, 109, 122, 3, 133, 135, 136, 142, 145, 152, 162, 167, 168, 187, 4, 188, 7, 11, 23, 45, 50, 52] (opracowanie własne)



Analizując Rysunek 5 można wnioskować, że zwykle wysoki poziom tlenu krzemu (IV) w mączce granitowej jest powiązany z niską zawartością tlenu glinu (III) [186]. W większości analizowanych prac zawartość obu analizowanych tlenków jest podobna i nie różni się znacząco (różnice mieszczą się w 10% zawartości związku chemicznego). Istotne jest, że na przedstawione porównanie literaturowe nie ma znaczącego wpływu lokalizacja w której mączka granitowa została wyprodukowana (np. dla prac z Brazylii [142], Chin [23], Iranu [59] czy Polski [122] badacze donoszą o zbliżonej do siebie zawartości analizowanych tlenków). Zgodnie z informacjami przedstawionymi przez *Shamsabadi i inni* [145] jeżeli spełniona jest nierówność  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$  wówczas zazwyczaj badana mączka mineralna może wykazywać właściwości pucolanowe. Niemniej jednak większość prac literaturowych [57] w których wykorzystano mączkę mineralną, której skład chemiczny spełniał przedstawioną nierówność, raportuje, że materiały te nie wykazują właściwości pucolanowych. Badacze twierdzą, że zauważone oznaki reaktywności mączki granitowej nie wynikają z reakcji pucolanowej, a z bardzo miłkiego uziarnienia wykorzystanej mączki. Znane jest bowiem, że bardzo miłkie uziarnienie mączki granitowej ( $<10\mu\text{m}$ ) powoduje aglomerację drobnych cząstek na podstawie przyciągania elektrostatycznego między cząsteczkami (siły Van der Waalsa). Niemniej jednak nie obserwuje się znaczącego wpływu tej własności na właściwości kompozytów cementowych – zauważa się natomiast trudność w zapewnieniu wymaganej jednorodności mieszanki cementowej (aglomerowane cząstki są trudne do rozdzielania i równomiernego rozmieszczenia w mieszance). *Gardner i inni* [55] opisali wpływ różnych odpadowych mączek mineralnych na proces hydratacji cementu. Zauważono [55], że wykorzystanie mączki o drobnym uziarnieniu prowadzi do tzw. wewnętrznego efektu wypełniacza (eng. *inert filler effect*). Drobne ziarna materiału stanowią dobre podłoże do rozwoju procesu hydratacji i tworzenia się struktur krystalicznych, dodatkowo przy tym poprawiając wypełnienie wolnych miejsc w mieszance. W konsekwencji obserwuje się wzrost stopnia hydratacji cementu w kompozycie oraz jego właściwości mechaniczne. Wielu badaczy wówczas błędnie wskazuje, że wzrost właściwości mechanicznych wywołany został właściwościami pucolanowymi mączki mineralnej, niemniej jednak mączki mineralne zwykle wykazują niewielką lub nie wykazują aktywności pucolanowej. Należy także podkreślić, że mączka granitowa wykazuje stałość właściwości chemicznych w czasie oraz niewielkie zróżnicowanie składu chemicznego (niski wpływ lokalizacji z której pochodzi skała granitowa).

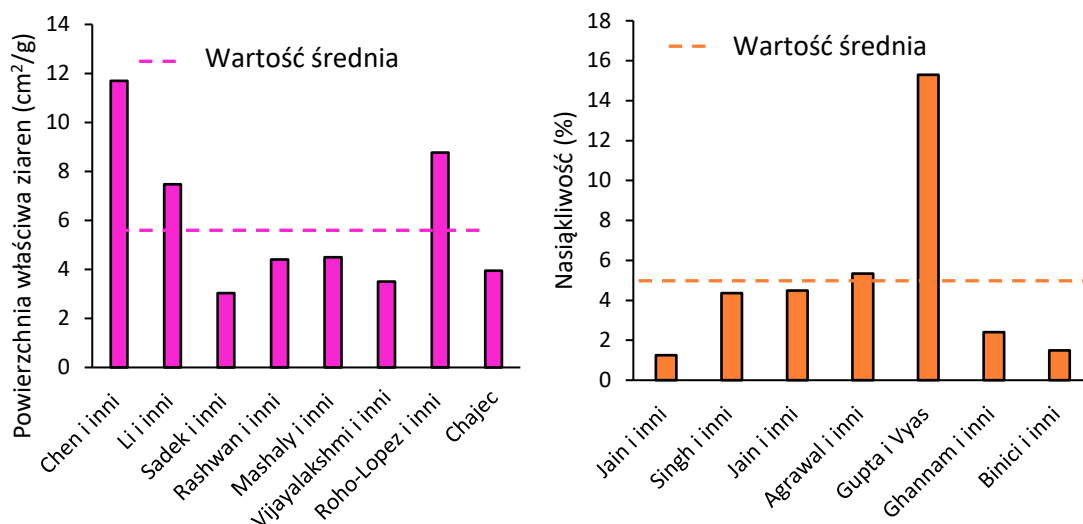
Skały granitowe pomimo, że powstają we wnętrzu ziemi, w wyniku ruchów górotwórczych są wynoszone na jej powierzchnię. Wówczas narażone są na oddziaływanie czynników atmosferycznych lub organizmów żywych. Ma to znaczący wpływ na tzw. wietrzenie skał granitowych. Wietrzenie skał granitowych jest procesem fizycznym, w którym działanie energii słonecznej, wody, powietrza oraz organizmów żywych prowadzi do mechanicznego rozpadu i przemian chemicznych struktury skały. W jego wyniku ulegają zmianie właściwości fizyczne oraz chemiczne skał granitowych. Tabela 1 przedstawia opis właściwości skał granitowych w zależności od stopnia zwietrzenia skały.

Tabela 1. Wpływ zwietrzenia skały granitowej na jej właściwości fizyczne (na podstawie [81])

Stopień zwietrzenia skały granitowej	Opis	Twardość (SHV)	Gęstość objętościowa	Wilgotność	Porowatość całkowita
			(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)
Świeży	Nie ma widocznych zmian w strukturze w związku z warunkami pogodowymi. Kolor niebiesko-szary. Ekstremalnie wytrzymały.	> 65	2,60-2,65	0,10-0,20	1,50-2,00
Lekko zwietrzony	Skały z brązowo-żółtym wtrąceniem tylko w strefie adhezji. Brak penetracji skały przez zwietrzenie. Ekstremalnie wytrzymały.	64-65	2,58-2,62	0,32-0,35	2,00-3,00
Średnio zwietrzony	Widoczne zmiany koloru w grubości połączonych ze sobą struktur materiału, jednak nie więcej niż 50% ich grubości. Bardzo wytrzymały.	58-64	2,54-2,59	0,50-1,10	3,00-4,00
Mocno zwietrzony	Zmianie koloru uległo więcej niż 50% objętości skały, pęknięcia materiału są ciasne, jednak nie powodują zniszczeń materiału. Wytrzymały.	56	2,52-2,55	1,40-1,65	4,00-4,50
Bardzo mocno zwietrzony	Całkowita zmiana koloru skały na żółto-brązową oraz żółto-pomarańczową. Ogromna liczba mikropęknięć, Umiarkowana wytrzymałość.	50-52	2,50-2,53	2,00-4,00	5,20-6,00

Wraz ze wzrostem stopnia zwietrzenia skały granitowej istotnie zmieniają się jej właściwości mechaniczne oraz fizyczne. Ten fakt będzie także wpływał na właściwości materiału powstałego w wyniku obróbki skał (w tym także mączek mineralnych). Zwietrzenie skały powoduje zmiany struktury skały wywołując liczne pęknięcia, mikropęknięcia czy ścieranie. Struktura materiału ulega osłabieniu, co prowadzi do kruszenia się drobnych cząstek skały. Zmiana koloru skał może natomiast być łączona z wpływem procesu zwietrzenia na właściwości chemiczne skały. Zmianie ulega skład chemiczny skały, co prowadzi do nieodwracalnych zmian fizyko-chemicznych materiału. Należy zatem podkreślić jak wielkie znaczenie ma w tym przypadku proces selekcji i segregacji skał mineralnych wykorzystywanych w budownictwie. Wykorzystanie materiału mocno lub bardzo mocno zwietrzonego będzie bowiem oddziaływać na właściwości materiału budowlanego z jego dodatkiem, zmniejszając przy tym jego trwałość oraz walory użytkowe [120].

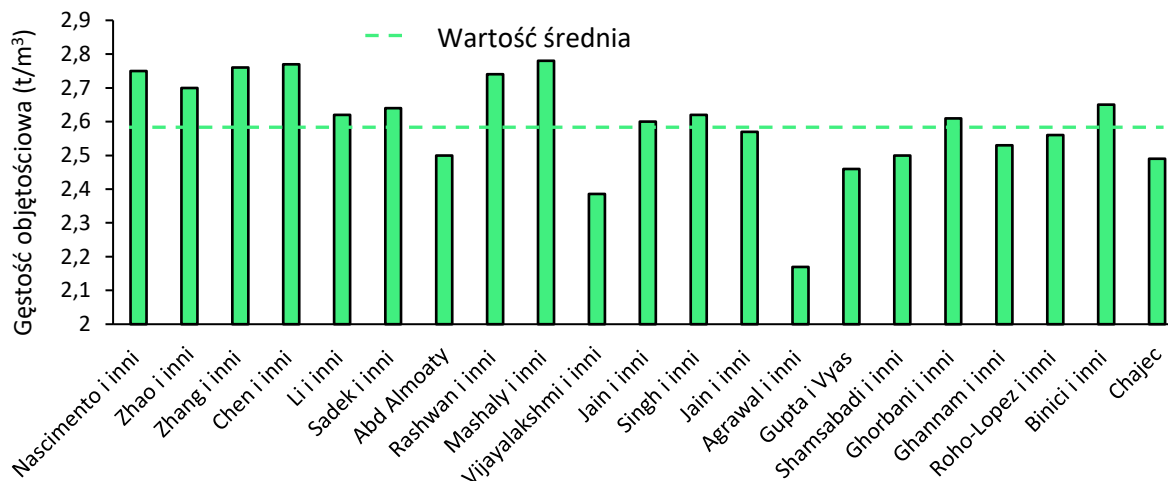
W wyniku obróbki skał granitowych powstaje odpadowa mączka granitowa, której właściwości fizyczne często są uzależnione od wielu czynników takich jak: pochodzenie skały granitowej, stopień jej zwietrzenia, skład chemiczny, metoda obróbki skały. Wszystkie te aspekty są istotne i prowadzą do znaczącego zróżnicowania właściwości fizycznych mączki granitowej. Rysunek 6, Rysunek 7 oraz Rysunek 8 przedstawiają właściwości fizyczne ziaren mączki granitowej opisane w literaturze.



Rysunek 6. Właściwości fizyczne ziaren mączki granitowej według literatury: a) powierzchnia właściwa ziaren [23, 105, 109, 133, 135, 136, 168] b) nasiąkliwość [3, 11, 57, 68, 85, 86, 152]

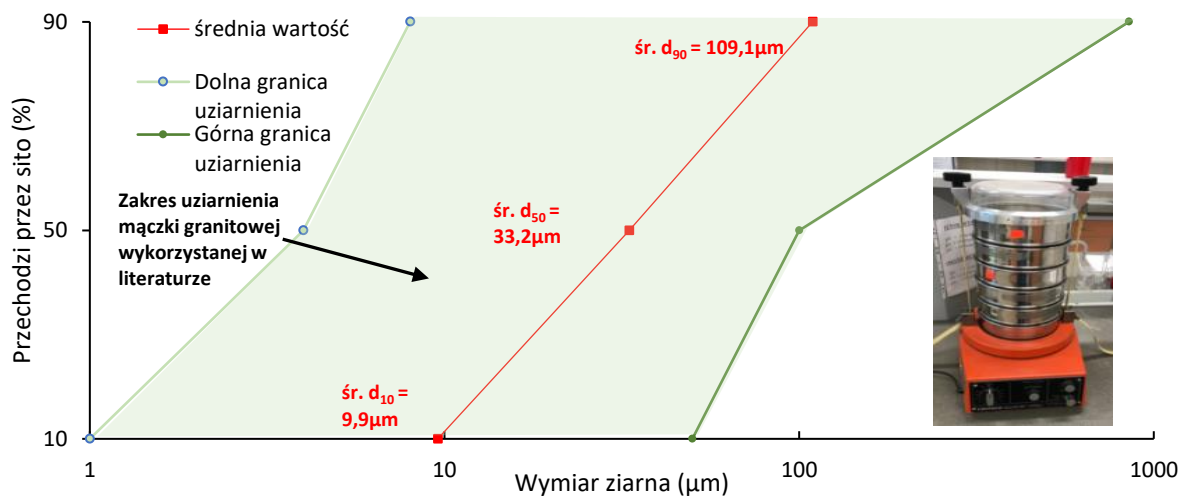
Rysunek 6a przedstawia powierzchnię właściwą ziaren mączki granitowej wykorzystywanej przed badaczy z całego świata. Powierzchnia właściwa ziaren jest wynikiem procesu mielenia, cięcia lub szlifowania materiału z którego powstały. Znanie jest z literatury, że wyższa powierzchnia właściwa ziaren (a co z tym związane miałkość) wpływa na konsystencję mieszanki cementowej (większa powierzchnia ziaren wymaga większej objętości zaczynu cementowego do ich otoczenia) [15] oraz rozwój wytrzymałości kompozytu cementowego (bardziej miałkie cementy prowadzą do szybszego rozwoju wytrzymałości na ściskanie) [109]. Niemniej jednak złożona zależność pomiędzy konsystencją, a właściwościami mechanicznymi kompozytu pozwala na stosowanie cementów o umiarkowanej powierzchni właściwej ziaren (2800-3800 cm<sup>2</sup>/g). Należy także wspomnieć, że proces mielenia klinkieru na bardzo miałko (wysoka powierzchnia właściwa ziaren) jest ograniczony ze względu na tendencję materiałów bardzo miałkich do aglomeracji cząstek. W praktyce oznacza to, że mielenie klinkieru do powierzchni właściwej ziaren >4500 cm<sup>2</sup>/g jest możliwe tylko przy zastosowaniu dodatkowych związków chemicznych powierzchniowo czynnych, które ułatwiają mielenie. Zwykle mączka granitowa powstała w wyniku cięcia lub kruszenia skał granitowych charakteryzuje się powierzchnią właściwą ziaren w przedziale 3000-4500 cm<sup>2</sup>/g. Rysunek 6b przedstawia nasiąkliwość ziaren mączki granitowej. Zmierzona nasiąkliwość zwykle mieści się w zakresie 1,5-5% co jest wartością typową dla drobnych cząstek skał granitowych. Niemniej jednak *Gupta i Vyas* [68] zauważyli, że zmierzona przez nich nasiąkliwość ziaren (która wyniosła 15,8%) znacznie przewyższa wyniki obserwowane przez innych badaczy. Uargumentowali oni ten fakt występowaniem w swoim materiale znacznej liczby pęknięć zwietrzeniowych, które pozwoliły na wnikanie wody w głąb ziaren. Zwiększona powierzchnia właściwa ziaren [68] dodatkowo spowodowała, że woda otaczając ziarna dodatkowo zwiększyła nasiąkliwość mączki granitowej. Wyniki przedstawione na Rysunek 6 prowadzą do

wniosków, że występuje duże zróżnicowanie właściwości ziaren mączki granitowej zależnie od jej pochodzenia, procesu w wyniku którego powstała czy też stopnia zwiertzenia. Ta obserwacja potwierdza konieczność weryfikacji właściwości ziaren mączki granitowej przed ich wykorzystaniem w budownictwie.



Rysunek 7. Gęstość nasypowa mączki granitowej na podstawie wyników literaturowych [1, 3, 109, 133, 135, 136, 142, 145, 153, 168, 187, 191, 11, 23, 57, 59, 68, 85, 86, 104]

Gęstość nasypowa mączki granitowej charakteryzuje się zblizoną wartością i zwykle mieści się w przedziale 2200-2800 kg/m<sup>3</sup>. Gęstość nasypowa mączki granitowej jest zależna od takich czynników jak kąt tarcia wewnętrzznego, kształt i wymiar ziaren, uziarnienie czy wilgotność mączki granitowej. Niemniej jednak znakomita większość wyników jest zblizona do średniej (2,59 kg/m<sup>3</sup>) co pozytywnie świadczy o powtarzalności tej właściwości wśród mączek granitowych wykorzystywanych w badaniach naukowych.

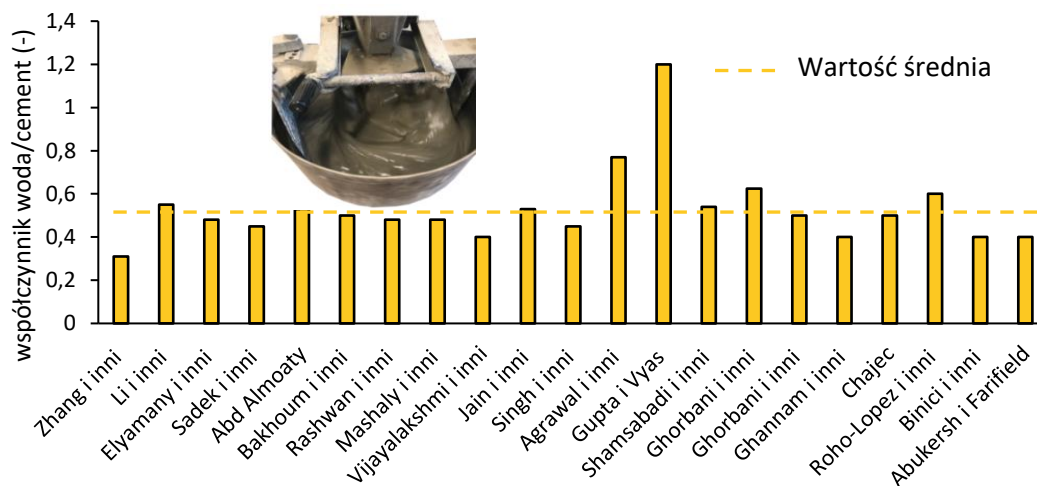


Rysunek 8. Zakres uziarnienia mączki granitowej stosowanej w badaniach naukowych w literaturze [1, 2, 60, 85, 104, 105, 109, 115, 133, 135, 142, 145, 3, 153, 162, 167, 168, 187, 7, 11, 23, 45, 52, 57, 59]

Uziarnienie mączki granitowej jest kluczową właściwością fizyczną, która warunkuje możliwość jej wykorzystania w kompozytach cementowych. Proces dobierania składników mieszanki cementowej jest skomplikowany i zależy od właściwości każdego ze składników. Wyniki uziarnienia mączki granitowej przedstawione w literaturze pozwalają stwierdzić, że naukowcy badający ten materiał stają przed znaczącym wyzwaniem związanym z ujednoczeniem uziarnienia mączki granitowej w taki sposób, aby był on powtarzalny, a co z tym związane mączka granitowa mogła być wykorzystywana w kompozycjach materiałowych mieszanek cementowych. Dolna granica uziarnienia mieści się w zakresie 1-70 µm (średnia 9,9 µm), zakres górnej granicy uziarnienia to 8-1000 µm (średnia 109,1 µm) – te wartości podkreślają, że właściwości fizyczne mączki granitowej są znacząco zróżnicowane, a ich kontrola jest konieczna w celu potwierdzenia jej przydatności w technologii mieszanek cementowych. Należy podkreślić, że pomimo starań autora wykorzystania do analizy wyników literaturowych jedynie mączki granitowej pochodzącej z kruszenia lub cięcia skał granitowych (bez dalszego przetworzenia), istnieje prawdopodobieństwo, że autorzy publikacji przywołanych w tej sekcji rozprawy nie wspomnieli o dodatkowej obróbce mechanicznej lub chemicznej mączki granitowej wykorzystanej w swoich badaniach. Mało prawdopodobne jest bowiem, żeby mączka powstała w wyniku cięcia skał granitowych (zwykle bardziej drobna niż mączka powstała w wyniku kruszenia skał) charakteryzowała się uziarnieniem <math><8\ \mu\text{m}</math>, podczas gdy źródła literaturowe donoszą, że takie uziarnienie mączek mineralnych możliwe jest do uzyskania dopiero w wyniku wielogodzinnego (minimum 3) mielenia mączki w młynie kulowym.

### 3.1.3. Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości mieszanek cementowych

Wykorzystanie odpadowej mączki granitowej w technologii mieszanek cementowych jest obiecującym tematem, nad którym badania naukowe trwają co najmniej od kilkunastu lat. Niemniej jednak badania mieszanek cementowych charakteryzują się koniecznością wykorzystania pewnych założeń wstępnych w celu stworzenia optymalnej mieszanki. Powoduje to, że skomplikowane jest wnioskowanie bezpośrednio nad wpływem konkretnego składnika mieszanki na jej właściwości na podstawie różnych źródeł literaturowych. Założenia początkowe (o których decyduje badacz) są bowiem subiektywne i rzadko się powtarzają. W praktyce zatem wykonuje się dużą liczbę serii badawczych (w tym referencyjnej – bez dodatków), aby możliwe było porównanie wpływu dodatku na daną właściwość. Jednym z czynników, których dobór jest kluczowy w procesie projektowania składu mieszanki cementowej jest współczynnik wodno-cementowy, który przedstawia Rysunek 9.

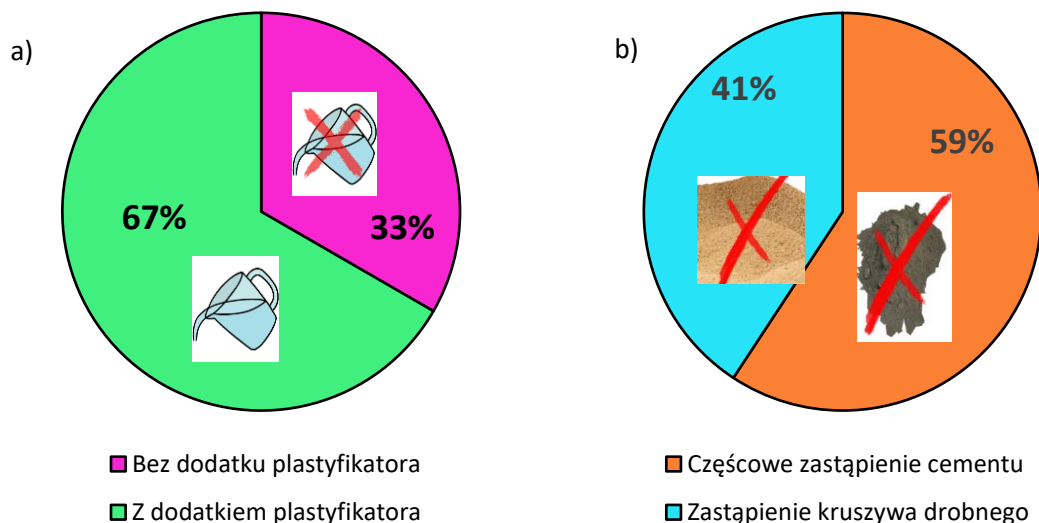


Rysunek 9. Wartość współczynnika woda/cement stosowanego w badaniach nad wpływem modyfikacji mieszanki cementowej za pomocą mączki granitowej w literaturze [1, 2, 86, 104, 109, 133, 135, 136, 145, 153, 168, 187, 3, 7, 11, 45, 57, 59, 60, 68]

W zależności od rodzaju wykorzystywanej mieszanki cementowego (beton towarowy, zaprawa, zaczyn) wykorzystywane są różne współczynniki wodno-cementowe. Niemniej jednak zwykle w praktyce inżynierskiej wykorzystuje się współczynniki mniejsze niż 0,5 (-) z racji ich bezpośredniej korelacji z właściwościami mechanicznymi kompozytu (im niższy współczynnik w/c tym wyższe wartości właściwości mechanicznych). Znakomita większość przedstawionych wyników (15 z 21 rezultatów) jest mniejsza niż 0,5 (-), podczas gdy średnia z analizy wyniosła 0,53 (-). Jest ona jednak znacząco zawyżona przez *Gupta i Vyas* [68], którzy w swojej pracy wykorzystali bardzo wysoki współczynnik w/c = 1,2 (-) badając możliwość produkcji betonu samozagęszczalnego, modyfikowanego dodatkiem

mączki granitowej, bez dodatku plastyfikatora. Pomijając w analizie ten wynik otrzymano by średnią równą 0,49 (-).

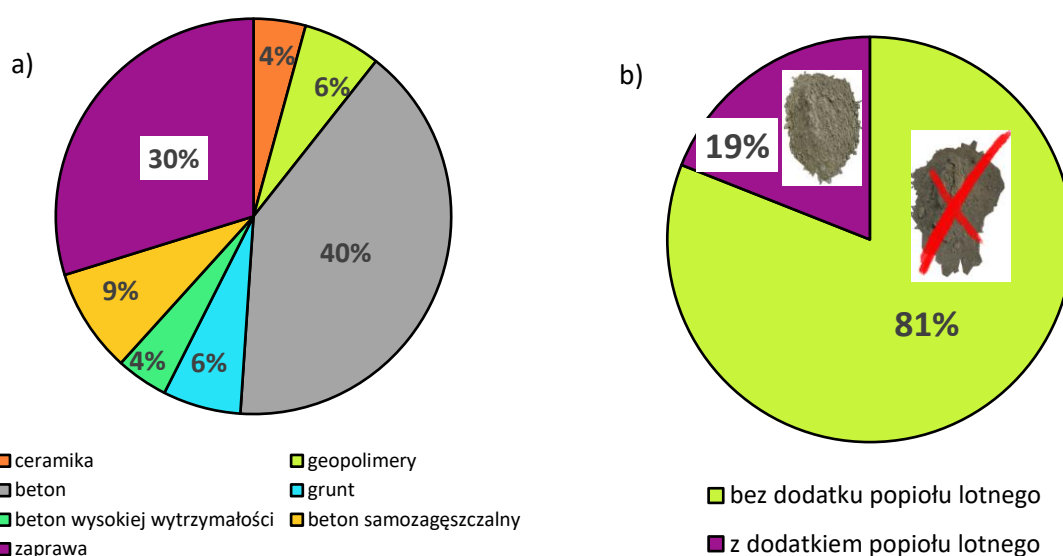
Rysunek 10 oraz Rysunek 11 przedstawiają wyniki analizy statystycznej na podstawie źródeł literaturowych związanych z dodatkiem mączki granitowej do mieszanek cementowych.



Rysunek 10. Analiza zastosowania wybranych metod projektowania kompozycji mieszanki cementowej modyfikowanej mączką granitową w literaturze [1, 2, 59, 85, 104, 109, 133, 135, 145, 153, 187, 3, 7, 11, 22, 45, 52, 57, 58]: a) z/bez dodatku plastyfikatora b) zastąpienie cementu/kruszywa drobnego

Rysunek 10a przedstawia rezultaty analizy statystycznej związanej ze stosowaniem plastyfikatora jako jednego ze składników mieszanki cementowej, która modyfikowana jest dodatkiem mączki granitowej. Można zauważyć, że znakomita większość badaczy (67%) wykorzystuje w mieszankach cementowych plastyfikator w celu optymalizacji konsystencji mieszanki. Z drugiej strony, można by stwierdzić, że aż 33% nie zastosowało plastyfikatora w swoich badaniach. Wśród praktyków technologii betonu panuje trend, który polega na wykorzystaniu plastyfikatora w celu zmniejszenia zapotrzebowania na wodę w mieszance (zmniejszając przy tym w/c mieszanki) zachowując przy tym pożądaną konsystencję oraz zwiększając właściwości mechaniczne kompozytu cementowego. Należy także podkreślić, że powstała wiele publikacji naukowych, które krytycznie podchodzą do tematu wykorzystania plastyfikatora w mieszankach cementowych w ramach badań naukowych z racji jego zauważalnego wpływu na niektóre właściwości kompozytu (takie jak rozwój faz krystalicznych czy niejednorodny proces hydratacji cementu w kompozycie). Rysunek 10b opisuje analizę statystyczną wykorzystanej technologii wprowadzenia dodatku mączki granitowej jako zamiennika cementu lub kruszywa drobnego (dominujące trendy w literaturze). Większość naukowców (59%) wykorzystwała dodatek mączki granitowej do redukcji części cementu w mieszance cementowej. Takie działanie

wpisuje się doskonale w teorię zrównoważonego rozwoju oraz dbania o środowisko naturalne. Dodatkowo rosnące koszty energii (której ogromne ilości są niezbędne do produkcji cementu), są dodatkowym motywatorem dla technologów mieszanek cementowych do poszukiwania metod zastąpienia cementu za pomocą dodatku innych materiałów sypkich. 41% badaczy wykorzystała mączkę granitową do zastąpienia części kruszywa drobnego w mieszance cementowej. Ten trend szczególnie popularny jest w Indiach oraz innych państwach, w których występują problemy z dostępem do dobrej jakości kruszywa drobnego. Można także zauważyć, że zastąpienie kruszywa drobnego (piasku) jest szczególnie często wykorzystywane przez naukowców zajmujących się betonem samozagęszczalnym oraz architektonicznym, gdzie zastąpienie większych ziaren piasku za pomocą drobniejszych ziaren mączki granitowej daje szczególnie pozytywny efekt.



Rysunek 11. Analiza literatury w zakresie trendów związanych z wykorzystaniem mączki granitowej w mieszankach cementowych: a) rodzaj modyfikowanego materiału b) zastosowanie mączki granitowej wraz z popiołem lotnym

[1, 2, 59, 85, 104, 109, 133, 135, 145, 153, 187, 3, 7, 11, 22, 45, 52, 57, 58]

Rysunek 11a przedstawia analizę wykorzystania dodatku mączki granitowej w poszczególnych rodzajach mieszanek cementowych. Należy podkreślić, że obecnie opublikowane wyniki badań naukowych związanych z dodatkiem mączki granitowej skupiają się w szczególności na analizie możliwości jej praktycznego wykorzystania, o czym świadczy dominacja (83%) w badaniach takich typów zaprawy jak betonu oraz zaprawa. W literaturze dostrzega się znaczącą lukę związaną z bardzo ograniczoną liczbą badań naukowych nad wpływem dodatku mączki granitowej na zaczyn cementowy. Badania zaczynu cementowego należą bowiem do grona badań podstawowych, które należy wykonać w celu oceny wpływu danego dodatku na właściwości mieszanki i kompozytu cementowego. Rysunek 11b analizuje skłonność naukowców do wykorzystania jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i innego



dotatku sypkiego (takiego jak: mączka wapienna, marmurowa, mikrokrzemionka). 81% naukowców nie zastosowała w swoich badaniach trendu związanego z jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i innego dodatku. Technika stosowania jednoczesnego dodatku obu tych materiałów wydaje się jednak korzystna ze względu na różne właściwości mieszanki i kompozytu, bowiem popiół lotny zwykle ma przeciwny wpływ na właściwości mieszanki i kompozytu cementowego w porównaniu do mączki wapiennej, marmurowej czy mikrokrzemionki (np. popiół prowadzi do bardziej płynnej konsystencji, podczas gdy mączka wapienna prowadzi do bardziej gęstej konsystencji mieszanki). W ostatnich latach popiół lotny zmienił swój status materiału odpadowego na produkt, którego cena znacząco wzrosła, a dostępność zmalała co może mieć wpływ na taki stan rzeczy, jednak potencjał wykorzystania jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku jest ogromny i zdecydowanie wymaga dodatkowych badań naukowych.

Tabela 2 przedstawia podsumowanie rozpoznania literaturowego związanego z wpływem modyfikacji mieszanki cementowej dodatkiem mączki granitowej na jej wybrane właściwości.

Tabela 2. Wpływ modyfikacji mieszanki cementowej dodatkiem mączki granitowej na jej wybrane właściwości - na podstawie literatury

Praca badawcza	Konsystencja	Zawartość powietrza	Czas wiązania	Gęstość objętościowa	Gęstość upakowania			
<i>Nascimento i inni</i> [142]	Brak danych	Brak danych	Zastąpienie +10% cementu wydłuża czas wiązania	Brak danych	Brak danych			
<i>Zhang i inni</i> [188]	Bardziej płynna		Brak danych		Brak danych	Wzrost		
<i>Chen i inni</i> [23]						Brak danych		
<i>Li i inni</i> [104]								
<i>Elyamany i inni</i> [45]								
<i>Rashwan i inni</i> [133]	Bardziej gęsta		Nieznaczące zmiany		Brak danych			
<i>Mashaly i inni</i> [109]	Skrócenie początku i końca czasu wiązania							
<i>Vijayalakshmi i inni</i> [168]	Bardziej płynna		Brak danych				Brak danych	Zmniejszenie
<i>Jain i inni</i> [85]								
<i>Agrawal i inni</i> [3]	Bardziej gęsta		Zwiększona zawartość				Bez znaczących zmian w porównaniu do serii referencyjnej	Brak danych
<i>Gupta i Vyas</i> [68]								
<i>Shamsabadi i inni</i> [145]								
<i>Chajec</i> [A1]								
<i>Rojo-Lopez i inni</i> [135]								
<i>Binici i inni</i> [11]								
<i>Abukersh i Farifield</i> [2]	Bardziej płynna	Brak danych	Brak danych	Brak danych				

Na podstawie przedstawionej analizy można wnioskować, że częściowe zastąpienie cementu za pomocą dodatku mączki granitowej w mieszance cementowej może prowadzić do bardziej gęstej konsystencji mieszanki cementowej. *Rojo – Lopez i inni* [135] argumentują, że jest to związane z większą powierzchnią właściwą ziaren oraz bardziej miłym uziarnieniem mączki granitowej w porównaniu z cementem co prowadzi do konieczności wykorzystania większej ilości wody do otoczenia ziaren mączki granitowej zaczynem cementowym. Podobnie wnioskuje także *Binici i inni* [11], którzy dodatkowo wyróżniają, że na konsystencję mieszanki cementowej może mieć także wpływ kształt ziaren mączki granitowej, które co prawda są zbliżone do kształtu ziaren cementu, ale wykazują się większą strzelistością co wpływa na kształtowanie wolnych przestrzeni pomiędzy ziarnami, w których zamykany jest zaczyn cementowy. Wyniki związane ze zmianą konsystencji na bardziej płynną [85] zostały uzyskane dla kompozycji materiałowych z wykorzystaniem plastyfikatora co utrudnia odczytanie wpływu mączki granitowej na konsystencje mieszanki. Zawartość powietrza w mieszance cementowej modyfikowanej dodatkiem mączki granitowej jest rzadko badaną przez naukowców właściwością. *Binici i inni* [11] określili, że mączka granitowa prowadzi do wzrostu zawartości powietrza w mieszance cementowej, argumentując przy tym, że kształt ziaren mączki granitowej wymusza powstawanie dodatkowych wolnych miejsc w mieszance cementowej. Czas wiązania mieszanki modyfikowanej dodatkiem mączki granitowej nie jest jasny. *Binici i inni* [11] nie zauważyli znaczących różnic w czasie początku i końca wiązania, podczas gdy *Mashaly i inni* [109] zaobserwowali, że częściowe zastąpienie cementu dodatkiem mączki granitowej doprowadziło do skrócenia się początku i końca czasu wiązania mieszanki. *Nascimento i inni* [142] określili, że częściowe zastąpienie cementu dodatkiem mączki granitowej prowadzi do wydłużenia czasu wiązania mieszanki cementowej. Brak zatem jednoznacznego stwierdzenia w tym temacie. Istotną obserwacją jest, że zastąpienie części cementu dodatkiem mączki granitowej może pozwolić na zwiększenie się gęstości objętościowej oraz gęstości upakowania mieszanki cementowej [3]. Podkreśla to bowiem potencjał mączki granitowej jako materiału stosowanego jako wypełniacz w mieszance cementowej, który ma za zadanie wypełnić wolne przestrzenie w strukturze mieszanki, zwiększając jej gęstość oraz właściwości mechaniczne.

#### 3.1.4. Wpływ mączki granitowej na wybrane właściwości kompozytów cementowych

Mączka granitowa, która charakteryzowana jest bardziej miłym uziarnieniem oraz większą powierzchnią właściwą ziaren w porównaniu do cementu będzie wykazywać zróżnicowany wpływ na właściwości kompozytów cementowych. W praktycznej analizie możliwości wykorzystania dodatku do mieszanki cementowej najbardziej istotną częścią jest jego wpływ na właściwości kompozytu cementowego, ponieważ zwykle decydują one o trwałości i bezpieczeństwie konstrukcji.

Nasiąkliwość kompozytu cementowego jest istotną cechą, która bezpośrednio wpływa na trwałość konstrukcji (szczególnie w przypadku jej ekspozycji na zmienne warunki cieplno-wilgotnościowe lub chemicznie agresywne środowisko) [93]. Aby odpowiednio przeanalizować wpływ dodatku mączki

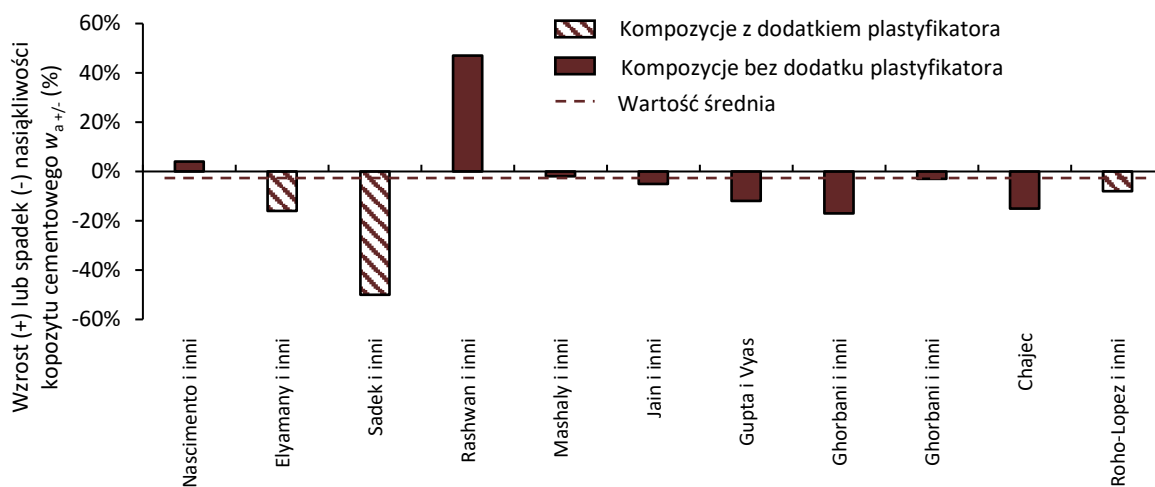
granitowej na nasiąkliwość kompozytów, autor zaproponował alternatywny sposób analizy. W badaniach kompozytów cementowych trudno szukać powtarzalnych kompozycji materiałowych mieszanek cementowych. Różne w/c, ilość spoiwa, stosowane dodatki itp. wpływają bezpośrednio na właściwości kompozytu, zatem porównanie kompozytów badanych przez różnych naukowców (nawet o takim samym procentowym zastąpieniu cementu) nie będzie dokładnym przedstawieniem. Autor porównał ze sobą najbardziej optymistyczne wyniki nasiąkliwości (największa redukcja/najmniejszy wzrost nasiąkliwości) -  $w_{a,1}$  do wyników uzyskanych dla serii referencyjnej (niemodyfikowanej) -  $w_{a,0}$  przedstawiane przez autorów w ramach jednej pracy naukowej. Wzór 1 przedstawia opis zaproponowanej metody analizy.

$$w_{a+/-} = \frac{w_{a,1} - w_{a,0}}{w_{a,0}} * 100\% \quad (1)$$

$w_{a,0}$  – nasiąkliwość kompozytu referencyjnego (%),

$w_{a,1}$  – nasiąkliwość kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (najniższy wzrost/największa redukcja) (%).

Rysunek 12 przedstawia wyniki analizy wpływu dodatku mączki granitowej na nasiąkliwość kompozytu.



Rysunek 12. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej na jego nasiąkliwość na podstawie literatury [45, 58, 60, 68, 85, 133, 135, 136, 142]

Wszystkie kompozyty cementowe modyfikowane dodatkiem mączki granitowej przy produkcji których wykorzystano plastyfikator charakteryzują się zmniejszeniem nasiąkliwości kompozytu co jest pozytywnym efektem (Rysunek 12). Większość (9 z 11) analizowanych publikacji donoszą, że dodatek mączki granitowej prowadzi do zmniejszenia się nasiąkliwości kompozytu cementowego, niemniej jednak zastanawiający jest raportowany przez *Rashwan i inni* [133], jednak możliwym jest, że autorzy uzyskali tak duży wzrost nasiąkliwości kompozytu z racji wykorzystania zbyt dużej ilości dodatków

o uziarnieniu bardziej miąższym niż kruszywo drobne (mączka granitowa oraz marmurowa), co w połączeniu ze stałym w/c oraz brakiem zastosowania plastyfikatora mogło doprowadzić do znacznego spadku zagęszczalności mieszanki cementowej, a w konsekwencji do powstania licznych kanałów powietrznych, które ułatwiły migrację wody do struktury kompozytu cementowego zwiększając nasiąkliwość. Podsumowując należy jednak podkreślić pozytywny wpływ dodatku mączki granitowej na zmniejszenie się nasiąkliwości kompozytów cementowych, który prawdopodobnie można połączyć z tzw. efektem wypełniacza co doprowadziło do bardziej zwartej struktury kompozytu.

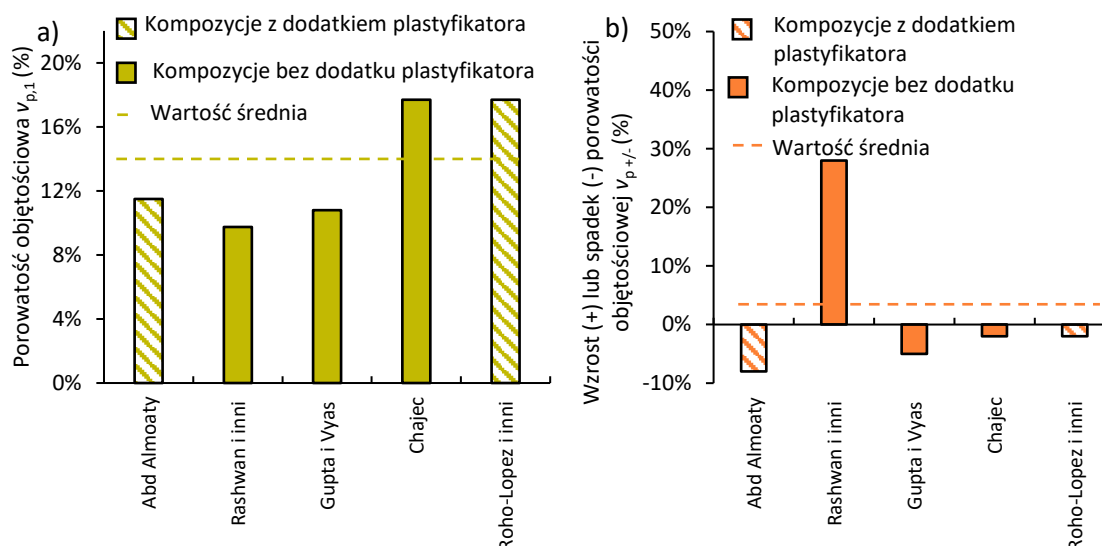
Porowatość objętościowa kompozytu cementowego jest jego istotną cechą ponieważ jest ona skorelowana nie tylko z trwałością kompozytu, ale przede wszystkim z jego właściwościami mechanicznymi. Znane jest, że im większa porowatość kompozytu cementowego tym mniejsza wytrzymałość na ściskanie. Uzyskanie możliwie niskiej porowatości kompozytu cementowego pozwoli zatem na uzyskanie lepszych właściwości mechanicznych kompozytu. W celu określenia wpływu dodatku mączki granitowej na porowatość objętościową kompozytu cementowego wykorzystano analizę, której metodykę opisano powyżej. Wzór 2 przedstawia numeryczny opis tej metody, gdzie  $v_{p,0}$  przedstawia porowatość kompozytu referencyjnego, a  $v_{p,1}$  porowatość objętościową kompozytu charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największa redukcja/najmniejszy wzrost).

$$v_{p+/-} = \frac{v_{p,1} - v_{p,0}}{v_{p,0}} * 100\% \quad (2)$$

$v_{p,0}$  – porowatość objętościowa kompozytu referencyjnego (%),

$v_{p,1}$  – porowatość objętościowa kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największa redukcja/najmniejszy wzrost) (%).

Rysunek 13 przedstawia wyniki analizy wpływu dodatku mączki granitowej na porowatość objętościową kompozytu cementowego.



Rysunek 13. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej na jego porowatość objętościową na podstawie literatury: a) wyniki uzyskane przez badaczy b) wzrost/spadek porowatości objętościowej kompozytu [1, 68, 133, 135]

Rysunek 13a przedstawia wyniki porowatości objętościowej kompozytu cementowego uzyskane przez badaczy (wartości uzyskane w badaniach). Na ich podstawie trudno jest określić czy dodatek plastyfikatora miał pozytywny efekt. Można jednak zauważyć, że raportowana przez naukowców wyniki porowatości różnią się między sobą dość znacząco (10-18%) co można tłumaczyć faktem wykorzystania różnych typów kompozytów – np. *Abd Almoaty* [1] wykonał oznaczenie dla zaczynów cementowych, natomiast *Roho-Lopez i inni* [135] wykorzystali w swoich badaniach beton. Szczególnie pozytywny efekt dodatku mączki granitowej można zauważyć analizując Rysunek 13b, ponieważ wszystkie serie modyfikowane mączką granitową (z wyjątkiem *Rashwan i inni* [133] co opisano przy okazji nasiąkliwości) wykazały zmniejszoną porowatość objętościową w porównaniu z serią referencyjną.

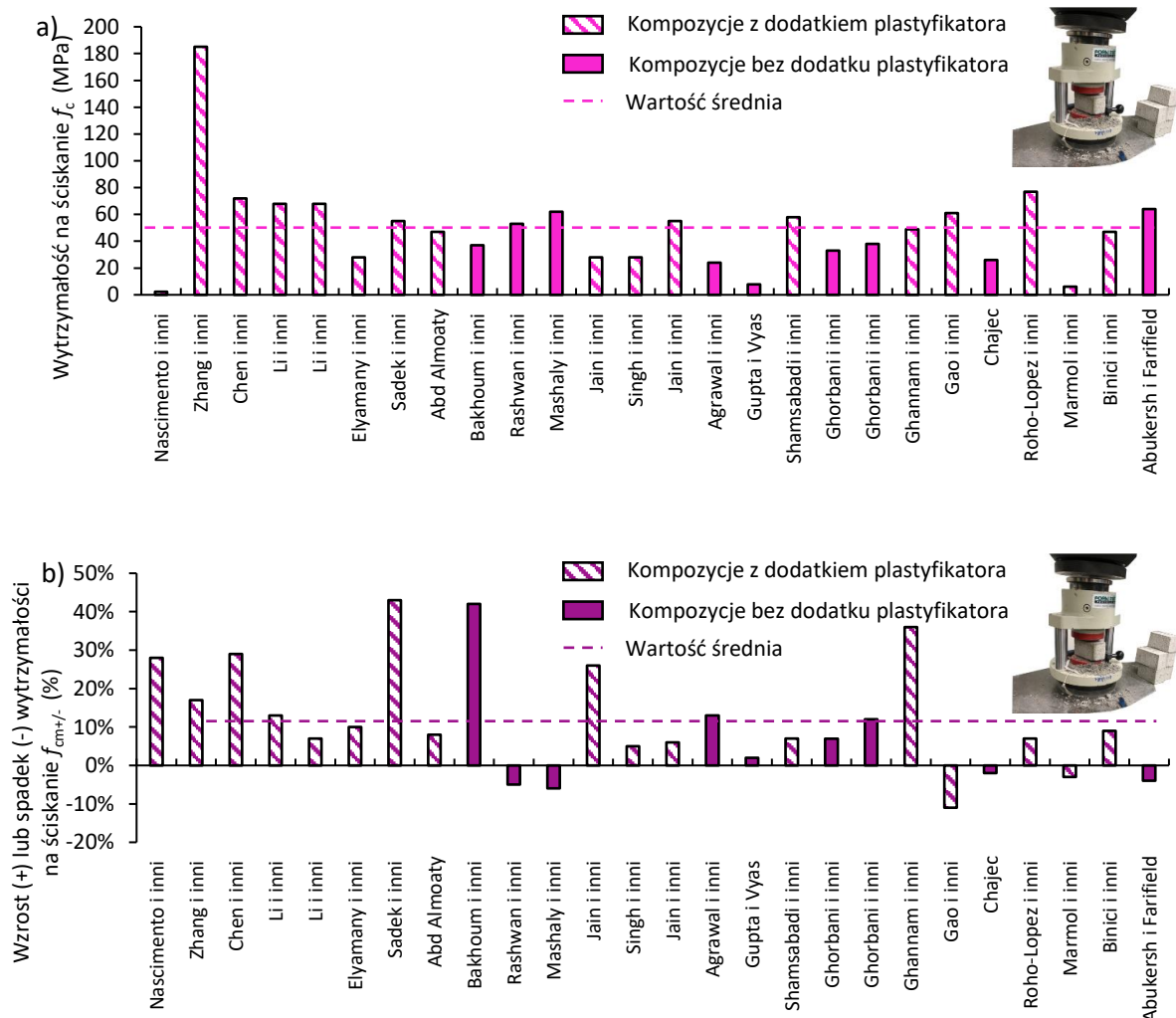
Wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego jest jego kluczową cechą przy analizie możliwości jego wykorzystania w konstrukcji. Konstrukcje z betonu są zwykle projektowane w taki sposób aby przenosić wysokie siły ściskające. Dlatego też szczególnie istotne jest aby przy analizie nowych dodatków do kompozytów cementowych testować ich wpływ na wytrzymałość na ściskanie. W celu analizy wpływu dodatku mączki granitowej na wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego autor przedstawił zarówno w sposób bezpośredni uzyskane przez badaczy wyniki wytrzymałości na ściskanie (Rysunek 14a) oraz wyniki analizy porównawczej wykonanej zgodnie z opisaną wyżej metodyką (Rysunek 14b). Wzór 3 przedstawia numeryczną interpretację tej analizy, gdzie  $f_{cm,0}$  oznacza wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego, a  $f_{cm,1}$  określa najbardziej

pozytywny wynik (najmniejszy spadek/największy wzrost) wytrzymałości na ściskanie uzyskany dla serii modyfikowanej dodatkiem mączki granitowej.

$$f_{cm+/-} = \frac{f_{cm,1} - f_{cm,0}}{f_{cm,0}} * 100\% \quad (3)$$

$f_{cm,0}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego (MPa),

$f_{cm,1}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa).



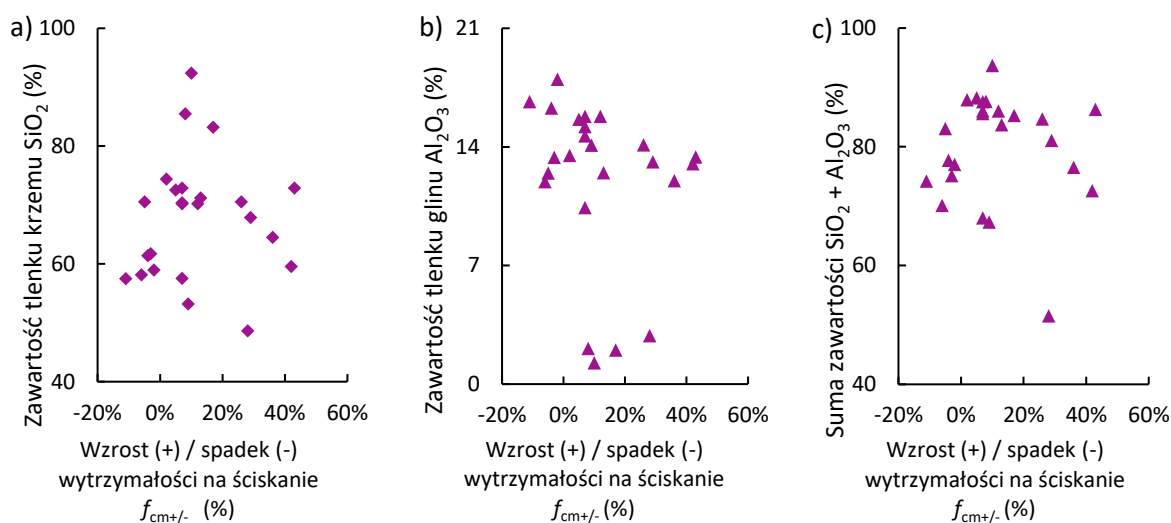
Rysunek 14. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej na jego wytrzymałość na ściskanie na podstawie literatury: a) wyniki uzyskanych przez badaczy wytrzymałości na ściskanie b) wzrost/spadek wytrzymałości na ściskanie kompozytu

[1, 2, 59, 68, 85, 86, 104, 105, 108, 109, 133, 135, 3, 136, 142, 145, 153, 187, 7, 11, 24, 45, 52, 57, 58]

Rysunek 14a przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych modyfikowanych mączką granitową raportowane przez różnych badaczy. Można zauważyć, że

przeważają wyniki 40-80 MPa, co związane jest z faktem prowadzenia badań dla betonu, podkreślając przy tym aplikacyjny charakter prowadzonych prac. Większość naukowców wykorzystała w swoich badaniach plastyfikator (16 z 26 przedstawionych wyników). Rysunek 14b przedstawia wyniki analizy porównawczej wykonanej zgodnie z opisaną wcześniej metodyką. Wpływ dodatku mączki granitowej w kompozytach cementowych wydaje się być nadszpiewanie pozytywny, ponieważ jedynie 6 z 26 naukowców uzyskało swoich badaniach redukcję wytrzymałości na ściskanie serii modyfikowanej mączką granitową w porównaniu z serią referencyjną. Niemniej jednak, należy mieć na uwadze, że przedstawione wyniki dotyczą zróżnicowanych kompozycji materiałowych w których wykorzystano różne dodatki, sposoby przechowywania czy rodzaj mieszanki (zaczyn/zaprawa/beton). Podkreślić należy także, że naukowcy często w różny sposób podchodzą do ustalania kompozycji mieszanki cementowej – wykorzystuje się bowiem jeden z dwóch założeń: stałe w/c lub stałe w/s. W przypadku stałego w/c należy pamiętać, że dodatek mączki granitowej traktowany jest jako uzupełnienie składu mieszanki, a nie zastąpienie części cementu, podczas gdy wykorzystując stałe w/s dodatek mączki granitowej jest zastąpieniem części wykorzystanego cementu. Powoduje to, że trudno jest określić jednoznacznie jaki wpływ ma mączka granitowa na wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego. *Sadek i inni* [136] oraz *Bakhoun i inni* [7] wykorzystali bowiem stałe w/c uzyskując przy tym imponujący ponad 40% wzrost wytrzymałości na ściskanie, jednak wyniki te szczególnie potwierdzają pozytywny efekt mączki granitowej stosowanej jako wypełniacz w mieszance. Z drugiej strony *Chajec* [A1] oraz *Gao i inni* [52] wykorzystali metodę stałego w/s co doprowadziło do sprawdzenia możliwości zastąpienia części cementu w mieszance za pomocą dodatku mączki granitowej. Pomimo wykazania redukcji wytrzymałości na ściskanie, to takie podejście należy uznać za obiecujące ponieważ zastąpiony procent cementu w kompozycie był znacznie wyższy niż procentowy spadek wytrzymałości na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową, co szczególnie podkreśla potencjał tej metody do redukcji śladu węglowego związanego z produkcją kompozytów cementowych.

Wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego modyfikowanego dodatkiem sypkim jest zależna od składu chemicznego tego dodatku. Rysunek 15 przedstawia korelację pomiędzy wytrzymałością na ściskanie kompozytu cementowego modyfikowanego dodatkiem mączki granitowej oraz zawartością związków chemicznych w mączce granitowej wykorzystanej w badaniach.



Rysunek 15. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej o zróżnicowanym składzie chemicznym na jego wzrost /spadek wytrzymałości na ściskanie na podstawie literatury: a) wpływ zawartości  $SiO_2$  b) wpływ zawartości  $Al_2O_3$  c) Wpływ sumy zawartości  $SiO_2$  oraz  $Al_2O_3$

[1, 2, 59, 68, 85, 86, 104, 105, 108, 109, 133, 135, 3, 136, 142, 145, 153, 187, 7, 11, 24, 45, 52, 57, 58]

Analizując Rysunek 15 można zauważyć znaczące zróżnicowane wyniki wytrzymałości na ściskanie w zależności od procentowej zawartości analizowanego związku. Trudno wskazać optymalną zawartość analizowanych związków, ponieważ uzyskane największe wzrosty wytrzymałości na ściskanie połączone są z zawartością kolejno 60-75%  $SiO_2$ , 11-14%  $Al_2O_3$  oraz 70-85% zawartości obu tych związków, niemniej jednak dla tych zawartości związków chemicznych inni naukowcy zaobserwowali skrajnie inne wyniki wytrzymałości na ściskanie (w tym nawet redukcję). Możliwe, że wpływ na dużą zmienność wyników mają założenia wstępne w doborze kompozycji materiałowej (w/c, w/s, inne dodatki, typ mieszanki, wykorzystanie plastyfikatora) czy przechowywania kompozytu cementowego. Należy zatem krytycznie stwierdzić, że analiza korelacji pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a składem chemicznym dodatku może być przydatnym narzędziem w konstruowaniu wniosków jedynie w ramach jednej pracy badawczej, natomiast w przypadku analizy wielu prac różnych naukowców jest ona zbyt zależna od przyjmowanych przez nich parametrów co może prowadzić do błędnych konkluzji.

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jest istotną właściwością w doborze kompozytu do wykorzystania w konstrukcji. W celu określenia wpływu dodatku mączki granitowej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu cementowego wykorzystano opisaną wcześniej analizę porównawczą, której interpretację numeryczną przedstawia Wzór 4, gdzie  $f_{ctm,0}$  określa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu referencyjnego, a  $f_{ctm,1}$  opisuje najbardziej pozytywny wynik



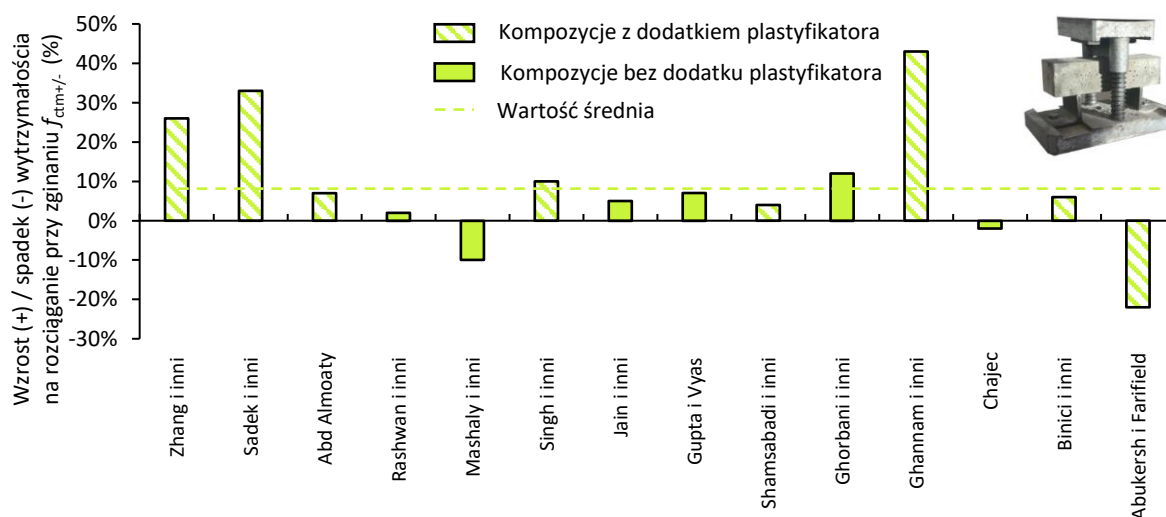
wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego dodatkiem mączki granitowej.

$$f_{ctm+/-} = \frac{f_{ctm,1} - f_{ctm,0}}{f_{ctm,0}} * 100\% \quad (4)$$

$f_{ctm,0}$  – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu referencyjnego (MPa),

$f_{ctm,1}$  – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa).

Rysunek 16 przedstawia wyniki analizy porównawczej wpływu dodatku mączki granitowej na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu cementowego.

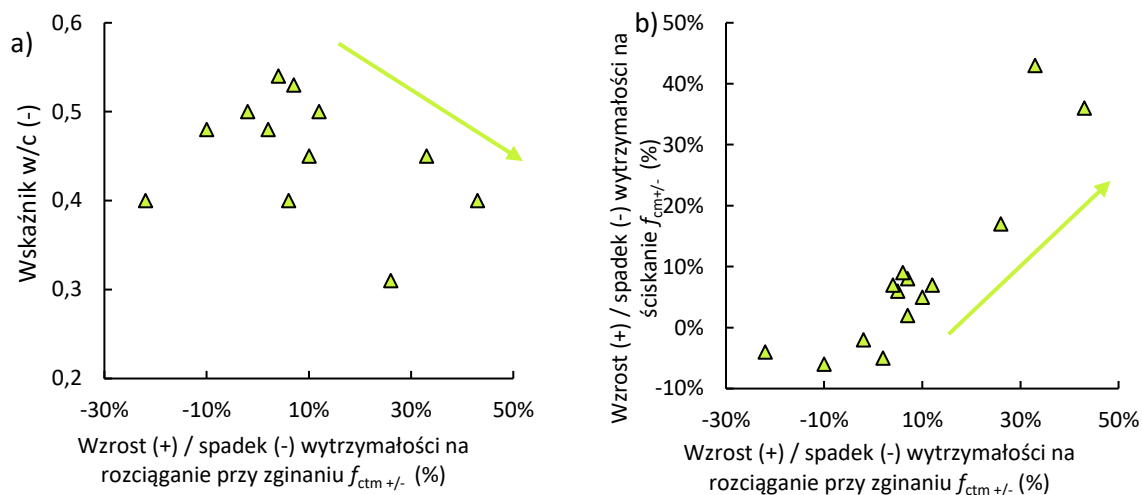


Rysunek 16. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej o zróżnicowanym składzie chemicznym na jego wzrost / spadek wytrzymałości na ściskanie na podstawie literatury [1, 2, 145, 153, 187, 11, 57, 58, 68, 85, 109, 133, 136]

Analizując Rysunek 16 można zauważyć, że podobnie do wytrzymałości na ściskanie, większość analizowanych prac naukowców (11 z 14) raportuje o zwiększeniu się wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów modyfikowanych dodatkiem mączki granitowej, niemniej jednak w tym przypadku jej średnia wartość jest mniejsza (8%). Zauważa się także, że większość dla większości serii w których składzie znalazł się plastyfikator uzyskano wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Analogicznie tak jak wcześniej należy wspomnieć, że skrajnie wysokie wzrosty wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (np. *Sadek i inni* [136] oraz *Ghannam i inni* [57]) uzyskano dzięki wykorzystaniu efektu wypełniacza mączki granitowej oraz stałego w/c. Prace badawcze raportujące niższe wzrosty lub spadki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (np. *Abukersh i Farifield* [2]) wykorzystują natomiast metodę stałego w/s co powoduje zmniejszenie

właściwości mechanicznych, jednak redukuje przy tym znacząco wpływ na środowisko poprzez zmniejszenie ilości zużywanego cementu.

Rysunek 17 przedstawia korelację pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego mączką granitową, a a) wskaźnikiem w/c wykorzystanym w jego produkcji oraz b) wytrzymałością na ściskanie tego kompozytu.



Rysunek 17. Zależność pomiędzy wzrostem / spadkiem wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz: a) wartością wskaźnika w/c b) wzrostem / spadkiem wytrzymałości na ściskanie według literatury [1, 2, 145, 153, 187, 11, 57, 58, 68, 85, 109, 133, 136]

Rysunek 17a przedstawia, że zgodnie ze znaną z literatury i praktyki budowlanej własnością, wraz z redukcją w/c rosną właściwości mechaniczne kompozytu. Oczekiwano jest, że ta korelacja będzie także spełniona dla kompozytów modyfikowanych dodatkiem mączki granitowej, jednak należy zauważyć, że szczególny potencjał aplikacyjny będzie wykazywać wykorzystanie plastyfikatora w celu znaczącego zmniejszenia w/c zachowując przy tym konsystencję mieszanki oraz zwiększając właściwości mechaniczne kompozytu cementowego. Zauważono także, że wyniki literaturowe wpisują się także w znaną zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu (Rysunek 17b), co może świadczyć o rzetelności autorów w przedstawianiu wyników badań.

Właściwości funkcjonalne kompozytów cementowych modyfikowanych dodatkiem mączki granitowej są znaczące ponieważ trend wykorzystania dodatków sypkich jest szczególnie popularny wśród naukowców zajmujących się wykorzystaniem strukturalnym kompozytów modyfikowanych, ale już rzadziej w literaturze można spotkać kompleksowe rozważania nad wpływem dodatku sypkiego na właściwości funkcjonalne takie jak odporność na korozję czy ścieralność. Odporność na korozję wywołaną agresywnym środowiskiem jest podstawową cechą wpływającą na trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji. Analizę porównawczą wpływu dodatku mączki granitowej na odporność na korozję

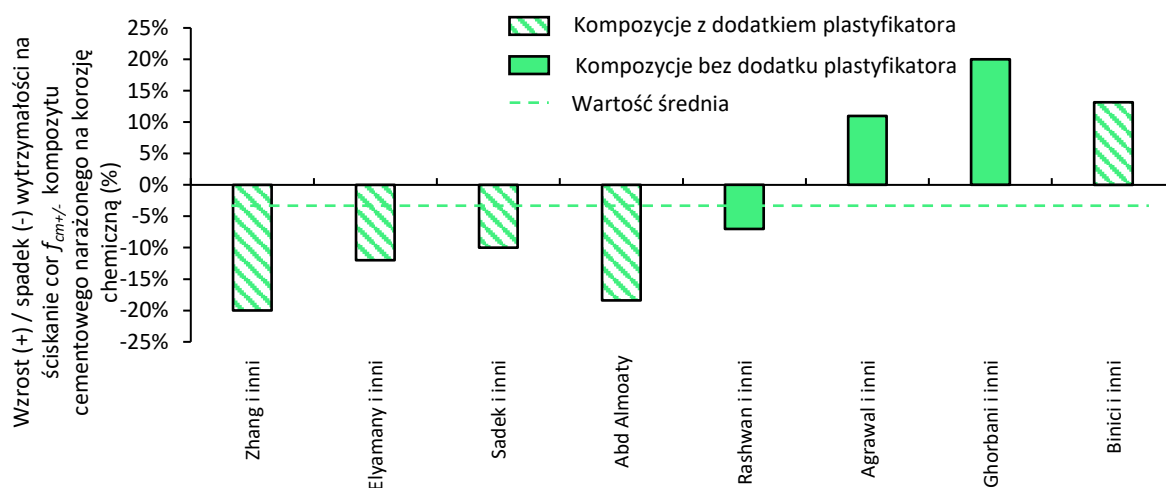
kompozytu wykonano analogicznie jak opisano to już wcześniej. Wzór 5 przedstawia numeryczną interpretację tej analizy, gdzie  $cor f_{cm,0}$  określa wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego po ekspozycji na korozję chemiczną, a  $cor f_{cm,1}$  przedstawia najbardziej pozytywny wynik wytrzymałości na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową po ekspozycji na korozję chemiczną.

$$cor f_{cm+/-} = \frac{cor f_{cm,1} - cor f_{cm,0}}{cor f_{cm,0}} * 100\% \quad (5)$$

$cor f_{cm,0}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego po ekspozycji na korozję chemiczną (MPa),

$cor f_{cm,1}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu modyfikowanego mączką granitową charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem po ekspozycji na korozję chemiczną (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa).

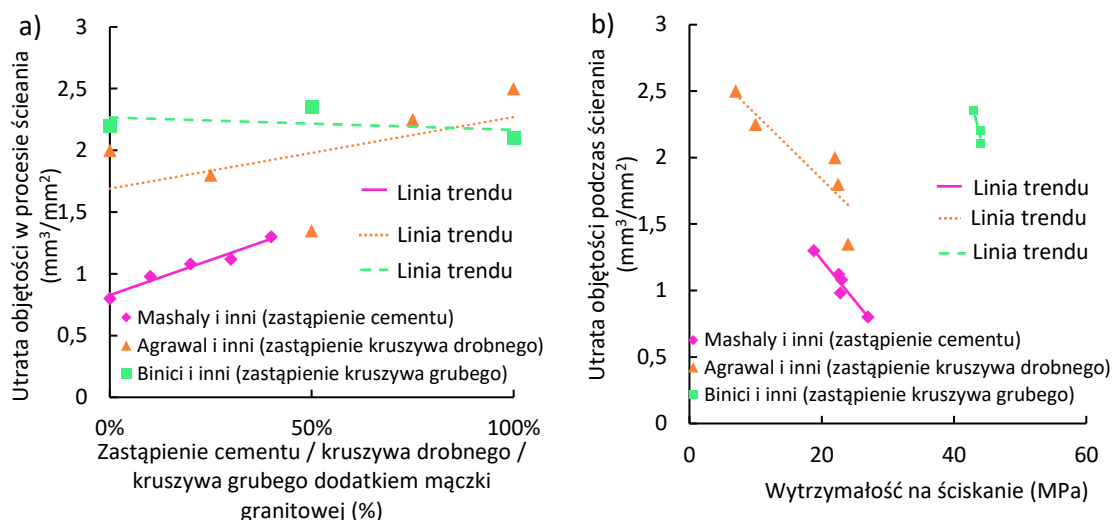
Rysunek 18 przedstawia wyniki analizy porównawczej wpływu dodatku mączki granitowej na wytrzymałość na ściskanie kompozytu cementowego narażonego na korozję chemiczną.



Rysunek 18. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem mączki granitowej na jego wzrost / spadek wytrzymałości na ściskanie po jego ekspozycji na korozję chemiczną według literatury [1, 3, 11, 45, 59, 133, 136, 187]

Zastąpienie części cementu za pomocą dodatku mączki granitowej zwykle prowadzi do redukcji wytrzymałości na ściskanie kompozytu cementowego narażonego na korozję chemiczną, co potwierdzają wyniki uzyskane przez *Zhang i inni* [187], *Elyamany i inni* [45], *Rashwan i inni* [133] czy *Abd Almoaty* [1], z drugiej strony wyniki przedstawione przez badaczy wykorzystujących dodatek mączki granitowej przy stałym w/c w pozwalają stwierdzić, że mączka granitowa ma wówczas pozytywny wpływ na odporność na korozję kompozytu cementowego. Zauważono także, że dla serii w których wykorzystano plastyfikator nie zauważono znaczących zmian wytrzymałości na ściskanie w porównaniu do innych serii.

Rysunek 19 przedstawia wyniki wpływu dodatku mączki granitowej na ścieralność kompozytu modyfikowanego oraz korelacje tej właściwości.



Rysunek 19. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego za pomocą mączki granitowej na utratę objętości podczas ścierania: a) w zależności od procentowej modyfikacji składu kompozytu dodatkiem mączki granitowej b) w korelacji z jego wytrzymałością na ściskanie według literatury [3, 11, 133]

*Mashaly i inni* [109] wykorzystali mączkę granitową do zastąpienia części cementu w mieszance cementowej (nawet do 40%). Zauważyli oni, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu przez mączkę granitową rośnie utrata objętości kompozytu podczas ścierania co oznacza jego większą ścieralność. *Agrawal i inni* [3] wykorzystali dodatek mączki granitowej do zastąpienia części kruszywa drobnego w mieszance, co również doprowadziło do wzrostu utraty objętości kompozytu podczas ścierania. Z kolei *Binici i inni* [11] wykorzystali dodatek mączki granitowej do zastąpienia części kruszywa grubego. Takie podejście pozwoliło tym naukowcom na uzyskanie odmiennego trendu w porównaniu z wcześniej opisanymi badaczami, bowiem zaobserwowali oni zmniejszenie utraty objętości kompozytu w procesie ścierania. Rysunek 19b przedstawia korelację pomiędzy utratą objętości podczas ścierania, a wytrzymałością na ściskanie kompozytu ścieranego. Warto podkreślić, że wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie kompozytu znacząco spada ubytek jego objętości w procesie ścierania.

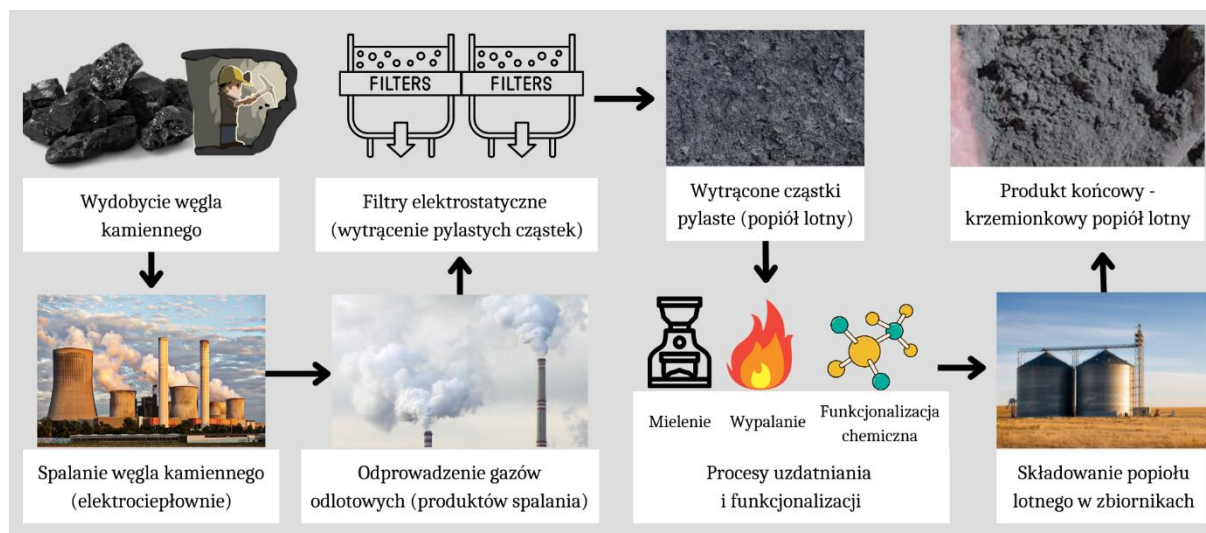
## 3.2. Krzemionkowy popiół lotny

### 3.2.1. Wprowadzenie

Krzemionkowy popiół lotny jest produktem procesu spalania węgla kamiennego. Obecnie polski przemysł energetyczny opiera się na energii produkowanej w elektrowniach spalających węgiel kamienny. Skład chemiczny krzemionkowego popiołu lotnego zależy od składu chemicznego węgla, w wyniku którego spalania powstaje popiół, jednak zwykle jest on następujący: 47-51% tlenku

krzemu (IV), 20-28% tlenku glinu (III), 5,8-8,8% tlenku żelaza (III), 3,6-6,2% tlenku wapnia, 2,2-4,8% tlenku magnezu oraz pozostałych, których suma jest mniejsza niż 5%. Krzemionkowy popiół lotny charakteryzuje się stratą prażenia (*LOI*) równą 1,8-8,5% co jest stosunkowo dużą wartością w porównaniu do popiołu wapiennego, jednak jakość krzemionkowego popiołu lotnego (w tym niskie *LOI*) są zależne od procesu produkcji i wydajności pieców w których spalany jest węgiel kamienny [61]. Krzemionkowy popiół lotny jest materiałem wykazującym właściwości pucolanowe co oznacza, że prowadzi do reakcji z wapnem w środowisku wodnym w normalnej temperaturze i przy normalnym ciśnieniu [184]. Niemniej jednak *Giergiczny* [61] wspomina, że reaktywność pucolanowa popiołu lotnego związana jest z bardzo miłąkimi uziarnieniem (ziarna popiołu mają mniejszy wymiar niż cement) oraz składem chemicznym wspierającym proces hydratacji cementu.

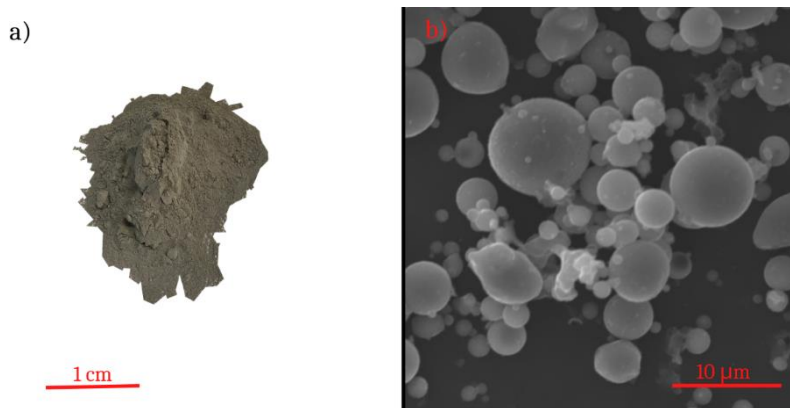
Proces produkcji krzemionkowego popiołu lotnego przedstawia Rysunek 20. Właściwym jest określenie, że produkcja popiołu rozpoczyna się już na etapie wydobywania węgla kamiennego. Węgiel kamienny jest skałą osadową, pochodzenia roślinnego, która składa się nawet w 97% z pierwiastka węgla. Jednak skład chemiczny węgla poza występowaniem pierwiastka węgla jest zależny od procesów w których skała powstawała, lokalizacji czy materiału pierwotnego z którego uformowała się skała [63]. W związku z tym w praktyce rozróżnia się węgiel kamienny o różnych kalorycznościach (ilość energii powstałej w wyniku spalania węgla) oraz zanieczyszczeniach (np. wtrącenia metali ciężkich). Wszystko to wpływa na fakt, że w wyniku spalania węgla kamiennego powstaje krzemionkowy popiół lotny, który zwykle jest zróżnicowany pod względem właściwości i trudno jest przeprowadzić proces spalania w taki sposób aby ujednolicił jego właściwości.



Rysunek 20. Proces powstawania krzemionkowego popiołu lotnego (opracowanie własne)

Elektrociepłownie w których węgiel jest spalany z racji wymogów ograniczenia emisyjności oraz zanieczyszczenia środowiska naturalnego wyposażane są w różnego rodzaju filtry (np. workowe, elektrostatische), które za zadanie mają wyłapywanie cząstek stałych, które nie uległy procesowi

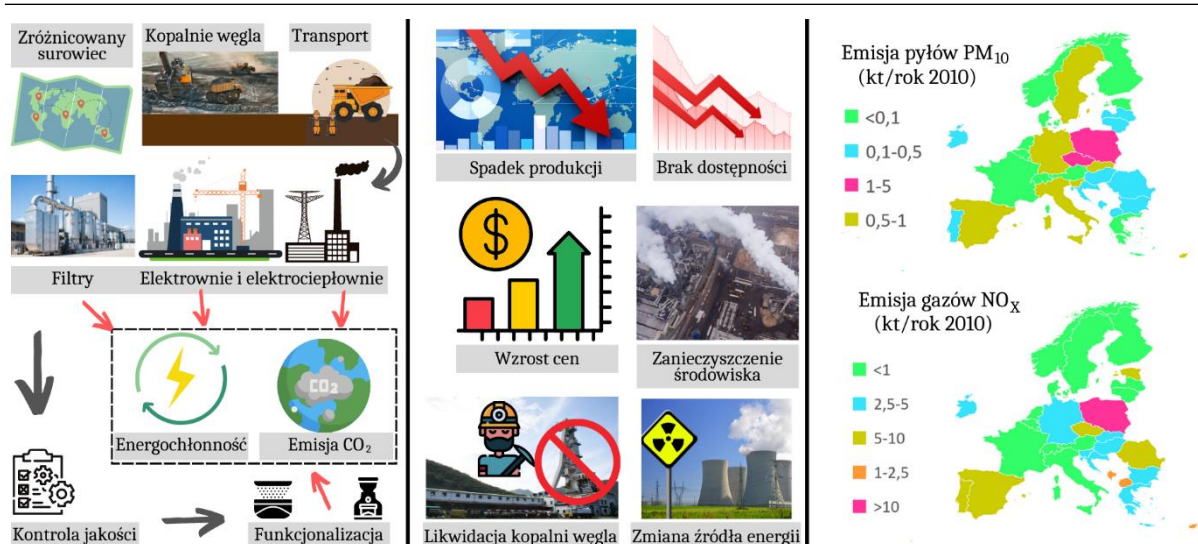
spalania. Po oczyszczeniu gazów odlotowych z cząstek stałych, gazy odprowadzane są do atmosfery, natomiast pozostałe na filtrach cząstki pyłaste tworzą ze sobą krzemionkowy popiół lotny. Procesy odzysku i powtórnego wykorzystania popiołów lotnym znane są w budownictwie od co najmniej 50 lat. Znane są przykłady wykorzystania popiołu lotnego w stabilizacji gruntów sypkich czy stosowanie go jako dodatku do betonu. Aby zapewnić wymaganą jakość popiołu lotnego często poddawany jest on dodatkowym procesom fizycznym lub chemicznym, które mają na celu oczyszczenie go z niespalonych części węgla (wywołują negatywny wpływ na beton) poprzez wypalanie popiołu, jego mielenie (mające na celu zwiększenie reaktywności) czy funkcjonalizacja chemiczna (polepszająca właściwości popiołu) [65]. Tak przygotowany materiał składowany jest następnie w zbiornikach i dystrybuowany do punktów odbioru. Rysunek 21 przedstawia wygląd krzemionkowego popiołu lotnego w formie nasypu, podczas przechowywania oraz zdjęcie wykonane skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM).



Rysunek 21. Krzemionkowy popiół lotny: a) w formie nasypu b) podczas przechowywania c) obraz ze Skaningowego Mikroskopu Elektronowego (opracowanie własne, na podstawie fotografii autora)

Krzemionkowy popiół lotny charakteryzuje się zwykle barwą nieznacznie ciemniejszą niż cement, jednak należy podkreślić, że zbyt ciemna (zbliżona do antracytowego/czarnego koloru) barwa będzie oznaczała wysoką zawartość niespalonego węgla, co świadczy o jego gorszej jakości. Po odpowiednim przybliżeniu za pomocą mikroskopu elektronowego można zauważyć, że ziarna krzemionkowego popiołu lotnego charakteryzują się odmiennym kształtem w porównaniu z cementem. Mają one bowiem kształt kulisty o zróżnicowanej wielkości, podczas gdy ziarna cementu są kształtu strzelistego, zbliżonego do równoległoboków.

Fakt, że krzemionkowy popiół lotny dzięki swojemu pozytywnemu wpływowi na właściwości mieszanki oraz kompozytów cementowych stał się pożądanym na rynku produktem spowodował, że obecnie nie jest on postrzegany już jako materiał odpadowy (jak miało to miejsce w połowie XX wieku). Ta wiadomość jest jednak tylko jednym z wielu problemów związanych z produkcją i wykorzystaniem popiołu lotnego, które przedstawia Rysunek 22.



Rysunek 22. Problematyka związana z popiołem lotnym oraz jego produkcją, rynkiem zbytu oraz wpływem na środowisko (opracowanie własne na podstawie danych ze źródła [79])

Wśród głównych problemów związanych z krzemionkowym popiołem lotnym można wydzielić trzy najbardziej istotne grupy: I – produkcja, II – rynek zbytu, III – ograniczenia emisyjności.

Pierwsza z wymienionych grup jest zależna od wielu czynników. Właściwości popiołu uzależnione są od lokalizacji z której wydobywany jest węgiel i jego właściwości. Same kopalnie węgla wywołują coraz większe kontrowersje polityczne, a w większości krajów europejskich zdecydowano już o przeprowadzeniu procesu wygaszania kopalni węglowych. Nie można także pominąć ich wpływu na środowisko i okoliczną ludność. Transport surowca do elektrowni i elektrociepłowni jest znaczącym utrudnieniem (szczególnie w przypadku większych odległości). Wreszcie przestarzałe technologie w ramach których produkowana jest energia elektryczna z węgla, wpływają na niską wydajność, wysokie zużycie surowca, a także znaczące straty produkcji. Należałoby się także zastanowić nad skutecznością filtrów, które mają za zadanie wyłapywanie cząstek stałych z gazów odlotowych. Wszystko to ma wpływ na produkt finalny jakim jest krzemionkowy popiół lotny oraz jego właściwości, które często nie spełniają wymagań co wiąże się z koniecznością energochłonnej funkcjonalizacji popiołu. Podsumowując problematykę związaną z grupą I należy zaznaczyć, że każdy opisany problem wiąże się z ogromnym śladem środowiskowym (prowadząc do jego zanieczyszczenia lub obciążony jest gigantyczną emisją CO<sub>2</sub>).

Wyzwania związane z grupą II można opisać jako ciąg przyczynowo skutkowy. Ogromny wzrost wykorzystania krzemionkowego popiołu lotnego w budownictwie doprowadził do zmniejszenia jego pokładów. Większy popyt na ten materiał niż jego podaż prowadzi do wzrostu cen na rynku. Nie można w tym przypadku zastosować rynkowego rozwiązania związanego ze zwiększoną produkcją ponieważ od lat państwa Unii Europejskiej dążą do zmiany metod produkcji energii i rezygnacji z elektrowni węglowych, zatem w całej Europie spada systematycznie rok do roku produkcja krzemionkowego

popiołu lotnego. Likwidacja kolejnych kopalni węgla oraz elektrowni węglowych nie poprawia dodatkowo sytuacji rynku, a trend związany z odwróceniem produkcji energii w bardziej ekologiczną stronę (elektrownie jądrowe, wiatrowe, słoneczne) powoduje, że na rynek krzemionkowego popiołu lotnego powinno spoglądać się raczej z umiarkowanym optymizmem. W przypadku grupy II podsumowując należy zauważyć, że opisane problemy są poniekąd efektem trendu związanego z ochroną środowiska naturalnego, co dodatkowo powinno zachęcać do poszukiwania ekologicznych sposobów ograniczenia wykorzystania krzemionkowego popiołu lotnego, jednak nie zwiększając przy tym zużycia klinkieru.

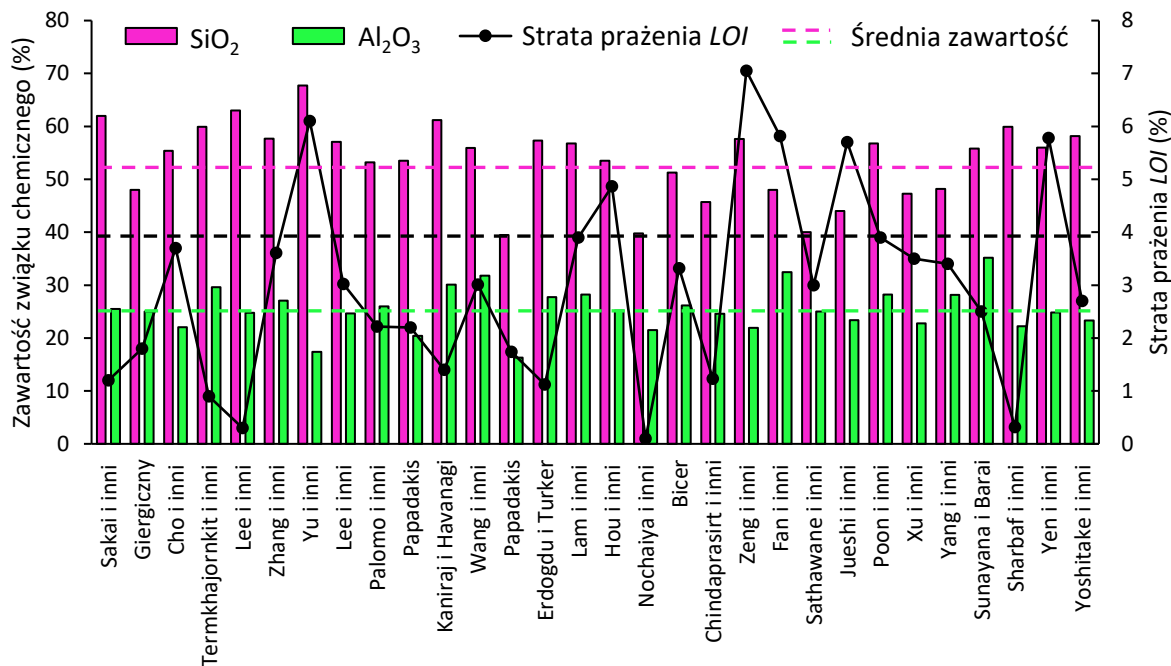
Wreszcie w ramach grupy III należy zweryfikować istotność wyzwania związanego z ochroną środowiska naturalnego. Historycznie Unia Europejska jest dość zróżnicowana pod względem polityki oraz świadomości środowiskowej jej obywateli. Kraje, których historia nieodłącznie związana była ze Związkiem Radzieckim obciążone są mniejszym rozwojem technologicznym w porównaniu z państwami leżącymi po zachodniej stronie „żelaznej kurtyny”. Dlatego też nie dziwi obraz mapy Unii Europejskiej przedstawiający zanieczyszczenie pyłami PM<sub>10</sub> oraz gazami NO<sub>x</sub> (Rysunek 22). Niestety, ale Polska wyróżnia się w tym zestawieniu jako jeden z krajów, który zanotował w 2010 roku najwyższe wartości analizowanych czynników zanieczyszczenia środowiska. Ten fakt jest pośrednio związany właśnie z produkcją energii z węgla kamiennego oraz rozwiniętemu przemysłowi cementowemu (Polska jest drugim największym eksporterem cementu w Unii Europejskiej).

Należy podkreślić, że na przełomie lat krzemionkowy popiół lotny stał się chętnie wykorzystywanym produktem, który cieszy się szczególną popularnością w technologii betonu. Niemniej jednak ogromny wpływ całego procesu jego produkcji, przetwarzania i wykorzystania związany jest z ogromnym śladem środowiskowym co powoduje, że należy zastanowić się nad ograniczeniem jego wykorzystania. Należy jednak zrobić to umiejętnie, z wykorzystaniem alternatywnych materiałów (w szczególności odpadowych), które pozwolą zastąpić część tego materiału w kompozytach cementowych. Poszukiwanie takich rozwiązań musi jednak zostać poprzedzone kompleksowymi badaniami, a ich tempo musi być ograniczone. Umiejętne przygotowanie nowoczesnych kompozycji materiałowych kompozytów cementowych wymaga przeprowadzenia rozpoznania literaturowego oraz badań związanych z popiołem lotnym. Wyniki te wskażą autorowi drogę do wyselekcjonowania w drodze badawczej, takiej kompozycji kompozytów cementowych stosowanych w warstwach wierzchnich podłóg, aby uzyskać poprawę ich podstawowych właściwości, redukując przy tym częściowe zużycie cementu. Rozdział 3.5 rozprawy przybliży osiągnięcia naukowców prowadzących badania nad wpływem popiołu lotnego w mieszankach oraz kompozytach cementowych.



### 3.2.2. Właściwości chemiczne i fizyczne krzemionkowego popiołu lotnego

Właściwości chemiczne i fizyczne krzemionkowego popiołu lotnego są podstawowymi elementami, których ocena pozwala określić przydatność popiołu do wykorzystania w kompozytach cementowych [64]. Szczególnie istotne są właściwości chemiczne, które determinować będą reaktywność krzemionkowego popiołu lotnego. Wysoka zawartość tlenku krzemu (IV) i faz szklistych będzie wspierała aktywność popiołu lotnego dzięki zwiększeniu zawartości aktywnej krzemionki, która w normalnych warunkach reaguje z wodorotlenkiem wapnia [61]. Dodatkowo podwyższona zawartość reaktywnych związków glinu będzie wspomagała ten proces, jednak reakcja związków glinu jest wolniejsza, stąd też w betonach i zaprawach jej wyniki obserwuje się po dłuższym niż zwyczajowo (dla cementu) czasie tj. 56 lub 90 dniach [39]. Działanie popiołu lotnego może być dodatkowo wspierane poprzez zastosowanie odpowiednich metod przechowywania kompozytu. Obserwuje się bowiem, że kompozyty cementowe modyfikowane popiołem lotnym przechowywane do czasu zniszczenia w wodzie osiągają nawet 30% wyższe wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z kompozytami przechowywanymi w warunkach powietrzno-suchych [115]. Istotną cechą związaną ze składem chemicznym krzemionkowego popiołu lotnego jest strata prażenia (*eng. Loss on Ignition - LOI*). *How-Ji Chen i inni* [21] donoszą, że wykorzystanie jako dodatku do betonu krzemionkowego popiołu lotnego o LOI=8% doprowadziło do znacznego (20%) wydłużenia się czasu początku i końca wiązania betonu, jednak nie miało to odzwierciedlenia we właściwościach mechanicznych badanego betonu. *Mu i inni* [114] określili natomiast, że krzemionkowy popiół lotny o wysokim LOI charakteryzuje się znacząco wyższą powierzchnią właściwą ziaren w porównaniu do popiołu o niższym LOI, co związane jest z podwyższoną zawartością pierwiastka węgla, który posiada wysoką powierzchnię właściwą. Naukowcy [114] zaznaczyli, że LOI jest związane z temperaturą wypalania węgla kamiennego i może być obniżone w popiele już po jego produkcji za pomocą wypalania w wysokiej temperaturze, jednak ten proces jest znacznie energochłonny, stąd tak istotna jest kontrola temperatury wypalania węgla w elektrowniach. Rysunek 23 przedstawia analizę wyników literaturowych składu chemicznego oraz LOI przedstawionych przez naukowców.



Rysunek 23. Zawartość tlenku krzemu (IV) i tlenku glinu (III) w krzemionkowym popiole lotnym w korelacji z jego stratą prażenia według literatury [10, 25, 119, 123–125, 128, 131, 141, 143, 146, 160, 26, 164, 170, 174, 176, 181, 182, 185, 189, 192, 46, 47, 61, 77, 91, 100, 102]

Krzemionkowy popiół lotny jest materiałem o dość stałym składzie chemicznym niezależnie od lokalizacji w której został wyprodukowany (Rysunek 23). Można zauważyć, że zarówno zawartość SiO<sub>2</sub>, jak i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dla poszczególnych prac naukowych są bardzo zbliżone do średniej (odpowiednio 52% oraz 25%). Norma PN-EN 450-1:2012 stanowi wymóg, że suma zawartości SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≥ 70% w krzemionkowym popiole lotnym stosowanym w kompozytach cementowych. Analizując dane literaturowe można stwierdzić, że znakomita większość (poza np. *Nochaiya i inni* [119] czy *Sathawane i inni* [143]) przedstawionych wyników spełnia tę zależność (nawet analizując jedynie sumę SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Pozytywnie należy także ocenić fakt, że większość (25 z 30) przedstawionych wyników badań straty prażenia popiołu kwalifikuje te popioły do klasy A czystości (LOI ≤ 5% wg. PN-EN 450-1:2012), co pozytywnie świadczy o jakości wykorzystanego materiału.

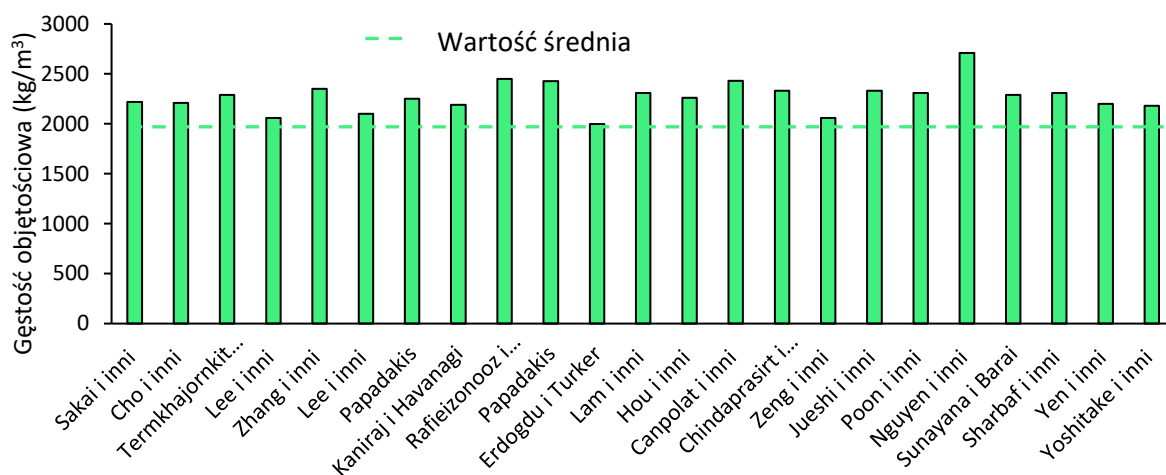
Rysunek 24 przedstawia analizę powierzchni właściwej ziaren krzemionkowego popiołu lotnego wykorzystywanego przez naukowców.



Rysunek 24. Powierzchnia właściwa ziaren krzemionkowego popiołu lotnego według literatury [14, 17, 127, 131, 132, 147, 160, 163, 182, 189, 25, 26, 61, 91, 100, 102, 124, 125]

Analizując Rysunek 24 można zauważyć, że większość analizowanych popiołów charakteryzuje się powierzchnią właściwą ziaren większą niż 3,0 m<sup>2</sup>/g co pozwala stwierdzić, że spełniają one wymagania opisane w normie PN-EN 450-1:2012. Niemniej jednak wyniki uzyskane przez *Lee i inni* [102] oraz *Papadakis* [124] powodują, że należy stwierdzić, że wykorzystane przez tych badaczy popioły nie nadają się do wykorzystania w betonie towarowym. Ocenia się, że powierzchnia właściwa ziaren cementu waha się w granicach 3,2-3,5 m<sup>2</sup>/g, zatem można stwierdzić, że większość analizowanych popiołów lotnych posiada zbliżoną miąższość do cementu, a zatem taki materiał wpisuje się odpowiednio w rozważania na temat zastąpienia jego dodatkiem części cementu w mieszance cementowej, gdyż nie powinien prowadzić on (pod względem miąższości) do znaczących różnic w konsystencji mieszanki. Część badaczy łączy wysoką >3,5 m<sup>2</sup>/g powierzchnię właściwą ziaren popiołu lotnego z podwyższoną wartością LOI, gdyż wyższa zawartość pierwiastka węgla mogłaby zwiększyć wynik oznaczania powierzchni właściwej ziaren popiołu lotnego, jednak należy pamiętać, że obecnie popularne są różnorodne techniki związane z funkcjonalizacją ziaren popiołu lotnego w taki sposób, aby zmaksymalizować efekt wykorzystania tego materiału (nawet przy mniejszym dodatku %). Do takich technik można zaliczyć mielenie popiołu [176] czy funkcjonalizację chemiczną polegającą na adsorpcji na powierzchni ziaren różnych nanocząstek, polepszając przy tym aktywność popiołu lotnego. W związku z istotnym ryzykiem związanym z wysokim LOI należy zatem prowadzić łącznie badania oznaczania powierzchni właściwej ziaren oraz LOI, co może pozwolić precyzyjnie określić efekt zastosowania krzemionkowego popiołu lotnego w mieszance i kompozycie cementowym.

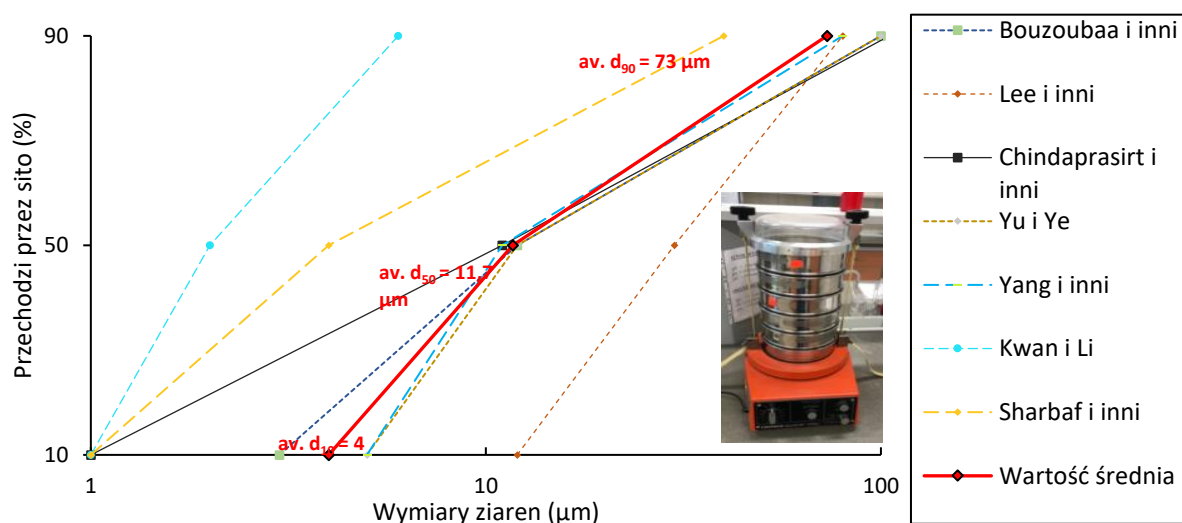
Rysunek 25 przedstawia analizę gęstości objętościowej krzemionkowego popiołu lotnego oznaczonej przez naukowców.



Rysunek 25. Gęstość objętościowa krzemionkowego popiołu lotnego na podstawie literatury [17, 25, 124, 125, 127, 131, 132, 141, 146, 147, 160, 163, 26, 181, 182, 186, 46, 77, 91, 100–102, 117]

Gęstość objętościowa krzemionkowego popiołu lotnego jest jego dość powtarzalną właściwością, która zwykle zależna jest od jego uziarnienia i wielkości ziaren. Z racji charakterystyki procesu w wyniku którego powstaje krzemionkowy popiół lotny można się spodziewać, że gęstość objętościowa różnych próbek będzie do siebie zbliżona, a odstępstwa od średniej będą wykazywały popioły dodatkowo przetworzone – np. *Nguyen i inni* [117] przesiali przez sito popiół lotny aby zmaksymalizować jego wpływ na właściwości mechaniczne kompozytu i uzyskać w ten sposób najwyższy możliwy procent zastąpienia cementu w kompozycie cementowym bez znaczącej utraty właściwości mechanicznych.

Rysunek 26 przedstawia analizę uziarnienia krzemionkowego popiołu lotnego wykorzystanego w badaniach kompozytów cementowych w literaturze.

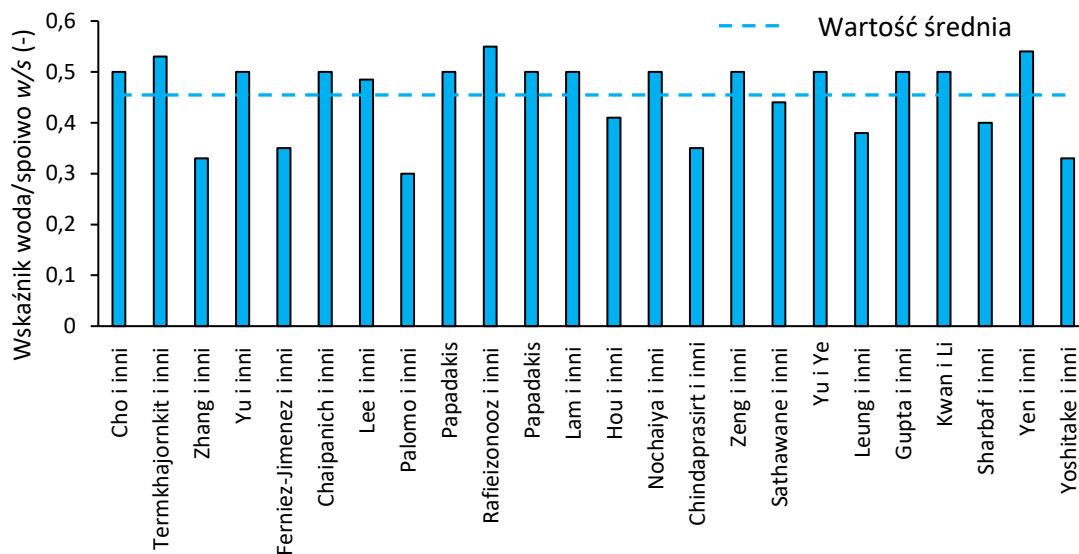


Rysunek 26. Krzywa uziarnienia krzemionkowego popiołu lotnego według literatury [14, 25, 98, 102, 146, 179]

Wyniki oznaczania uziarnienia krzemionkowego popiołu lotnego wykorzystanego przez naukowców w literaturze są powtarzalne, a ich zmienność niewielka. Można także zauważyć, że wszystkie analizowane próbki charakteryzowały się maksymalną średnicą ziaren mniejszą niż  $100\mu\text{m}$ , natomiast średnie średnice ziaren  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  z analizowanych prac wynosiły odpowiednio 4, 11.7 oraz  $73\mu\text{m}$ . Bardzo miążkie uziarnienie przedstawione przez *Kwan i Li* [98] dotyczyło jednak wyselekcjonowanych ziaren popiołu lotnego, gdyż Ci badacze sprawdzali wpływ ultramiałkiego popiołu lotnego na właściwości reologiczne mieszanki cementowej. Porównując natomiast przegląd literaturowy uziarnienia krzemionkowego popiołu lotnego oraz mączki granitowej można zauważyć, że popiół lotny charakteryzuje się znacząco mniejszą zmiennością wyników, które mieszczą się w dużo mniejszej skali wielkości ziaren ( $100\mu\text{m}$  w porównaniu do  $1000\mu\text{m}$  dla mączki granitowej).

### 3.2.3. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanek cementowych

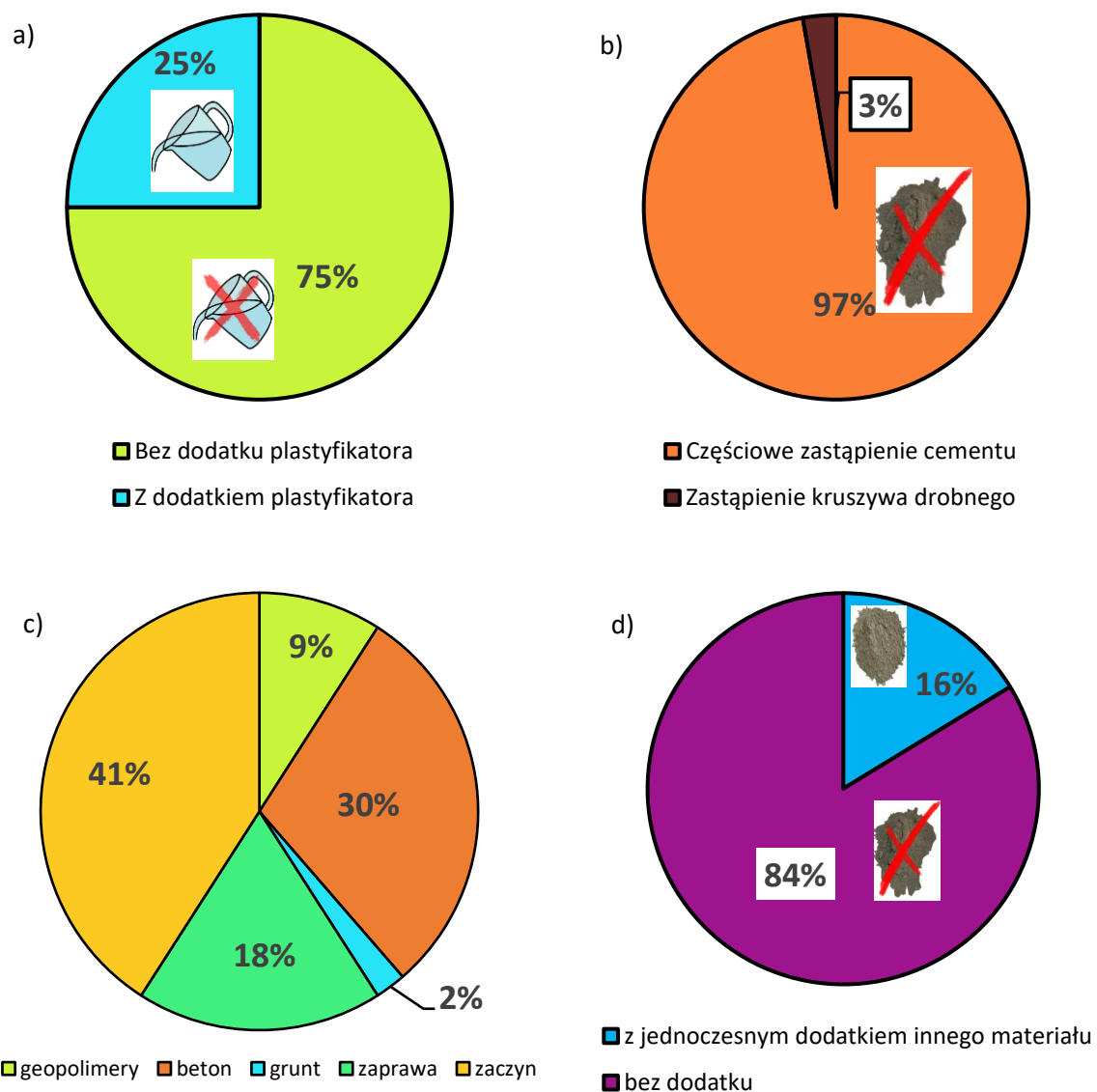
Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanek cementowych jest badany od lat. Ten fakt wpływa pozytywnie na bazę dostępnych danych i z dużym prawdopodobieństwem można oszacować wpływ popiołu na poszczególne właściwości. Niemniej jednak, podobnie jak wcześniej wspomniano w rozdziale 3.4, istotnym elementem w ocenie wpływu są założenia wstępne. Ustalenie stałej wartości w/c lub w/s jest dość trudne ponieważ z jednej strony należy dążyć do jego minimalizacji z racji chęci uzyskania podwyższonych właściwości mechanicznych kompozytu, z drugiej strony należy pamiętać, że mieszanka musi charakteryzować się odpowiednią urabialnością i konsystencją, co szczególnie istotne może być w badaniach naukowych, w których nie wykorzystano dodatku plastyfikatora. Krzemionkowy popiół lotny jest znanym materiałem wykorzystywanym chętnie przez naukowców jako tzw. materiał zastępujący cement (*eng. Supplementary Cementitious Material*). Oznacza to, że dzięki dodatkowi krzemionkowego popiołu lotnego zmniejsza się procentową zawartość cementu w mieszance. Z tego względu, naukowcy zajmujący się badaniami popiołu w swoich badaniach częściej korzystają przy ustalaniu warunków brzegowych składu mieszanki ze stałego w/s, wliczając w skład spoiwa cement + popiół lotny oraz pozwalając na zmienne w/c (zwykle zmniejszające się wraz z dodatkiem % popiołu). Rysunek 27 przedstawia analizę literaturową wartości stosowanego wskaźnika w/s.



Rysunek 27. Wskaźnik woda/spoiwo stosowany dla mieszanek cementowych modyfikowanych popiołem lotnym przez badaczy w literaturze [19, 24, 119, 123–125, 132, 143, 146, 164, 181, 182, 25, 183, 185, 189, 48, 69, 77, 98, 100, 102, 103]

Wskaźnik woda / spoiwo jest istotny w procesie analizy wpływu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanki [54, 70]. Można zauważyć, że najczęściej naukowcy stosują  $w/s = 0,4-0,5$  (-) (średnia 0,45 (-)), co świadczy o ograniczonym korzystaniu z naukowców z plastyfikatora w badaniach serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym. Ten fakt można kojarzyć z raportowanym przez naukowców [119] wpływem popiołu lotnego na zmianę konsystencji na bardziej płynną. Ocenia się, że właściwość tę popiół lotny zawdzięcza kształtowi ziaren oraz wysokiej zawartości fazy szklistej, które pozwalają zminimalizować niezbędną grubość warstwy wody na ziarnie popiołu, zwiększając przy tym objętość wody, która może zostać wykorzystana do otoczenia pozostałych ziaren w mieszance. Zhou i inni [173] donoszą, że popiół lotny dzięki opisanym wcześniej właściwością znacząco poprawia także zdolność mieszanki betonowej do zagęszczania, zmniejszając przy tym porowatość kompozytu cementowego i zwiększając dzięki temu jego właściwości mechaniczne.

Projektowanie składu mieszanki cementowej jest skomplikowanym wyzwaniem, do którego naukowcy podchodzą w różny sposób. Rysunek 28 przedstawia wyniki analizy statystycznej związanej z ustalaniem założeń wstępnych stosowanych przez naukowców w kompozycji składu mieszanek cementowych.



Rysunek 28. Wyniki analizy statystycznej związanej z wykorzystaniem krzemionkowego popiołu lotnego w mieszankach cementowych: a) z/bez dodatku plastyfikatora b) wykorzystanie popiołu jako zastąpienie cementu / kruszywa drobnego c) rodzaje mieszanek w których wykorzystano popiół lotny d) wykorzystanie popiołu lotnego jednoczesnym wykorzystaniem innego dodatku

W przypadku badań związanych z wpływem krzemionkowego popiołu lotnego można zauważyć, że naukowcy nie korzystają chętnie z plastyfikatora (75% przeprowadziła badania bez jego dodatku), co podkreśla zdolności popiołu lotnego do poprawy konsystencji mieszanki cementowej. Należy także zauważyć, że zasób danych literaturowych związanych z wykorzystaniem popiołu jest znacznie szerszy niż w przypadku mączki granitowej. Na wyniki przedstawionej analizy statystycznej (Rysunek 28) mógł mieć zatem wpływ subiektywny dobór analizowanych publikacji naukowych (analiza statystyczna jest oparta o przegląd 43 prac naukowych), podczas gdy w przypadku dodatku mączki granitowej autor przeanalizował większość dostępnych badań (analiza statystyczna na podstawie 50 prac). W przypadku

analizy popiołu lotnego autor starał się dobierać prace opisujące fundamentalne badania podstawowe związane z dodatkiem popiołu lotnego w mieszankach i kompozytach cementowych, co mogło doprowadzić do wniosku o skłonności naukowców do pomijania plastyfikatora w składzie mieszanki cementowej (z opisanych wcześniej powodów jego wpływu na wyniki badań). Rysunek 28b przedstawia wybraną przez naukowców metodę stosowania popiołu lotnego jako materiału zastępującego cement lub kruszywo drobne. Znakomita większość badaczy (97%) wykorzystwała popiół do zastąpienia części cementu w mieszance, co związane jest z faktem wywołania przez popiół reakcji pucolanowej, która rekompensuje w wytrzymałości kompozytu cementowego utratę części cementu. Rysunek 28c przedstawia analizę typów mieszanki cementowej wykorzystanej w badaniach naukowców. Można zaobserwować odmienny trend niż przedstawiony w rozdziale 3.4, gdyż zaledwie 30% analizowanych danych dotyczyła betonu, podczas gdy aż 41% była związana z zaczynem cementowym. Ten fakt może popierać wcześniej stawianą tezę, że w analizie statystycznej wykorzystano dane pochodzące z prac naukowych związanych z badaniami podstawowymi (chętnie prowadzonymi dla zaczynu cementowego), a nie badaniami aplikacyjnymi (często prowadzonymi dla betonu). W badaniach nad wpływem popiołu lotnego na właściwości mieszanek cementowych naukowcy rzadko (tylko 16% z analizowanych prac) sięgali po metodę łączenia ze sobą jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku sypkiego (Rysunek 28d). Należy jeszcze dodać, że w przedstawionych 16% prac raportujących o jednoczesnym oddziaływaniu popiołu lotnego i innego dodatku sypkiego, aż 6 z 7 analizowanych prac dotyczyła jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz mikrokrzemionki, a tylko jedna praca jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz mączki wapiennej. Należy stwierdzić, że metoda ta jest obecnie raczej rzadko stosowana przez naukowców, pomimo wykazywania przez nią ogromnego potencjału.

Tabela 3 przedstawia wyniki rozpoznania literaturowego związanego z wpływem dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na wybrane właściwości mieszanki cementowej.



Tabela 3. Wpływ modyfikacji mieszanki cementowej dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego na jej wybrane właściwości

Literatura	Konsystencja mieszanki	Zawartość powietrza	Czas wiązania	Zmiana temperatury mieszanki	Gęstość upakowania
<i>Papadakis</i> [125]	Brak danych			Zmniejszenie	Brak danych
<i>Rafieizonooz i inni</i> [132]	Brak danych				
<i>Hou i inni</i> [77]	Bardziej płynna	Brak danych		Zmniejszenie	Brak danych
<i>Nochaiya i inni</i> [119]		Brak danych	Wydłużenie czasu początku i końca	Brak danych	
<i>Nguyen i inni</i> [117]	Brak danych				Zwiększenie
<i>Kwan i Li</i> [98]	Bardziej płynna	Zmniejszona	Brak danych		
<i>Sunayana i Barai</i> [160]	Bardziej gęsta	Brak danych		Zmniejszenie	Brak danych
<i>Guneyisi i Gesoglu</i> [67]	Bardziej płynna	Brak danych	Wydłużenie czasu początku i końca		Zwiększenie
<i>Wang i inni</i> [170]	Bardziej gęsta			Brak danych	
<i>Kurda i inni</i> [96]	Bardziej płynna	Zmniejszona	Brak danych		Zwiększenie

Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na konsystencję mieszanki cementowej jest podobny dla większości analizowanych prac. Większość naukowców (np. *Nochaiya i inni* [119] czy *Kurda i inni* [96]) donosi, że dodatek popiołu powoduje, że mieszanka cementowa staje się bardziej płynna. Przeciwny efekt zaobserwowali *Sunayana i Barai* [160], którzy przeanalizowali jednak także dodatek kruszywa recyklingowego, które jest bardziej wodozadne niż kruszywo tradycyjne, co mogło doprowadzić do zmian konsystencji mieszanki. Natomiast *Wang i inni* [170], którzy również uzyskali bardziej gęstą konsystencję mieszanki po dodaniu popiołu lotnego wykorzystali w swoich badaniach wysoką procentową zawartość mikrokrzemionki, co doprowadziło do zwiększenia wodozadności mieszanki (mikrokrzemionka na znacznie wyższą powierzchnię właściwą ziaren w porównaniu z popiołem lotnym). *Kwan i Li* [98] zauważyli, że dzięki dodatku popiołu do mieszanki cementowej możliwe jest zmniejszenie zawartości powietrza w mieszance cementowej. Naukowcy [119] donoszą, że wraz z częściowym zastąpieniem cementu za pomocą dodatku krzemionkowego popiołu lotnego wydłużeniu uległ czas początku i końca czasu wiązania mieszanki. Może to być związane z wysoką zawartością związków glinu w popiele, którego reakcja przebiega znacznie wolniej w porównaniu z klinkierem portlandzkim. *Guneyisi i Gesoglu* [67] zauważyli, że zastąpienie części cementu w mieszance cementowej dodatkiem popiołu lotnego prowadzi do znaczącego zmniejszenia wydzielania ciepła w procesie hydratacji cementu. Jest to związane z niższą dynamiką przemian termochemicznych w mieszance ze względu na niższą zawartość krzemianu trójwapniowego, którego proces hydratacji jest procesem egzotermicznym. Zatem niższa zawartość klinkieru w mieszance (poprzez zastąpienie cementu dodatkiem popiołu lotnego) prowadzi do zmiany zawartości poszczególnych faz chemicznych, a w konsekwencji zmniejszeniem ilości wydzielanego ciepła

w procesie hydratacji mieszanki. Istotnym efektem dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanki cementowej jest jej gęstość upakowania. Znana jest bowiem zależność opisująca korelację pomiędzy gęstością upakowania składników mieszanki, a wytrzymałością na ściskanie kompozytu (im większa gęstość upakowania, tym większa wytrzymałość na ściskanie). Szczególnie pozytywnie należy zatem ocenić, że zgodnie z obserwacjami naukowców [96], gęstość upakowania mieszanki wzrosła dzięki modyfikacji mieszanki dodatkiem popiołu.

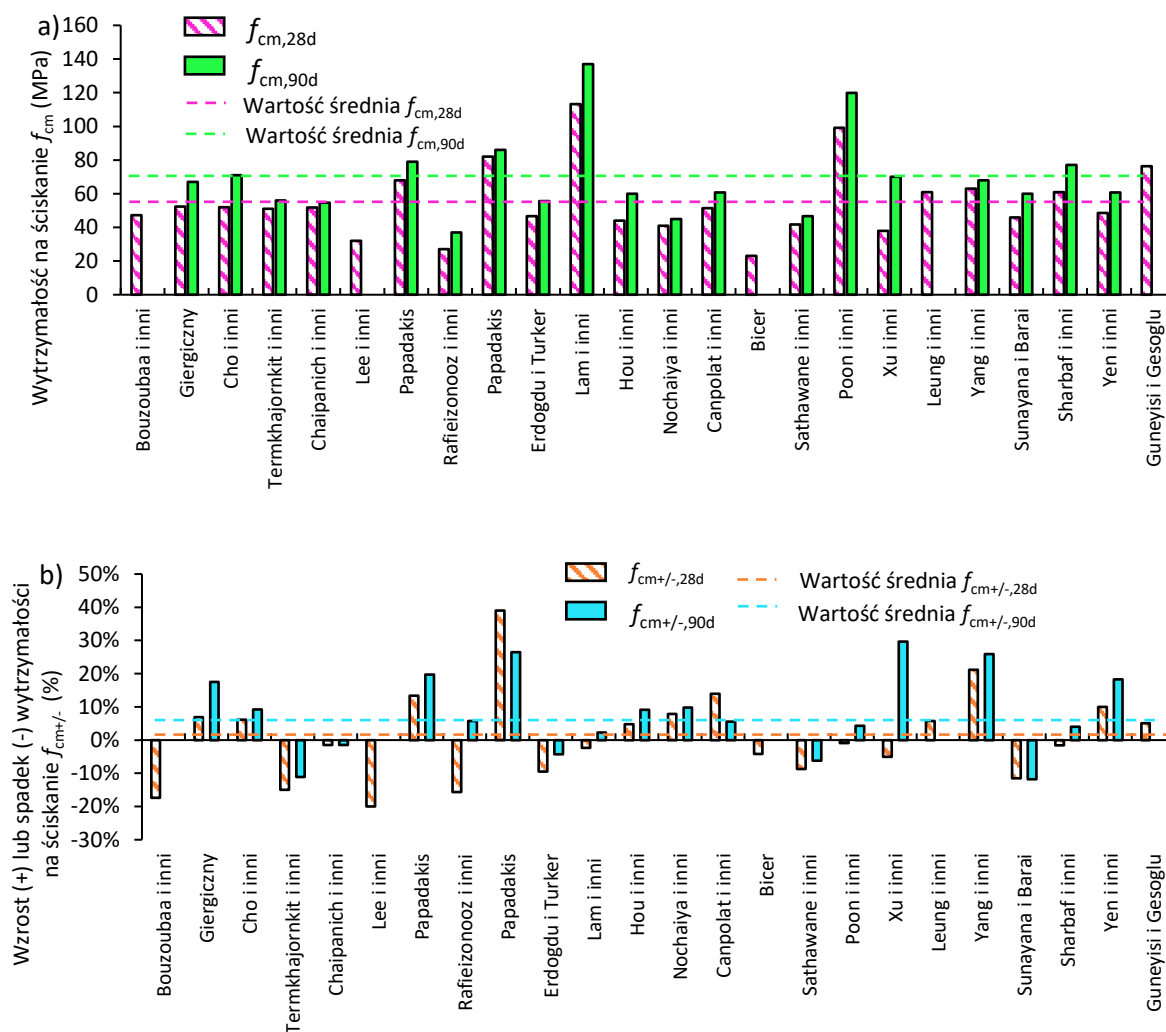
### 3.2.4. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości kompozytów cementowych

Właściwości kompozytów mechanicznych są kluczowe przy ocenie możliwości ich wykorzystania w budownictwie. Wymagania związane z niezawodnością oraz trwałością konstrukcji powodują, że projektanci muszą zwracać szczególną uwagę na materiały budowlane wykorzystywane w budownictwie. Wykorzystanie krzemionkowego popiołu lotnego w technologii betonu jest znane od wielu lat, a dzięki temu inżynierowie posiadają wystarczającą wiedzę, aby umiejętnie projektować kompozyty, w których częściowo zastąpiono cement dodatkiem popiołu. Właściwości mechaniczne są kluczowym elementem oceny kompozytów cementowych. W przypadku kompozytów cementowych modyfikowanych popiołem, istotne jest, że należy uwzględnić, że dynamika przyrostu właściwości mechanicznych jest odmienna w porównaniu z kompozytem cementowym niemodyfikowanym. Dodatek popiołu lotnego prowadzi bowiem do wolniejszego przyrostu właściwości mechanicznych, jednak proces ich rozwoju jest jednak wydłużony w czasie, co powoduje, że kompozyt modyfikowany popiołem zyskuje znacząco większe właściwości mechaniczne po 90 dniach niż po 28 dniach przechowywania. Rysunek 29 przedstawia wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie na podstawie literaturowy oraz ich analizę porównawczą. Wzór 6 przedstawia numeryczną interpretację analizy porównawczej, gdzie  $f_{cm,0}$  oznacza wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego, a  $f_{cm,1}$  określa najbardziej pozytywny wynik (najmniejszy spadek/największy wzrost) wytrzymałości na ściskanie uzyskany dla serii modyfikowanej dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego.

$$f_{cm+/-} = \frac{f_{cm,1} - f_{cm,0}}{f_{cm,0}} * 100\% \quad (6)$$

$f_{cm,0}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu referencyjnego (MPa),

$f_{cm,1}$  – wytrzymałość na ściskanie kompozytu modyfikowanego krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (największy wzrost/najmniejszy spadek) (MPa).

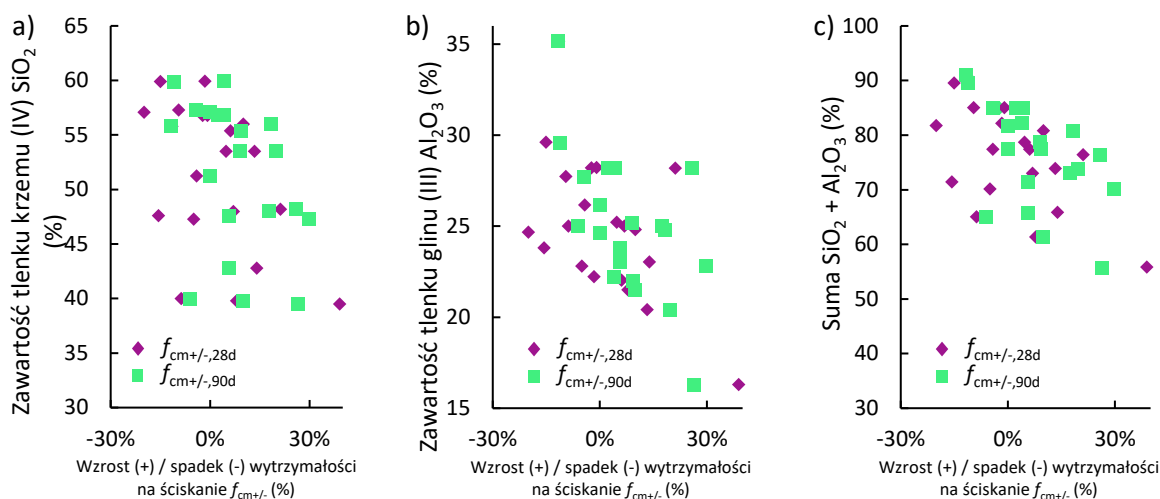


Rysunek 29. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego na jego wytrzymałość na ściskanie na podstawie literatury: a) wyniki uzyskanych przez badaczy wytrzymałości na ściskanie b) wzrost/spadek wytrzymałości na ściskanie kompozytu [10, 14, 102, 103, 119, 124, 125, 127, 132, 143, 146, 160, 17, 163, 175, 177, 181, 19, 26, 46, 61, 67, 77, 100]

Rysunek 29a przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie po 28 oraz 90 dniach dla kompozytów modyfikowanych popiołem lotnych według literatury. Można zauważyć, że dla wszystkich serii (dla których były dostępne dane), popiół lotny doprowadził do znaczącego wzrostu wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach. Świadczyć to może, że wykorzystywany przez badaczy popiół charakteryzował się wysoką aktywnością i był dobrej jakości. Zgodnie bowiem z *Giergiczny* [61], im lepsza jest jakość popiołu lotnego tym wyższe przyrosty „późnej” (56 dni i więcej) wytrzymałości na ściskanie można zaobserwować. *Lam i inni* [99] donoszą, że dzięki wpływowi popiołu lotnego na upakowanie składników mieszanki cementowej oraz zwiększenie jej zagęszczalności, kompozyty modyfikowane popiołem mogą zyskiwać znacząco na wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z kompozytami niemodyfikowanymi tym dodatkiem.

*Papadakis* [124] zauważył, że na wytrzymałość na ściskanie kompozytów modyfikowanych popiołem lotnym znaczący wpływ ma wielkość ziaren popiołu, ponieważ większe ziarna wykazują znacząco mniejszą aktywność w porównaniu z mniejszymi ziarnami. Dodatkowo, wywnioskował [124] także, że krzemionkowe popioły lotne o podwyższonej zawartości aktywnej krzemionki powodują znacząco większy wpływ na wzrost wytrzymałości na ściskanie. Nie zauważono natomiast, aby popiół lotny prowadził do bardziej znaczącego wzrostu wytrzymałości na ściskanie w kompozytach wysokich wytrzymałości (>100 MPa) (Rysunek 29a). *Termkhajornkit i inni* [163] uzyskali spadek wytrzymałości na ściskanie kompozytów modyfikowanych dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego, niemniej jednak naukowcy przeprowadzili badania nad wpływem sposobu przechowywania na wytrzymałość na ściskanie kompozytów modyfikowanych popiołem. Wywnioskowali oni, że krytycznie ważne jest, aby odpowiednio przechowywać kompozyty z częściowym zastąpieniem cementu popiołem gdyż może to zapewnić warunki do przyrostu wytrzymałości na ściskanie, pomimo zmniejszonej zawartości cementu. Interesujące wyniki zmian wytrzymałości na ściskanie w czasie przedstawili *Xu i inni* [175], którzy uzyskali redukcję wytrzymałości na ściskanie kompozytu modyfikowanego popiołem po 28 dniach, jednak po 90 dniach zaraportowali oni o prawie 30% wzroście wytrzymałości na ściskanie kompozytu modyfikowanego popiołem w porównaniu do kompozytu niemodyfikowanego. Autorzy [175] wnioskują, że taki efekt uzyskali z racji zróżnicowanej dynamiki wzrostu kryształów glinokrzemianowych w kompozycie w zależności od składu fazowego krzemionkowego popiołu lotnego. Początkowo zastąpienie części cementu prowadzi do osłabienia struktury kompozytu, jednak gdy ziarna popiołu zaczynają reagować (po czasie 28 dni), wówczas struktura zostaje znacząco wzmocniona i wypełniona, co prowadzi do wzrostu właściwości mechanicznych. Wskazali także, że wprowadzenie dodatkowego gipsu do kompozytu modyfikowanego popiołem lotnym może pozwolić na wzmocnienie jego aktywności.

Rysunek 30 przedstawia korelację pomiędzy zawartością analizowanych związków chemicznych w popiole, a wzrostem / spadkiem wytrzymałości na ściskanie kompozytu modyfikowanego popiołem lotnym.



Rysunek 30. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego o zróżnicowanym składzie chemicznym na jego wzrost /spadek wytrzymałości na ściskanie na podstawie literatury: a) wpływ zawartości  $\text{SiO}_2$  b) wpływ zawartości  $\text{Al}_2\text{O}_3$  c) Wpływ sumy zawartości  $\text{SiO}_2$  oraz  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [10, 14, 102, 103, 119, 124, 125, 127, 132, 143, 146, 160, 17, 163, 175, 177, 181, 19, 26, 46, 61, 67, 77, 100]

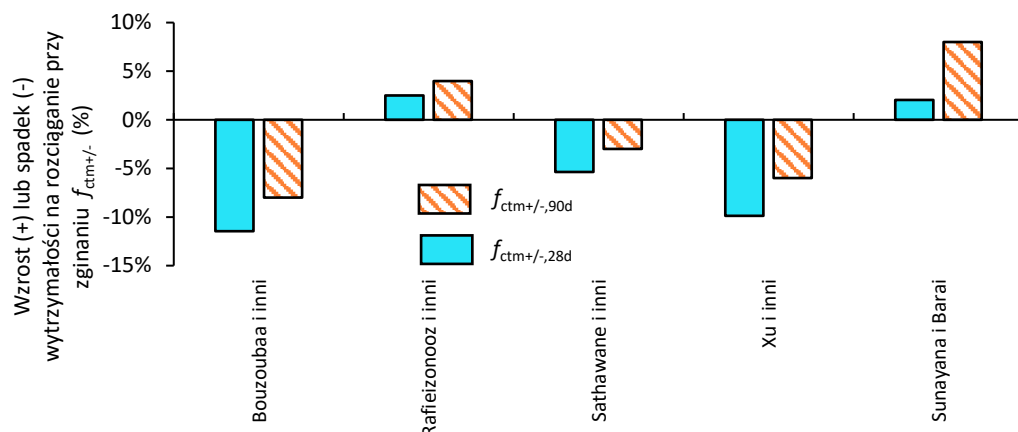
Podobnie jak w przypadku analizy wpływu składu chemicznego mączki granitowej (Rodział 3.4), w przypadku popiołu lotnego również trudno jest wskazać optymalną zawartość  $\text{SiO}_2$  czy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Niemniej jednak, analiza ta skutecznie przedstawia aktywność wykorzystanych popiołów lotnych. Można zauważyć, że jeżeli zawartość  $\text{SiO}_2$  przekroczy 55%, wówczas właściwości mechaniczne kompozytu ulegają zmniejszeniu. Podobnie w przypadku, gdy zawartość  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w popiele przekroczy 27%. Natomiast suma tych dwóch zawartości po przekroczeniu 80% prowadzi do gorszych właściwości mechanicznych kompozytu modyfikowanego.

Rysunek 31 przedstawia analizę porównawczą wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów cementowych modyfikowanych dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego według literatury. W celu określenia wpływu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu cementowego wykorzystano opisaną wcześniej analizę porównawczą, której interpretację numeryczną przedstawia Wzór 7, gdzie  $f_{ctm,0}$  określa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu referencyjnego, a  $f_{ctm,1}$  opisuje najbardziej pozytywny wynik wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego dodatkiem popiołu lotnego.

$$f_{ctm+/-} = \frac{f_{ctm,1} - f_{ctm,0}}{f_{ctm,0}} * 100\% \quad (7)$$

$f_{ctm,0}$  – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu referencyjnego (MPa),

$f_{ctm,1}$  – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu modyfikowanego popiołem lotnym (MPa).



Rysunek 31. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 i 90 dniach przechowywania kompozytu [14, 132, 143, 160, 175]

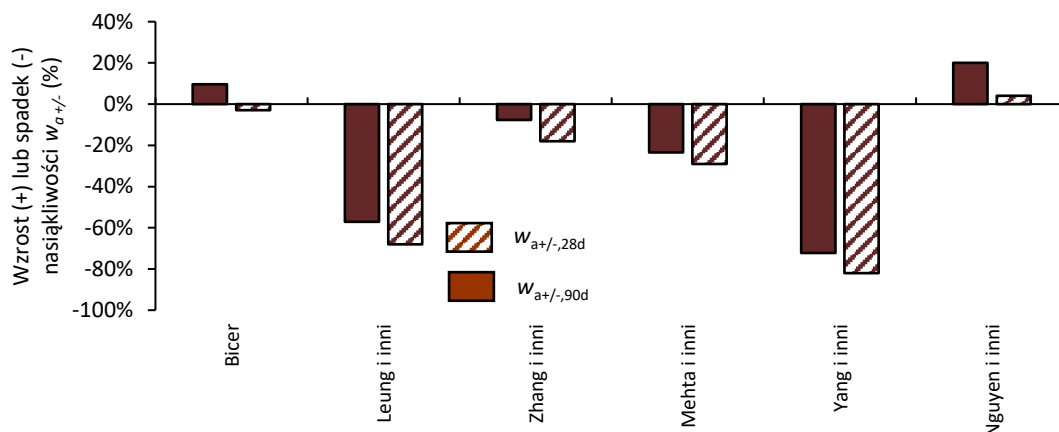
W przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu obserwuje się mniejszy efekt reaktywności popiołu w czasie. Może to być związane z raportowaną przez *Sahoo i inni* [140] zwiększoną kruchłością kompozytów cementowych modyfikowanych popiołem lotnym. *Sunayana i Barai* [160] zauważyli, że dzięki uzyskaniu zwiększonej gęstości upakowania składników mieszanki cementowej modyfikowanej popiołem lotnym, możliwe jest zwiększenie właściwości mechanicznych kompozytów. Niemniej jednak wyniki wpływu krzemionkowego popiołu lotnego na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytów należy uznać za mniej pozytywne w porównaniu z wytrzymałością na ściskanie. Możliwe, że znaczący wpływ w tym przypadku ma osłabienie struktury kompozytu opisywane przez *Xu i inni* [175], bowiem kryształy powstałe w wyniku aktywności popiołu lotnego charakteryzują się innymi właściwościami w porównaniu do krzemianu trójwapieniowego powstałego podczas hydratacji klinkieru portlandzkiego.

Rysunek 32 przedstawia porównanie wyników literaturowych związanych z nasiąkliwością kompozytów cementowych modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym. Analiza porównawcza opiera się na stosunku najbardziej optymistycznych wyników nasiąkliwości (największa redukcja/najmniejszy wzrost nasiąkliwości) -  $w_{a,1}$  do wyników uzyskanych dla serii referencyjnej (niemodyfikowanej) -  $w_{a,0}$ . Wzór 8 przedstawia opis zaproponowanej metody analizy.

$$w_{a+/-} = \frac{w_{a,1} - w_{a,0}}{w_{a,0}} * 100\% \quad (8)$$

$w_{a,0}$  – nasiąkliwość masowa kompozytu referencyjnego (%),

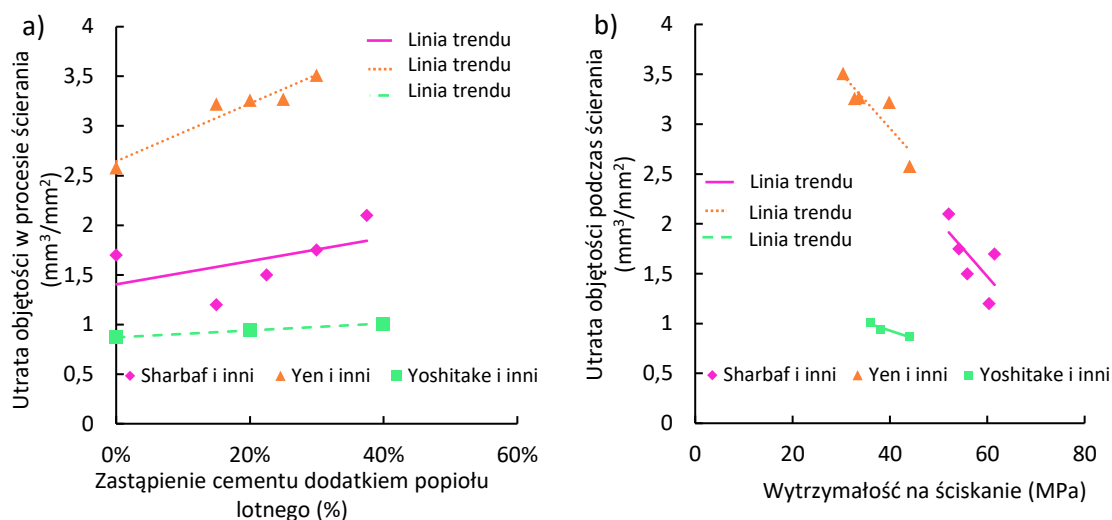
$w_{a,1}$  – nasiąkliwość masowa kompozytu modyfikowanego krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzującego się najbardziej pozytywnym wynikiem (najniższy wzrost/największa redukcja) (%).



Rysunek 32. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego na jego nasiąkliwość po 28 i 90 dniach przechowywania według literatury [10, 103, 111, 117, 178, 189]

Rysunek 32 przedstawia pozytywny wpływ popiołu lotnego na nasiąkliwość kompozytu cementowego. Po 28 dniach przechowywania dla większości (4 z 6) wyników uzyskano redukcję nasiąkliwości (w tym dla dwóch o ponad 50%). Natomiast po 90 dniach pielęgnacji można zauważyć podkreśloną reaktywność dodatku popiołu lotnego, który doprowadził do dalszego zmniejszenia się nasiąkliwości kompozytu. *Leung i inni* [103] wskazują, że zastąpienie większej niż 20% zawartości cementu w kompozycie dodatkiem popiołu lotnego prowadzi do znacznego zmniejszenia nasiąkliwości. Reaktywność popiołu lotnego prowadzi do dodatkowej krystalizacji związków glinu w reakcji z gipsem, co prowadzi do rozrostu struktury i jej uszczelnienia utrudniając przy tym migrację wody wewnątrz kompozytu. *Yang i inni* [178] zaobserwowali, że dzięki mieleniu na mokro popiołu lotnego można uzyskać produkt bardzo miałki, który będzie miał wyjątkowo dobre właściwości uszczelniające kompozyt cementowy.

Rysunek 33 przedstawia wyniki analizy literaturowej wpływu krzemionkowego popiołu lotnego na utratę objętości w procesie ścierania.



Rysunek 33. Wpływ modyfikacji kompozytu cementowego krzemionkowym popiołem lotnym:

- a) korelacja pomiędzy % zastąpieniem cementu popiołem oraz utraty objętości kompozytu w procesie ścierania po 28 dniach przechowywania b) korelacja pomiędzy utratą objętości kompozytu w procesie ścierania oraz jego wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach według literatury [146, 181, 182]

Popiół lotny nie powoduje znaczącego zmniejszenia utraty objętości kompozytu w procesie ścierania. Niemniej jednak pozytywnie należy ocenić fakt, że zastąpienie nawet 40% cementu dodatkiem popiołu spowoduje zaledwie 10% zwiększenie utraty objętości kompozytu przy ścieraniu. Analizując wyniki *Sharbaf i inni* [146] można nawet zauważyć, że zastąpienie 17,5% cementu dodatkiem popiołu powoduje uzyskanie optymalnego kompozytu cementowego, którego utrata objętości w procesie ścierania będzie mniejsza niż kompozytu referencyjnego. Korelacja pomiędzy wytrzymałością na ściskanie oraz utratą objętości kompozytu w procesie ścierania (podobnie jak dla wpływu mączki granitowej) spełnia znaną zależność, że wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie kompozytu maleje utrata jego objętości przy ścieraniu (Rysunek 33).

### 3.3. Jednoczesny dodatek mączek mineralnych oraz krzemionkowego popiołu lotnego

#### 3.3.1. Wprowadzenie

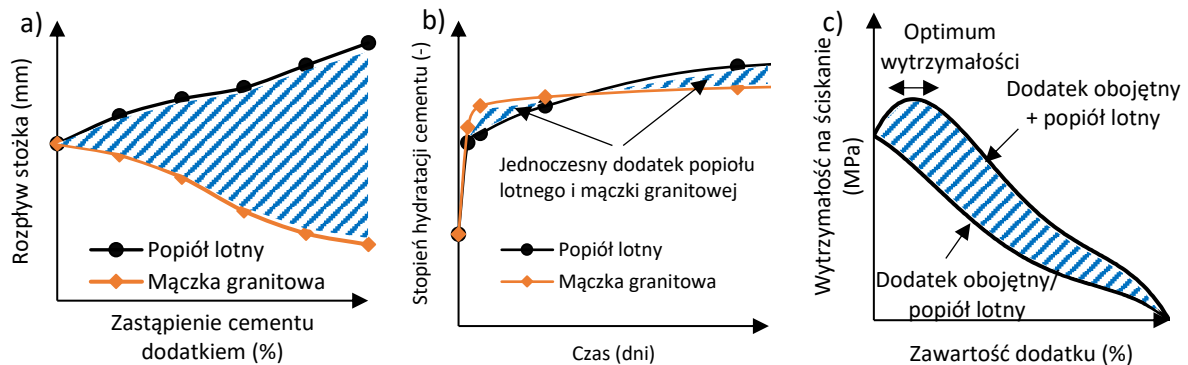
Przemysł cementowy ze znaczącymi wyzwaniami. Obecny w całej Europie kryzys energetyczny doprowadził do sytuacji, kiedy cementowanie zmagając się z kolejnymi podwyżkami cen energii decydują się na zmniejszanie produkcji cementu. Wprowadzane przez Unię Europejską opłaty za emisję  $\text{CO}_2$  mają znaczący wpływ na ceny cementu. Wysokie koszty pozyskania uprawnień do emisji wymagają od producentów zwiększenia pokładów na produkcję zmniejszając przy tym jej opłacalność. Trendy związane z prężnym rozwojem budownictwa doprowadziły do historycznie najwyższych poziomów produkcyjnych cementu. Wreszcie konflikt w Ukrainie, którego efekty odczuwalne są na



całym świecie sprawił, że zaczęło brakować surowca do produkcji cementu, ale także energii. Te wydarzenia wpłynęły także na inflację. W Polsce inflacja rok do roku w październiku 2022 roku wyniosła 17,9% wprowadzając dodatkowe problemy związane z kosztami produkcji, logistyki i dystrybucji cementu. Polski przemysł cementowy boryka się także z kłopotami politycznymi – wprowadzone przez Unię Europejską ograniczenia emisyjności w szczególnym stopniu dotyczą polskich producentów cementu. Warto bowiem zauważyć, że w Białorusi nie obowiązują opłaty za emisyjność, zatem przemysł cementowy tego kraju ma znacznie niższe koszty produkcji w porównaniu z polskimi producentami. Zasady wolnego rynku doprowadziły do sytuacji, kiedy polscy wytwórcy betonu wolą zamawiać cement na Białorusi (omijając przy tym dodatkowe koszty środowiskowe), zamiast w Polsce. Wszystkie te fakty wpływały na istotną zmianę postrzegania cementu przez wytwórców betonu. Obecnie panuje bowiem przekonanie, że koniecznym ze względów produkcyjnych, środowiskowych, ekonomicznych czy technologicznych jest poszukiwanie sposobów, które mogą pozwolić na wykorzystanie alternatywnych materiałów ograniczających zużycie cementu.

Popiół lotny jest jednym z materiałów chętnie wykorzystywanych do zastąpienia części cementu. Niemniej jednak, opisane w Rozdziale 3.5 problemy związane z wykorzystaniem popiołu lotnego pozwalają na refleksję przyszłości wykorzystania popiołu lotnego. Pozytywny efekt popiołu lotnego na właściwości mieszanki cementowej (bardziej płynna konsystencja, mniejsza zawartość powietrza), zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła w procesie hydratacji czy zmiana dynamiki przyrostu właściwości mechanicznych (wolniejszy przyrost „wczesnej wytrzymałości” oraz większy wzrost „późnej wytrzymałości”) pozwalają wnioskować, że przemysł betonowy jeszcze przez długi czas nie będzie gotowy na fakt, że dostęp do popiołów lotnych będzie ograniczony, a ich stosowanie będzie z czasem stawało się mniej popularne. W technologii cementu poza materiałami pucolanowymi (jakimi są np. popioły lotne czy żużle wielkopieczowe) chętnie wykorzystuje się materiały wypełniające (wypełniacze) takie jak różnego rodzaju mączki mineralne (wapienne, marmurowe, granitowe) [97]. Jak opisano w Rozdziale 3.4 mączka granitowa charakteryzuje się zauważalnym wpływem wypełniacza, nie tylko wspomagając hydratację cementu (wypełniając strukturę kompozytu), ale także poprawiając właściwości fizyczne mieszanki i kompozytu (gęstość objętościowa, gęstość upakowania), a wszystkie te elementy sumarycznie sprawiają, że mimo znacznego (nawet 30% zastąpienia cementu) możliwe jest uzyskanie zbliżonych właściwości mechanicznych co kompozyt referencyjny. Mając na uwadze opisane w tym akapicie fakty, należy stwierdzić, że idealnym wydaje się być jednoczesne zastosowanie dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej w kompozytach cementowych. Pozwoliłoby to bowiem na ograniczenie znacznej części wykorzystywanego cementu, wykorzystując do tego nowoczesne rozwiązania technologii cementu, które mogą pozwolić na problemów produkcyjnych, wykonawczych, logistycznych czy ekonomicznych. Wpływ jednoczesnego dodatku tych materiałów pozwoliłoby na uzyskanie bardziej zbliżonych do referencyjnych właściwości mieszanki cementowej, ale także właściwości mechanicznych kompozytów cementowych. Rysunek 34

przedstawia potencjał wykorzystania jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz dodatku wypełniacza mineralnego (np. mączki granitowej).



Rysunek 34. Potencjał jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mączki granitowej w mieszance i kompozytach cementowych (opracowanie własne na podstawie [97] oraz wynikach badań własnych):

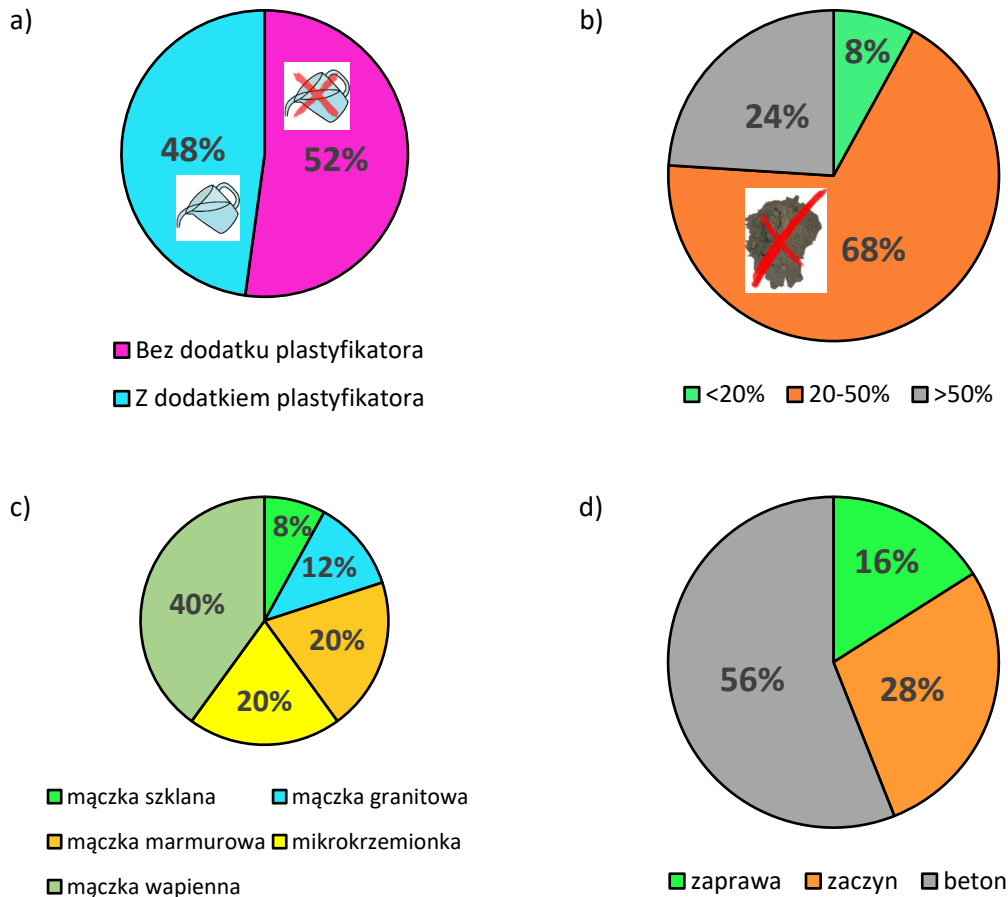
a) wpływ zastąpienia 30% cementu za pomocą dodatku popiołu lotnego lub mączki granitowej na stopień hydratacji cementu w kompozycie b) wpływ zastąpienia części cementu za pomocą dodatku popiołu lotnego oraz mączki granitowej na rozpliw mieszanki cementowej c) wpływ stosowania jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mączki granitowej na wytrzymałość na ściskanie kompozytu

Częściowe zastąpienie cementu w mieszance dodatkiem odpadowej mączki granitowej prowadzi do zmiany konsystencji mieszanki na bardziej gęstą (Rysunek 34a). Wpływ ten rośnie wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu tym materiałem. Z drugiej strony, częściowe zastąpienie cementu dodatkiem popiołu lotnego pozwala na uzyskanie bardziej płynnej mieszanki cementowej, a wpływ popiołu także rośnie wraz z procentowym zastąpieniem cementu w mieszance. Wysoko prawdopodobne jest zatem, że połączenie tych dwóch materiałów pozwoli na uzyskanie pośrednich wyników oznaczania konsystencji mieszanki (będą one znajdowały się na wykresie w polu oznaczonym niebieskim kreskowaniem). Z racji zmiany dynamiki procesu hydratacji cementu w mieszance cementowej popiół lotny powoduje wolniejszy wzrost stopnia hydratacji, jednak jego właściwości pozwalają na uzyskanie wyższej jego wartości niż kompozyt modyfikowany dodatkiem mączki granitowej (Rysunek 34b). Mączka granitowa dzięki miążkiemu uziarnieniu oraz korzystnemu kształtowi ziaren pozwala na przyspieszony rozwój faz krystalicznych w kompozycie. Podsumowaniem potencjału stosowania jednoczesnego wykorzystania dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej jest Rysunek 34c. Można bowiem zauważyć, że zastępując pewną ilość cementu w kompozycie cementowym osobno dodatkiem obojętnym (wypełniaczem) lub popiołem lotnym uzyska się niższą wartość wytrzymałości na ściskanie, niż w przypadku jednoczesnego dodatku tych dwóch materiałów. Takie wyniki badań uzyskali bowiem *Jain i inni* [83], którzy stosując jednocześnie popiół lotny oraz mączkę granitową uzyskali wzrost wytrzymałości kompozytu po 28 dniach o 15% w porównaniu z serią zawierającą tylko popiół lotny. Zatem metoda wykorzystania jednoczesnego

dotatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej ma ogromny potencjał i może pozwolić na rozwiązanie wielu problemów, z którymi zmagają się producenci betonu towarowego.

### 3.3.2. Stosowane dotychczas konfiguracje materiałowe oraz ich wpływ na właściwości mieszanki cementowej oraz kompozytu cementowego

Podobnie jak opisano w rozdziałach 3.4. oraz 3.5. przyjmowane założenia wstępne przy projektowaniu składu mieszanki cementowej będą odrywały znaczącą rolę. Należy jednak wspomnieć, że w przypadku z analizą jednoczesnego wpływu popiołu lotnego oraz innego dodatku mineralnego (wypełniacza) w literaturze można spotkać znacznie mniej publikacji związanych z tą tematyką. Dodatkowo z nikłej liczby publikacji naukowych podejmujących tematykę jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej, autor postanowił przeprowadzić wszystkie analizy opisane w rozdziale 3.6. dla jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i innego wypełniacza (możliwe różne mączki mineralne). Aby przybliżyć tematykę tego tematu przygotowano Rysunek 35, który przedstawia wyniki analizy statystycznej stosowania tej kompozycji materiałowej w mieszance i kompozytach cementowych.

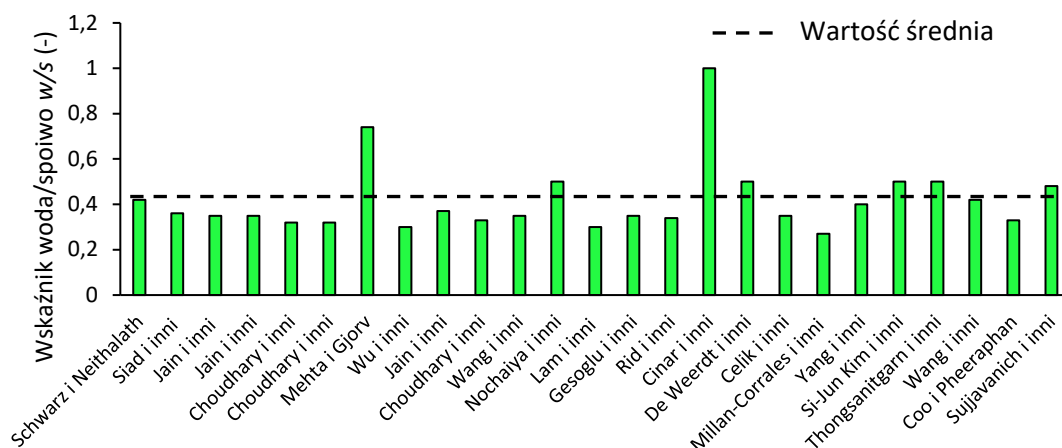


Rysunek 35. Analiza statystyczna związana ze stosowaniem jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku: a) wykorzystanie plastyfikatora w badaniach b) maksymalne stosowane procentowe zastąpienie cementu c) rodzaj dodatku stosowanego jednocześnie z popiołem lotnym d) rodzaj mieszanki w której stosowano jednoczesny dodatek popiołu lotnego oraz innego dodatku sypkiego [18, 27, 84, 95, 100, 112, 113, 119, 134, 144, 148, 158, 28, 165, 169, 170, 172, 180, 29, 33, 34, 40, 56, 82, 83]

Uzyskane wyniki analizy wykorzystania plastyfikatora jako dodatku do mieszanki cementowej (Rysunek 35a) są zaskakująco równo podzielone, bowiem niewielką przewagą (52%) wśród badaczy ma podejście bez wykorzystania plastyfikatora, podczas gdy 48% z nich wykorzystowało plastyfikator w kompozycji mieszanki. Możliwe jest stwierdzenie, że wyniki te są dość zaskakujące zważając na fakt, że w badaniach popiołu lotnego większość badaczy niechętnie korzystała z plastyfikatora, to należałoby się spodziewać podobnych wyników w tym przypadku. Taki trend można tłumaczyć zaobserwowaniem przez badaczy znaczącej wodożądności dodatków mineralnych stosowanych wraz z popiołem lotnym, co podkreślili *Nepomuceno i inni* [116]. Znaczący potencjał wykorzystania jednoczesnego dodatku popiołu i mączki mineralnej mogą podnosić wyniki analizy maksymalnego procentowego zastąpienia cementu tym jednoczesnym dodatkiem (Rysunek 35b). Zaobserwowano, że zdecydowana większość

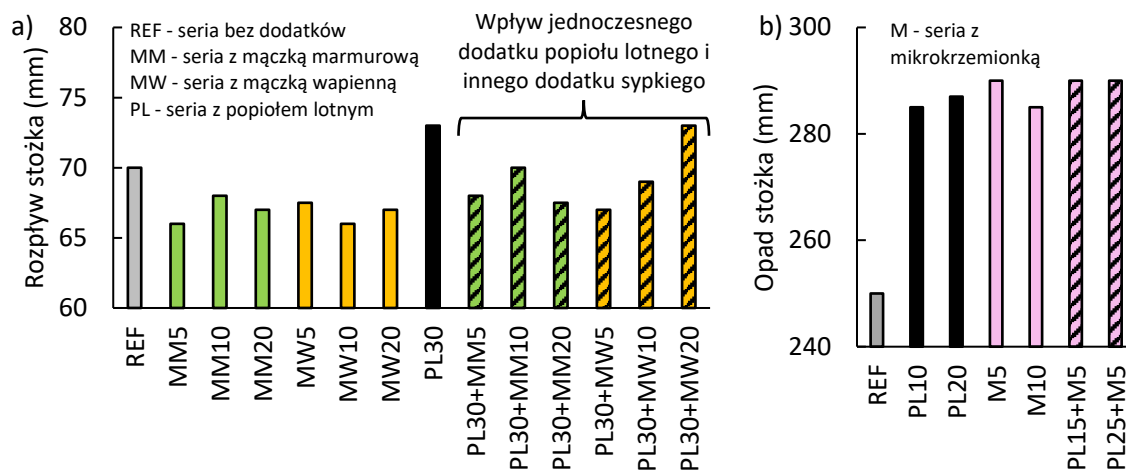
(92%) badacze sprawdzała w swoich pracach możliwość zastąpienia 20% i więcej cementu w mieszance, w tym aż 24% naukowców testowała zastąpienie większego niż 50% zastąpienia cementu. Te fakty prowadzą do konkluzji, że naukowcy widzą znaczącą możliwość zastąpienia większej części cementu w mieszance z wykorzystaniem jednoczesnego dodatku popiołu i wypełniacza. Rysunek 35c przedstawia wyniki analizy statystycznej związanej z rodzajem wypełniacza stosowanego w jednoczesnym dodatku z popiołem lotnym. Zdecydowana większość naukowców (40%) korzystała z połączenia mączki wapiennej oraz popiołu lotnego, co może być związane z tym, że mączka wapienna jest znanym dodatkiem obojętnym, który w technologii cementu wykorzystywany jest od lat, a w niektórych krajach (np. Włochy) wykorzystywana jest nawet jako jeden ze składników cementu [97]. Podobnie znanym rozwiązaniem jest stosowanie jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz mikrokrzemionki (20%). W tym miejscu, należy nadmienić, że mikrokrzemionka wykazująca właściwości pucolanowe kategoryzowana jest zwykle jako materiał pucolanowy, jednak część z naukowców dostrzegła jej znakomity potencjał wypełniający [32], dlatego też autor zdecydował się zaliczyć mikrokrzemionkę w tej analizie jako wypełniacz. Rzadko (tylko 12%) naukowcy wykorzystywali jednoczesny dodatek mączki granitowej i popiołu lotnego, co prowadzi do obserwacji, że wiele właściwości tej konfiguracji może nadal pozostawać niepewna lub niesprawdzona. Połączenie materiału pucolanowego (popiołu lotnego) oraz wypełniacza wykazuje szczególnie istotny charakter aplikacyjny co podkreśla fakt stosowania przez 56% naukowców betonu jako typu mieszanki w swoich badaniach (Rysunek 35d). Charakterystyka tych dwóch materiałów powoduje, że w przypadku mieszanek, które posiadają (poza cementem i wodą) zróżnicowane ziarna kruszywa, efekt reakcji pucolanowej popiołu oraz wypełniacza są dużo bardziej zauważalne. Niemniej jednak należy podkreślić, że aby możliwe było aplikacyjne zastosowanie materiału należy przeprowadzić kompleksowe badania podstawowe, wykonywane dla zaczynu lub zaprawy cementowej. Rzadkie wykorzystanie zaczynu cementowego jako typu mieszanki do badań jednoczesnego dodatku popiołu i wypełniacza należy ocenić jako istotną lukę badawczą, której wypełnienie jest krytycznie ważne dla dalszego stosowania tej kompozycji materiałowej w budownictwie.

Rysunek 36 przedstawia analizę wykorzystywanego przez badaczy wskaźnika woda/spoiwo w mieszankach cementowych modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i wypełniacza.



Rysunek 36. Wskaźnik woda/spoiwo stosowany w literaturze w badaniach nad jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego oraz innego dodatku sypkiego [18, 27, 84, 95, 100, 112, 113, 119, 134, 144, 148, 158, 28, 165, 169, 170, 172, 180, 29, 33, 34, 40, 56, 82, 83]

Wskaźnik woda/spoiwo jest wygodnym parametrem do analizy składu materiałowego mieszanek cementowych. Możliwe jest ustalenie podstawowego wpływu modyfikatora na właściwości mieszanki, ponieważ zwykle stosunek woda/spoiwo jest ustalany na podstawie wcześniejszych prób, które mają na celu wyznaczenie minimalnej objętości wody wykorzystanej do mieszanki, zapewniając przy tym pożądaną jej konsystencję. Interesujące jest, że większość badaczy (16 z 25) postanowiło do badań wpływu jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i innego dodatku mineralnego wykorzystać  $w/s \leq 0,4$  (-). Co więcej średnia z całej analizy (0,39) podkreśla dodatkowo skłonność naukowców do korzystania z niskiego  $w/s$  w przypadku kompozycji modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem popiołu i wypełniacza. Odbiegające od pozostałych wyniki przedstawione przez *Mehta i Gjorv* [112] oraz *Cinar i inni* [33] dotyczą specjalistycznych mieszanek cementowych o niszowym wykorzystaniu, w których projektowana konsystencja wymagała wykorzystania dużej objętości wody w mieszance. Rysunek 37 przedstawia wyniki analizy wpływu jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i wypełniacza na rozplływ stożka (a) oraz opad stożka (b).

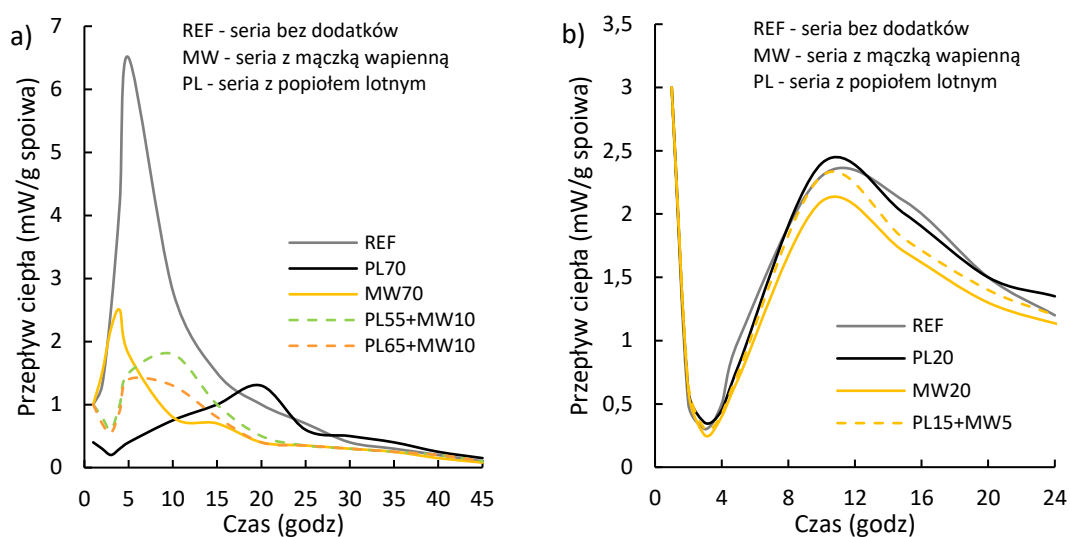


Rysunek 37. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku sypkiego na:  
a) rozpływ stożka [56] b) opad stożka mieszanki cementowej [172]

*Gesoglu i inni* [56] przedstawili wyniki badań, które podkreślają opisany wcześniej trend związany z jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i wypełniacza. Mieszanki modyfikowane dodatkiem mączki marmurowej (MM) lub mączki wapiennej (MW) wykazały bowiem mniejszy rozpływ stożka w porównaniu z serią referencyjną (nie modyfikowaną), co może być związane z większą powierzchnią właściwą ziaren obu mączek w porównaniu z cementem. Mieszanka modyfikowana popiołem lotnym wykazała się większym rozpływem stożka, co oznaczało, że jej konsystencja jest bardziej płynna. Można zatem wnioskować, że wszystkie trzy modyfikatory wykorzystane w opisanych badaniach doprowadziły do efektu znanego z literatury. Niemniej jednak interesujące wyniki opisują serie materiałowe w których wykorzystano jednoczesny dodatek popiołu lotnego oraz mączek (MM oraz MW), gdyż zauważono, że takie połączenie pozwala zredukować nawet o 50% zawartość cementu w mieszance, nie zmieniając przy tym istotnie jej konsystencji (seria PL30+MM10 wykazała się nawet rozpływem stożka takim samym jak seria referencyjna, a spoiwo w niej wykorzystane charakteryzowało się 40% zastąpieniem cementu jednoczesnym dodatkiem popiołu i mączki marmurowej). *Wu i inni* [172] w swoich badaniach wykorzystali jednoczesny dodatek popiołu lotnego oraz mikrokrzemionki. Naukowcy zaobserwowali, że jednoczesne wykorzystanie tych dwóch materiałów prowadzi do znaczącego zwiększenia się opadu stożka w porównaniu z serią referencyjną. Nie zaobserwowali oni także istotnych różnic pomiędzy seriami modyfikowanymi pojedynczo tymi materiałami, a jednocześnie co może być związane z tym, że ziarna mikrokrzemionki mają znacznie mniejsze wymiary niż mączki badane przez *Gesoglu i inni* [56], przez co potrzebna jest mniejsza objętość wody do otoczenia ich warstwą wody, a co z tym związane więcej wody pozostaje w mieszance.

Energia cieplna emitowana przez mieszankę cementową w procesie hydratacji związana jest faktem, że reakcja ta jest procesem egzotermicznym. Ma to wpływ na kompozyt cementowy, szczególnie w momencie, kiedy ten zaczyna twardnieć gdyż niekontrolowany wzrost wydzielania ciepła może

doprowadzić do większego skurczu i spękań kompozytu. Rysunek 38 przedstawia raportowane przez badaczy wyniki wpływu modyfikacji mieszanki cementowej dodatkiem popiołu lotnego oraz innych wypełniaczy na ilość wydzielanej energii cieplnej w procesie hydratacji cementu.



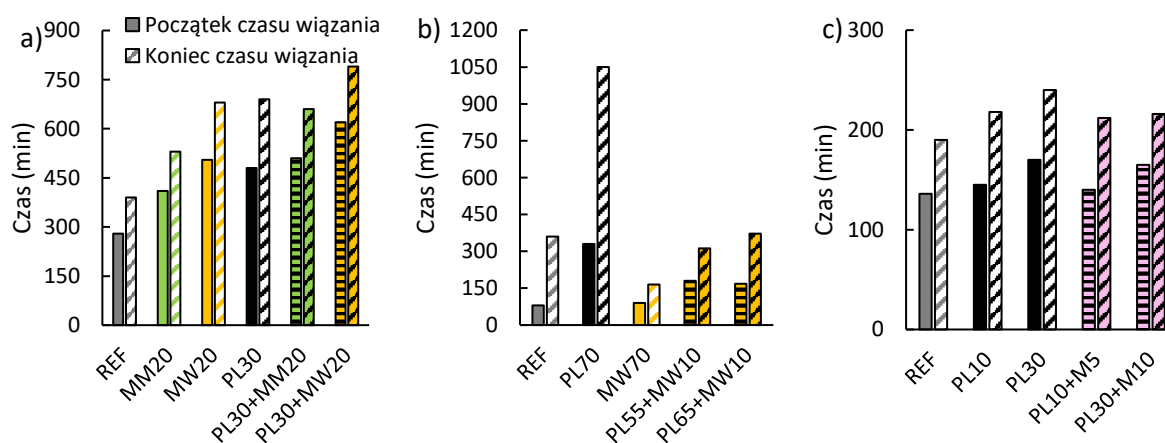
Rysunek 38. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz mączki wapiennej na pomierzony przepływ ciepła w procesie hydratacji cementu w mieszance cementowej - opracowanie własne na podstawie: a) Millan-Corrales i inni [113] b) Si-Jun Kim i inni [95]

*Millan-Corrales i inni* [113] przeprowadzili badania mające na celu sprawdzenie wpływu popiołu lotnego oraz mączki wapiennej na przepływ ciepła zmierzony w kalorymetrze. Modyfikacja mieszanki dodatkiem popiołu lotnego doprowadziła do znaczącej zmiany w termodynamice wydzielania ciepła z mieszanki (zastąpienie 70% cementu popiołem lotnym), przesuując znacząco czas maksymalnego zaobserwowanego przepływu ciepła na ok. 20 godzin po zmieszaniu składników. Zastąpienie 70% cementu dodatkiem mączki wapiennej nie spowodowało zmiany przebiegu wykresu opisującego przepływ ciepła, ale znacząco zmniejszyło jego wartość (pik na wykresie w ok. 5 godzinie po zmieszaniu zmniejszył się z 7,5 na 2,5 mW/g spoiwa). Mieszanki modyfikowana jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego oraz mączki wapiennej (PL55+MW10 oraz PL65+MW10) zmieniły przebieg wykresu przepływu ciepła w taki sposób, że później zaobserwowano pik na wykresie (zamiast po ok. 5 godzinach, maksymalna wartość zaobserwowana została po ok. 10 godzinach). Same wykresy tych dwóch serii wpasowały się w pole ograniczone wykresami mieszanek modyfikowanych popiołem lotnym (PL70) oraz mączką wapienną (MW70). *Si-Jun Kim i inni* [95] sprawdzili wpływ zastąpienia części cementu takimi samymi dodatkami jak wcześniej *Millan-Corrales i inni* [113] jednak zaobserwowane przez nich wyniki badań znacząco różnią się od opisanych wcześniej. Nie zauważyli oni bowiem zmiany przebiegu całego przepływu ciepła z mieszanki modyfikowanej popiołem lotnym, a co więcej otrzymali oni nawet dla serii PL20 większy przepływ ciepła niż dla serii referencyjnej co jest zastanawiające. Naukowcy [95] zaobserwowali jednak, że modyfikacja mączką wapienną prowadzi



do zmniejszenia przepływu ciepła (co prawda mniej znaczącego niż może się to wydawać na podstawie literatury), a wyniki przepływu ciepła dla serii modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki wapiennej zostały zlokalizowane na przedstawionym wykresie pomiędzy liniami wyznaczonymi przez dwa te materiały stosowane osobno.

Początek i koniec czasu wiązania jest szczególnie ważną właściwością dla mieszanek cementowych, których technologia wymaga określonego czasu obróbki. Na przykład dla betonu wykorzystywanego do układania warstwy wierzchniej stawia się wymagania związane z odpowiednio długim czasem początku wiązania oraz ograniczonym czasie końca wiązania tak, aby możliwe było wykonania zatarcia powierzchni płyty betonowej oraz jej pielęgnacja. Rysunek 39 przedstawia wyniki literaturowe oznaczania czasu początku i końca wiązania mieszanek cementowych modyfikowanych popiołem lotnym, wypełniaczami oraz ich jednoczesnym wykorzystaniem.

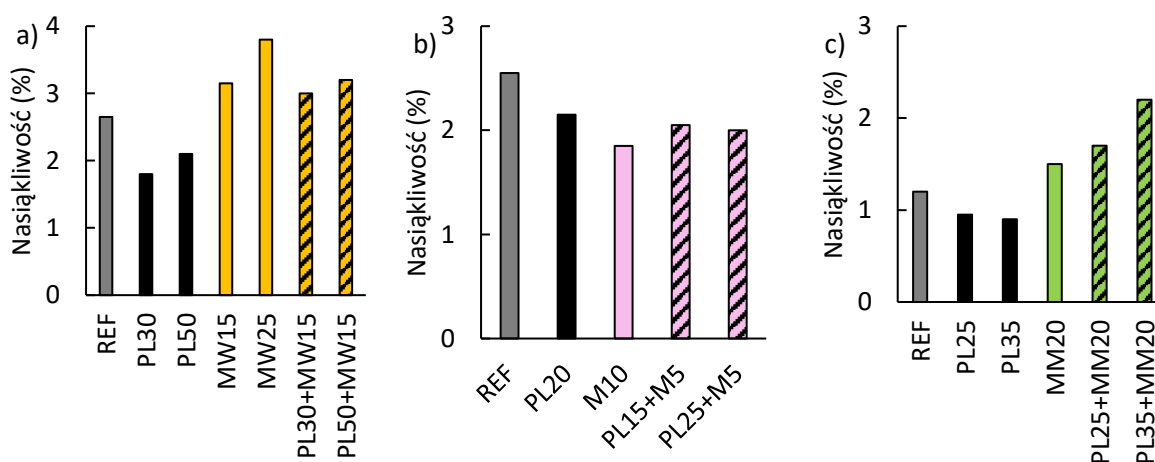


Rysunek 39. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku sypanego na początek i koniec czasu wiązania mieszanki cementowej - opracowanie własne na podstawie:  
 a) Gesoglu i inni [56] b) Millan-Corrales i inni [113] c) Nochaiya i inni [119] (oznaczenia kolorystyczne oraz nazwy serii zgodne z opisem jak Rysunek 37)

*Gesoglu i inni* [56] zaobserwowali, że zastąpienie części cementu dodatkiem wypełniaczy (MM oraz MW) prowadzi do wydłużenia początku i końca czasu wiązania mieszanki. Podobnie modyfikacja mieszanki popiołem lotnym (PL30) doprowadziła do wydłużenia początku i końca czasu wiązania. Pomimo, że wyniki przedstawione dla serii z jednoczesnym wykorzystaniem wypełniacza i popiołu lotnego (PL30+MM20 oraz PL30+MW20) są nie intuicyjne na pierwszy rzut oka, to należy je uznać za bardzo obiecujące, ponieważ w produkcji tych serii zastąpiono aż 50% zawartości cementu tymi dodatkami, co po porównaniu z wynikami dla zastąpienia 20 oraz 30% cementu w mieszance (MM20, MW20 oraz PL30) prowadzi do obserwacji, że jednoczesny dodatek tych dwóch materiałów ma lepszy efekt niż ich dodatek pojedynczo. *Millan-Corrales i inni* [113] raportują o odmiennych wynikach. Bowiem podobnie jak wcześniej, modyfikacja mieszanki dodatkiem 70% popiołu lotnego doprowadziła

do znaczącego wydłużenia początku (z 80 minut na 330) oraz końca (z 360 minut na 1050) czasu wiązania, jednak zastąpienie 70% cementu dodatkiem mączki wapiennej spowodowało uzyskanie minimalnie dłuższego czasu początku wiązania (90 minut) oraz znacznie krótszego czasu końca wiązania (165 minut). Jednoczesny dodatek tych dwóch materiałów natomiast pozwolił na uzyskanie mieszanki, której początek czasu wiązania jest dłuższy niż serii referencyjnej (180 minut), ale czas końca wiązania jest krótszy (312 minut). *Nochaiya i inni* [119] opisali wyniki wpływu modyfikacji mieszanki dodatkiem popiołu lotnego oraz jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mikrokrzemionki. Zauważyli oni, że zastąpienie części cementu dodatkiem popiołu lotnego prowadzi do wydłużenia początku i końca czasu wiązania mieszanki, podczas gdy modyfikacja jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego oraz mikrokrzemionki (PL10+M5 oraz PL30+M10) powoduje do uzyskanie czasów wiązania nieznacznie dłuższych niż seria referencyjna, jednak krótszych niż seria modyfikowana tylko popiołem.

Nasiąkliwość kompozytu cementowego jest jego cechą, która determinuje trwałość konstrukcji wykonanej z kompozytu. Rysunek 40 przedstawia wyniki analizy wpływu jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz wypełniacza na nasiąkliwość kompozytu cementowego.



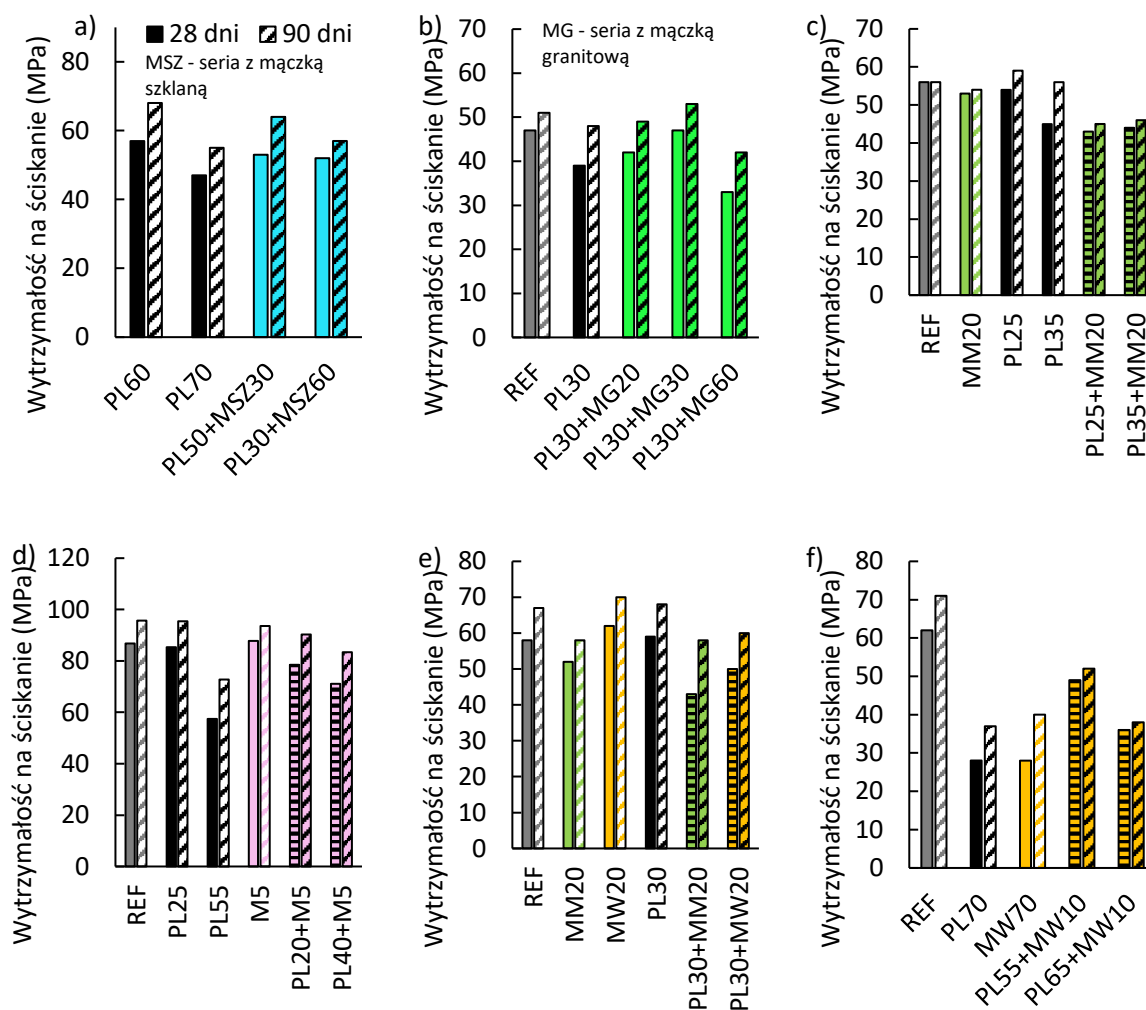
Rysunek 40. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz innego dodatku sypkiego na nasiąkliwość masową kompozytu cementowego – opracowanie własne na podstawie:

a) Schwarz i Neithalath [144] b) Wu i inni [172] c) Choudhary i inni [28] (oznaczenia kolorystyczne oraz nazwy serii zgodne z opisem jak Rysunek 37)

*Schwarz i Neithalath* [144] określili nasiąkliwość kompozytów cementowych modyfikowanych dodatkiem popiołu lotnego, mączki wapiennej oraz jednocześnie dwoma tymi materiałami. Popiół lotny doprowadził do zmniejszenia nasiąkliwości kompozytu, podczas gdy mączka wapienna spowodowała jej zwiększenie. Jednoczesny dodatek popiołu lotnego i mączki wapiennej także doprowadził do uzyskania większej nasiąkliwości niż kompozyt referencyjny, ale uzyskane wyniki znajdują się pomiędzy skrajnymi wynikami uzyskanymi dla kompozytów modyfikowanych oddzielenie badanymi materiałami. *Wu i inni* [172] zauważyli, że zastąpienie części cementu dodatkiem popiołu lotnego,

mikrokrzemionki lub jednoczesnym dodatkiem tych dwóch materiałów prowadzi do zmniejszenia się nasiąkliwości kompozytu. Choudhary i inni [28] uzyskali analogiczne wyniki dla popiołu lotnego jak wcześniej opisani badacze, jednak zauważyli oni także, że dodatek mączki marmurowej prowadzi do zwiększenia nasiąkliwości kompozytu, natomiast jednoczesny dodatek obu tych materiałów nie prowadzi do uzyskania wyników pośrednich, a do większej nasiąkliwości kompozytu cementowego.

Wytrzymałość na ściskanie jest właściwością mechaniczną warunkującą możliwość wykorzystania kompozytu cementowego w konstrukcji. Rysunek 41 przedstawia wyniki analizy wpływu popiołu lotnego, różnych wypełniaczy oraz jednoczesnego dodatku tych materiałów na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych.

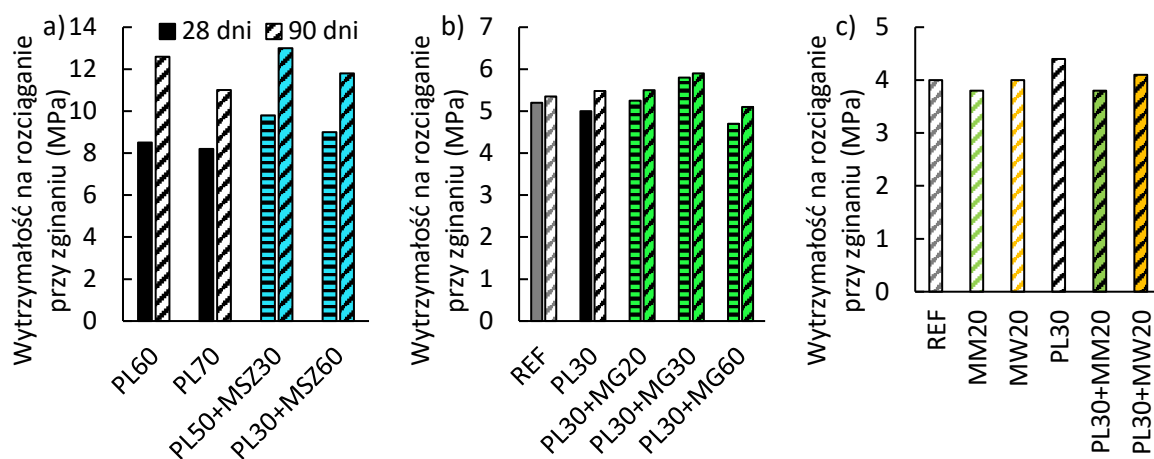


Rysunek 41. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i innego dodatku sypkiego na wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych – opracowanie własne na podstawie:

- a) Siad i inni [148] b) Jain i inni [84] c) Choudhary i inni [28] d) Lam i inni [99]  
 e) Gesoglu i inni [56] f) Millan – Corrales i inni [113] (oznaczenia kolorystyczne oraz nazwy serii zgodne z opisem jak Rysunek 37)

*Siad i inni* [148] badali wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mączki szklanej na właściwości kompozytu cementowego. Zauważyli oni, że jednoczesny dodatek tych dwóch materiałów pozwala na znacząco wyższe procentowe zastąpienie cementu (nawet 90%) niż wykorzystanie w tym celu tylko popiołu lotnego, bez znaczącej utraty właściwości mechanicznych. *Jain i inni* [84] przetestowali wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mączki granitowej na wytrzymałość na ściskanie kompozytu. Warte podkreślenia jest, że część serii (PL30+MG20 oraz PL30+MG30), które zastępowały odpowiednio aż 50 oraz 60% cementu w kompozycie uzyskały wyższą wartość wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach niż seria referencyjna, której spoiwem był tylko cement. Wyniki te należy uznać za szczególnie obiecujące. *Choudhary i inni* [28] opisali wyniki wpływu jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i mączki marmurowej. Zauważyli oni, że stosując jednoczesny dodatek obu tych materiałów co prawda nie możliwym jest uniknięcie spadku wytrzymałości na ściskanie, jednak jest ona nieznaczna (z 55 na 45 MPa). *Lam i inni* [99] badali jednoczesny wpływ dodatku popiołu lotnego i mikrokrzemionki. Zauważyli, że stosowanie tej modyfikacji może doprowadzić do nieznacznej redukcji wytrzymałości na ściskanie (z 83 na 78 MPa po 28 dniach oraz z 96 na 90 MPa po 90 dniach) co należy uznać za pozytywny wynik, gdyż dzięki zastosowaniu takiej kompozycji materiałowej możliwe było zastąpienie 25 lub 45% cementu w kompozycie. *Gesoglu i inni* [56] zauważyli, że zastosowanie jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz wypełniacza może pozwolić na uzyskanie nieznacznie niższych wytrzymałości na ściskanie, redukując przy tym znaczącą (nawet 50%) zawartość cementu w kompozycie. *Millan – Corrales i inni* [113] uzyskali wyniki wytrzymałości na ściskanie, które idealnie odzwierciedlają uzasadnienie stosowania jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i wypełniacza mineralnego. Jednoczesny dodatek popiołu i mączki wapiennej pozwolił na uzyskanie wyższej wytrzymałości na ściskanie niż każdy z tych materiałów osobno, zastępując przy tym 65% cementu w kompozycie.

Rysunek 42 przedstawia analizę wpływu jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i wypełniacza na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytu cementowego.

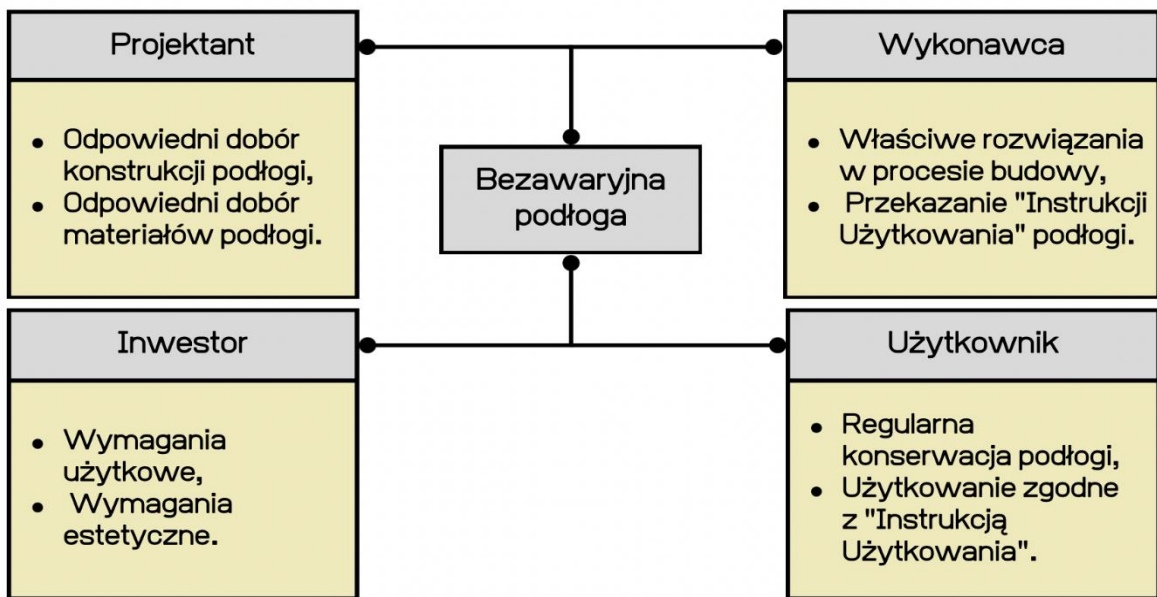


Rysunek 42. Wpływ jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i innego dodatku sypkiego na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu kompozytów cementowych – opracowanie własne na podstawie: a) Siad i inni [148] b) Jain i inni [84] c) Gesoglu i inni [56] (oznaczenia kolorystyczne oraz nazwy serii zgodne z opisem jak Rysunek 37)

*Siad i inni* [148] zaobserwowali, że jednoczesny dodatek mączki szklanej oraz popiołu lotnego pozwala na uzyskanie wyższych wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w porównaniu z kompozytem modyfikowanym jedynie dodatkiem popiołu lotnego. *Jain i inni* [84] uzyskali interesujące wyniki dla kompozytów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej. Podobnie, jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem tych dwóch materiałów charakteryzowały się większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu niż seria referencyjna oraz seria modyfikowana popiołem lotnym (dotyczy serii PL30+MG20 oraz PL30+MG30). *Gesoglu i inni* [56] otrzymali wyniki, które wpisują się w trend wykorzystania jednoczesnego dodatku popiołu lotnego i wypełniacza. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki marmurowej lub wapiennej charakteryzowały się bowiem wartością wytrzymałości znajdującą się na wykresie pomiędzy wartością uzyskaną dla kompozytu modyfikowanego tylko popiołem lotnym, a kompozytem modyfikowanym osobno mączką marmurową lub wapienną.

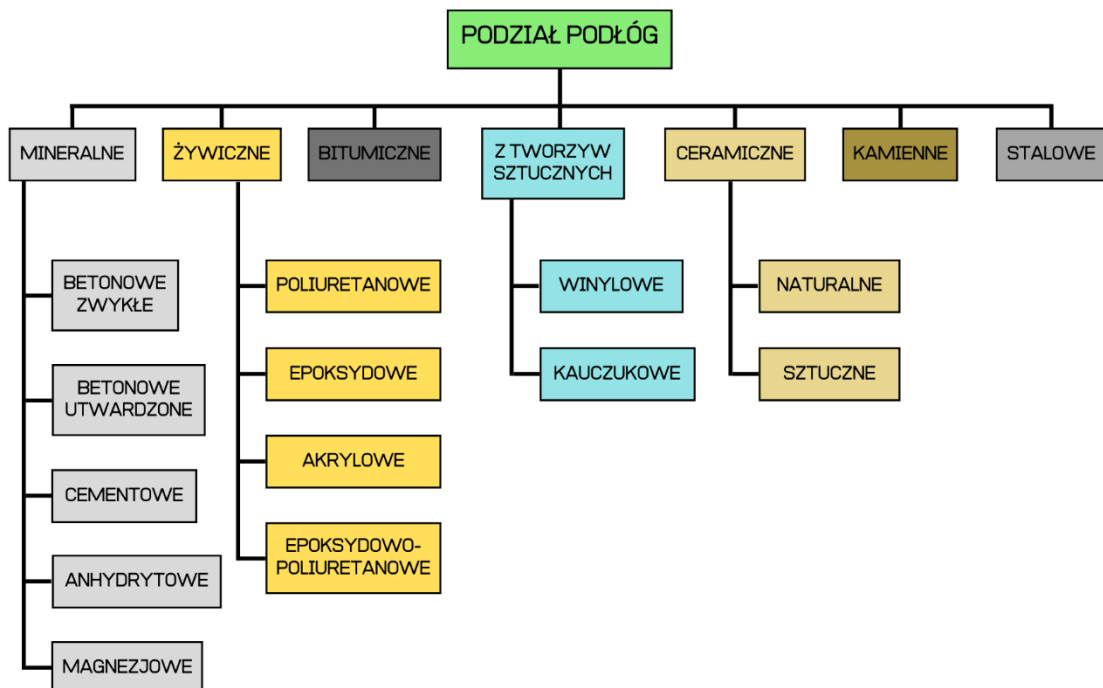
### 3.4. Podstawowe informacje o cementowych warstwach wierzchnich w podłogach

Bezawaryjna podłoga pozwala przez lata wykorzystywać obiekt budowlany zgodnie z jego przeznaczeniem. Jednak wykonanie podłogi w sposób bezawaryjny wymaga od wszystkich uczestników procesu inwestycyjnego pełnego zaangażowania w jej zaprojektowanie, wykonanie, użytkowanie i serwisowanie. Rysunek 43 przedstawia schemat omawiający podstawowe zadania projektanta, wykonawcy, inwestora i użytkownika podłogi w celu zapewnienia jej trwałości.



Rysunek 43. Kryteria bezawaryjnego wykonania i użytkowania podłogi (opracowanie własne na podstawie [71])

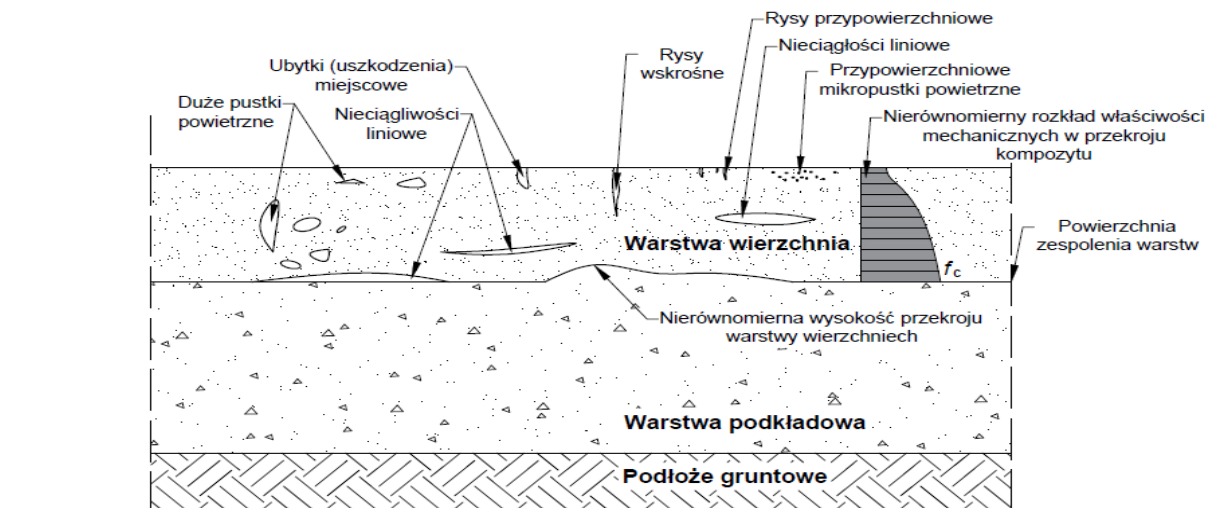
W zależności od materiału z którego wykonana jest podłoga wyróżnia się siedem rodzajów podłóg (Rysunek 44). Najczęściej wykorzystywane w budynkach są podłogi mineralne oraz żywiczne, jednak pozostałe ich rodzaje są równie chętnie wykorzystywane w nowoczesnym budownictwie.



Rysunek 44. Podział podłóg z uwagi na materiał z jakiego jest wykonana warstwa wierzchnia lub jakie ta warstwa posiada wykończenie (opracowanie własne)

Podłoga składa się zwykle z kilku różnych warstw, które zwykle dzielą się na: podłoże gruntowe, podbudowy, warstwy poślizgowej, płyty betonowej (ewentualnie żelbetowej lub fibrobetonowej) oraz warstwy wierzchniej (posadzki). Podłoże gruntowe jest to zwykle grunt rodzimy lub nasypowy, który znajduje się pod warstwą nośną nawierzchni (gruntu). Jego zadaniem jest zapewnienie równomiernych osiadań oraz niezbędnej nośności. Podbudowa może być wykonana z gruntu nośnego (odpowiednio zagęszczonego) lub z betonu podkładowego, a jej miąższość wynosi zwykle 15-40 cm. Podbudowa ma zapewnić bezpieczne przeniesienie obciążeń z płyty betonowej na podłoże gruntowe. Płyta betonowa podłogi ma za zadanie przenieść obciążenia oddziałujące na podłogę na podłoże gruntowe [49]. Wytrzymałość, zbrojenie oraz grubość płyty betonowej uzależnione jest od obciążeń statycznych, dynamicznych, chemicznych, mechanicznych oraz temperaturowych, ale także od warunków gruntowych występujących na analizowanej powierzchni płyty. Warstwa wierzchnia podłogi (posadzka) ma za zadanie zwiększenie trwałości i ujednolicenie właściwości podłogi, jednak w niektórych warunkach nie ma konieczności jej wykonywania, a płyta betonowa spełnia wszystkie stawiane jej warunki.

Cementowa warstwa wierzchnia jest chętnie wykorzystywana dzięki dobremu dostępowi do materiału oraz stosunkowo prostej technologii wykonania. Wykorzystuje się ją szeroko w budownictwie ogólnym, mają one zwykle na celu zapewnienie wymaganego poziomu dokładności technologicznej (często trudnej do osiągnięcia w przypadku płyt konstrukcyjnych). Warstwa wierzchnia pozwala też chronić płytę nośną przed wpływem czynników zmniejszających trwałość betonu (np. wpływ temperatury, agresja chemiczna, czynniki mechaniczne), niemniej jednak należy zauważyć, że nieprawidłowo wykonana cementowa warstwa wierzchnia może być istotnym problemem w użytkowaniu podłogi [53]. Najważniejszą właściwością cementowej warstwy wierzchniej jest jej przyczepność po podkładu, a jej zapewnienie pozwala uzyskać trwałą podłogę. Wadliwie dobrane składniki mieszanki wykorzystanej do wykonania cementowej warstwy wierzchniej znacząco utrudniają jej wykonawstwo, prowadząc do zwiększonej porowatości, mniejszej gęstości, zmniejszonej wytrzymałości na odrywanie oraz ściskanie, a także zmniejsza jednorodność cementowej warstwy wierzchniej. Rysunek 45 przedstawia najczęściej występujące wady i uszkodzenia cementowej warstwy wierzchniej.



Rysunek 45. Wady i uszkodzenia mogące występować w cementowych warstwach wierzchnich podłóg (opracowanie własne na podstawie [71, 155])

Metodologia analizy wad i uszkodzeń występujących w cementowych warstwach wierzchnich podłóg została opisana przez *Stawiski i Kania* [155]. Zauważyli oni dzięki przeprowadzeniu badań kompozytów cementowych wykorzystanych na warstwę wierzchnią podłóg, że część kompozytu cementowego, która znajduje się bliżej górnej powierzchni próbki zwykle charakteryzuje się niższymi właściwościami mechanicznymi niż część znajdująca się dalej od górnej powierzchni próbki. Wynik badania podkreśla wpływ zaobserwowanych zjawisk występujących w elementach budowlanych układanych poziomo takich jak migracja wody w przekroju mieszanki, segregacja składników czy występujące nieciągłości i defekty miejscowe. Dbanie o zapewnienie odpowiednich właściwości kompozytów cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg pozwoli nie tylko uniknąć uszkodzenia podłogi, ale także polepszenia się jej właściwości. Przykładowe wady i uszkodzenia występujące w kompozytach cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg przedstawia Rysunek 46.



Rysunek 46. Przykładowe wady i uszkodzenia występujące w kompozytach cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg (zdjęcia własne autora)



### 3.5. Omówienie podstawowych właściwości cementowej warstwy wierzchniej w podłogach

Właściwości cementowej warstwy wierzchniej w podłogach są zależne od właściwości mieszanki i kompozytu cementowego wykorzystanych do jej wykonania. Rysunek 47 przedstawia najbardziej istotne właściwości mieszanki cementowej oraz kompozytu cementowego.

Właściwości mieszanki cementowej i stwardniałego kompozytu cementowego do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach	
Właściwości mieszanki cementowej	Właściwości stwardniałego kompozytu cementowego
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Współczynnik woda/spoiwo,</li> <li>• Konsystencja,</li> <li>• Zawartość cementu,</li> <li>• Gęstość objętościowa,</li> <li>• Gęstość upakowania,</li> <li>• Początek i koniec czasu wiązania,</li> <li>• Zawartość powietrza,</li> <li>• Odsączanie wody z mieszanki cementowej.</li> </ul>	<p><b>Właściwości fizyczne:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gęstość objętościowa,</li> <li>• Porowatość objętościowa,</li> <li>• Nasiąkliwość,</li> <li>• Jednorodność kompozytu cementowego w funkcji grubości warstwy wierzchniej,</li> </ul> <p><b>Właściwości mechaniczne:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wytrzymałość na ściskanie,</li> <li>• Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu,</li> </ul> <p><b>Właściwości adhezyjne:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Przyczepność przy odrywaniu warstwy wierzchniej od podkładu</li> </ul> <p><b>Właściwości funkcjonalne:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Odporność na ścieranie,</li> <li>• Przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie.</li> </ul>

Rysunek 47. Podstawowe właściwości mieszanek oraz kompozytów cementowych wykorzystywanych do wykonywania warstwy wierzchniej podłóg

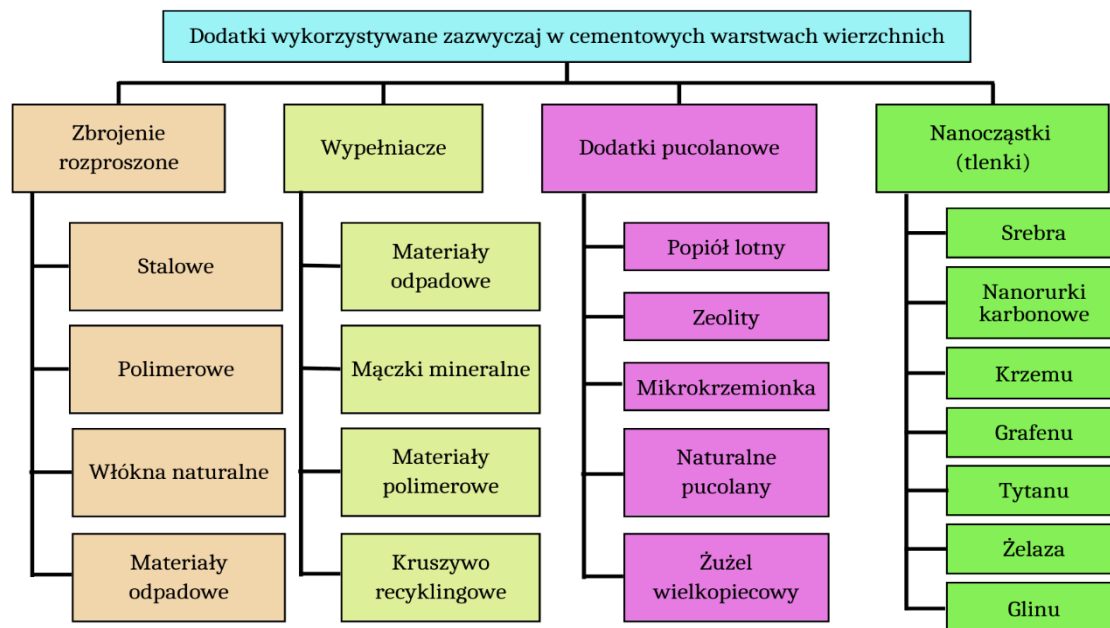
Odpowiedni dobór składników mieszanki cementowej wykorzystywanej na cementową warstwę wierzchnią jest kluczowym etapem projektowania jej właściwości. Zapewnienie pożądanej konsystencji mieszanki cementowej pozwala uzyskać niezbędną urabialność mieszanki [8]. Dzięki temu możliwe jest ułożenie i pielęgnacja mieszanki w wymaganym czasie. Odpowiednio płynna mieszanka cementowa pozwala także zminimalizować nakład pracy potrzebny do wykonania warstwy wierzchniej. Czas wiązania mieszanki cementowej pozwala określić czas w którym konieczne jest zakończenie wszystkich procesów technologicznych związanych z wykonaniem warstwy wierzchniej. Odpowiednio zaprojektowany czas wiązania mieszanki pozwala także zapobiegać jej uszkodzeniu w wyniku skurczu, ponieważ skorelowany z nim jest moment zakończenia fazy wykończenia posadzki i wykonania jej nacięć dylatacyjnych pozwalających na swobodę odkształcenia [137]. Odsączanie wody z mieszanki cementowej po jej ułożeniu (bleeding) jest jej naturalną właściwością związaną z procesem sedymentacji. Niekontrolowane odsączanie wody może jednak prowadzić do uszkodzenia cementowej warstwy wierzchniej, ponieważ zbyt duża objętość wody wytrąconej na górną powierzchnię warstwy

prowadzi do lokalnego zwiększenia stosunku w/c zmniejszając jej właściwości mechaniczne, ale także istotnie redukując jednolitość właściwości warstwy zależnie od jej wysokości.

Wytrzymałość na ściskanie jest kluczową właściwością kompozytów cementowych determinującą możliwość ich wykorzystania w elementach obiektów budowlanych. Niemniej jednak, w przypadku cementowej warstwy wierzchniej osiągnięcie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie za pozwolić na bezawaryjne przeniesienie obciążeń przez warstwę wierzchnią na płytę betonową. Przyczepność cementowej warstwy wierzchniej do podkładu betonowego determinuje jej trwałość i bezawaryjne użytkowanie. Ścieralność cementowej warstwy wierzchniej determinuje jej czas użytkowalności. Zapewnienie odpowiedniej odporności na ścieranie pozwala na korzystanie z warstwy wierzchniej oraz zapobiega jej uszkodzeniom. Zmiany temperatury prowadzą do rozszerzania lub kurczenia się kompozytu cementowego. Odpowiednio dobrany skład materiałowy może zredukować wrażliwość warstwy wierzchniej na zmiany temperatury. Dodatkowo w celu zmniejszenia odkształcenia wywołanego przez skurcz w cementowych warstwach wierzchnich stosuje się zbrojenie prętami zbrojeniowymi, włóknami stalowymi lub syntetycznymi.

### 3.6. Wpływ dodatków na wybrane właściwości cementowej warstwy wierzchniej

Naukowcy od dawna stosują różne rodzaje dodatków do cementowej warstwy wierzchniej. Mają one zróżnicowane zadania, zależnie od rodzaju i dozowania dodatku. Dodatki mają poprawić właściwości mieszanki zwiększając jej urabialność oraz modyfikując czas jej wiązania, zwiększyć wytrzymałość kompozytu poprawiając wypełnienie jej struktury, zwiększając stopień hydratacji cementu czy adhezję pomiędzy warstwą wierzchnią, a podkładem. Wreszcie mogą one też wpływać na właściwości funkcjonalne warstwy wierzchniej, redukując odkształcenia termiczne, zwiększając odporność na ścieranie czy ujednolicając właściwości kompozytu. Rysunek 48 przedstawia podział materiałów stosowanych jako dodatki w cementowej warstwie wierzchniej podłóg.



Rysunek 48. Dodatki stosowane do technologii wykonywania cementowej warstwy wierzchniej

### 3.6.1. Przegląd zastosowań dodatków do zaprawy cementowej stanowiącej warstwę wierzchnią w układach warstwowych z kompozytów cementowych

Zbrojenie rozproszone stosowane jest w kompozytach cementowych w celu zwiększenia ich wytrzymałości resztkowej oraz niwelacji skurczu kompozytu. *Chu* [31] zbadał wpływ włókien stalowych na właściwości kompozytów cementowych. Zaobserwował, że dodatek włókien powoduje, że konsystencja mieszanki staje się bardziej gęsta, jednak wpływ włókien na właściwości kompozytu cementowego jest szczególnie pozytywny. Pozwalają bowiem zniwelować skurcz, zwiększyć wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu. *Banthia i Gupta* [8] również zaobserwowali pozytywny wpływ włókien na kontrolę skurczu kompozytu. Dodatkowo, opisali, że większe włókna mają gorszy wpływ na właściwości kompozytu niż włókna o mniejszej średnicy. Z kolei dłuższe włókna wykazują bardziej pozytywny efekt oddziaływania niż włókna krótsze. *Chajec i Sadowski* [20] porównali ze sobą wpływ włókien stalowych i polipropylenowych na właściwości betonu stosowanego do wykonywania podłóg betonowych. Zauważyli, że zależnie od zastosowanego typu włókien ich wpływ jest zróżnicowany. Dodatek włókien stalowych powodował zmianę konsystencji na bardziej gęstą, natomiast ich efekt na właściwości mechaniczne kompozytu był bardziej widoczny niż włókien polipropylenowych.

Wypełniacze stanowią dość szeroki zbiór materiałów sypkich wykorzystywanych w technologii betonu w celu poprawienia struktury kompozytu cementowego dzięki zróżnicowanemu uziarnieniu mieszanki. Najczęściej stosowanym wypełniaczem są mączki mineralne (wapienne, marmurowe), jednak coraz częściej stosuje się w tym celu także materiały odpadowe (zmielone cząstki plastiku,

kruszone szkło) oraz kruszywo recyklingowe pochodzące z rozbiórek istniejących konstrukcji. *John i inni* [89] wskazali, że obecnie w składzie cementu średnio tylko 7% jego masy stanowi zastosowanie wypełniacza, jednak korzyści płynące z jego stosowania są coraz szerzej dyskutowane, co może w przyszłości zachęcić badaczy do korzystania z wypełniaczy. Naukowcy opisali także, że nowatorskie metody produkcji mieszanek cementowych pozwalają zniwelować największy dotychczasowy mankament związany ze stosowaniem wypełniaczy – zmianę konsystencji mieszanki na bardziej gęstą. *Du i inni* [44] przeprowadzili badania nad stosowaniem takich wypełniaczy jak mączka szklana, metakaolin czy mączka wapienna, co pozwoliło im na stwierdzenie, że wypełniacze mogą pozwolić na redukcję wykorzystywanego cementu na całym świecie, odwracając przy tym negatywny wpływ na środowisko kompozytów cementowych maksymalizując przy tym wykorzystanie materiałów odpadowych, co potwierdzają także inni naukowcy [90], [150]. *Chajec i inni* [A2] zauważyli, że modyfikacja składu materiałowego mieszanki stosowanej na warstwy wierzchniej dodatkiem wypełniacza (mączki granitowej) pozwoliła na uzyskanie zwiększonych właściwości adhezyjnych i funkcjonalnych warstwy wierzchniej co jest pozytywnym efektem.

Dodatki pucolanowe są najchętniej stosowanymi dodatkami przez technologów betonu. Pozwalają one bowiem na częściowe zastąpienie cementu w kompozycie cementowym, nie zmieniając przy tym istotnie jego właściwości mechanicznych. *Massazza* [110] wskazuje, że pucolany zyskały swoją popularność dzięki inicjowaniu reakcji pomiędzy pucolaną, a wapieniem będącym wynikiem hydratacji cementu. Badacz wskazuje, że zastąpienie nawet 30% cementu dodatkiem pucolany pozwala uzyskać kompozyt, którego wytrzymałość na ściskanie będzie taka sama jak kompozytu niemodyfikowanego. *Day i Shi* [38] zauważyli, że miąższość pucolany ma znaczący wpływ na jej oddziaływanie na właściwości kompozytu cementowego. Bardziej miąższość pucolany prowadzi do większych wzrostów wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z tymi, których ziarna mają większe wymiary. Najczęściej wykorzystywaną pucolaną w technologii wykonywania cementowej warstwy wierzchniej jest popiół lotny. *Banithia i Gupta* [9] zaobserwowali, że dzięki modyfikacji kompozycji materiałowych cementowej warstwy wierzchniej dodatkiem popiołu lotnego, możliwe jest ograniczenie występowania skurczu w kompozytach stosowanych na warstwę wierzchnią. Popiół lotny prowadzi także do samoczynnego zasklepiania się mikropęknięć w kompozycie dzięki wywołaniu reakcji pucolanowej. Szczególnie pożądanym wpływem popiołu lotnego na mieszankę cementową jest też zmniejszenie ilości wydzielania ciepła podczas reakcji wiązania mieszanki. *Zhang i inni* [190] podkreślili, że dzięki zastosowaniu dodatków pucolanowych do zastąpienia części cementu w kompozycie, znacząco zmienia się ślad środowiskowy produkowanego elementu konstrukcji budynku. Za szczególnie ważne uznali, że w betonowych elementach wykonywanych poziomo, takich jak podłogi ograniczenie emisji dwutlenku węgla jest szczególnie potrzebne.

Nanocząstki są stosowane w technologii mieszanek oraz kompozytów cementowych w celu optymalizacji ich właściwości [118]. *Paul i inni* [126] zauważyli, że wszystkie obecnie stosowane

nanocząstki mają korzystny wpływ na właściwości mechaniczne kompozytów, jednocześnie niektóre z nich (jak np. tlenek krzemu (IV) czy tlenek tytanu (IV)) pozwalają na poprawę konsystencji mieszanki czy zmianę termodynamiki procesu hydratacji cementu w mieszance. Za szczególnie pozytywny badacze określili wpływ nanocząstek na zmniejszenie się nasiąkliwości kompozytów cementowych. Nanocząstki istotnie wpływają na proces hydratacji cementu stanowiąc znakomite bazy dla rozwoju produktów hydratacji. *Sikora i inni* [149] określili właściwości antybakteryjne nanocząstek tlenków glinu, miedzi, żelaza oraz cynku wykorzystanych w kompozytach cementowych. Naukowcy zauważyli, że wykorzystane nanocząstki wykazały toksyczne oddziaływania na wykorzystane mikroorganizmy, niemniej wykorzystanie nanocząstek w kompozytach cementowych wymaga opracowania sposobu ich dyspersji. *Szymanowski* [161] zbadał wpływ dodatku nanocząstek tlenku tytanu (IV) na właściwości mieszanek i kompozytów cementowych stosowanych na warstwę wierzchnią podłóg. Naukowiec zauważył, że dodatek 0,5% tego materiału pozytywnie wpływa na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej dzięki występowaniu zdecydowanie mniejszych porów w strefie adhezji warstwy wierzchniej do podkładu. Zaobserwowano także, że wykorzystana nanocząstka pozwala uzyskać zwiększoną odporność na ścieranie kompozytu cementowego.

### 3.7. Podsumowanie rozpoznania literaturowego

Cementowa warstwa wierzchnia jest chętnie wykorzystywanym elementem podłóg betonowych pozwalających na zapewnienie jej odpowiedniej trwałości. Jej stosowanie wiąże się jednak z wieloma wyzwaniami przed którymi stoją inżynierowie. Odpowiednio zaprojektowany skład mieszanki cementowej pozwala uzyskać jej wymaganą konsystencję, czas wiązania, gęstość czy urabialność. Właściwości mechaniczne kompozytów wykorzystanych do wykonania cementowej warstwy wierzchniej pozwalają na uzyskanie jej trwałości i bezawaryjne użytkowanie. Należy także podkreślić, że rozwijająca się świadomość społeczna związana z wpływem na środowisko prowadzi do konkluzji, że cementowa warstwa wierzchnia odpowiada za znaczną część emitowanego dwutlenku węgla – produkcja cementu jest jedną z najbardziej energochłonnych, dodatkowo transport cementu i samej mieszanki cementowej dodatkowo zwiększają ślad środowiskowy budownictwa. Należy zatem poszukiwać rozwiązań, które z jednej strony pozwolą zredukować wady cementowej warstwy wierzchniej, podkreślając przy tym jej zalety, ale także zmniejszając wpływ na środowisko przemysłu budowlanego. Stosowanie w tym celu dodatków sypkich oraz wypełniaczy wydaje się być obiecującą techniką. Tabela 4 przedstawia skład chemicznych najczęściej stosowanych dodatków sypkich i wypełniaczy w cementowych warstwach wierzchnich.

Tabela 4. Podsumowanie - skład chemiczny najczęściej stosowanych dodatków do kompozytów cementowych w porównaniu do cementu (na podstawie literatury przeanalizowanej w Rozdziale 3)

Związek chemiczny	Cement	Popiół lotny	Mączka granitowa	Mączka wapienna	Mączka marmurowa	Mikrokrzemionka	Mączka szklana
	(%)						
SiO <sub>2</sub>	28-35	50-65	60-85	8-15	3-8	95-99	60-75
CaO	38-55	0-3	0-2	80-92	45-55	<5	0-2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8	20-35	10-20	2-5	0-2		8-14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-5	2-5	0-2	0-3			0-2
K <sub>2</sub> O	<1	0-2	2-5	<1	<1		2-5
MgO		0-2	<1		5-9		
Na <sub>2</sub> O		<1					
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		<1			<1		
TiO <sub>2</sub>							
Pozostałe							

Poprawa zagęszczalności, stabilizowanie czasu wiązania, zwiększenie gęstości upakowania to pozytywny efekt stosowania dodatków sypkich do mieszanek cementowych. Do negatywnego wpływu należy zaliczyć zmianę konsystencji mieszanki na bardziej gęstoplastyczną. Dzięki zwiększeniu gęstości upakowania, kompozyty cementowe modyfikowane dodatkami sypkimi charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi. Dodatki sypkie pozwalają także na uszczelnienie struktury kompozytu, zmniejszenie jego porowatości oraz zmniejszenie wpływu korozji chemicznej na kompozyt cementowy.

Wpływ dodatku mączki granitowej na mieszankę i kompozyty cementowe nie jest jasny. Wielu badaczy zajmowało się tym tematem, jednak przedstawiane przez nich wyniki nie są jednoznaczne, a często wręcz raportowane są sprzeczne wyniki. Niepewność ta jest dodatkowo potęgowana poprzez fakt, że większość prezentowanych wyników badań przez badaczy dotyczy rozwiązań aplikacyjnych, a procentowe zastąpienie cementu dodatkiem mączki granitowej nie było znaczące. Potencjał wykorzystania odpadowej mączki granitowej w kompozytach cementowych jest jednak ogromny i należy dążyć do precyzyjnych badań wpływu tego materiału, co dodatkowo poparte jest możliwością poprawy stanu środowiska naturalnego. Wszystko to prowadzi do konkluzji, że niezbędne są precyzyjne badania wpływu zastąpienia cementu dodatkiem mączki granitowej na mieszankę i kompozyt cementowy.

Krzemionkowy popiół lotny prowadzi do znanych od lat zmian właściwości mieszanki i kompozytu cementowego. Dokładnie zbadany oraz opisany krzemionkowy popiół lotny przestał pełnić rolę odpadu, a stał się pożądanym produktem co podkreśla jego pozytywne oddziaływanie. Niemniej jednak należy pamiętać, że popiół lotny jest także problematycznym środowiskowo materiałem, który jest obciążony ogromnym śladem środowiskowym.

Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w celu zastąpienia części cementu w kompozycie cementowym to być może przełomowy moment, który pozwoli wykorzystać znane pozytywne aspekty stosowania popiołu lotnego, niwelując przy tym negatywny wpływ mączki granitowej na niektóre właściwości (szczególnie konsystencję oraz właściwości mechaniczne). Mączka granitowa wykorzystana w takiej kompozycji może pozwolić na zwiększenie gęstości upakowania mieszanki co zwiększy właściwości mechaniczne oraz trwałość kompozytu cementowego.

Podsumowując przegląd literaturowy wykonany w całym rozdziale 3 przedstawiono analizę luk badawczych związanych z tematyką rozprawy doktorskiej (Tabela 5).

Tabela 5. Podsumowanie przeglądu literaturowego związanego z wpływem modyfikacji kompozytu cementowego do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach za pomocą dodatku popiołu lotnego (PL), mączki granitowej (MG) oraz jednoczesnego dodatku popiołu lotnego oraz mączki granitowej (PL+MG)

Badana właściwość	Kompozyt modyfikowany dodatkiem PL, MG lub PL+MG*								
	Zaczyn			Zaprawa			Beton		
	PL*	MG*	PL+MG*	PL*	MG*	PL+MG*	PL*	MG*	PL+MG*
Właściwości mieszanki cementowej									
Gęstość objętościowa	+	-	-	+	+	+	+	+	+
Czas początku i końca wiązania	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Konsystencja	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Wodozadržność	+	-	-	+	-	-	+	-	-
Odsączanie wody z mieszanki cementowej	+	+	-	-	-	-	+	+	-
Gęstość upakowania składników	+	-	-	+	+	-	+	+	-
Właściwości fizyczne stwardniałego kompozytu cementowego									
Gęstość objętościowa	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Porowatość objętościowa	+	-	-	+	+	-	+	+	-
Nasiąkliwość masowa	+	-	-	+	+	-	+	+	-
Właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu cementowego									
Wytrzymałość na ściskanie	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Właściwości adhezyjne stwardniałego kompozytu cementowego									
Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Właściwości funkcjonalne stwardniałego kompozytu cementowego									
Odporność na ścieranie	+	-	-	+	+	-	+	+	-
Jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej	-	-	-	-	+	-	-	+	-
"+" jeżeli właściwość była badana w literaturze; "-" jeżeli właściwość nie była badana w literaturze; PL - serie modyfikowane popiołem lotnym; MG - serie modyfikowane mączką granitową; PL+MG - serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej									

Prace badawcze w ramach tej rozprawy doktorskiej zostały zaprojektowane w taki sposób, aby w ich wyniku wypełnić jak największą liczbę luk badawczych, poszerzając przy tym zasób wiedzy o badanych materiałach oraz podkreślając przy tym znaczenie uzyskanych wyników dla praktyki budowlanej.

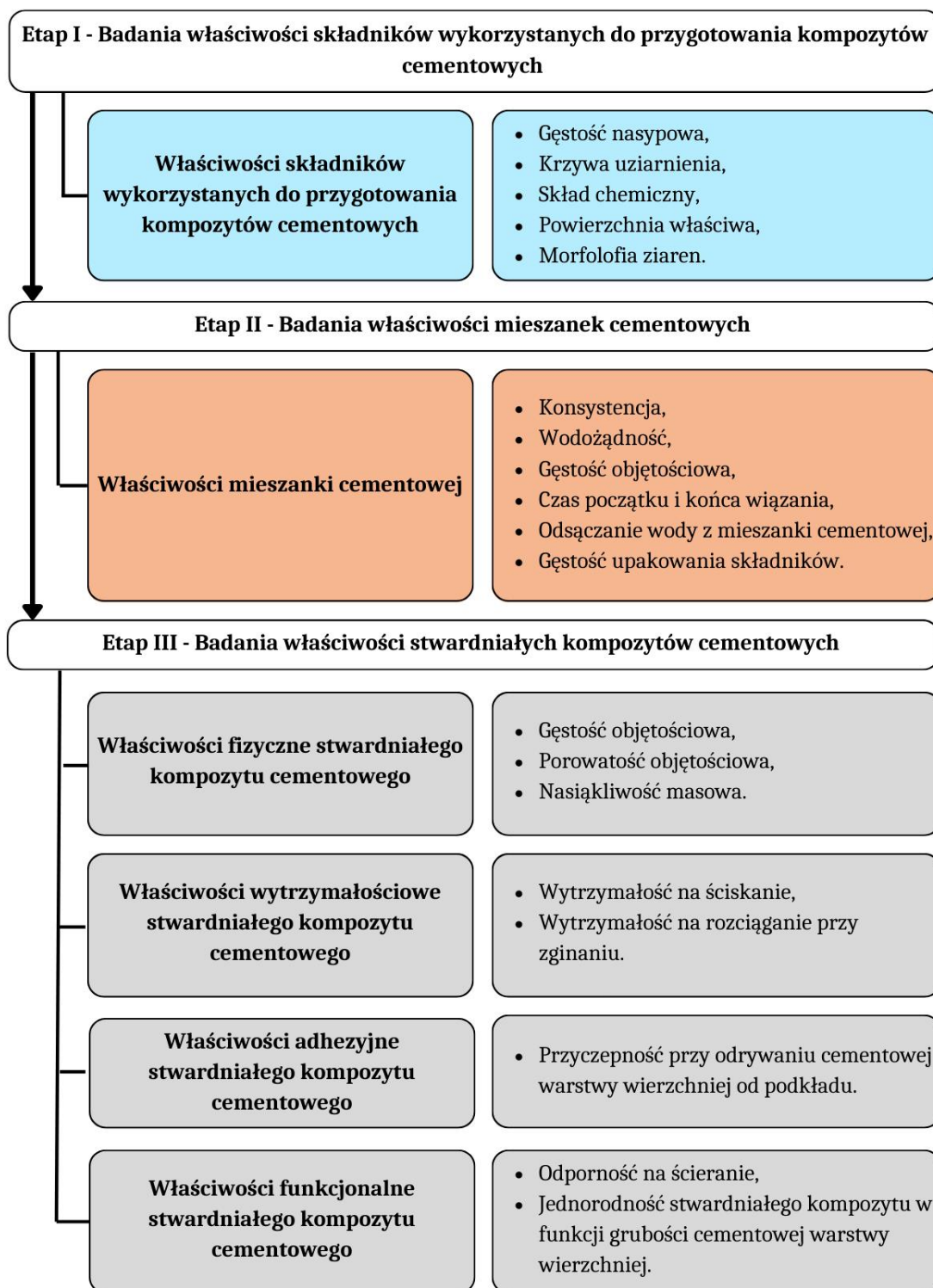


## **4. OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW, ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH I STOSOWANA W ROZPRAWIE METODOLOGIA**

### 4.1. Zakres badań własnych

Badania prowadzone w ramach rozprawy zostały wykonane dla wykorzystanych dodatków (mączka, popiół i ich jednoczesny dodatek), zaczynów oraz zapraw cementowych. Istotnym elementem badań wstępnych jest określenie właściwości składników wykorzystanych w badaniach – odpadowej mączki granitowej, krzemionkowego popiołu lotnego oraz jednoczesnego dodatku mączki i popiołu. Badania wykonane dla zaczynów i zapraw cementowych modyfikowanych dodatkiem mączki granitowej, popiołu lotnego oraz ich jednoczesnego dodatku mają za zadanie zdefiniować (lub potwierdzić w przypadku popiołu) wpływ tych dodatków na podstawowe właściwości kompozytów cementowych do zastosowania w cementowych warstwach wierzchnich w podłogach. Dodatkowo, badania zapraw cementowych modyfikowanych analizowanymi dodatkami mają za zadanie zdefiniować potencjał aplikacyjny wykorzystania badanych kompozycji materiałowych.

Zakres prac do wykonania został podzielony na trzy etapy badawcze: I – Badania właściwości składników wykorzystanych do przygotowania kompozytów cementowych, II – Badania właściwości mieszanek cementowych oraz III – Badania właściwości stwardniałych kompozytów cementowych. Ogólny plan badań przedstawia Rysunek 49.



Rysunek 49. Ogólny plan badań własnych – etapy i badania

W celu zapewnienia przejrzystości i poprawności prowadzonych badań, w pierwszym etapie projektowania niezbędnych prac wybrano analizowane składniki mieszanek cementowych oraz poczyniono założenia wstępne. Wybrano wykorzystanie cementu CEM I 42,5R (Górażdże Premium, Polska), krzemionkowego popiołu lotnego (Kogeneracja S.A., Polska), odpadowej mączki granitowej

(Strzegom, Polska) pochodzącej z zakładu obróbki skał granitowych, która została pobrana z odpadu produkowanego przez diamentowe piły łańcuchowe podczas cięcia skał granitowych. Jako kruszywo drobne wykorzystano piasek kwarcowy, który charakteryzuje się uziarnieniem 0-2 mm (Axton, Polska). We wszystkich badaniach wykorzystano wodę pochodzącą z wodociągu.

W badaniach Etapu II i III poczyniono założenia, które mają na celu spełnienie celów rozprawy opisanych wcześniej. Zdecydowano się wykorzystać analizowane materiały (mączkę, popiół i ich jednoczesny dodatek) jako materiały zastępujące część cementu w mieszance w maksymalnej części – 30%. W badaniach wykorzystano 4 rodzaje kompozycji materiałowych, które stworzyło 11 serii badawczych dla zaczynów oraz tyle samo dla zapraw. W badaniach wykorzystano materiały bez dodatkowej funkcjonalizacji (przesiewanie, mielenie, kruszenie itp.), aby uniknąć wynikającego z nich dodatkowego śladu środowiskowego. Zdecydowano się przeprowadzić wszystkie badania serii materiałowych bez dodatku żadnego dodatkowego związku chemicznego (plastyfikator, napowietrzacz itp.), gdyż prowadzone w ramach rozprawy badania mają przede wszystkim charakter naukowy i poznawczy, a jak wspomniano w literaturze – [94] związki chemiczne wpływające na konsystencje mieszanki wpływają także na zmiany strukturalne kompozytów cementowych zaburzając przy tym wyniki uzyskane w takich badaniach. Zdecydowano się, że w tych badaniach wykorzystane zostanie maksymalne zastąpienie cementu (masowo) w mieszance do 30%. Taką decyzję podjęto na podstawie analizy literatury, która wskazuje, że wyższe zastąpienie cementu dodatkiem materiałów sypkich nie pozwala na uzyskanie zbliżonych właściwości kompozytów cementowych, co seria niemodyfikowana. Także, dbając o potencjał aplikacyjny opracowanego rozwiązania autor zdecydował się ograniczyć procent zastąpienia cementu do 30% za pomocą dodatków sypkich (mniej radykalne zmiany są obciążone niższym ryzykiem badawczym / wdrożeniowym, niż w przypadku zastąpienia większej części cementu w kompozycie cementowym (masowo). W celu przeanalizowania wpływu różnych sposobów przechowywania (pielęgnacji) kompozytów cementowych na ich właściwości zdecydowano się na pielęgnację kompozytów na trzy sposoby, natomiast pielęgnację cementowej warstwy wierzchniej wykonano na dwa sposoby (4.3 oraz 4.6.7). Badania kompozytów cementowych przeprowadzono po 7, 28, 90 dniach, niemniej jednak nie udało się wykonać badań cementowej warstwy wierzchniej po 7 i 28 dniach, ponieważ warstwa nie była wystarczająco wytrzymała (podczas wiercenia miejsc badawczych dochodziło do zniszczeń próbki) i zdecydowano się na przeprowadzenie tych badań po 56 i 90 dniach. Oznaczenie odporności na ścieranie wykonano po 28 i 90 dniach pielęgnacji tylko dla jednego sposobu pielęgnacji – CC1 z racji ograniczonego dostępu do aparatury badawczej. Rysunek 50 przedstawia schemat ogólnego planu badań z opisem badanych składników oraz poczynionych założeń wstępnych.

#### **Składniki**

- Cement CEM I 42.5R,
- Krzemionkowy popiół lotny,
- Odpadowa mączka granitowa,
- Kruszywo drobne - piasek kwarcowy 0-2mm,
- Woda z wodociągu.

#### **Założenia**

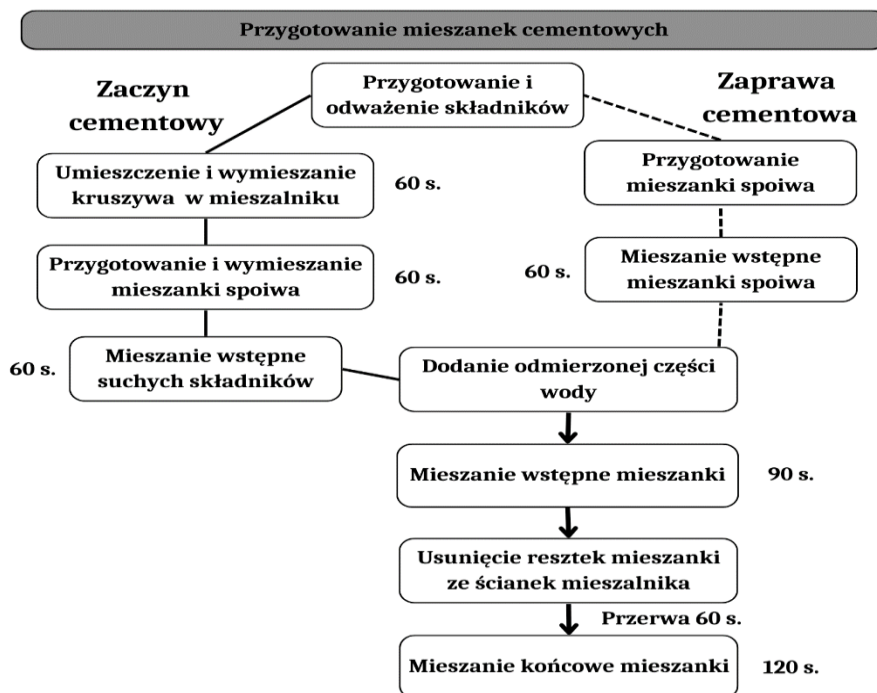
- 4 rodzaje kompozycji materiałowych: referencyjna (niemodyfikowana), modyfikowana popiołem, modyfikowana mączką, modyfikowana jednoczesnym dodatkiem popiołu i mączki,
- 11 serii badawczych,
- Zastąpienie maks. 30% masy cementu w mieszance cementowej,
- Badania zaczynów i zapraw cementowych,
- w/c dla serii referencyjnej zaczynów oraz zapraw cementowych = 0,4 (-),
- Brak dodatkowej funkcjonalizacji mączki granitowej przed jej wykorzystaniem,
- Nie stosowanie dodatku plastyfikatora w kompozycjach materiałowych,
- Wprowadzenie dla wybranych badań różnych sposobów pielęgnacji próbek,
- Badania kompozytów cementowych po 7, 28 oraz 90 dniach.

Rysunek 50. Ogólny plan badań własnych – składniki i założenia

## 4.2. Mieszanki cementowe

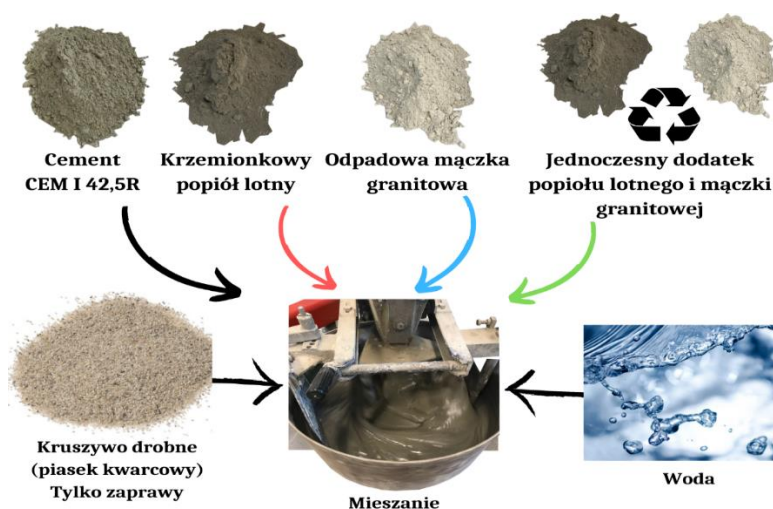
Badania mieszanek cementowych ograniczono do wykonania sprawdzeń zaczynów cementowych oraz zapraw cementowych. Składy zaczynów cementowych ustalono na podstawie analizy literatury w taki sposób aby przyjęta kompozycja wpisywała się w zwykle stosowane mieszanki przez badaczy zajmujących się tematyką modyfikacji kompozytów cementowych dodatkami mineralnymi. Składy zapraw cementowych dobrano na podstawie analizy powszechnie stosowanych kompozycji materiałowych mieszanek stosowanych do wykonywania cementowej warstwy wierzchniej w podłogach. Przygotowanie mieszanek rozpoczęto od odmierzenia składników mieszanek zgodnie ze wskazaniami kompozycji materiałowych mieszanek (4.2.1 oraz 4.2.2). Następnie rozpoczynano procedurę mieszania. Rysunek 51 przedstawia procedurę mieszania ze sobą składników zaczynów i zapraw cementowych. Po wymieszaniu składników mieszanek i kontroli rezultatu mieszania (w przypadku niejednorodności mieszanki zdecydowano się powtórzyć etap mieszania końcowego mieszanki), bezzwłocznie przechodzono do badań mieszanek cementowych. Po wykonaniu badań mieszanki były jeszcze raz mieszane w mieszalniku przez 60 sekund, a po tym rozpoczynano układanie ich w przygotowanych wcześniej formach (wymiary zgodne z wymiarami próbek opisanymi w punkcie 4.3). Po zaformowaniu mieszanki odstawiano w miejsce przeznaczone do ich pielęgnacji do czasu przeprowadzenia badań kompozytów cementowych. Miejsca pielęgnacji zapewniały warunki pielęgnacji opisane w pkt. 4.3. Próbkę po podziale na poszczególne rodzaje pielęgnacji oznaczano farbą w sprayu w zależności od rodzaju pielęgnacji i opisywano datą wyprodukowania (szare – warunki

powietrzno suche CC1, czerwone – warunki powietrzno – wilgotne CC2, niebieskie – warunki wilgotne CC3).



Rysunek 51. Schemat przedstawiający procedurę mieszania składników mieszanki cementowych

Wykorzystane składniki mieszanki cementowej oraz przypisane do nich oznaczenia kolorystyczne serii badawczych (czarny – seria referencyjna (niemodyfikowana), czerwony – seria modyfikowana krzemionkowym popiołem lotnym, niebieski – seria modyfikowana odpadową mączką granitową, zielony – seria modyfikowana jednoczesnym dodatkiem popiołu i mączki granitowej) przedstawia Rysunek 52. Przypisane oznaczenia kolorystyczne dla poszczególnych serii badawczych utrzymano dla wszystkich przedstawionych w rozprawie wyników badań.



Rysunek 52. Składniki mieszanki cementowej i ich mieszanie

#### 4.2.1. Zaczyny cementowe

Na podstawie analizy literatury przedstawionej w pkt. 3 zdecydowano się na sprawdzenie kompozycji materiałowych zaczynów cementowych o  $w/c = 0,4$  (-), gdzie zastąpiono maksymalnie 30% masy cementu w mieszance dodatkiem modyfikatora. Tabela 6 przedstawia szczegółowo kompozycje zaczynów cementowych wykorzystanych w badaniach.

Tabela 6. Skład materiałowy zaczynów cementowych wykorzystanych w badaniach własnych

Numer serii	Nazwa serii	Skład serii	Cement		Woda		Popiół lotny		Mączka granitowa	
			(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )
1	REF	100% cement	1	1260	0.4	504	0	0	0	0
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego										
2	FA10	90% cement 10% popiół	0.9	1134	0.4	504	0.1	126	0	0
3	FA20	80% cement 20% popiół	0.8	1008			0.2	252		
4	FA30	70% cement 30% popiół	0.7	882			0.3	378		
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej										
5	GP10	90% cement 10% mączka	0.9	1134	0.4	504	0	0	0.1	126
6	GP20	80% cement 20% mączka	0.8	1008					0.2	252
7	GP30	70% cement 30% mączka	0.7	882					0.3	378
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej										
8	5FA+5 GP	90% cement 5% popiół 5% mączka	0.9	1134	0.4	504	0.05	63	0.05	63
9	10FA+10GP	80% cement 10% popiół 10% mączka	0.8	1008			0.1	126	0.1	126
10	20FA+10GP	70% cement 20% popiół 10% mączka	0.7	882			0.2	252	0.1	126
11	10FA+20GP	70% cement 10% popiół 20% mączka	0.7	882			0.1	126	0.2	252
Legenda nazw serii zaczynów cementowych: FAy – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy krzemionkowego popiołu lotnego GPx – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy mączki granitowej yFA+xGP – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy mączki granitowej oraz y% masy cementu dodatkiem tej masy krzemionkowego popiołu lotnego										

#### 4.2.2. Zaprawy cementowe

W wyniku przeglądu literaturowego opisanego w pkt. 3 zdecydowano się na sprawdzenie kompozycji materiałowych zapraw cementowych o  $w/c = 0,4$  (-), zawartości kruszywa drobne w stosunku do zawartości cementu = 3,0 (-), gdzie zastąpiono maksymalnie 30% masy cementu w mieszance dodatkiem modyfikatora. Tabela 7 przedstawia szczegółowo kompozycje zapraw cementowych wykorzystanych w badaniach.

OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW, ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH I STOSOWANA  
W ROZPRAWIE METODOLOGIA

Tabela 7. Skład materiałowy zapraw cementowych wykorzystanych w badaniach własnych

Numer serii	Nazwa serii	Skład serii	Cement		Woda		Popiół lotny		Kruszywo drobne		Mączka granitowa	
			(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )
1	REF	100% cement	1	540	0.4	216	0	0	3.0	1620	0	0
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego												
2	FA10	90% cement 10% popiół	0.9	486	0.4	216	0.1	54	3.0	1620	0	0
3	FA20	80% cement 20% popiół	0.8	432			0.2	108				
4	FA30	70% cement 30% popiół	0.7	378			0.3	162				
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej												
5	GP10	90% cement 10% mączka	0.9	486	0.4	216	0	0	3.0	1620	0.1	54
6	GP20	80% cement 20% mączka	0.8	432							0.2	108
7	GP30	70% cement 30% mączka	0.7	378							0.3	162
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej												
8	5FA+5 GP	90% cement 5% popiół 5% mączka	0.9	486	0.4	216	0.05	27	3.0	1620	0.05	27
9	10FA+ 10GP	80% cement 10% popiół 10% mączka	0.8	432			0.1	54			0.1	54
10	20FA+ 10GP	70% cement 20% popiół 10% mączka	0.7	378			0.2	108			0.1	54
11	10FA+ 20GP	70% cement 10% popiół 20% mączka	0.7	378			0.1	54			0.2	108
Legenda nazw serii zapraw cementowych: FAy – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy krzemionkowego popiołu lotnego GPx – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy mączki granitowej yFA+xGP – seria w której zastąpiono x% masy cementu dodatkiem tej masy mączki granitowej oraz y% masy cementu dodatkiem tej masy krzemionkowego popiołu lotnego												

#### 4.3. Próbkki kompozytów cementowych i ich przechowywanie

Próbkki kompozytów cementowych pielęgnowano odpowiednio 7, 28, 56 lub 90 dni (w zależności od badania do przeprowadzenia). Próbkki były umieszczone w miejscu pielęgnacji od czasu ich rozformowania (po 24 godzinach od zaformowania) do czasu badania. Tabela 8 przedstawia szczegółowy plan badań wraz z określeniem metodologii, aparatury badawczej oraz rodzaju i liczby próbek badawczych.

Tabela 8. Szczegółowy plan badań i metodologia prowadzenia badań

Badana właściwość	Norma/Metodologia	Aparatura badawcza	Rodzaj próbek (liczba)
<b>Etap I - Badania właściwości składników wykorzystanych do przygotowania kompozytów cementowych</b>			
Gęstość nasypowa	PN-EN 1097-3	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna	Próbka materiału (1000g) oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy statystycznej
Krzywa uziarnienia	PN-71C-04501	Zestaw sit normowych, wytrząsarka, waga laboratoryjna	
Skład chemiczny	Badanie dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego	Skaningowy mikroskop elektronowy	Próbka materiału (5g), oznaczenie wykonano min 3 krotnie w celu analizy statystycznej
Powierzchnia właściwa	PN-EN 196-6	Aparat Blaine'a	
Morfologia ziaren	Metodologia opisana przez <i>Wong i inni</i> [171]	Skaningowy mikroskop elektronowy	
<b>Etap II - Badania właściwości mieszanek cementowych</b>			
Konsystencja	Badanie za pomocą stolika rozplywu wg PN-EN 1015-3	Stolik rozplywu, miarka	Wykonano min. 3 krotnie dla każdej serii zaczynów i zapraw
Wodozadržność			
Gęstość objętościowa	PN-EN 1015-6	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna	
Czas początku i końca wiązania	PN-EN 196-3	Aparat Vicata	Wykonano na min. 3 próbkach każdej serii zaczynów i zapraw
Odsączanie wody z mieszanki cementowej	ASTM C243-95	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna, biureta	Wykonano min. 3 krotnie dla każdej serii zaczynów i zapraw
Gęstość upakowania składników	Metodologia opisana przez <i>Kwan i Chu</i> [22]	Wiaderko pomiarowe, waga laboratoryjna	Pomiar gęstości objętościowej wykonano 3 krotnie, oznaczenie optymalnej gęstości upakowania składników wykonano dla 11 serii zapraw
<b>Etap III – Badania właściwości stwardniałych kompozytów cementowych</b>			
Gęstość objętościowa	PN-EN 1015-10	Waga laboratoryjna	Beleczi 40x40x160 mm (3 szt. z każdej serii zaczynów i zapraw, 3 czasy oznaczania: 7,28 i 90 dni, 3 sposoby pielęgnacji: 3x11x2x3x3 = 594 szt.)
Porowatość objętościowa		Waga laboratoryjna, komora klimatyczna	
Nasiąkliwość masowa			
Wytrzymałość na ściskanie	PN-EN 1015-11	Maszyna wytrzymałościowa	Półowki beleczek 40x40x160 mm (6 szt. z każdej serii zaczynów i zapraw, 3 czasy badania - 7,28,90 dni; 3 sposoby pielęgnacji CC1,CC2,CC3: 6x11x2x3x3=1188 szt.)
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu			Beleczi 40x40x160 mm (3 szt. z każdej serii zaczynów i zapraw; 3 czasy badania - 7,28,90 dni; 3 sposoby pielęgnacji CC1,CC2,CC3 : 3x11x2x3x3=594 szt.)



## W ROZPRAWIE METODOLOGIA

Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu	PN-EN 1542	Automatyczna dyna Pull-off	Miejsca badawcze na przygotowanych poletkach badawczych warstwy wierzchniej (6 miejsc badawczych dla każdej serii zapraw; 2 sposoby pielęgnacji – CC1 i CC2; 2 czasy badania - 56 i 90 dni : 6x1x11x2x2=264 szt.)
Odporność na ścieranie	PN-EN 14157	Tarcza Boehme'go	Prostopadłościan o podstawie 71x71 mm (3 szt. z każdej serii zaczynów i zapraw; 2 czasy badania - 28 i 90 dni; 3 sposoby pielęgnacji – CC1,CC2,CC3 : 3x2x11x2x3 = 396 szt.)
Jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej	Metodologia opisana przez <i>Stawiski i Kania</i> [155]	Betnoskop ultradźwiękowy zaopatrzone w stożkowe głowice pomiarowe	Badania min 3 odwiertów rdzeniowych cementowej warstwy wierzchniej (3 miejsca badawcze dla każdej serii zapraw; 2 sposoby pielęgnacji – CC1, CC2; 2 czasy badania - 56 i 90 dni: 3x1x11x2x2 = 132 szt.)

W trakcie przechowywania próbek kompozytów cementowych do czasu przeprowadzenia ich badań wykorzystano trzy sposoby ich pielęgnacji:

- CC1 – powietrzno-suchy, który symuluje warunki wykonania kompozytu cementowego bez dodatkowej pielęgnacji wodą (próbki pozostawione na działanie powietrza o temperaturze i wilgotności pokojowej),
- CC2 – powietrzno-wilgotny, który odwzorowuje warunki pielęgnacji w wilgotnym środowisku (zwiększona wilgotność) jak np. przykrycie folią kompozytu na budowie i okresowe jego podlewanie,
- CC3 – wilgotny – teoretycznie idealny sposób pielęgnacji kompozytów cementowych zanurzonych w wodzie (z dostępem do wody z każdej strony), należy jednak krytycznie stwierdzić, że nie jest on realny do uzyskania w warunkach budowy, gdzie zwykle możliwy jest dostęp do pielęgnacji tylko do jednej lub dwóch płaszczyzn kompozytu.

Wyżej wymienione sposoby pielęgnacji są zwykle wykorzystywane w praktyce budowlanej związanej z wykonywaniem cementowej warstwy wierzchniej (CC1 i CC2). Sposób CC1 zwykle jest błędnym sposobem pielęgnacji na budowie, gdyż zwiększa on ryzyko wystąpienia skurczu plastycznego oraz spękań cementowej warstwy wierzchniej, CC2 jest typowym, najczęściej stosowanym sposobem pielęgnacji cementowej warstwy wierzchniej bez wykorzystania środków chemicznych. Z drugiej strony, w warunkach budowy często popełniany jest błąd polegający na pielęgnowaniu próbek kompozytów cementowych (tzw. świadków) w sposób opisany jako CC3. Prowadzi to zwykle do zawyżenia wyników uzyskanych przez próbki wzorcowe, co może mieć znaczący, negatywny wpływ na decyzje na placu budowy w trakcie realizacji (np. błędne określenie czasu po którym należy wykonać dylatacje cementowej warstwy wierzchniej, czy niepoprawne określenie nośności podłogi przed momentem jej obciążenia). Istotne jest zatem dla praktyki budowlanej, aby zbadać korelację pomiędzy

wybranymi sposobami pielęgnacji. Dla wszystkich próbek zapewniono dostęp ze wszystkich stron do warunków pielęgnacji (stosowano specjalne przekładki kratowe unikając układanie próbek w stosie). Tabela 9 przedstawia szczegółowy opis warunków pielęgnacji kompozytów cementowych.

Tabela 9. Opis warunków przechowywania próbek kompozytów cementowych do czasu wykonania ich badań

Oznaczenie	Sposób przechowywania	Wilgotność	Temperatura	Uzasadnienie
		(%)	(°C)	
CC1	Powietrzno - suchy	$20 \pm 3$	$23 \pm 1$	Sposób często stosowany błędnie przez wykonawców cementowych warstw wierzchnich. Może prowadzić on do zwiększonego skurczu plastycznego oraz uszkodzeń warstwy wierzchniej.
CC2	Powietrzno - wilgotny	$70 \pm 3$		Ten sposób pielęgnacji jest najczęściej stosowanym przez wykonawców cementowych warstw wierzchnich. Odzworowuje realne warunki pielęgnacji na budowie.
CC3	Wilgotny	100		Teoretycznie idealny sposób pielęgnacji cementowych warstw wierzchnich, nierealny jednak w warunkach budowy. Na budowie często wykonawcy błędnie pielęgnują próbki „świadki” kompozytów w ten sposób.

#### 4.4. Statystyczna analiza wyników badań

Analiza statystyczna wyników badań uzyskanych w pracy badawczej jest szczególnie istotna, ponieważ pozwala między innymi na ocenę rozbieżności wyników, dopasowania liczby prób badawczych czy analizę błędów względnych. W ramach rozprawy, autor korzystał z wyznaczania i analizy błędów względnych pomiarów oraz sprawdzania w sposób matematyczny niezbędnej liczby prób badawczych.

Błędy względne wyników badań przeprowadzonych w rozprawie określono zgodnie z literaturą [72], mieściły się odpowiednio w przedziałach:

Badania właściwości zastosowanych składników:

- gęstość nasypowa: 1,02 – 3,52 %,
- powierzchnia właściwa ziaren: 2,99 – 4,58 %,
- właściwości morfologiczne ziaren: 1,50 – 3,12 %.

Badania właściwości mieszanek cementowych:

- konsystencja: 2,80 – 5,21 %,
- wodożądność: 1,42 – 3,86 %,

- gęstość objętościowa: 0,81 – 1,25 %,
- początek i koniec czasu wiązania: 1,55 – 4,98 %,
- odsączenie wody: 1,24 – 4,12 %,
- gęstość upakowania składników: 2,14 – 4,08 %.

Badania stwardniałych kompozytów cementowych:

- gęstość objętościowa: 0,81 – 2,01 %,
- porowatość objętościowa: 1,10 – 2,85 %,
- nasiąkliwość masowa: 2,01 – 3,52 %,
- wytrzymałość na ściskanie: 1,21 – 4,85 %,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu: 2,58 – 4,88 %,
- odporność na ścieranie: 1,10 – 3,58 %,
- przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu: 0,85 – 2,55 %,
- jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej: 0,69 – 4,44 %.

Matematyczne sprawdzenie niezbędnej liczby prób badawczych w celu zapewnienia odpowiedniej reprezentatywności wyników określono na podstawie literatury [16], za pomocą rozkładu t-Studenta, według Wzoru 9.

$$\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} \leq \frac{\vartheta}{v} \quad (9)$$

$t_{\alpha}$  – kwantyl rozkładu rzędu  $\alpha$  o  $k$  stopniach swobody (-),

$n$  – liczna próbek (-),

$\vartheta$  – założona tolerancja wartości średniej (-),

$v$  – współczynnik zmienności (-).

Przykładowe wyniki sprawdzeń przedstawia Tabela 10.

Tabela 10. Przykładowe rezultaty sprawdzeń niezbędnej liczby prób badawczych według rozkładu t-Studenta

Badana właściwość	Zmienna losowa	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	$\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} \leq \frac{\vartheta}{v}$
	$x_i$	$\bar{x}$	$s$	$v$	
Badania właściwości zastosowanych składników					
gęstość nasypowa	Cement: 1,125 ; 1,118 ; 1,132	1,125	0,006	0,0053	$\frac{2,262}{\sqrt{3}} \leq \frac{0,10}{0,0053}$ $1,308 \leq 18,868$
powierzchnia właściwa ziaren	Odpadowa mączka granitowa: 3980 ; 3950 ; 3920	3950	24,495	0,0062	$\frac{2,262}{\sqrt{3}} \leq \frac{0,10}{0,0062}$ $1,308 \leq 16,129$
Badania właściwości mieszanek cementowych					
konsystencja	Seria GP30: 215 ; 220 ; 225	220	4,082	0,0186	$\frac{2,262}{\sqrt{3}} \leq \frac{0,10}{0,0186}$ $1,308 \leq 5,376$
gęstość objętościowa	Seria FA20: 2160 ; 2205 ; 2115	2160	36,742	0,0171	$\frac{2,262}{\sqrt{3}} \leq \frac{0,10}{0,0171}$ $1,308 \leq 5,848$
Badania stwardniałych kompozytów cementowych					
wytrzymałość na ściskanie	Zaprawy seria 20FA+10GP CC3, 28 dni: 44,1 ; 46,9 ; 49,7 ; 45,2 ; 48,6 ; 47,0	46,9	1,892	0,0403	$\frac{2,262}{\sqrt{6}} \leq \frac{0,10}{0,0403}$ $0,923 \leq 2,481$
odporność na ścieranie	Seria GP20 CC1, 90 dni, 8 cykli: 3,08% ; 3,14% ; 3,11%	3,11	0,0245	0,0079	$\frac{2,262}{\sqrt{3}} \leq \frac{0,10}{0,0079}$ $1,308 \leq 12,658$

Z tabeli wynika, że dla założonego poziomu istotności  $\alpha = 0,10$  (-) oraz tolerancji wartości średniej  $\vartheta = 0,10$  (-) liczby prób badawczych przyjęte w badaniach są wystarczające.

#### 4.5. Badania właściwości zastosowanych materiałów

##### 4.5.1. Krzywa uziarnienia

Oznaczenie krzywej uziarnienia materiałów wykorzystanych w badaniach wykonano za pomocą przesiewu mechanicznego suchego materiału przez zestaw sit, gdzie największy bok oczka sita wynosił 2 mm, a najmniejszy bok oczka sita wynosił 0,1 mm. Czyste i suche sita ułożono kolejno jedno na drugim zaczynając od sita o najmniejszym boku oczka, w taki sposób, że przylegały one do siebie. Pod dolne sito założono denko. Tak przygotowany zestaw umieszczono na urządzeniu do przesiewania (wyrząsarce). Na górne sito przeniesiono bez strat odważoną masę próbki analizowanej (1000 g). Wierzchnie sito przykryto pokrywą i uruchomiono wyrząsarce na 5 minut. Każdy rodzaj materiału przesiano 3 krotnie w celu zapewnienia odpowiedniej analizy statystycznej wyników. Po zakończeniu przesiewania materiał z każdego sita przeniesiono na czyste i zważone wcześniej pojemniki, a następnie

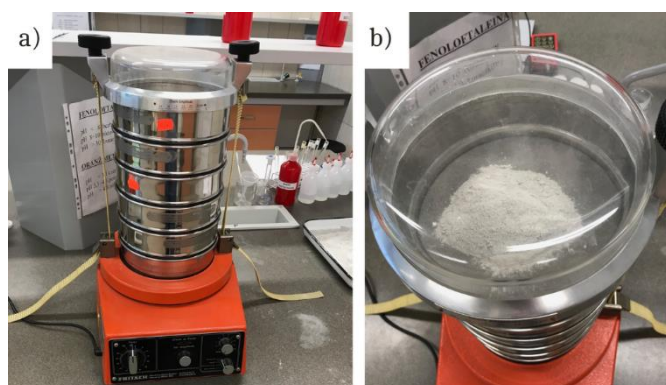
zważono każdy z pojemników z dokładnością do 0,001 g. Dla pozostałości na poszczególnych sitach (odsiew) obliczono ich procentową zawartość w całej wadze próbki wyjściowej (nadawy) zgodnie ze Wzorem 10. Rysunek 53 przedstawia zdjęcia z oznaczania krzywej uziarnienia badanych materiałów.

$$d_x = \frac{m_c - \sum m_{1,x,1...n}}{m_c} * 100\% \quad (10)$$

$d_x$  – procentowa zawartość materiału sypkiego przechodzącego przez sito o wymiarze  $x$  (%),

$\sum m_{1,x,1...n}$  – suma masy próbki pozostała na analizowanym sicie o wymiarze  $x$  oraz sitach powyżej niego (g),

$m_c$  – masa całkowita badanej próbki materiału sypkiego (g).



Rysunek 53. Oznaczenie krzywej uziarnienia materiałów sypkich wykorzystanych w badaniach własnych: a) zestaw sit i wytrząsarka b) próbka materiału przed rozpoczęciem badania

#### 4.5.2. Gęstość nasypowa

Gęstość nasypowa materiałów wykorzystanych w badaniach została określona dla materiałów o stałej masie w formie luźnej (niezagęszczonej). Gęstość nasypowa materiałów sypkich jest ich naturalną cechą, która opisuje wynik procesu porządkowania (układania) się ziaren materiału podczas jego przesypywania do pojemnika o określonym kształcie [23]. Znaczący wpływ na gęstość nasypową ma rozmiar czy kształt ziaren materiału, ale także rozkład ich wielkości. Dla każdej próbki przygotowano min 5 kg materiału w celu zapewnienia możliwości trzykrotnego oznaczenia. Przygotowany, suchy i szczelny pojemnik o objętości 1 litra (główny wymiar badanych kruszyw nie przekracza 4 mm) zważono w celu określenia jego masy początkowej ( $m_1$ ). Następnie pojemnik ustawiono na poziomej powierzchni i napełniono go kruszywem, a następnie ostrożnie usunięto nadmiar kruszywa, zapewniając przy tym równość powierzchni. Nie ugniatano ani nie zagęszczano przygotowanej próbki. Tak przygotowany pojemnik z kruszywem zważono z dokładnością 0,001 g. Oznaczenie wykonano trzykrotnie dla każdego badanego materiału. Gęstość nasypową w stanie luźnym wyznaczono na podstawie Wzoru 11.

$$\rho_b = \frac{(m_{2,b} - m_1)}{V_{\text{cyl}}} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad (11)$$

$\rho_b$  – gęstość nasypowa materiału sypkiego w stanie luźnym ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

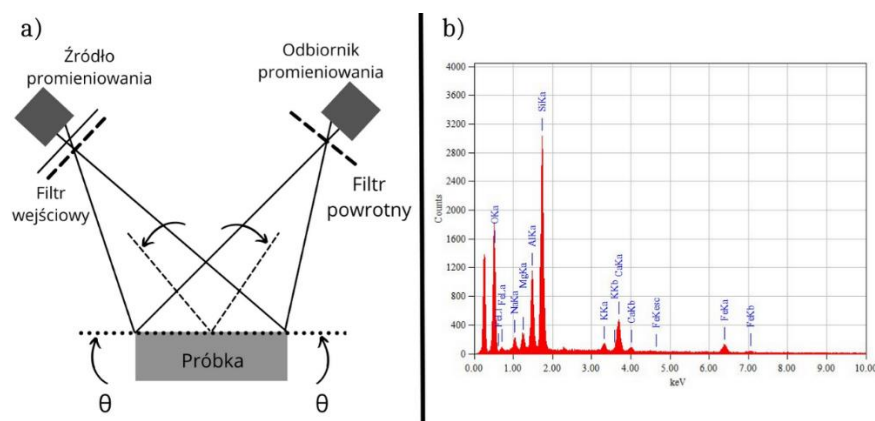
$m_{2,b}$  – masa cylindra pomiarowego oraz próbki materiału sypkiego w stanie luźnym (g),

$m_1$  – masa suchego cylindra pomiarowego (g),

$V_{\text{cyl}}$  – pojemność cylindra pomiarowego ( $\text{cm}^3$ ).

### 4.5.3. Skład chemiczny

Skład chemiczny materiałów sypkich wykorzystywanych jako spoiwo lub do częściowego zastąpienia cementu w mieszance cementowej zwykle definiuje potencjał danego materiału. Odpowiedni skład chemiczny może bowiem zapewnić rozwój procesu hydratacji lub wywołać reakcję pucolanową w mieszance. Skład chemiczny analizowanych próbek wyznaczono przy użyciu spektrometru rentgenowskiego z rozproszeniem energii (EDS) JEOL JED-2300. Czas martwy wykrywacza nie przekraczał 15%, a współczynnik zliczeń ustalono na ok. 4000 cps. Ilościowe analizy składu chemicznego przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania firmy JEOL (JEOL JED-2300 Analysis Station) przy użyciu zintegrowanej metody ZAF. Ilościowe wyniki składu chemicznego przedstawiono przy założeniu, że zidentyfikowane pierwiastki chemiczne tworzą tlenki. Skład chemiczny próbki wykonano dla obszaru  $445 \times 300 \mu\text{m}$  dla każdej próbki (powiększenie 300x) wykonano minimum 3 oznaczenia, a przedstawiony wynik stanowi wartość średnią. Rysunek 54 przedstawia opis metody analizy oraz jej wynik. Nie określano składu chemicznego piasku kwarcowego.



Rysunek 54. Oznaczanie składu chemicznego materiałów wykorzystanych w badaniach własnych z wykorzystaniem Skanującego Mikroskopu Elektronowego (SEM-EDS): a) zasada działania SEM b) przykładowe widmo analizy pierwiastków

#### 4.5.4. Powierzchnia właściwa ziaren

Powierzchnię właściwą ziaren analizowanych materiałów sypkich (z wyłączeniem piasku kwarcowego) wykonano za pomocą metody przepuszczalności powietrza wg Blaine'a. W tej metodzie wyznacza się powierzchnię właściwą ziaren na podstawie pomiaru czasu potrzebnego na przepływ określonej ilości powietrza przez zagęszczoną warstwę analizowanego materiału. Na początku oznaczenia wykonano badanie dla próbki wzorcowej co potwierdziło działanie aparatu. Próbki przed badaniem wytrząsnięto w celu usunięcia aglomeratów. Przygotowaną tuleję z warstwą analizowanego materiału połączono z górnym końcem manometru w sposób szczelny. Górny koniec tulei zamknięto korkiem, a następnie otwarto kran odcinający oraz wpuszczono ciecz manometryczną do najwyższej kreski. Zamknięto kran i rozpoczęto obserwację poziomu cieczy (powinien pozostać stały). Następnie otwarto kran i przez zasysanie dostarczono ciecz manometryczną do najwyższego wskazania. Zamknięto kran odcinający i usunięto korek z końca tulei. Ciecz powinna obniżyć swój poziom. Włączono licznik czasu gdy ciecz osiągnęła drugi poziom porównawczy, a wyłączyła gdy osiągnęła trzeci poziom porównawczy. Zanotowano czas i temperaturę otoczenia w którym przeprowadzono badanie. Pomiar powtórzono trzykrotnie dla każdej próbki. Powierzchnię właściwą wyznaczono na podstawie Wzoru 12.

$$S = \frac{K}{\rho} * \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} * \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10*\eta}} \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \quad (12)$$

$S$  – powierzchnia właściwa ziaren ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ),

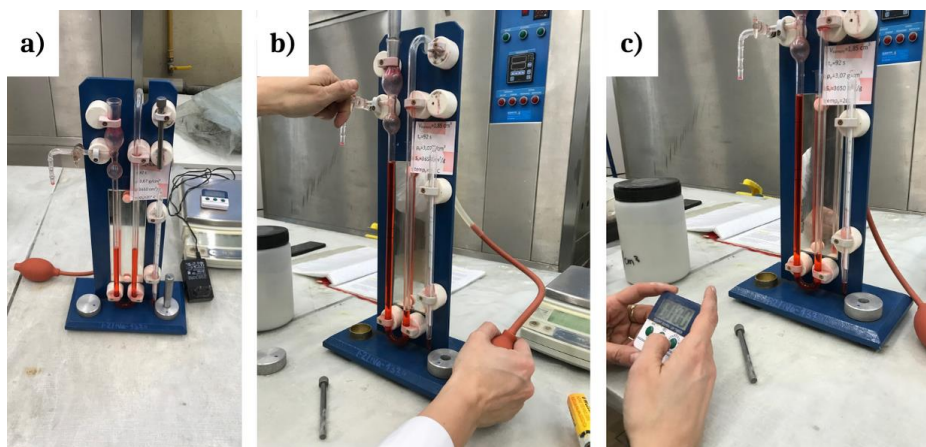
$K$  – stała aparatu Blaine'a (-),

$e$  – porowatość warstwy badanego materiału (%),

$t$  – zmierzony czas (s),

$\rho$  – gęstość cementu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$\eta$  – lepkość powietrza ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ).

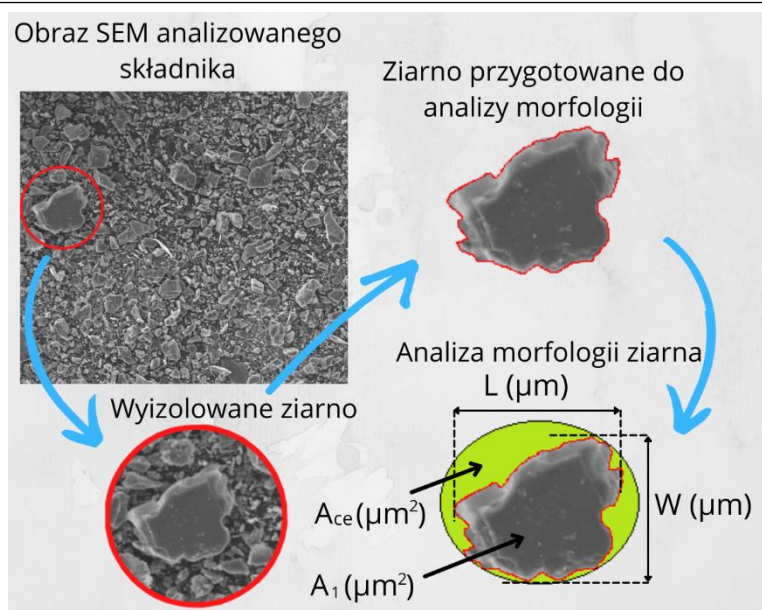


Rysunek 55. Oznaczanie powierzchni właściwej ziaren materiałów sypkich wykorzystanych w badaniach własnych: a) aparatura badawcza b,c) przebieg badania

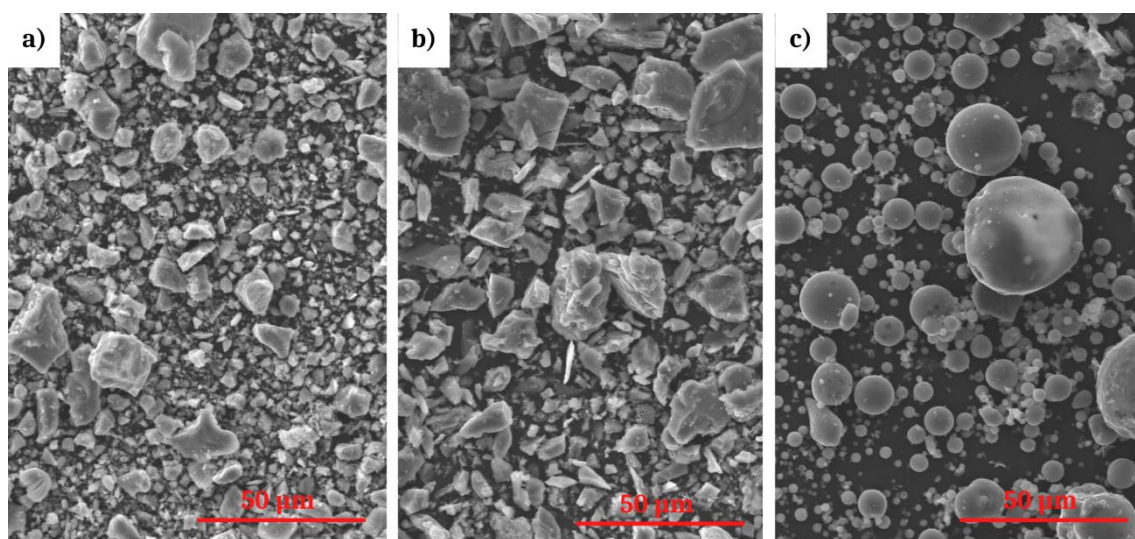
#### 4.5.5. Właściwości morfologiczne ziaren

Właściwości spoiw zależne są od właściwości morfologicznych ich ziaren [171]. Właściwości morfologiczne ziaren materiałów sypkich pozwalają na dogłębną analizę ich wpływu na takie właściwości mieszanki cementowej jak konsystencja, gęstość objętościowa, gęstość upakowania składników czy proces odsączania wody z mieszanki cementowej po jej ułożeniu [171]. Mają one także pośredni wpływ na właściwości kompozytów cementowych, jednak wynika on głównie z wpływu na właściwości mieszanki cementowej. Podstawowe dane, które są niezbędne do analizy morfologii ziaren można uzyskać za pomocą obrazów ze Skaningowego Mikroskopu Elektronowego (SEM). Wykorzystane w analizie obrazy zostały wykonane przy napięciu prądu elektrycznego 20kV i zbliżeniu 500x. Następnie do analizy wybrano minimum 20 ziaren każdego badanego materiału i wyizolowano je graficznie. Zgodnie z metodyką, którą przedstawia Rysunek 56, każde analizowane ziarno wpisano w elipsę oraz pomierzono oznaczone wymiary, gdzie  $W$  oznacza długość projekcji 2D ziarna,  $L$  jego szerokość,  $A_{ce}$  opisuje pole elipsy opisanej na ziarnie, a  $A_l$  określa powierzchnię 2D projekcji ziarna. Następnie obliczono parametry: współczynnik proporcji, współczynnik powierzchni oraz okrągłość. Obrazy SEM wykorzystane do tej analizy przedstawia Rysunek 57. Oznaczenia nie wykonano dla piasku kwarcowego.





Rysunek 56. Metodologia analizy właściwości morfologicznych ziaren materiałów sypkich wykorzystana w badaniach własnych



Rysunek 57. Obrazy ze Skaningowego Mikroskopu Elektronowego wykorzystane w analizie właściwości morfologicznych ziaren: a) cementu b) mączki granitowej c) popiołu lotnego

Najbardziej podstawowym z analizowanych wskaźników jest współczynnik proporcji ( $AR$ ), który opisuje stosunek długości do szerokości dwuwymiarowej projekcji ziarna (Wzór 13). Jeżeli jego wartość zbliżona jest do wartości 1,0 (-) oznacza to, że kształt ziarna zbliżony jest do okręgu, wynik powyżej tej wartości opisuje ziarno, którego kształt jest bardziej strzelisty.

$$AR = \frac{L}{W} (-) \quad (13)$$

Okrągłość ( $R$ ) to parametr opisujący zależność pomiędzy długością ziarna ( $l$ ), a jego powierzchnią ( $A_l$ ). Zależność tą opisuje Wzór 14.

$$R = \frac{l^2}{4\pi A_l} \quad (-) \quad (14)$$

Współczynnik powierzchni ( $A_r$ ) opisuje zależność pomiędzy powierzchnią dwuwymiarowej powierzchni ziarna ( $A_1$ ), a powierzchnią elipsy, która została opisana na analizowanym ziarnie ( $A_{ce}$ ). Im bliższa wartości 1,0 jest  $A_r$ , tym bardziej ziarno ma równomierny, symetryczny kształt. Zależność tą przedstawia Wzór 15.

$$A_r = \frac{A_{ce}}{A_1} \quad (-) \quad (15)$$

#### 4.6. Badania właściwości mieszanek cementowych

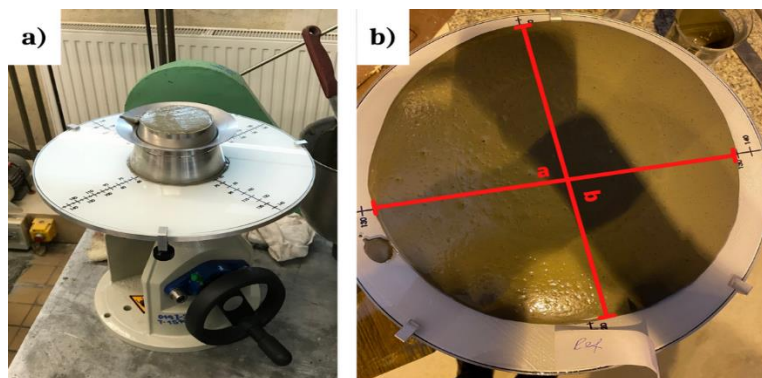
##### 4.6.1. Konsystencja mieszanki

Konsystencję mieszanki cementowej (zaczynów i zapraw) wyznaczono za pomocą metody stolika rozplýwu. Oczyszczoną powierzchnię tarczy oraz pierścienia stolika posmarowano olejem mineralnym. Następnie umieszczono pierścień centrycznie na tarczy i ułożono w nim mieszankę w dwóch warstwach, zagęszczając każdą z nich 10-krotnym uderzeniem ubijaka. Zgarnięto nadmiar zaprawy i wyrównano górną powierzchnię, a następnie oczyszczono wolną część tarczy do sucha. Po upływie 15 sekund zdjęto pierścień i wstrząsnęto stolikiem 15 razy ze stałą częstotliwością uderzeń ok. 1 uderzenia na sekundę. Zmierzono średnicę próbki w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach ( $a$  i  $b$ ), a następnie obliczono średnią średnicę rozplýwu korzystając ze Wzoru 16. Oznaczenie średnicy rozplýwu wykonano dla każdej serii zaczynu i zaprawy trzy krotnie w celach analizy statystycznej wyników.

$$r_m = \frac{(a+b)}{2} \quad (\text{mm}) \quad (16)$$

$r_m$  – rozplýw mieszanki cementowej oznaczony metodą stolika rozplýwu (mm),

$a, b$  – wymiary rozplýwu mieszanki cementowej (mm).



Rysunek 58. Oznaczenie konsystencji mieszanki cementowej za pomocą metody stolika rozplýwu:

a) aparatura badawcza b) próbka w trakcie badania

#### 4.6.2. Wodożądność

Wodożądność poszczególnych kompozycji materiałowych serii badawczych wykorzystanych w badaniach pozwala określić wpływ ich składników na właściwości reologiczne mieszanki cementowej. Jest ona jednocześnie odzwierciedleniem wpływu morfologii ziaren składników na właściwości mieszanki cementowej. Wodożądność poszczególnych serii badawczych określono w oparciu o metodę stolika rozplwy opisaną w punkcie 4.5.1. Badania wykonano dla opisanych wcześniej serii badawczych zaczynów i zapraw tak samo jak określenie konsystencji mieszanki, jednak w mieszankach modyfikowano ilość wody w taki sposób aby uzyskać średnią średnicę rozplwy mieszanki taką samą jak dla serii referencyjnej. Następnie odnotowano ilość wody niezbędnej do wypełnienia tego założenia.

#### 4.6.3. Gęstość objętościowa

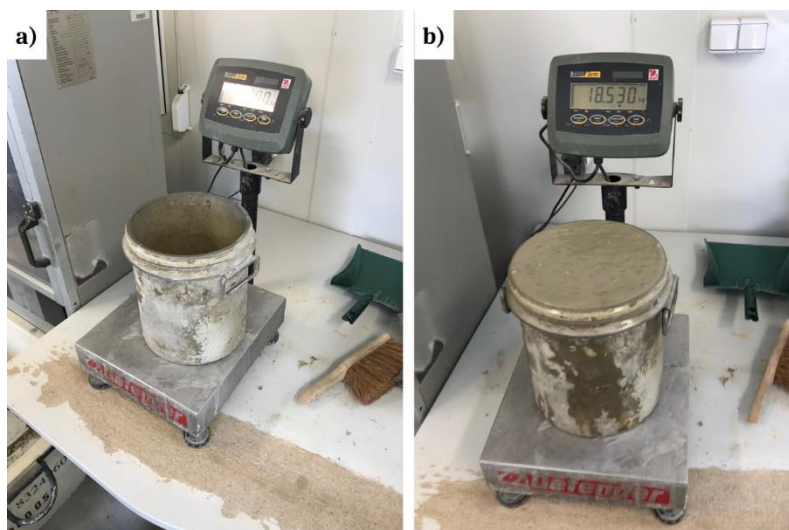
Gęstość objętościowa mieszanki cementowej jest skorelowana z właściwościami mechanicznymi kompozytu cementowego. Ważne jest zatem, aby ją kontrolować i projektować mieszanki cementowe w taki sposób aby możliwe było osiągnięcie niezbędnej jej wartości. Gęstość objętościową zaczynów i zapraw cementowych wykonano w ten sam sposób. Czyste naczynie pomiarowe o średnicy wewnętrznej ok. 125 mm i objętości ok. 1 litra wypełniono w pełni zaprawą, a następnie wyrównano górną powierzchnię. Na podstawie Tablicy 1 normy PN-EN 1015-6:2000 określono sposób zagęszczenia mieszanki zależnie od średnicy jej rozplwy (badanie z wykorzystaniem stolika rozplwy) - mieszanki o średnicy rozplwy < 200 mm zagęszczano metodą wibracji, mieszanki o średnicy rozplwy > 200 mm nie zagęszczano. Odpowiednio przygotowane naczynie pomiarowe ważono z dokładnością 0,001 g, a następnie obliczano gęstość objętościową na podstawie Wzoru 17. Oznaczenie wykonano 3 krotnie dla każdej serii mieszanek.

$$\rho_m = \frac{m_m - m_{cyl}}{V_{cyl}} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (17)$$

$\rho_m$  – gęstość objętościowa mieszanki cementowej (kg/m<sup>3</sup>),

$m_m$  – masa cylindra pomiarowego wypełnionego w 100% mieszanką cementową (kg),

$V_{cyl}$  – pojemność cylindra pomiarowego (m<sup>3</sup>).



Rysunek 59. Oznaczenie gęstości objętościowej mieszanki cementowej: a) pomiar wagi cylindra pomiarowego b) pomiar wagi cylindra pomiarowego wypełnionego mieszanką cementową

#### 4.6.4. Początek i koniec czasu wiązania

Czas początku i końca wiązania mieszanki cementowej zwykle definiuje możliwość jej wykorzystania w konkretnym rodzaju konstrukcji. W przypadku cementowej warstwy wierzchniej pozwala on na ocenę momentu rozpoczęcia pielęgnacji posadzki, ale także wykonania nacięć dylatacyjnych czy zakończenia pielęgnacji aktywnej. Oznaczanie początku i końca czasu wiązania mieszanek wykorzystanych w badaniach wykonano za pomocą ręcznego aparatu Vicata. Niezwłocznie po wymieszaniu składników mieszanki, przeniesiono próbkę do naoliwionego wcześniej pierścienia pomiarowego, znajdującego się na naoliwionej płytce bazowej bez wstrząsania. Pustki powietrzne z mieszanki usunięto za pomocą delikatnego opukiwania pierścienia pomiarowego. Wyrównano górną powierzchnię mieszanki. Rozpoczęto odliczanie czasu zero. Przygotowany, napęczniony pierścień przechowywano w wodzie z min 5 mm przykryciem górnej warstwy mieszanki. W czasie badania wypełniony pierścień umieszczono pod igłą aparatu Vicata, a następnie obniżano igłę do zetknięcia się z zaczynem. Po tym zwalniano ruchome części pozwalając igle na zagłębianie się w zaczynie. Odczytywano wskazania skali kiedy zagłębianie ustępowało lub po 30 sekundach od zwolnienia aparatu zależnie co wcześniej zastąpiło. Odnotowano odczyt skali wraz z odległością między końcem igły, a płytką bazową oraz czasem liczonym od czasu zero. Oznaczenie powtarzano co 10 minut w nowych miejscach w mieszance. Czas początku wiązania określono dla momentu kiedy igła aparatu w trakcie zagłębiania zatrzymała się w odległości  $6 \pm 3$  mm od płytki bazowej. Po tym odwrócono pierścień pomiarowy o 180 stopni tak, aby wcześniejsza część, która przylegała do płytki bazowej teraz była na górze i umieszczono w komorze do przechowywania. W czasie sprawdzenia końca czasu wiązania pierścień ustawiano pod igłą aparatu, a następnie opuszczano igłę do zetknięcia się z mieszanką. Zwolniono ruchome części aparatu i pozwolono igle na zagłębianie się w mieszance i odczytywano

OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW, ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH I STOSOWANA  
W ROZPRAWIE METODOLOGIA

---

wskazania analogicznie jak w badaniu początku czasu wiązania. Sprawdzenie końca czasu wiązania wykonywano w odstępach co 10 minut, aż do czasu kiedy igła po raz pierwszy zagłębiła się w mieszance tylko na 0,5 mm. Odnotowano ten czas jako czas końca wiązania mieszanki. Każde badanie początku i końca czasu wiązania wykonano na 3 próbkach mieszanki. Oznaczenie wykonano dla każdej serii badawczej. Na podstawie Wzoru 18 i 19 wyznaczano czas początku i końca czasu wiązania. Rysunek 60 przedstawia zdjęcia z badania.

$$t_{pw} = t_1 - t_0 \text{ (min)} \quad (18)$$

$$t_{kw} = t_2 - t_0 \text{ (min)} \quad (19)$$

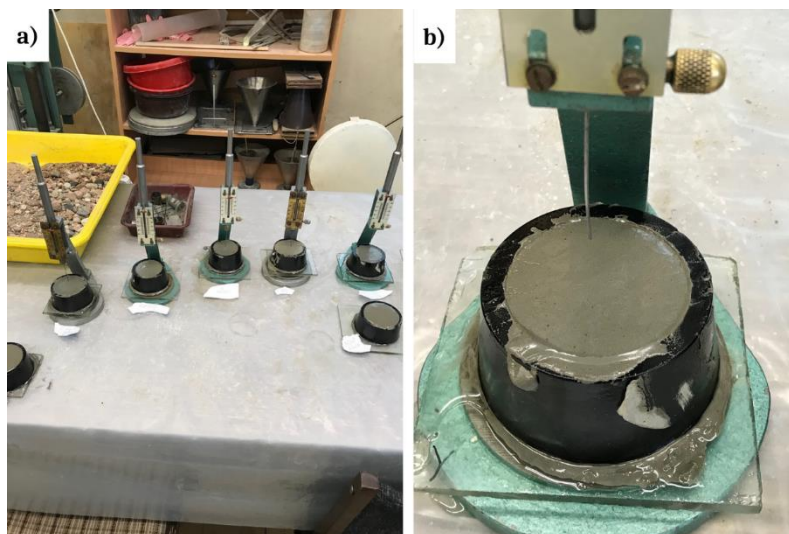
$t_{pw}$  – czas początku wiązania mieszanki cementowej (min),

$t_{kw}$  – czas końca wiązania mieszanki cementowej (min),

$t_0$  – czas rozpoczęcia badania (czas zero) (min),

$t_1$  – czas początku wiązania mieszanki cementowej (min),

$t_2$  – czas końca wiązania mieszanki cementowej (min).



Rysunek 60. Określanie czasu początku i końca wiązania mieszanki cementowej za pomocą aparatu Vicata: a,b) mieszanki cementowe w trakcie badania

#### 4.6.5. Odsączenie wody z mieszanki cementowej

Odsączenie wody z mieszanki cementowej po jej ułożeniu (*eng. bleeding*) jest istotnym zagadnieniem cementowej warstwy wierzchniej. Niekontrolowane odsączenie wody z mieszanek cementowych prowadzi do zbyt małej lub dużej objętości odsączonej wody po ułożeniu mieszanki. W mieszance po ułożeniu jej w miejscu wbudowania rozpoczyna się proces ułożenia jej składników. W jego wyniku lekkie cząstki składników unoszą się grawitacyjnie wraz z wodą ku górze cementowej warstwy wierzchniej. Ten proces prowadzi do zmiany wskaźnika w/c w górnej części przekroju warstwy wierzchniej. Odpowiednio kontrolowane odsączenie wody z mieszanki cementowej może pozwolić na uniknięcie skurczu kompozytu cementowego oraz zapewnić jednorodność właściwości warstwy wierzchniej w całym przekroju elementu. Z drugiej strony, niekontrolowany proces odsączenia wody może doprowadzić do niejednorodności właściwości warstwy wierzchniej w przekroju kompozytu, co może prowadzić do uszkodzenia lub zniszczenia kompozytu cementowego.

Odsączenie wody z mieszanki cementowej określono zgodnie z procedurą opisaną w normie *ASTM C243* [6]. Badanie według przywołanej normy nie jest powszechnie wykorzystywane w Europie, jednak autor uważa, że dzięki zapewnieniu przez to badanie wyśmienitej dokładności pomiaru odsączonej wody powinno ono być szerzej stosowane. Tuż po zakończeniu procedury mieszania składników mieszanki bezzwłocznie przystąpiono do wypełnienia wcześniej przygotowanego wiaderka pomiarowego mieszanką cementową (do 127 mm od spodu – do góry pierścienia wiaderka). Wypełnienie zakończono w ciągu 15 sekund, a czas zakończenia wypełniania przyjęto jako czas startowy badania. Nałożono pierścień na mieszankę, a następnie ustawiono biuretę. Następnie na wypełniono pozostałe miejsce wiaderka pomiarowego i biurety 1,1,1 trichloroetanem, który umożliwił transport odsączonej wody do biurety pomiarowej. Zamknięto zawór i rozpoczęto obserwację procesu odsączenia wody z mieszanki cementowej. Pierwszy pomiar objętości odsączonej wody dokonano po 4 minutach po rozpoczęciu badania, a następnie wykonywano co 2 minuty aż do 30 minuty testu, kiedy to zmieniono częstotliwość odczytu na 10 minutowe odstępy czasowe, aż do uzyskania 2 wyników o niezmiennym wskazaniu – ten czas przyjęto jako czas zakończenia obserwacji. Odsączenie wody z mieszanki cementowej charakteryzowane jest zwykle za pomocą całkowitej objętości odsączonej wody w jednostce czasu, współczynnika odsączenia wody z mieszanki cementowej  $R_B$  (Wzór 20) oraz współczynnika natężenia odsączenia wody z mieszanki cementowej  $C_B$  (Wzór 21). Rysunek 61 przedstawia aparaturę badawczą wykorzystaną w badaniu oraz schemat przebiegu badania.

$$R_B = \frac{V_1}{A \cdot t} \left( \frac{\text{ml}}{\text{cm}^2 \text{s}} \right) \quad (20)$$

$R_B$  – współczynnik odsączenia wody z mieszanki cementowej (ml/cm<sup>2</sup>s),

$V_1$  – objętość odsączonej wody (ml),

$A$  – powierzchnia wierzchu mieszanki cementowej w wiaderku pomiarowym ( $\text{cm}^2$ ),

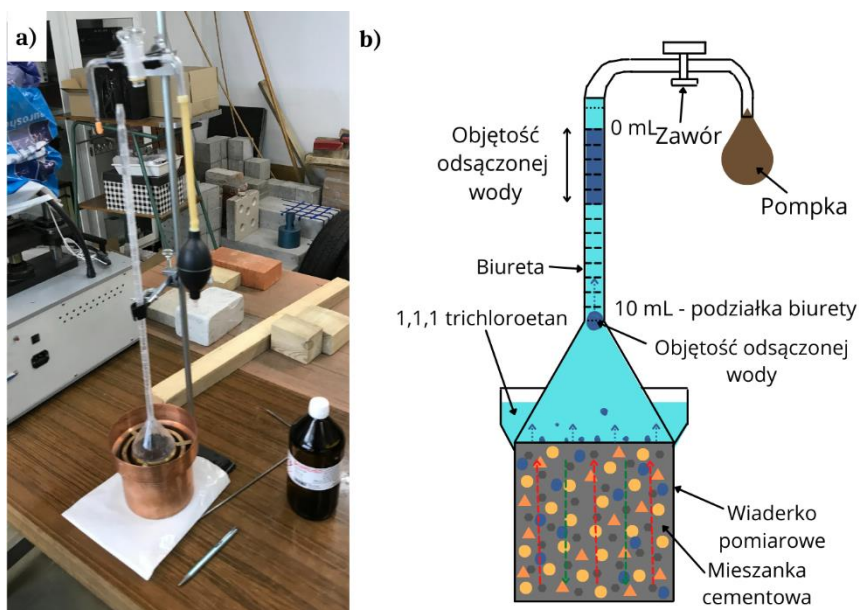
$t$  – czas w którym odsączanie wody występuje w jednorodnej formie (s).

$$C_B = \frac{V_2}{V_3} (-) \quad (21)$$

$C_B$  – współczynnik natężenia odsączania wody z mieszanki cementowej (-),

$V_2$  – całkowita objętość odsączonej wody (ml),

$V_3$  – objętość mieszanki cementowej w wiaderku pomiarowym wykorzystanej do badania (ml).

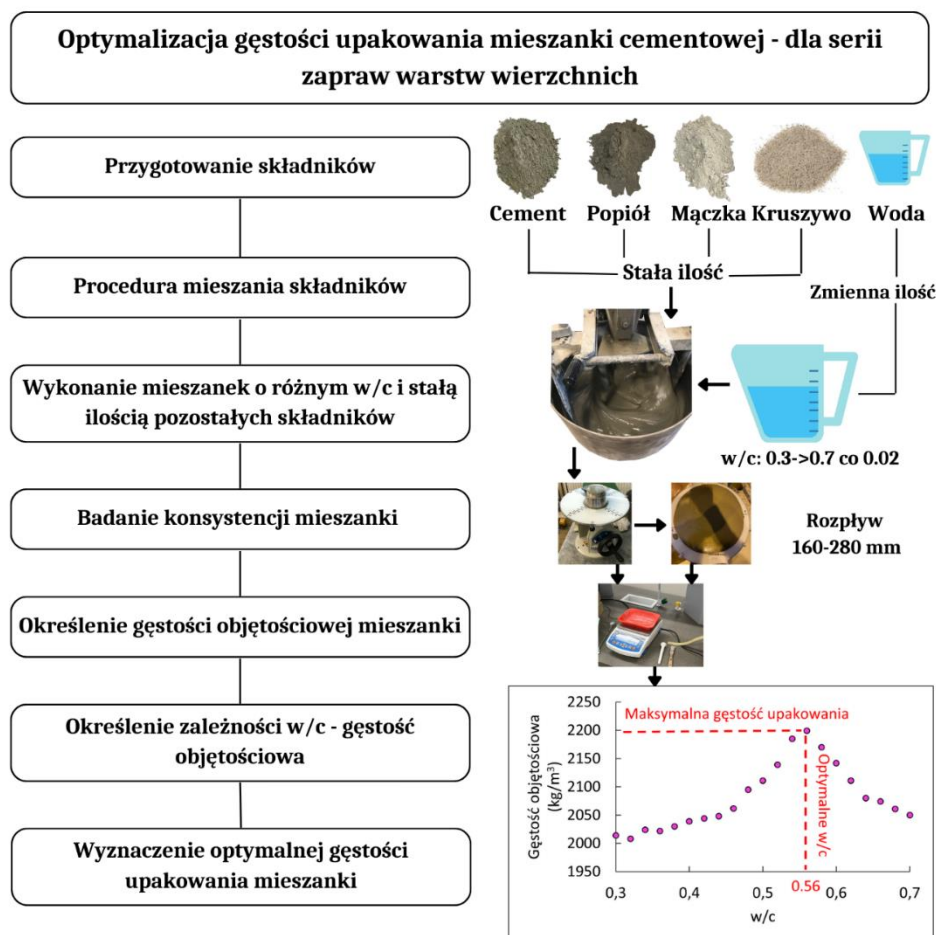


Rysunek 61. Określanie objętości odsączonej wody z mieszanki cementowej w procesie odsączania wody z mieszanki cementowej: a) aparatura badawcza b) schemat opisujący badanie

#### 4.6.6. Gęstość upakowania składników

Mieszanka cementowa zwykle charakteryzuje się składem materiałowy zbudowanym z kilku rodzajów materiałów. Powoduje to, że jest ona skomplikowaną mieszaniną, a jej właściwości zależne są od właściwości i zawartości składników. Zauważono, że zależnie od doboru i zawartości różnych frakcji ziaren kruszywa możliwe jest uzyskanie zróżnicowanej gęstości objętościowej mieszanki [30]. Wiadome jest, że gęstość objętościowa mieszanki cementowej ma bezpośredni wpływ na właściwości mechaniczne kompozytu cementowego [87]. Dobór optymalnych rozmiarów ziaren składników mieszanki oraz ich zawartości pozwala na znalezienie optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki cementowej. Określenie optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki cementowej opiera się na badaniu jej gęstości objętościowej. Jednak dla każdej serii mieszanek należy to badanie wykonać 20 krotnie (każdy wynik musi być średnią z min. 3 pomiarów), co w praktyce oznacza konieczność zbadania każdej serii badawczej 60 krotnie. Badanie optymalnej gęstości upakowania

składników wykonano jedynie dla zapraw, ponieważ nie zauważono istotnej zmiany upakowania składników w zaczynach cementowych modyfikowanych mączką granitową lub popiołem lotnym – możliwe, że małe różnice uziarnienia składników nie pozwalają na obserwację zmian gęstości upakowania. Pomiary wagi mieszanek wykonano z dokładnością do 0,1 kg. Procedurę oznaczania optymalnej gęstości upakowania zapraw cementowych przedstawia Rysunek 62. Metodologia oparta jest na opisie *Kwan i Chu* [22] z literatury.



Rysunek 62. Schemat określania optymalnego wskaźnika w/c pozwalającego na uzyskanie maksymalnej gęstości upakowania składników mieszanki zaprawy cementowej stosowanej na warstwę wierzchnią

## 4.7. Badania kompozytów cementowych

### 4.7.1. Gęstość objętościowa

Gęstość objętościowa kompozytów cementowych jest ich właściwością opisującą ułożenie składników mieszanki w strukturze kompozytu. Jest ona powiązana z właściwościami mechanicznymi kompozytu, ale często gęstość objętościowa cementowej warstwy wierzchniej może mieć wpływ na możliwości jej zastosowania w konkretnym miejscu. Odpowiednio dobrana gęstość objętościowa



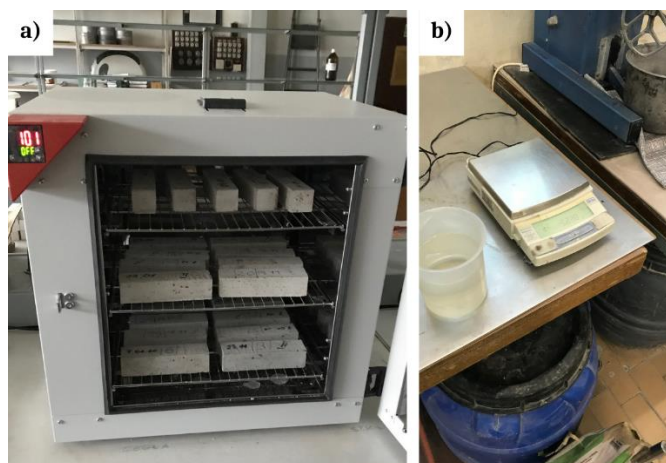
kompozytu pozwoli bowiem dociążyć lub odciążyć konstrukcję, zależnie od potrzebnego do uzyskania efektu. Próbki kompozytów cementowych do oznaczania gęstości objętościowej (beleczki 40x40x160 mm) wysuszono do stałej masy. Następnie każdą próbkę zważono z dokładnością do 0,001 g. Zmierzono każdą próbkę kompozytu w celu ustalenia jej objętości. Na podstawie Wzoru 22 ustalono gęstość objętościową analizowanych próbek. Oznaczenie wykonano dla 3 próbek każdej z serii po 7, 28 i 90 dniach pielęgnacji. Oznaczenie gęstości objętościowej wykonano dla próbek pielęgnowanych według sposobu pielęgnacji CC3. Rysunek 63 przedstawia zdjęcia z przeprowadzonego badania.

$$\rho_k = \frac{m_{k,s}}{V_{k,s}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (22)$$

$\rho_k$  – gęstość objętościowa suchego kompozytu cementowego ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),

$m_{k,s}$  – masa suchej próbki kompozytu cementowego (kg),

$V_{k,s}$  – objętość suchej próbki kompozytu cementowego ( $\text{m}^3$ ).



Rysunek 63. Oznaczenie gęstości objętościowej kompozytów cementowych: a) suszenie próbek do badania b) waga laboratoryjna wykorzystana w badaniu

#### 4.7.2. Porowatość objętościowa

Porowatość objętościowa kompozytów cementowych jest ich właściwością, która bezpośrednio wpływa na ich trwałość. Zbyt duża porowatość objętościowa będzie bowiem prowadzić nie tylko na zmniejszenia właściwości mechanicznych, ale także może umożliwiać łatwiejsze uszkodzenie kompozytu. Jest to szczególnie ważne w cementowych warstwach wierzchnich, które muszą zapewnić wymaganą trwałość, która pozwoli na jej bezawaryjne użytkowanie. Kontrola porowatości i dążenie do jej minimalizacji pozwoli zmniejszyć ryzyko wystąpienia awarii podłogi. Porowatość objętościowa kompozytu cementowego wyznaczono za pomocą metody wypornościowej. Próbkę wysuszono do stałej masy, a następnie zapisano uzyskaną wagę próbki z dokładnością do 0,001 g oraz zmierzono próbkę z dokładnością do 1 mm. Próbki zanurzano w wodzie do czasu kiedy zmiany masy pozornej nie będą

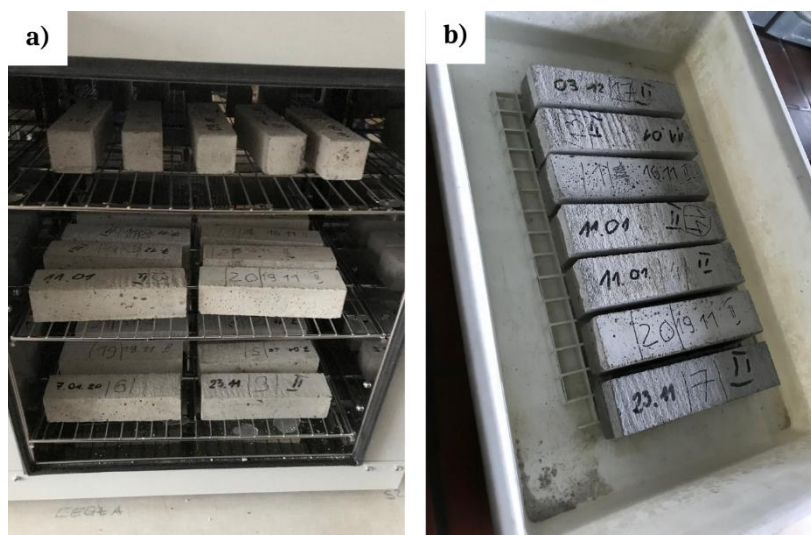
zauważalne (masa próbki z dwóch kolejnych pomiarów nie zmieni się w odstępie 15 minut o więcej niż 0,2% wagi próbki). Zważono próbkę nasyconą z dokładnością do 0,001 g. Rozpoczęto ważenie próbki w wodzie. Unormowano stan wagi szalkowej, a następnie umieszczono na niej nasyconą wodą próbkę. Zważono i zapisano wagę z dokładnością do 0,001 g. Na podstawie uzyskanych wyników określono objętość próbki  $V_k$ . Objętość porów  $V_{pk}$  obliczono na podstawie różnic mas próbki nasyconej i suchej oraz gęstości wody. Oznaczenie wykonano dla każdej serii badawczej kompozytów na co najmniej 3 próbkach po 7, 28 i 90 dniach. Oznaczenie wykonano tylko dla serii pielęgnowanej według sposobu CC3. Porowatość objętościową kompozytu obliczono na podstawie Wzoru 23.

$$p_{v,k} = \frac{V_{pk}}{V_k} * 100\% \quad (23)$$

$p_{v,k}$  – porowatość objętościowa kompozytu cementowego (%),

$V_{pk}$  – objętość porów w próbce kompozytu cementowego (cm<sup>3</sup>),

$V_k$  – objętość próbki kompozytu cementowego (cm<sup>3</sup>).



Rysunek 64. Oznaczanie porowatości i nasiąkliwości kompozytu cementowego: a) suszenie próbek  
b) nawadnianie próbek

#### 4.7.3. Nasiąkliwość masowa

Nasiąkliwość masowa kompozytów cementowych determinuje ich wytrzymałość na zróżnicowane warunki atmosferyczne oraz na wsiąkanie w nie zróżnicowanych związków chemicznych. Cementowa warstwa wierzchnia powinna być projektowana w taki sposób, aby procesy technologiczne wykonywane na jej powierzchni (w tym częste zanieczyszczenie różnymi cieczami) nie miały znaczącego wpływu trwałość podłogi. Nasiąkliwość masową próbek kompozytów cementowych oznaczono za pomocą procedury przygotowania i ważenia próbek opisaną w punkcie 4.6.2. Po uzyskaniu wartości wagi próbki w stanie suchym i nasyconym wodą na podstawie Wzoru 24

obliczono nasiąkliwość masową próbek kompozytów cementowych. Oznaczenie wykonano dla każdej serii badawczej kompozytów na co najmniej 3 próbkach po 7, 28 i 90 dniach. Oznaczenie wykonano tylko dla serii pielęgnowanej według sposobu CC3.

$$n_{m,k} = \frac{m_{k,w} - m_{k,s}}{m_{k,s}} * 100\% \quad (24)$$

$n_{m,k}$  – nasiąkliwość masowa kompozytu cementowego (%),

$m_{k,w}$  – masa próbki kompozytu cementowego w stanie nasyconym wodą (g),

$m_{k,s}$  – masa próbki kompozytu cementowego w stanie suchym (g).

#### 4.7.4. Wytrzymałość na ściskanie

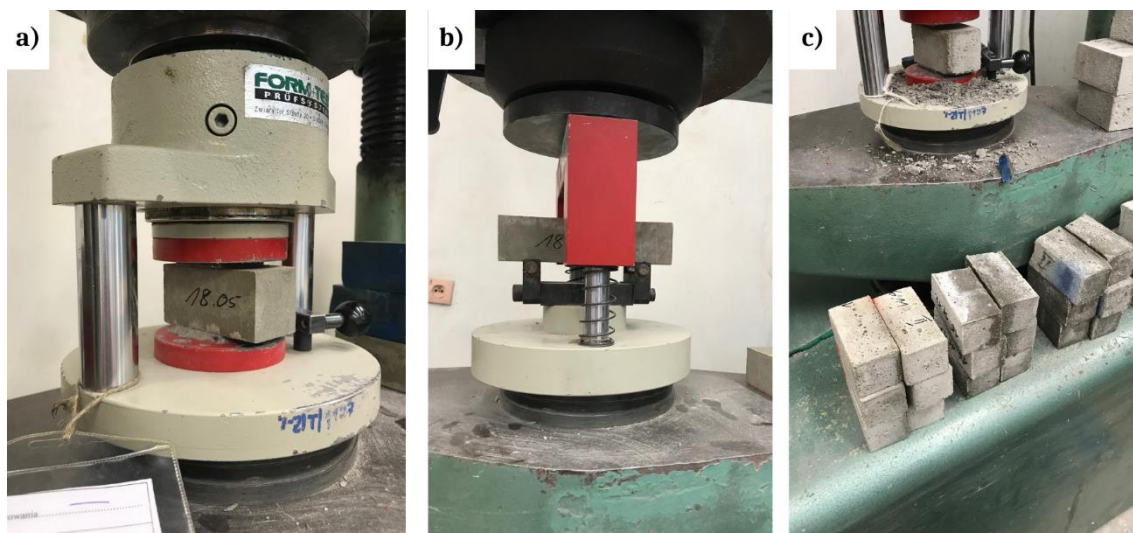
Wytrzymałość na ściskanie kompozytów cementowych jest ich kluczową cechą mechaniczną, która determinuje możliwość ich wykorzystania w elementach konstrukcyjnych budynków. Właściwość ta jest także istotna w cementowych warstwach wierzchnich, które muszą pozwolić na przeniesienie na płytę konstrukcyjną obciążeń osiowych od np. regałów składowania czy maszyn. Badanie wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych wykonano na połówkach beleczek o wymiarach 40x40x160 mm, zatem zwykle analizowana próbka miała wymiary 40x40x80 mm. Uzyskane w wyniku oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu próbki oczyszczono, a następnie oczyszczono maszyną wytrzymałościową. Próbkę umieszczono w maszynie tak aby płyta ściskająca miała kontakt z jedną z powierzchni, która przywierała do formy (nie do powierzchni zacieranej). Próbkę umieszczono w taki sposób, aby płytka ściskająca o wymiarach 40x40 mm była umiejscowiona na środku badanej próbki. Sprawdzano czy siła przykładana jest na całej powierzchni próbki równomiernie. Następnie przyłożono do próbki obciążenie i zwiększano je z prędkością 100 N/s aż do zniszczenia próbki. Zwykle czas od rozpoczęcia przykładania obciążenia do zniszczenia próbki wynosił od 30 do 75 sekund. Zapisano maksymalną uzyskaną siłę niszczącą. Badanie wykonano dla 6 próbek każdej z serii kompozytów cementowych, dla wszystkich trzech sposobów przechowywania (CC1, CC2, CC3). Wyniki oznaczania obliczono zgodnie ze Wzorem 25. Rysunek 65 przedstawia zdjęcia z badania wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu kompozytów cementowych.

$$f_{cm} = \frac{F_n}{A_k} \quad (25)$$

$f_{cm}$  – wytrzymałość na ściskanie próbki kompozytu cementowego (MPa),

$F_n$  – maksymalna siła niszcząca odczytana w badaniu wytrzymałości na ściskanie (MN),

$A_k$  – powierzchnia przyłożenia siły w badaniu wytrzymałości na ściskanie (m<sup>2</sup>).



Rysunek 65. Oznaczenie właściwości mechanicznych kompozytów cementowych: a) badanie wytrzymałości na ściskanie b) badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu c) zdjęcie z przebiegu badania

#### 4.7.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Zapewnienie wystarczającej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu pozwala na uniknięcie uszkodzeń oraz awarii cementowej warstwy wierzchniej. Elementy cementowe wykonywane poziomo narażone są na skurcz plastyczny, który prowadzi do wystąpienia naprężeń rozciągających. Odpowiednio wysoki poziom wytrzymałości na rozciąganie kompozytu pozwoli na uniknięcie jego uszkodzenia lub awarii. W badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu skorzystano ze schematu obciążenia jedną siłą w centralnym miejscu próbki, która oparta jest na dwóch podporach rozmieszczonych pomiędzy sobą w odległości 12 cm. Oznaczenie wykonano dla próbek o wymiarach 40x40x160 mm. W celu analizy statystycznej wyników oznaczenie wykonano dla minimum 3 próbek każdej badanej serii zaczynów i zapraw. W badaniu zastosowano prędkość przyrostu obciążenia 50 N/s. Próbkę po upływie czasu pielęgnacji (7,28 lub 90 dni) przygotowano do badania i zmierzono z dokładnością do 1 mm. Próbkę umieszczono na podporach walcowych maszyny wytrzymałościowej – próbkę ustawiano w taki sposób, aby na walcach opierała się jedną ze stron, która miała kontakt z formą, nie stroną zacieraną ręcznie. Przyłożono obciążenie i badano do czasu zniszczenia próbki. Zniszczenie nastąpiło zwykle po upływie 30-75 sekund. Zapisano maksymalną siłę zgodnie z odczytem maszyny wytrzymałościowej. Obliczenie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wykonano zgodnie ze Wzorem 26.

$$f_{ctm} = \frac{3 \cdot F_n \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} * 10 \text{ (MPa)} \quad (26)$$

$f_{ctm}$  – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu próbki kompozytu cementowego (MPa),

$F_n$  – wartość siły łamiącej (kN),

$l$  – rozstaw podpór (cm),

$d_1$  – szerokość próbki kompozytu (cm),

$d_2$  – wysokość próbki kompozytu (cm).

#### 4.7.6. Odporność na ścieranie

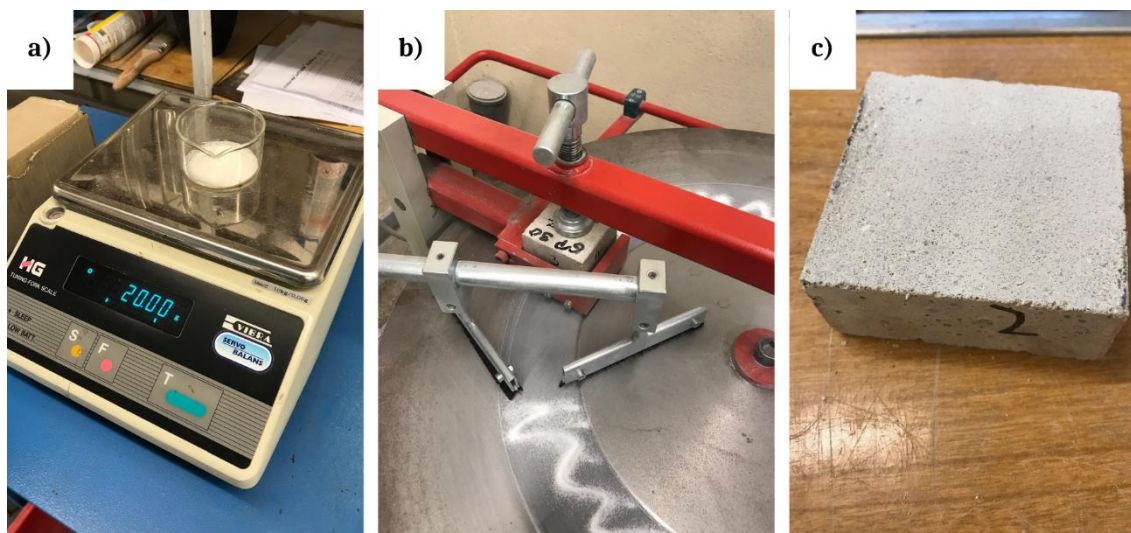
Odporność na ścieranie kompozytów cementowych jest ich właściwością funkcjonalną, która determinuje ich możliwości trwałościowe. Jest ona szczególnie istotna w przypadku cementowej warstwy wierzchniej, która narażona jest na wielokrotne procesy technologiczne, których efektem pobocznym może być ścieranie warstwy wierzchniej. Dlatego też zapewnienie odpowiedniej odporności na ścieranie w przypadku podłóg jest istotne i może pozwolić uzyskać jej bezawaryjność. Oznaczanie odporności na ścieranie kompozytów cementowych wykonano z wykorzystaniem tarczy Boehme'go. Przygotowane wcześniej próbki (wysuszone do stałej masy) kompozytów cementowych w kształcie prostopadłościanu o wymiarach podstawy 71x71 mm i wysokości 50 mm dla każdej serii badawczej zaczynów i zapraw dla próbek przechowywanych według 3 metod pielęgnacji (CC1, CC2, CC3) po 28 oraz 90 dniach pielęgnacji. Oznaczanie przeprowadzono na 3 próbkach każdej serii. Jako ścierniwo wykorzystano sztuczny korund. Oczyszczoną tarczę Boehme'go posypano ścierniwem po całej powierzchni ścierania (ok. 20 g ścierniwa). Każdą próbkę przed badaniem zmierzono z dokładnością do 1 mm oraz zważono z dokładnością do 0,001 g. Następnie próbkę umieszczono w maszynie ścierającej i obciążono siłą pionową 294 N w celu uniknięcia przesuwania i unoszenia się próbki. Uruchomiono tarczę. Łącznie wykonano dla każdej próbki 16 cykli ścierania (każdy po 22 obroty). Co 4 cykle próbkę wyjmowano z maszyny w celu jej oczyszczenia i zważenia i zmierzenia (zgodnie z podaną wcześniej dokładnością). Następnie czyszczono maszynę, rozsypywano świeże ścierniwo i kontynuowano ścieranie do czasu wykonania łącznie 16 cykli ścierania. Wyniki badania przedstawiono na podstawie Wzoru 27. Rysunek 66 przedstawia zdjęcia z oznaczania odporności na ścieranie próbek kompozytów cementowych.

$$u_{k,s} = \frac{m_{s,1} - m_{s,2}}{m_{s,1}} * 100\% (\%) \quad (27)$$

$u_{k,s}$  – ubytek masy próbki kompozytu cementowego w procesie ścierania (po 4, 8, 12, 16 cyklach ścierania) (%),

$m_{s,1}$  – masa próbki kompozytu cementowego przed ścieraniem (g),

$m_{s,2}$  – masa próbki kompozytu cementowego po ścieraniu (po 4, 8, 16, 24 cyklach) (g).



Rysunek 66. Badanie odporności na ścieranie kompozytów cementowych a): odważanie proszku ściernego b) przebieg badania c) widok próbki po badaniu

#### 4.7.7. Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu

Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu definiuje jej właściwości adhezyjne. Zapewnienie ich na odpowiednim poziomie może pozwolić na uniknięcie trudnych do napraw awarii związanych z deformacją warstwy wierzchniej lub odspojeniem jej od podkładu. Tego typu awarie prowadzą zwykle do wyłączenia z użytkowania podłogi z racji przekroczenia przez nią możliwych odchyłek normowych. Badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu wykonano tylko dla serii zapraw cementowych – pominięto badania zaczynów cementowych, gdyż charakter tego badania jest aplikacyjny, a zaczyny cementowe nie są powszechnie wykorzystywane w aplikacji jako cementowa warstwa wierzchnia. Podkład betonowy o wymiarach 2,5 x 2,5 m oraz wysokości 0,15 m został wykonany z niezbrojonego betonu towarowego klasy C25/30, w którym minimalną zawartość cementu CEM II 42,5R oznaczono na 295 kg/m<sup>3</sup>, a próbki betonu pobrane przy betonowaniu płyty zbadane w laboratorium wykazały się średnią wytrzymałością na ściskanie po 56 dniach: 52,2 MPa. Podczas betonowania płyty podkładu beton był zagęszczany wibratorem wgłębnym, a wierzchnia warstwa podkładu została wyrównana łatą wibracyjną oraz wyrównana poprzez zatarcie (bez dodatków). Płyta podkładu była pielęgnowana poprzez polewanie wodą oraz przykrycie folią przez 56 dni. Po tym czasie przystąpiono do usunięcia pozostałych fragmentów betonu oraz oczyszczenia płyty (odkurzanie). Podkład betonowy wykazywał jednorodność oraz nie zauważono oznak uszkodzeń wynikłych z naprężeń skurczowych czy widocznych gołym okiem porów powietrznych. Po oględzinach i badaniach podkładu stwierdzono, że nadaje się on do dalszych badań. Podkład podzielono na 22 pola badawcze, a następnie wydzielono na nim za pomocą szalunków drewnianych te pola (Rysunek 67 przedstawia schematyczny podział podkładu betonowego na pola badawcze oraz miejsca wykonanych badań). Następnie przystąpiono do

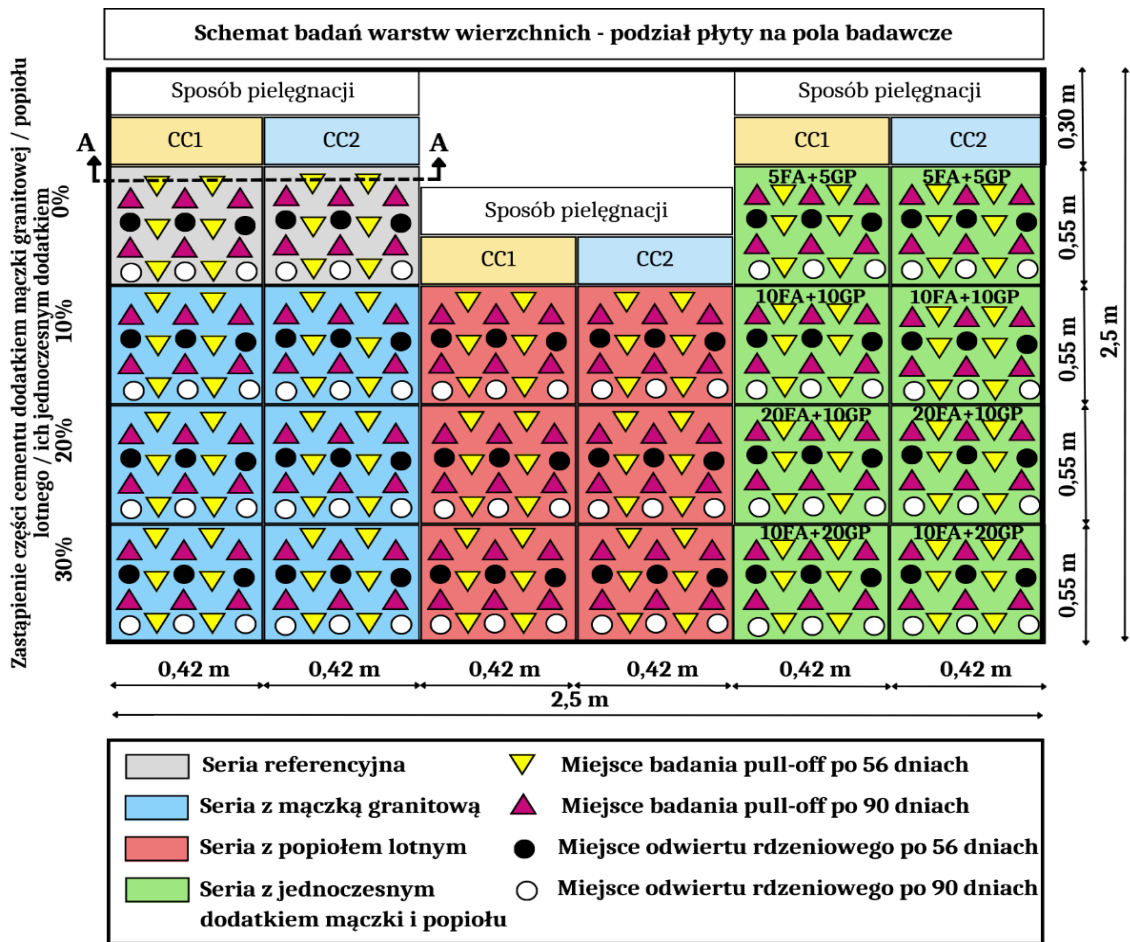
ułożenia cementowej warstwy wierzchniej, których skład i schemat mieszania są zgodne z opisem przedstawionym w punkcie 4.2. Przygotowane mieszanki zapraw cementowych układano na zwilżonym wcześniej podkładzie betonowym (bez zastosowania warstwy poślizgowej ani szczepnej) w taki sposób, aby wysokość każdej z warstw wynosiła ok. 5,5 cm. Zaprawę układano w jednej warstwie, a po ułożeniu zagęszczano wibratorem wgłębnym oraz wyrównywano powierzchnię pacą. Po wykonaniu cementowej warstwy wierzchniej na wszystkich polach badawczych przykryto ją folią, a po związaniu mieszanki (ok. 3-4 godziny od wykonania) rozpoczęto pielęgnację zgodną ze sposobami opisanymi w punkcie 4.3. Pielęgnacja trwała do czasu wykonania badań (56 oraz 90 dni). Po ukończeniu pielęgnacji próbki oczyszczono, a następnie wywiercono w miejscach badawczych okrągłe otwory o średnicy  $50 \pm 2$  mm – dla każdego pola badawczego wykonano 6 odwiertów dla każdego czasu badania. Następnie oczyszczono próbkę i przyklejono do niej stalowe krążki badawcze. Po związaniu kleju do krążków wkręcono zamocowanie, które umieszczono w automatycznej dynie pull-off. Rozpoczęto oznaczanie przyczepności przy odrywaniu – stosowano prędkość przyrostu obciążenia  $0,05 \text{ MPa/s}$ . Badanie kończyło zniszczenie próbki (oderwanie cementowej warstwy wierzchniej) dla którego zapisywano siłę niszczącą oraz notowano miejsce w którym doszło do zniszczenia. Obserwowano dwa modele zniszczenia: zniszczenie w cementowej warstwie wierzchniej lub na połączeniu cementowej warstwy wierzchniej z podkładem betonowym. Następnie uzyskane wyniki opracowano zgodnie ze Wzorem 28 w celu określenia przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Rysunek 68 przedstawia schemat wykonania badania pull-off.

$$f_h = \frac{F_h}{A_{ks}} \text{ (MPa)} \quad (28)$$

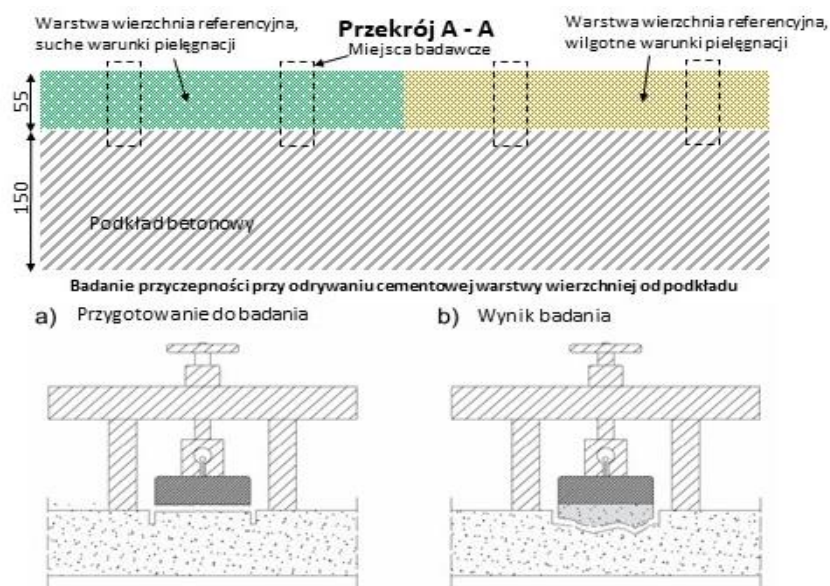
$f_h$  – przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu (MPa),

$F_h$  – maksymalna odczytana siła w trakcie zniszczenia próbki (MN),

$A_{ks}$  – powierzchnia krążka stalowego wykorzystanego do badania ( $\text{m}^2$ ).



Rysunek 67. Schemat podziału płyty badawczej na pola badawcze warstwy wierzchniej wraz z oznaczeniem rozkładu miejsc badawczych i pobrania odwiertu rdzeniowego



Rysunek 68. Przekrój miejsca badawczego warstwy wierzchniej oraz schemat badania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu



#### 4.7.8. Jednorodność stwardniałego kompozytu

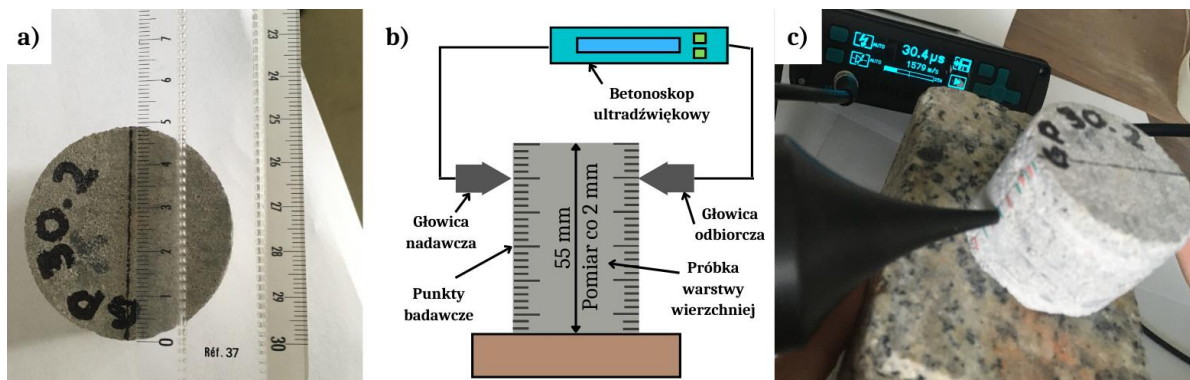
Jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej pozwala na określenie jednorodności właściwości kompozytu. Metody ultradźwiękowe są powszechnie wykorzystywane w tym celu. Bardziej zbliżone do linii pionowej wyniki pomiaru będą świadczyły o wyższej jednorodności kompozytu, podczas gdy wyniki badania będą w znaczny sposób odbiegały od przebiegu pionowego będzie to świadczyć o wyższym zróżnicowaniu wyników w funkcji grubości warstwy wierzchniej. Oznaczanie jednorodności stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej wykonano za pomocą betonoskopu ultradźwiękowego wyposażonego w głowice stożkowe. Na pobranych odwiertach rdzeniowych (w dniach badań tj. po 56 oraz 90 dniach pielęgnacji) naniesiono miejsca badawcze, zmierzono oraz zważono odwierty, a następnie przystąpiono do badania. Miejsca badawcze usytuowano w rozstawie 2 mm na wysokości próbki (średnio ok. 28 punktów badawczych / próbkę cementowej warstwy wierzchniej). Dla każdej serii badawczej badano 3 odwierty rdzeniowe dla każdego czasu badania (po 56 i 90 dniach), tj. dla każdej serii łącznie zbadano 6 odwiertów rdzeniowych. Wykorzystano dwa sposoby pielęgnacji cementowej warstwy wierzchniej. W każdym punkcie pomiarowym wykonano min. 3 pomiary w celu zapewnienia odpowiedniej statystyki uzyskanych wyników (Rysunek 69b obrazuje schematycznie stanowisko badawcze). Łącznie zbadano 66 odwierty rdzeniowe, co daje sumaryczną liczbę około 1848 miejsc pomiarowych oraz 5544 wyniki pomiarów. Odpowiednio wysoka liczba wyników pomiarów pozwala zapewnić, że uzyskane wyniki są reprezentatywne dla pobranych próbek poszczególnych serii badawczych. Należy zaznaczyć, że podczas wykonywania odwiertów rdzeniowych zdarzały się niedoskonałości w pobraniu próbek rdzeniowych, co mogło skutkować nieznacznymi wahaniami wysokości próbek (odnotowano próbki o wysokościach  $55 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ ). Na nieznaczące zróżnicowanie wysokości warstwy wierzchniej miał też sposób wykończenia wierzchniej płaszczyzny podkładu (wyrównanie pacą po ułożeniu i wyrównaniu wstępnym mieszanki betonowej), co mogło także wpływać na nieznaczące wysokości ułożonej na nim cementowej warstwy wierzchniej. Ze względów nieznaczonej różnicy wysokości próbek, autor przyjął założenie, że są one reprezentatywne, a jej zmienna wysokość nie wpływa istotnie na właściwości cementowej warstwy wierzchniej. W wyznaczonych miejscach pomiarowych przykładano głowice stożkowe (jedna z głowic jest emiterym fali ultradźwiękowej, a druga jej odbiornikiem) i mierzono czas przejścia fali ultradźwiękowej. Na podstawie znanego czasu przejścia fali ultradźwiękowej oraz odległości pomiędzy głowicami pomiarowymi na podstawie Wzoru 29 ustalano prędkość przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości warstwy wierzchniej. Rysunek 69 przedstawia zdjęcia z oznaczania przebiegu fali.

$$c_L = \frac{d_p}{t_c} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (29)$$

$c_L$  – prędkość przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej (m/s),

$d_p$  – odległość pomiędzy głowicami pomiarowymi betonoskopu (m),

$t_c$  – czas przejścia podłużnej fali ultradźwiękowej pomiędzy głowicą nadawczą i odbiorczą (s).



Rysunek 69. Badania jednorodności stwardniałego kompozytu w funkcji grubości warstwy wierzchniej: a, c) zdjęcia z badania b) schemat stanowiska badawczego

#### 4.7.9. Analiza ekonomiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych

Analiza ekonomiczno – mechaniczna pozwala na selekcję kompozycji materiałowych, które w sposób optymalny wpisują się projektowane właściwości elementu budowlanego. Projektant przy doborze mieszanki cementowej z której zostanie wykonana konstrukcja może kierować się wieloma parametrami. Istotnymi parametrami są właściwości mechaniczne kompozytu, koszt jego zakupu, ale coraz częściej analizuje się także ślad środowiskowy poszczególnych rodzajów mieszanek. Podjęcie optymalnej decyzji umożliwić może przeprowadzenie analizy ekonomiczno - mechanicznej oraz ekologiczno - mechanicznej. Poniżej algorytm przeprowadzenia takiej analizy wyników kompozytów cementowych modyfikowanych popiołem lotnym, mączką granitową oraz ich jednoczesnym dodatkiem.

Analizę ekonomiczno – mechaniczną wykonano osobno dla zaczynów cementowych oraz zapraw cementowych. W przypadku zaczynów i zapraw cementowych analizę oparto o wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu. Obliczenia współczynnika wydajności wytrzymałościowej *MPR* wykonano z uwzględnieniem wag poszczególnych właściwości, które zostały ustalone na podstawie doświadczeń autora oraz literatury. Wskaźnik wydajności kosztowej *ECR* został ustalony w oparciu o pięć ofert cenowych uzyskanych przez autora na każdy z analizowanych składników od dostawców działających na rynku materiałów budowlanych. W obliczeniach nie uwzględniono kosztów transportu poszczególnych materiałów oraz mieszanki cementowej w miejsce wbudowania, pominięto koszty wytworzenia i robocizny. Analizy wykonano osobno dla każdego sposobu pielęgnacji – CC1, CC2, CC3. Analiza ekonomiczno - mechaniczna jest wykorzystywana do rozpatrzenia aplikacyjnego wykorzystania analizowanego materiału. Pomimo, że obecnie wykorzystanie aplikacyjne zaczynów cementowych jest dość ograniczone, autor uważa, że taka analiza może być wysoce przydatna dla technologów betonów, którzy projektując mieszanki cementowe mogą uwzględnić wyniki tego badania. Dodatkowo przeprowadzenie analizy pozwala na bardziej dokładne porównanie uzyskanych wyników

badan wewnątrz bazy danych – tj. sprawdzenie efektu poszczególnych zmiennych (składników, sposobów pielęgnacji itp.).

Analizę wydajności mechanicznej wykonano zgodnie ze Wzorem 30.

$$MPR_{serii} = \frac{4 \cdot \frac{f_{cm,serii}}{f_{cm,ref}} + 2 \cdot \frac{f_{ctm,serii}}{f_{ctm,ref}}}{6} * 100\% \quad (30)$$

W celu określenia współczynnika wydajności kosztowej *ECR* w pierwszej kolejności określono koszty poszczególnych składników zaczynów cementowych na podstawie Wzoru 31. Następnie z wykorzystaniem Wzoru 32 określono cenę składników wyprodukowania każdej serii kompozytu. Wzór 33 przedstawia sposób obliczenia współczynnika *ECR*.

$$c_{składnik} = c_{rynek} * z_{składnik} \text{ (zł} \cdot \text{kg/m}^3\text{)} \quad (31)$$

$c_{składnik}$  – koszt składnika serii kompozytów cementowych (zł · kg/m<sup>3</sup>),

$c_{rynek}$  – cena jednostkowa składnika (na podstawie ofert rynkowych) (zł),

$z_{składnik}$  – zawartość składnika w serii kompozytów cementowych (kg/m<sup>3</sup>).

$$c_{serii} = c_{CEM} + c_{FA} + c_{GP} + c_{woda} \text{ (zł)} \quad (32)$$

$c_{serii}$  – koszt materiałowy wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł),

$c_{CEM}$  – koszt materiałowy cementu do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł),

$c_{FA}$  – koszt materiałowy popiołu lotnego do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł),

$c_{GP}$  – koszt materiałowy mączki granitowej do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł),

$c_{woda}$  – koszt materiałowy wody do wytworzenia serii kompozytów cementowych (zł).

Wyniki analizy ekonomicznej przedstawiono w oparciu o współczynnik wydajności kosztowej *ECR*, który obliczono na podstawie Wzoru 33.

$$ECR_{serii} = \frac{c_{serii}}{c_{ref}} * 100\% \quad (33)$$

Analiza kosztowa cementowej warstwy wierzchniej (zapraw) została także wykonana w oparciu o procedurę opisaną w punkcie 6.1.1, jednak w tym przypadku Wzór 32 został zastąpiony Wzorem 34, który uwzględnia dodatkowo koszt kruszywa wykorzystanego do produkcji mieszanki cementowej.

$$c_{serii} = c_{CEM} + c_{FA} + c_{GP} + c_{woda} + c_{kruszywo} \text{ (zł)} \quad (34)$$

#### 4.7.10. Analiza ekologiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych

Dbanie o środowisko jest coraz częstszym aspektem poruszonym zarówno przez naukowców jak i praktyków. Analiza ekologiczno – mechaniczna pozwala określić zależność między śladem węglowym produkowanej mieszanki cementowej, a właściwościami mechanicznymi kompozytu cementowego.

Pozwala ona na odpowiedni dobór składników mieszanki oraz oszacować ryzyko uzyskania założonych właściwości mechanicznych kompozytu. Wskaźnik śladu środowiskowego  $ECO_2R$  opisuje emisyjność poszczególnych składników mieszanek cementowych, która została ustalona w wyniku analizy literatury. W obliczeniach nie uwzględniono śladu środowiskowego transportu poszczególnych materiałów oraz mieszanki cementowej w miejsce wbudowania. W analizie wykorzystano współczynnik wydajności mechanicznej  $MPR$  wyznaczony według algorytmu opisanego w punkcie 5.3.9. Analiza zaczynów cementowych pozwała na oszacowanie wpływu na środowisko podstawowego spoiwa w mieszance betonowej. Projektowanie składu każdej mieszanki cementowej rozpoczyna się od ustalenia składu zaczynu cementowego.

Tabela 11 przedstawia wykorzystaną w analizie ekologicznej jednostkową emisję dwutlenku węgla przez każdy ze składników (wartości ustalone na podstawie literatury).

Tabela 11. Przyjęte do analizy wartości  $ECO_2$  dla poszczególnych składników zaczynu cementowego

(kg CO <sub>2</sub> /kg)	Cement	Mączka granitowa	Popiół lotny	Woda
ECO <sub>2</sub>	0,88	0,13	0,57	2,5x10 <sup>-7</sup>

Bazując na jednostkowej emisji CO<sub>2</sub> na podstawie Wzoru 35 ustalono emisyjność składników wykorzystanych w produkcji zaczynu cementowego, a następnie wykorzystując Wzór 36 obliczono ślad węglowy całej mieszanki. Obliczenie współczynnika emisyjności  $ECO_2R$  dla każdej serii wykonano na podstawie Wzoru 37.

$$ECO_{2\text{składnik}} = ECO_{2\text{źródła}} * z_{\text{składnik}} \text{ (kg CO}_2\text{)} \quad (35)$$

$ECO_{2\text{składnik}}$  – emisja CO<sub>2</sub> związana z wykorzystaniem danego składnika w mieszance (kg CO<sub>2</sub>),

$ECO_{2\text{źródła}}$  – jednostkowa emisja CO<sub>2</sub> związana z analizowanym składnikiem mieszanki cementowej (kg CO<sub>2</sub>/kg).

$$ECO_{2\text{serii}} = ECO_{2\text{CEM}} + ECO_{2\text{FA}} + ECO_{2\text{GP}} + ECO_{2\text{woda}} \text{ (kg CO}_2\text{)} \quad (36)$$

$ECO_{2\text{serii}}$  – określona emisyjność serii badawczej (kg CO<sub>2</sub>).

$$ECO_{2R\text{serii}} = \frac{ECO_{2\text{serii}}}{ECO_{2\text{ref}}} * 100\% \text{ (}\% \text{)} \quad (37)$$

$ECO_{2R\text{serii}}$  – współczynnik emisyjności dla analizowanej serii mieszanki cementowej (%).

Zaprawy cementowe charakteryzują się szerokim zastosowaniem aplikacyjnym. Obecne trendy sprawiają, że należy postrzegać te materiały nie tylko poprzez ich właściwości mechaniczne, ale także należy brać pod uwagę ich ślad węglowy.

Analiza ekologiczna wykorzystanych w badaniach serii zapraw cementowych została przeprowadzona analogicznie do opisaney wcześniej analizy zaczynów, jednak ślad środowiskowy

OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW, ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH I STOSOWANA  
W ROZPRAWIE METODOLOGIA

---

pojedynczych składników został określony na podstawie danych, które przedstawia Tabela 12. Następnie na podstawie Wzoru 38 obliczono ślad środowiskowy dla poszczególnych serii badawczych.

Tabela 12. Przyjęte do analizy wartości  $ECO_2$  dla poszczególnych składników zaprawy cementowej

<b>(kg CO<sub>2</sub>/kg)</b>	<b>Cement</b>	<b>Mączka granitowa</b>	<b>Popiół lotny</b>	<b>Woda</b>	<b>Kruszywo</b>
ECO <sub>2</sub>	0,88	0,13	0,57	2,5x10 <sup>-7</sup>	0,01

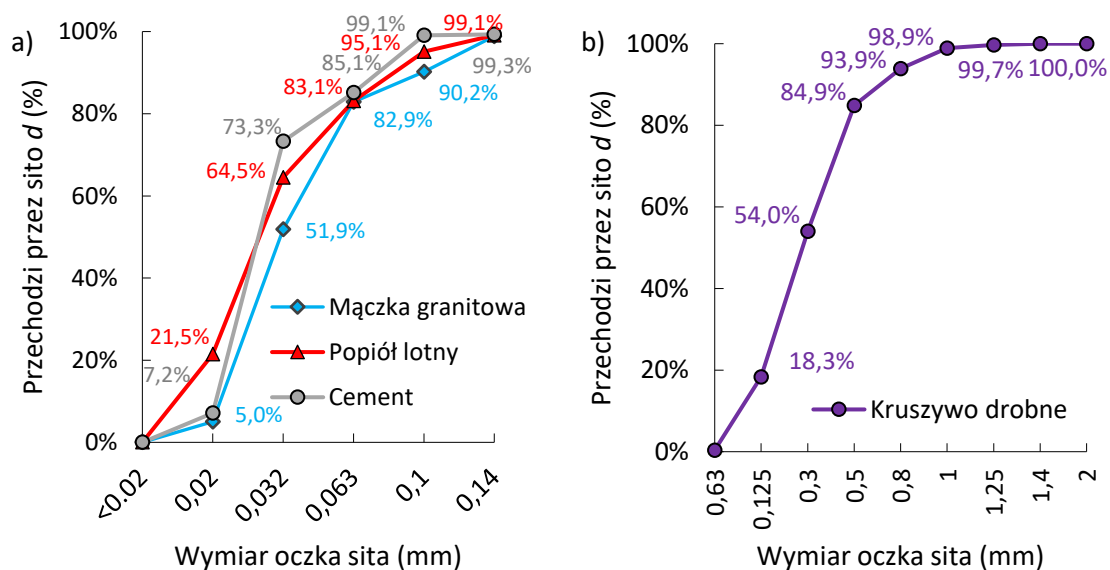
$$ECO_{2\text{serii}} = ECO_{2\text{CEM}} + ECO_{2\text{FA}} + ECO_{2\text{GP}} + ECO_{2\text{woda}} + ECO_{2\text{kruszywo}} \text{ (kg CO}_2\text{)} \quad (38)$$

## 5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

### 5.1. Wyniki badań właściwości zastosowanych materiałów

#### 5.1.1. Krzywa uziarnienia

Rysunek 70 przedstawia wyniki analizy krzywej uziarnienia cementu, krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej (Rysunek 70a) oraz kruszywa drobnego wykorzystanego w badaniach (Rysunek 70b).



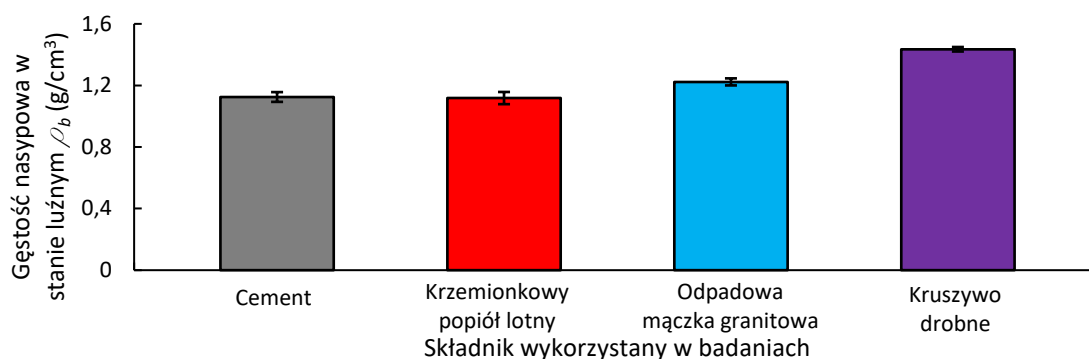
Rysunek 70. Wyniki oznaczania krzywej uziarnienia metodą analizy sitowej: a) cement, odpadowa mączka granitowa oraz krzemionkowy popiół lotny b) kruszywo drobne

Analizując wyniki krzywej uziarnienia badanych składników można zauważyć, że cement, krzemionkowy popiół lotny oraz odpadowa mączka mają znacząco bardziej miłąkłe uziarnienie w porównaniu z kruszywem drobnym. Krzemionkowy popiół lotny oraz odpadowa mączka granitowa wykazują się natomiast zbliżonym uziarnieniem jak cement. Co prawda analizowany popiół lotny jest najbardziej miłąkim z tych materiałów, jednak zaobserwowane różnice są stosunkowo niewielkie. Aż 21,5% ziaren o średnicy mniejszych niż 0,02 mm wykazuje popiół lotny co może świadczyć o obecności w składzie tego materiału pewnej ilości rozdrobnionych ziaren. Analizując krzywe uziarnienia krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej można stwierdzić, że nadają się one (pod względem granulometrycznym) do zastąpienia cementu w mieszance cementowej i nie powinien ten fakt istotnie zmienić jej właściwości. Określone w tym badaniu krzywe uziarnienia wpisują się w doniesienia literaturowe – o podobnych uziarnieniach cementu donosili *Gesoglu i inni* [56] czy *Lothenbach i inni* [106], dla popiołu lotnego zbliżone wyniki opublikowali *Hemalatha i Santhanam* [73] czy *Amin i inni* [5], a o zbliżonych wynikach uziarnienia mączki granitowej

informowali *Vieira i inni* [167] czy *Gao i inni* [52]. Na tej podstawie można zatem stwierdzić, że analizowane składniki mieszanek cementowych są reprezentatywne i możliwa jest na ich podstawie dalsza analiza.

### 5.1.2. Gęstość nasypowa

Rysunek 71 przedstawia wyniki gęstości nasypowej analizowanych składników mieszanek cementowych.



Rysunek 71. Wyniki oznaczenia gęstości nasypowej w stanie luźnym badanych składników

Podobnie do wyników uzyskanych w punkcie 5.1.2 cement, odpadowa mączka granitowa oraz krzemionkowy popiół lotny wykazują zbliżone do siebie wartości gęstości nasypowej. Analizowane kruszywo drobne charakteryzuje się największą gęstością nasypową –  $1,58 \text{ g/cm}^2$ . Dla badanej próbki popiołu lotnego uzyskano najniższą wartość gęstości nasypowej –  $1,15 \text{ g/cm}^2$ , jednak była ona tylko nieznacznie niższa od cementu –  $1,18 \text{ g/cm}^2$ , odpadowa mączka granitowa charakteryzuje się wyższą gęstością nasypową –  $1,22 \text{ g/cm}^2$ . Uzyskane różnice w gęstości nasypowej są jednak pomijalnie małe i trudno jest wnioskować w oparciu o nich o właściwościach analizowanych materiałów (pomijając kruszywo drobne). Niemniej jednak należy stwierdzić, że pomierzone wartości gęstości nasypowej wpisują się w wartości dostępne w różnego rodzaju tablicach materiałów sypkich czy literaturze przeanalizowanej w Rozdziale 3.

### 5.1.3. Skład chemiczny

Tabela 13 przedstawia wyniki oznaczania składu chemicznego analizowanych materiałów sypkich.

Tabela 13. Skład chemiczny cementu, krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej wraz z niepewnością pomiaru

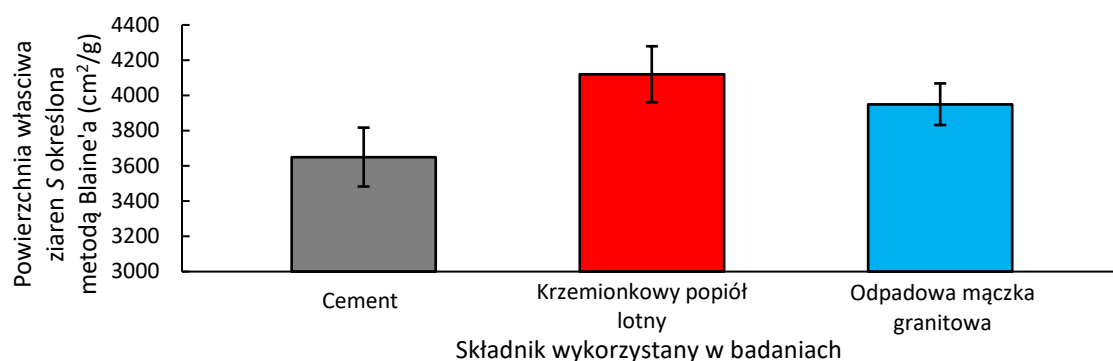
Symbol związku chemicznego	Cement	Krzemionkowy popiół lotny	Odpadowa mączka granitowa
	Zawartość (%)		
CaO	69,94 ± 1,17	3,34 ± 1,82	9,24 ± 1,25
SiO <sub>2</sub>	18,86 ± 1,37	54,33 ± 2,18	59,59 ± 1,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,73 ± 1,25	30,65 ± 1,63	18,69 ± 1,21
MgO	1,54 ± 1,25	2,45 ± 1,57	4,14 ± 1,81
SO <sub>3</sub>	5,89 ± 1,26	-	-
K <sub>2</sub> O	1,3 ± 0,83	2,51 ± 1,38	4,02 ± 1,14
FeO	2,75 ± 2,59	4,78 ± 3,60	5,23 ± 1,06
Pozostałe	< 1,0		

Wyniki uzyskane dla poszczególnych materiałów znacząco różnią się od siebie podkreślając przy tym zróżnicowanie wykorzystanych materiałów. Cement składa się głównie z tlenku wapnia (II) – 69,9% oraz tlenku krzemu (IV) – 18,9%, podczas gdy krzemionkowy popiół lotny zawiera w sobie głównie tlenek krzemu (IV) – 54,3% oraz tlenek glinu (III) – 30,7%, a odpadowa mączka granitowa składa się w większości z tlenku krzemu (IV) – 59,6% oraz tlenku glinu (III) – 18,7%. Wyniki uzyskane dla cementu mogą charakteryzować się granicznymi dopuszczalnymi przez normę zawartościami poszczególnych tlenków, jednak po uwzględnieniu niepewności pomiaru oraz możliwego wpływu warunków zewnętrznych (trudno jest utrzymać stałe warunki przechowywania i unikać narażenia na wilgoć) można stwierdzić, że analizowany cement nadaje się do przeprowadzenia badań naukowych w ramach rozprawy. Istnieje teza, że jakość krzemionkowego popiołu lotnego połączona jest z zawartością w nim niespalonego węgla (straty prażenia - *LOI*) oraz zawartości Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *LOI* wykorzystanego popiołu lotnego wynosiło 2,3% , co oznacza, że jest to wartość zgodna z normą (<5,0%) oraz poniżej średniej określonej w przypadku przeglądu literaturowego (pkt. 3.5.2). Zawartość Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >30 % uzyskana dla badanego popiołu może świadczyć o dobrej jakości oraz możliwym wywołaniu reakcji pucolanowej w kompozycie. Wysoka zawartość SiO<sub>2</sub> w odpadowej mączce granitowej zdecydowanie świadczy o dobrej jakości skały granitowej z której pochodzi mączka granitowa. Jednocześnie zgodnie z doniesieniami *Shamsabadi i inni* [145] w przypadku odpadowej mączki granitowej, której sumaryczna zawartość SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przekracza 75% istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia pozytywnej reakcji chemicznej, która pozwoli na dodatkowy rozwój produktów hydratacji w kompozycie cementowym, doprowadzając przy tym to wzrostu jego właściwości mechanicznych. Oznaczony skład chemiczny mączki granitowej wykorzystanej w badaniach wpisuje się w zbiór składów opisanych podczas analizy literatury.



## 5.1.4. Powierzchnia właściwa ziaren

Wyniki oznaczania powierzchni właściwej ziaren cementu, odpadowej mączki granitowej oraz krzemionkowego popiołu lotnego przedstawia Rysunek 72.



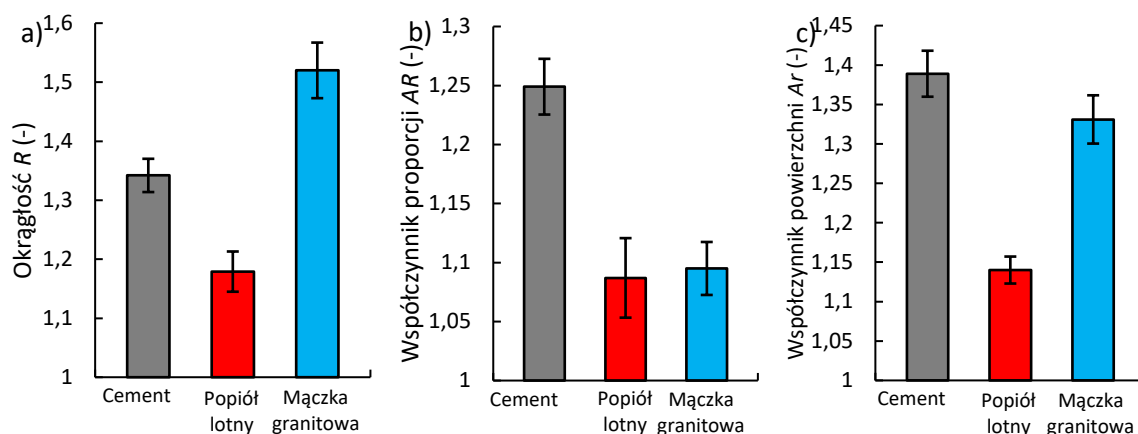
Rysunek 72. Wyniki oznaczenia powierzchni właściwej ziaren cementu, krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej za pomocą metody Blaine'a

Określona powierzchnia właściwa cementu – 3700 cm<sup>2</sup>/g jest dość wysoką wartością, jednak mieszcząca się w ramach standardowej miążkości cementu. Odpadowa mączka granitowa charakteryzuje się bardziej miążkim uziarnieniem niż cement, a jej powierzchnia właściwa ziaren wynosi 3950 cm<sup>2</sup>/g. Krzemionkowy popiół lotny, którego powierzchnia właściwa ziaren wyniosła 4150 cm<sup>2</sup>/g jest najbardziej miążkim z analizowanych materiałów. Określona powierzchnia właściwa ziaren badanego popiołu lotnego dość dobrze koresponduje z wynikami krzywej uziarnienia, gdzie ten materiał wykazał się największą zawartością najbardziej drobnych cząstek <0,2 mm. Właśnie ten fakt może warunkować także wysoką powierzchnię właściwą ziaren, gdyż im więcej części pyłastej w badanych materiale, tym większa powierzchnia właściwa ziaren. W przypadku odpadowej mączki granitowej otrzymana wartość większa niż cementu (pomimo bardzo podobnej zawartości części pyłastej w uziarnieniu) może być związana z odmiennymi właściwościami morfologicznymi ziaren, jednak ten fakt zostanie sprawdzony w punkcie 5.1.5. Porównując uzyskane wyniki do literatury należy stwierdzić, że powierzchnia właściwa ziaren badanego cementu mieści się w granicach standardowego cementu wykorzystywanego w badaniach naukowych. Odpadowa mączka granitowa wykorzystana w tych badaniach charakteryzuje się niższą niż określona w pkt 3.4.2 średnią powierzchnią właściwą ziaren mączki (5800 cm<sup>2</sup>/g), jednak uzyskany wynik wpisuje się w zbiór wyników publikowanych przez kilku naukowców więc można ją uznać jako reprezentatywną próbkę. Wysokie zmiany wartości powierzchni właściwej ziaren odpadowej mączki granitowej wynikają ze zróżnicowania procesów technologicznych w których powstaje ten odpad. Powierzchnia właściwa ziaren krzemionkowego popiołu lotnego uzyskana w tym badaniu jest nieznacznie wyższa niż opisana w pkt. 3.5.2 średnia powierzchnia właściwa ziaren popiołu lotnego (3800 cm<sup>2</sup>/g), a uzyskany wynik jest jednym z wyższych wyników opisywanych w literaturze, jednak przekroczenie wartości średniej jest nieznaczne (mniej niż 10%) co może

prowadzić do wniosku, że badany krzemionkowy popiół lotny może zostać wykorzystany w dalszych badaniach.

#### 5.1.5. Właściwości morfologiczne ziaren

Rysunek 73 przedstawia wyniki analizy właściwości morfologicznych ziaren cementu, odpadowej mączki granitowej i krzemionkowego popiołu lotnego w oparciu o obrazy uzyskane ze skaningowego mikroskopu elektronowego.



Rysunek 73. Wyniki oznaczania właściwości morfologicznych ziaren cementu, odpadowej mączki granitowej oraz krzemionkowego popiołu lotnego: a) Okrągłość b) Współczynnik proporcji c) Współczynnik powierzchni

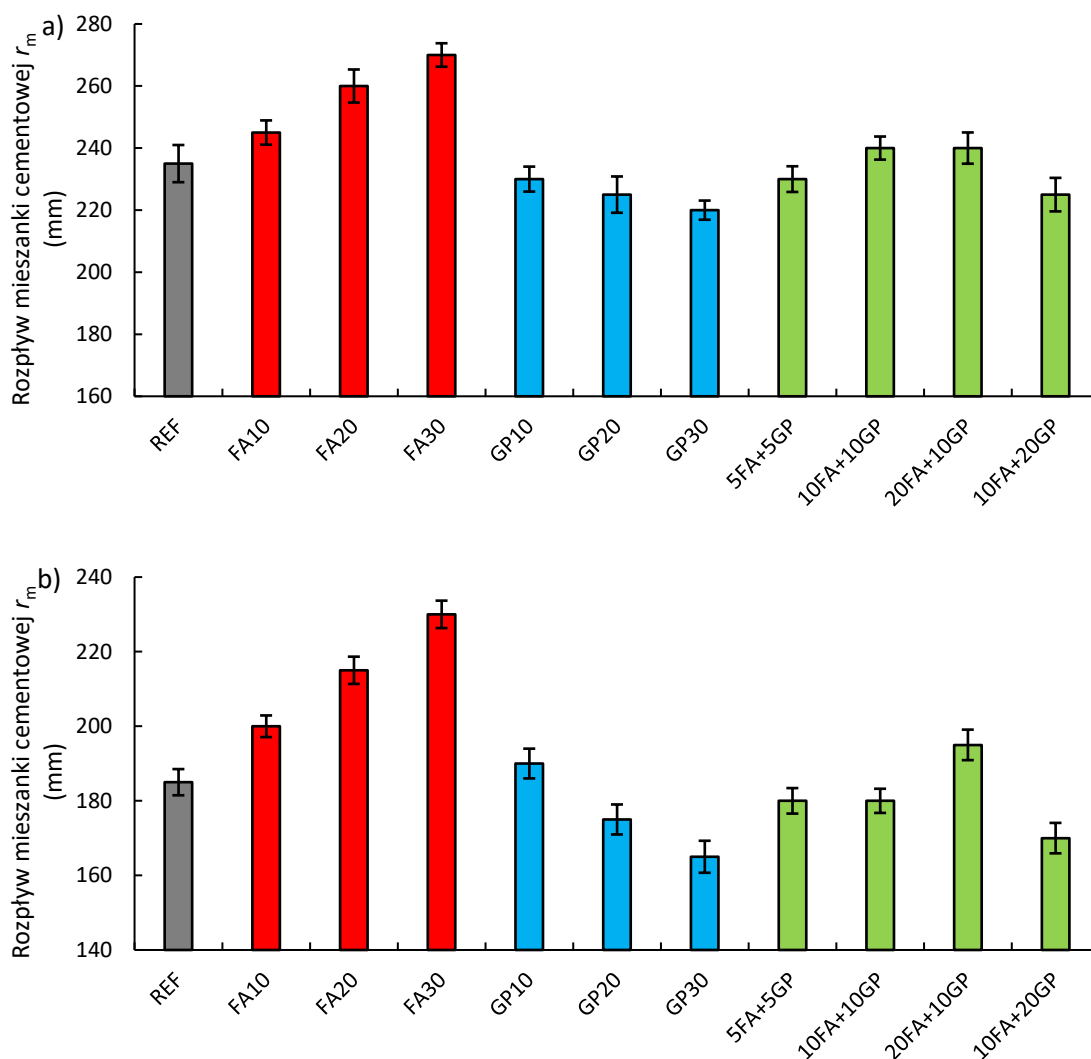
Okrągłość ( $R$ ) określa jak bardzo analizowane ziarno ma kształt zbliżony do okręgu. Analizowany popiół lotny wykazuje się ziarnami o kształcie najbardziej zbliżonymi do okręgu, podczas gdy odpadowa mączka granitowa charakteryzuje się ziarnami o kształcie najbardziej strzelistym, zbliżonym do prostopadłościanu. Cement ma ziarna o kształcie pośrednim, jednak bardziej zbliżonym do odpadowej mączki granitowej, co może także potwierdzać analiza obrazów SEM tych materiałów przedstawiona w rozdziale 4. Współczynnik proporcji ( $AR$ ) opisuje stosunek boków ziarna. Można zauważyć, że to cement charakteryzuje się najbardziej strzelistymi ziarnami, których stosunek długości boków jest najwyższy. Natomiast odpadowa mączka granitowa oraz krzemionkowy popiół lotny mają bardzo podobny do siebie stosunek boków ziaren, zatem lepiej ich kształt nawiązuje do okręgu niż kształt ziaren cementu. Taki fakt może mieć wpływ na układanie się ziaren tych materiałów po ułożeniu mieszanki cementowej oraz na ich zachowanie podczas mieszania mieszanki. Współczynnik powierzchni ( $Ar$ ) określa stosunek powierzchni dwuwymiarowej projekcji rzutu ziarna do elipsy opisanej na ziarnie. Cement wykazał się największą wartością tego parametru co potwierdza zauważoną wcześniej budowę ziaren jako strzelistą. Odpadowa mączka granitowa wykazała się nieco niższym wynikiem tego parametru, jednak zaskakująco wysokim w porównaniu do wyniku  $AR$ . Krzemionkowy

popiół charakteryzuje się najniższą wartością  $Ar$  co potwierdza, że jego ziarna mają symetryczny kształt zbliżony do kształtu okręgu.

## 5.2. Wyniki badań właściwości mieszanek cementowych

### 5.2.1. Konsystencja mieszanki

Rysunek 74 przedstawia wyniki analizy rozplywu mieszanki cementowej dla zaczynów i zapraw w których częściowa zawartość cementu została zastąpiona za pomocą dodatku krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej lub obu materiałów jednocześnie.



Rysunek 74. Wyniki oznaczenia rozplywu mieszanki cementowej: a) zaczyny b) zaprawy

Mieszanki cementowe modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazują się większym rozplywem mieszanki niż seria referencyjna i zwiększa się on wraz ze wzrostem ilości tego dodatku. Jest to spowodowane wysoką zawartością fazy szklistej w krzemionkowym popiole lotnym, która ma obniżone zapotrzebowanie na wodę w stosunku do cementu. Dodatkowo okrągły kształt ziaren

krzemionkowego popiołu lotnego prowadzi do stosunkowo łatwego ułożenia ziaren w mieszance, zwiększając przy tym jej płynność. Niespodziewanie jednak krzemionkowy popiół lotny wywołał większy wpływ na rozplływ mieszanki dla zapraw cementowych niż zaczynów cementowych. Ten fakt może być spowodowany pozytywnym efektem uporządkowania składników, który został lepiej spożytkowany w zaprawach, gdzie duża zawartość kruszywa drobnego zwykle prowadzi do pogorszenia konsystencji mieszanki. Mieszanki modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej wykazały mniejszy rozplływ mieszanki w porównaniu z serią referencyjną (pomijając serię GP10 dla zapraw). Może to być spowodowane podwyższoną powierzchnią właściwą ziaren odpadowej mączki granitowej w porównaniu do cementu. Przewidywalnie, efekt oddziaływania odpadowej mączki granitowej w zaczynie cementowym jest mniejszy niż z zaprawie cementowej, co może dodatkowo potwierdzać fakt zmiany konsystencji mieszanki z dodatkiem odpadowej mączki granitowej w wyniku podwyższonej powierzchni właściwej jej ziaren – po dodaniu kruszywa drobnego efekt ten jest dodatkowo zwiększony. Szczególnie pozytywny efekt modyfikacji mieszanki cementowej zaobserwowano dla jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej. Zaobserwowano, że taka kombinacja materiałowa prowadzi do uzyskania mieszanek, których rozplływ jest zbliżony do serii referencyjnej. Zatem możliwe jest zastąpienie nawet 30% cementu bez zmiany konsystencji mieszanki. Można to tłumaczyć, że negatywny wpływ odpadowej mączki granitowej na konsystencję mieszanki został zniwelowany za pomocą pozytywnego oddziaływania krzemionkowego popiołu lotnego. Porównując uzyskane wyniki do doniesień literaturowych można stwierdzić, że dla efektu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego zaobserwowano efekt zgodny z wynikami innych naukowców (pkt. 3.5.2). W przypadku odpadowej mączki granitowej zaobserwowano, że prowadzi ona do bardziej gęstej konsystencji co potwierdza część badaczy zajmujących się tym tematem, jednak istnieją także zdania przeciwne (pkt. 3.4.2) – co może być zapewne związane z dużym zróżnicowaniem powierzchni właściwej ziaren mączki granitowej stosowanej przez różnych naukowców. Jednocześnie dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie zbliżonej konsystencji jak seria referencyjna, co potwierdza doniesienia literaturowe opisane w punkcie 3.6.2 rozprawy.

## 5.2.2. Wodożądność

Wyniki oznaczania wodożądności przedstawia Tabela 14.

Tabela 14. Wyniki oznaczania wodożądności dla kompozycji poszczególnych serii badawczych

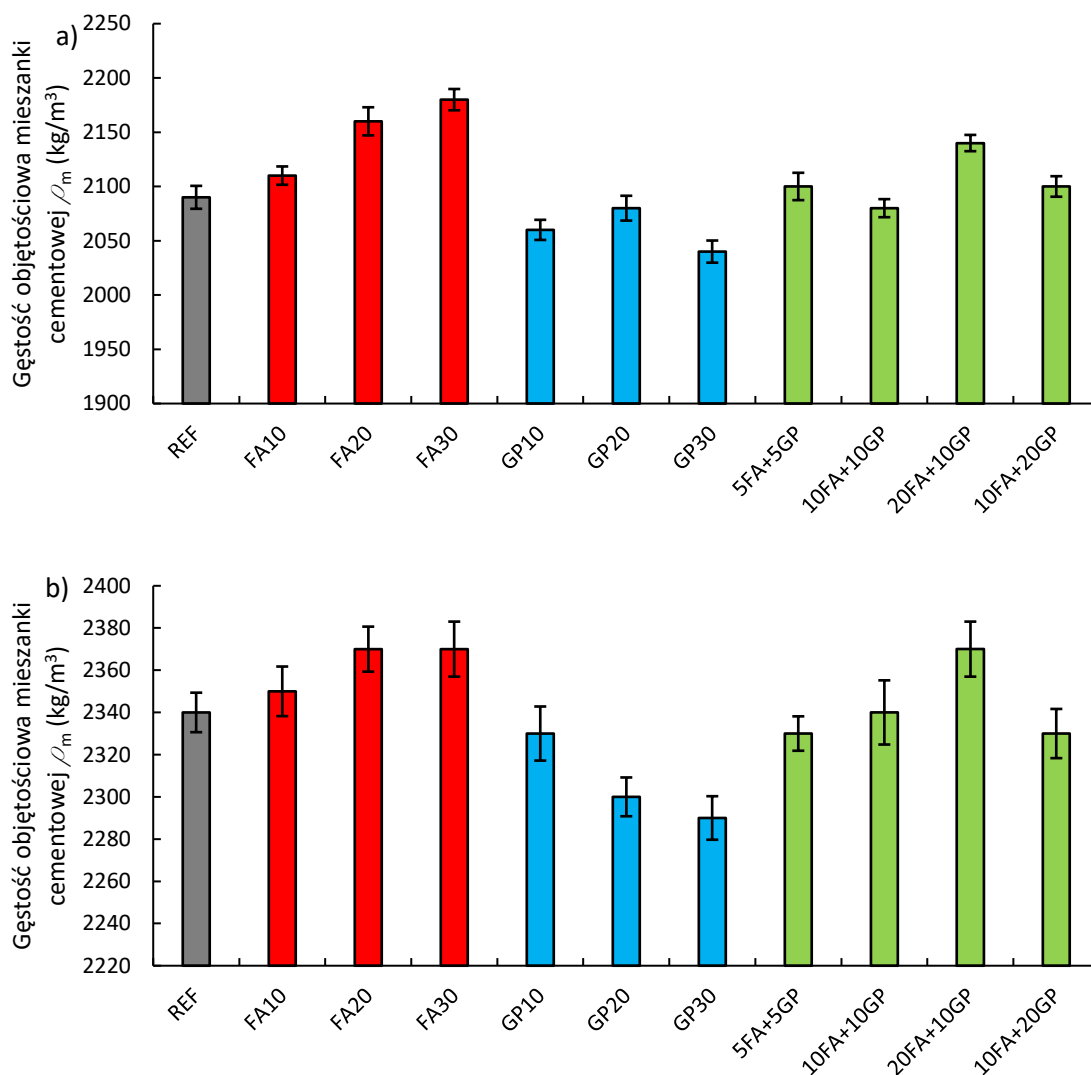
Seria badawcza	Wymagane w/c do uzyskania rozplywu mieszanki jak dla serii REF	
	Zaczyny	Zaprawy
REF	0,4	0,4
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego		
FA10	0,36	0,36
FA20	0,31	0,31
FA30	0,29	0,27
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej		
GP10	0,42	0,39
GP20	0,45	0,44
GP30	0,46	0,47
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej		
5FA+5GP	0,41	0,41
10FA+10GP	0,38	0,41
20FA+10GP	0,39	0,37
10FA+20GP	0,43	0,45

Serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazują się znacznie niższą wodożądnością niż seria referencyjna – kompozycja modyfikowana zastąpieniem 30% cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego wymagała stosunku wskaźnika w/c = 0,29 (-) w porównaniu do 0,40 (-) (REF) w celu zapewnienia tej samej średnicy rozplywu. Zauważono, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego maleje wodożądność mieszanki co podkreśla wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na konsystencję mieszanki prowadząc do jej większej płynności. Przeciwnie wyniki zaobserwowano dla serii modyfikowanych odpadową mączką granitową. Wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej rośnie zapotrzebowanie na wodę w mieszance w celu zapewnienia granicznej średnicy rozplywu mieszanki (jak dla serii REF). Może to być związane z podwyższoną w stosunku do cementu powierzchnią właściwą ziaren odpadowej mączki granitowej. Należy jednak podkreślić, że wpływ odpadowej mączki granitowej na wodożądność mieszanki jest słabszy niż krzemionkowego popiołu lotnego. Z kolei serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazały się bardzo zbliżonymi wynikami jak seria referencyjna, a ewentualna modyfikacja kompozycji materiałowej większym lub mniejszym dodatkiem wody była nieznaczna (0,03 (-) dla zaczynów oraz 0,05 (-) dla zapraw). Może to podkreślać, że jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej prowadzi do zmniejszenia

się wpływu obu tych materiałów, prowadząc do bardziej zbliżonej wodożądności mieszanki cementowej jak seria referencyjna, jednak redukując przy tym nawet 30% zużycia w niej cementu.

### 5.2.3. Gęstość objętościowa

Rysunek 75 przedstawia wyniki oznaczania gęstości objętościowej dla badanych mieszanek cementowych.



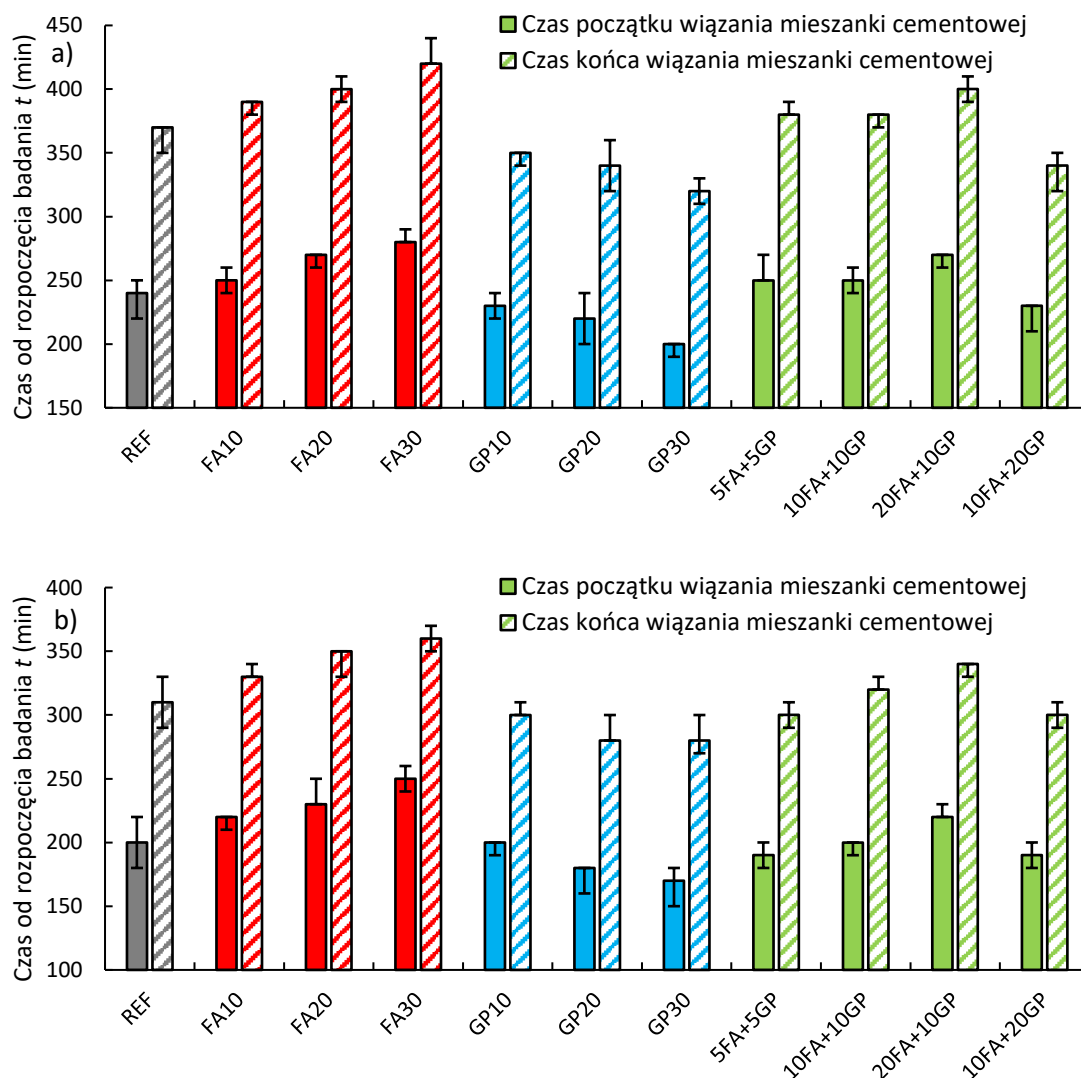
Rysunek 75. Wyniki oznaczenia gęstości objętościowej mieszanki cementowej: a) zaczyna b) zaprawa

Wpływ analizowanych składników na gęstość objętościową mieszanki cementowej jest podobny do opisanego w punkcie 5.2.1 wpływu na jej konsystencję. Serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazują się wzrostem gęstości objętościowej w porównaniu z serią referencyjną. Może to potwierdzać, że krzemionkowy popiół lotny może być z powodzeniem wykorzystywany jako materiał poprawiający strukturę mieszanki cementowej, uszczelniając ją i wypełniając puste przestrzenie. Dla serii modyfikowanych odpadową mączką granitową zauważono, że doprowadziła ona do zmniejszenia

się gęstości objętościowej mieszanek, ale należy zaznaczyć, że w przypadku zaczynów efekt ten nie jest tak oczywisty jak dla zapraw. W przypadku serii modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu i odpadowej mączki zaobserwowano, że charakteryzują się one większą gęstością objętościową mieszanki niż seria referencyjna. Szczególnie warto podkreślić, że seria 10FA+20GP, wykazała się wyższą gęstością objętościową niż wszystkie serie modyfikowane tylko odpadową mączką granitową – podkreśla to dodatkowo pozytywny efekt krzemionkowego popiołu lotnego jako materiału zwiększającego płynność mieszanki. Można wnioskować, że odpadowa mączka granitowa prowadzi do zmniejszenia gęstości objętościowej ponieważ zwiększa wodożądność mieszanki, a co z tym związane mniej wody pozostaje w mieszance do zapewnienia jej płynności. Podczas gdy zastosowanie kombinacji jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej prowadzi do zwiększenia łącznej powierzchni właściwej ziaren w mieszance, ale wysoka zawartość fazy szklistej krzemionkowego popiołu lotnego nie zwiększa znacząco wodożądności mieszanki. Porównując uzyskane wyniki do literatury należy zauważyć, że zaobserwowany wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na gęstość objętościową jest zgodny z doniesieniami literaturowymi, jednak w przypadku odpadowej mączki granitowej nie można tak stwierdzić. Część naukowców zauważyła bowiem poprawę gęstości objętościowej mieszanki po jej modyfikacji odpadową mączką granitową – może to wynikać z faktu, że większość z nich stosowała w swoich badaniach plastyfikator co nawet przy takim samym wskaźniku w/c pozwala uzyskać znacznie lepszą wydajność otoczenia wszystkich składników spoiwem. Może to pozytywnie świadczyć o potencjale w tym temacie ziaren odpadowej mączki granitowej, ponieważ być może wykorzystany w tych badaniach wskaźnik w/c nie jest optymalny dla tego dodatku jak chodzi o uzyskanie jak największej gęstości objętościowej mieszanki. Należy wykonać w tym kierunku dodatkowe badania mieszanek modyfikowanych odpadową mączką granitową. Należy także wspomnieć, że opisany wpływ jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej jest zbieżny z opisany w literaturze wpływem innej mączki mineralnej i krzemionkowego popiołu lotnego, które pozwoliły na uzyskanie nieznacznie wyższych gęstości objętościowych mieszanek w porównaniu z mieszanką referencyjną.

#### 5.2.4. Początek i koniec czasu wiązania

Rysunek 76 przedstawia wyniki oznaczania czasu początku i końca wiązania badanych zaczynów i zapraw cementowych.



Rysunek 76. Wyniki oznaczenia czasu początku i końca wiązania mieszanki cementowej: a) zaczyny  
b) zaprawy

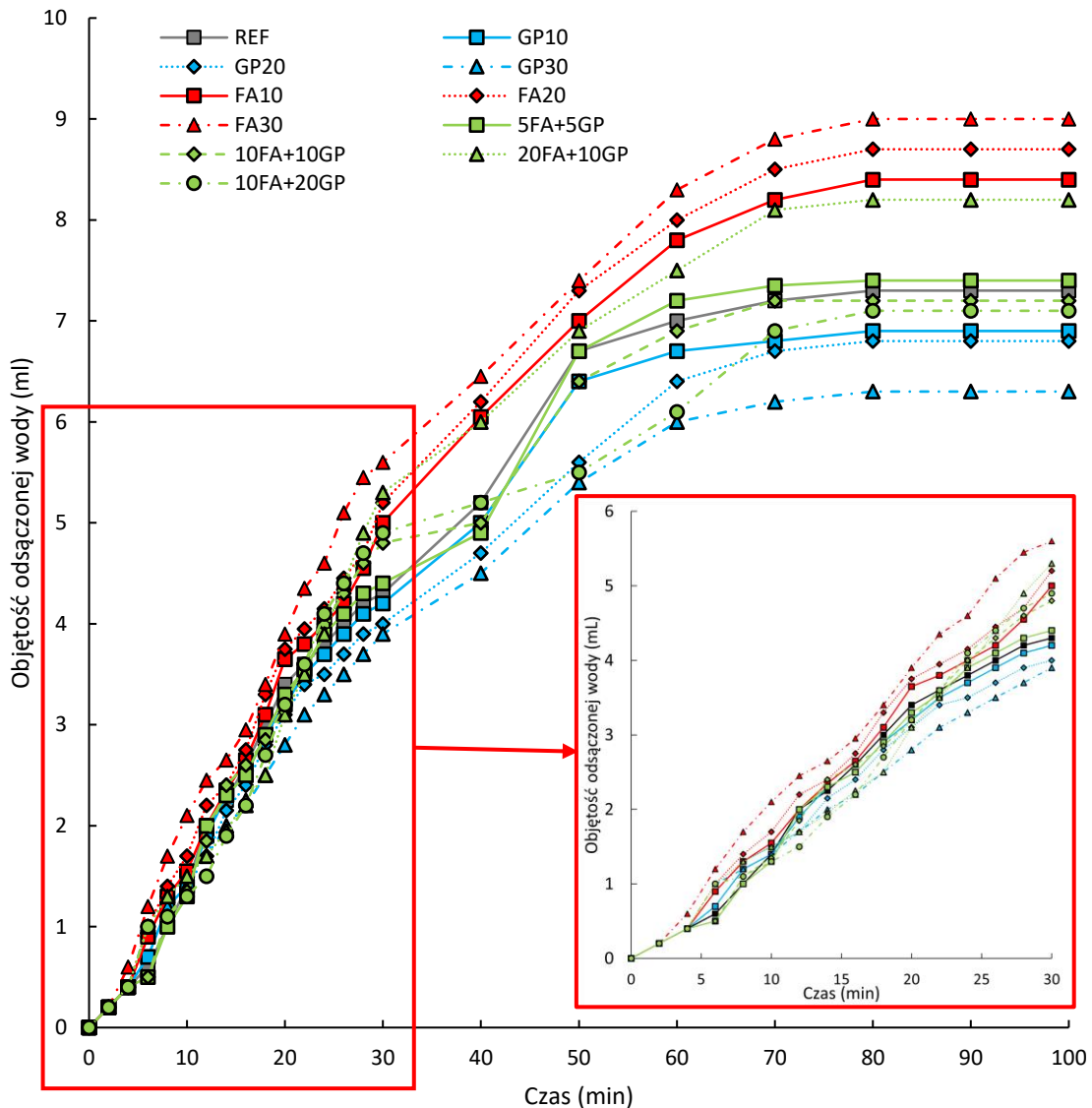
Modyfikacja mieszanki dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego prowadzi do wydłużenia czasu początku i końca jej wiązania. Taką prawidłowość zaobserwowano zarówno dla zaczynów jak i zapraw cementowych. Zastąpienie części cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej prowadzi natomiast do skrócenia czasu początku i końca czasu wiązania. Dodatkowo zaobserwowano, że dla tych serii zmniejszyła się też różnica pomiędzy czasami końca i początku wiązania. Można to tłumaczyć zwiększonym zapotrzebowaniem na wodę, a co z tym związane proces hydratacji cementu przebiega szybciej, gdyż ilość wody w mieszance jest ograniczona. W przypadku serii modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej



zaobserwowano (podobnie jak przy innych właściwościach mieszanki), że możliwe jest uzyskanie wartości pośrednich pomiędzy tymi dla serii modyfikowanych tylko krzemionkowym popiołem lotnym lub odpadową mączką granitową. Wykorzystanie serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym powinno być szczególnie w warstwach wierzchnich, które narażone są skurcz i pękanie (o dużych polach roboczych i zwiększonych odległościach pomiędzy dylatacjami). Mieszanki modyfikowane odpadową mączką granitową warto natomiast wykorzystać w miejscach, gdzie technologia prac wymaga krótszego niż zazwyczaj czasu obróbki warstwy po ułożeniu. Zastosowanie mieszanek jednocześnie modyfikowanych dwoma tymi materiałami powinno szczególnie być częste w przypadku chęci redukcji ilości wykorzystanego cementu oraz śladu węglowego mieszanki, nie zmieniając przy tym istotnie czasu początku i końca wiązania mieszanki.

### 5.2.5. Odsączenie wody z mieszanki cementowej

Rysunek 77 przedstawia wyniki analizy odsączenia wody z mieszanki cementowej zaczynów cementowych modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym, odpadową mączką granitową oraz ich jednoczesnym dodatkiem.

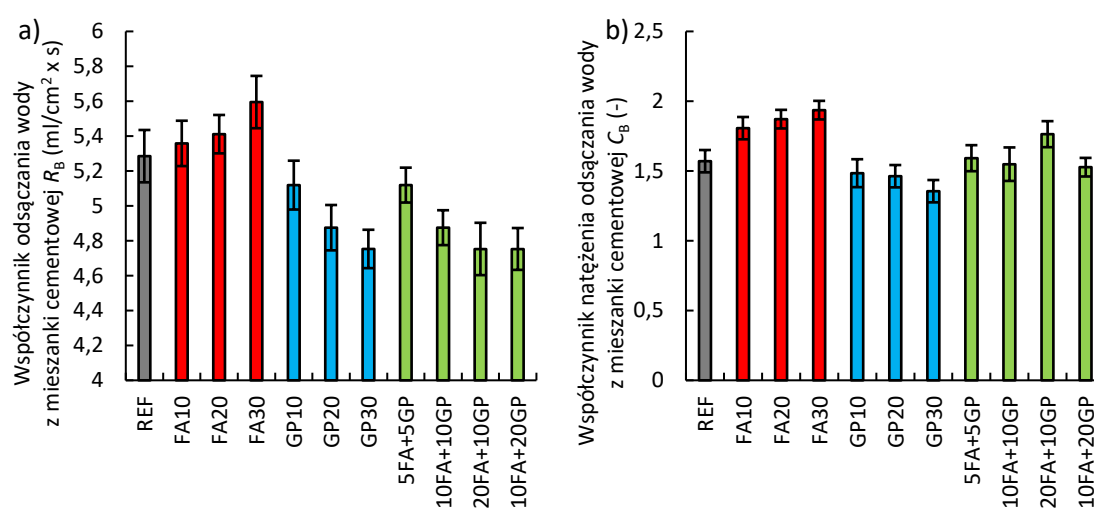


Rysunek 77. Wyniki oznaczenia odsączenia wody z mieszanki cementowej – zaczyny

Mieszanka modyfikowana krzemionkowym popiołem lotnym wykazała się największą objętością odsączonej wody z mieszanki cementowej. Z drugiej strony zaczyn cementowy modyfikowany odpadową mączką granitową charakteryzuje się najmniejszą objętością odsączonej wody. Wyniki uzyskane dla serii referencyjnej klasyfikują się pomiędzy wynikami uzyskanymi dla serii z krzemionkowym popiołem lotnym oraz odpadową mączką granitową. Z kolei mieszanka w której część cementu została zastąpiona jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego oraz

odpadowej mączki granitowej wykazała się objętością odsączonej wody zbliżonymi do serii referencyjnej – w zakresie pomiędzy seriami z odpadową mączką granitową i krzemionkowym popiołem lotnym. Analizując uzyskane wyniki należy także zauważyć, że w pierwszych 30 minutach proces odsączania wody z mieszanki cementowej jest bardzo zmienny, co może być związane z właściwościami morfologicznymi ziaren. Ponieważ wiadome jest, że w ciągu pierwszych 30 minut tego procesu zauważa się jeszcze wpływ mieszania składników mieszanki oraz ich układania się. Układanie się składników zależne jest od ich rozkładu wielkości ziaren oraz od ich kształtu. Po pierwszych 30 minutach proces ten jednak się stabilizuje i staje się mniej zmienny.

Rysunek 78 przedstawia wyniki oznaczania współczynników procesu odsączania wody z mieszanki cementowej dla badanych zaczynów.

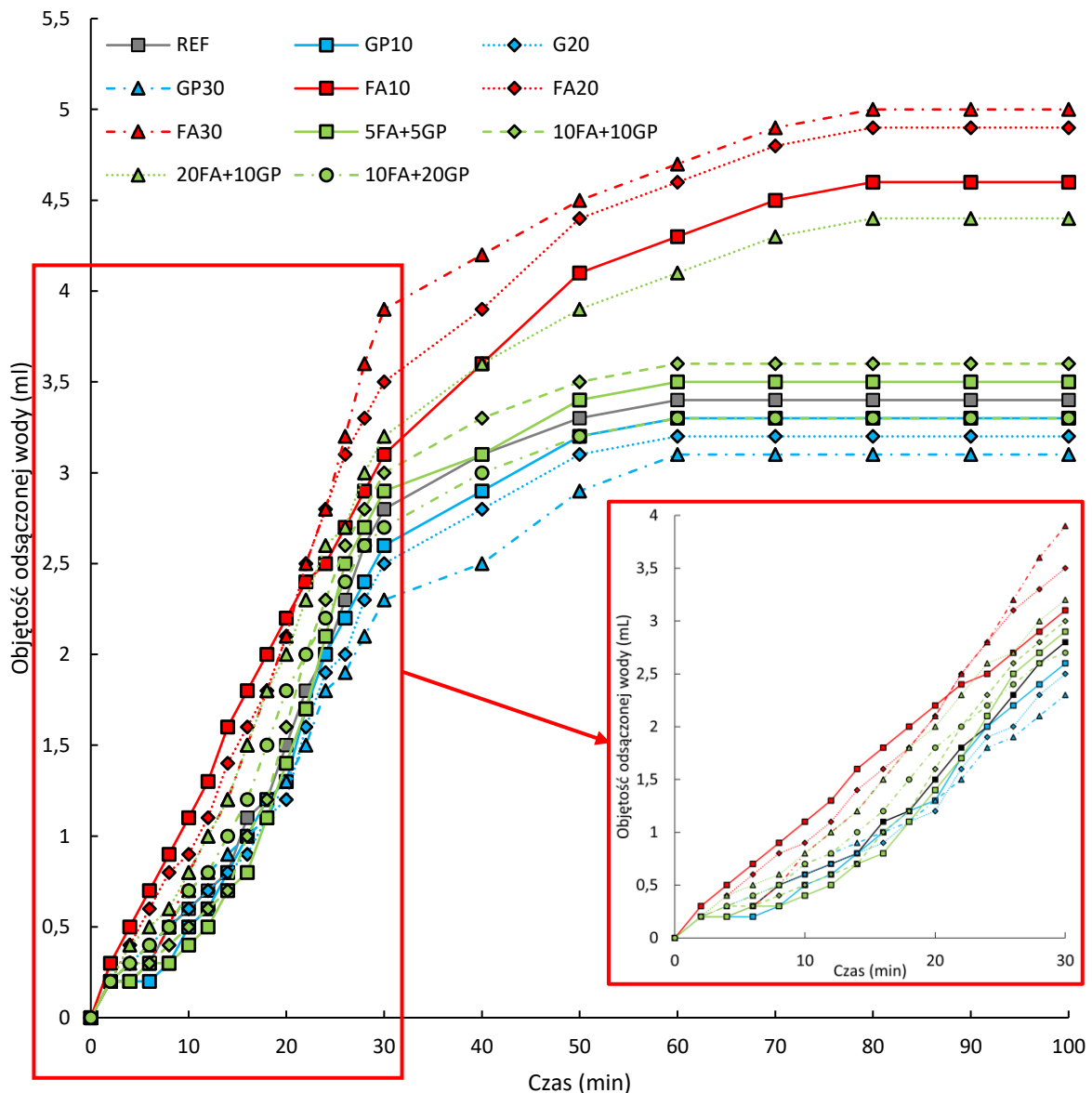


Rysunek 78. Wyniki oznaczania współczynników procesu odsączania wody z mieszanki cementowej – zaczyny: a) współczynnik odsączania wody z mieszanki cementowej  $R_B$  b) współczynnik natężenia odsączania wody z mieszanki cementowej  $C_B$

Współczynnik odsączania wody z mieszanki cementowej  $R_B$  opisuje intensywność procesu odsączania wody z mieszanki w pierwszych 30 minutach po jej ułożeniu (Rysunek 78a). Można zauważyć, że serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzują się wzrostem  $R_B$  wraz ze wzrostem części zastąpienia cementu. Serie modyfikowane odpadową mączką granitową wykazują mniejszą skłonność do wydzielania wody na początku procesu. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej charakteryzują się wynikami zbliżonymi do serii modyfikowanych odpadową mączką granitową. Porównując te wyniki z wynikami współczynnika natężenia odsączania wody z mieszanki cementowej  $C_B$  (Rysunek 78b) można zaobserwować, że zmienia się nieco dynamika procesu, gdyż  $C_B$  opisuje cały proces odsączania wody z mieszanki cementowej. Po pierwszych 30 minutach aż do końca procesu występują znacznie mniejsze różnice wartości  $C_B$  niż  $R_B$ , co może świadczyć o bardziej marginalnym

wpływie procesu odsączania wody z mieszanki cementowej po pierwszych 30 minutach. Ewidentnie po 30 minutach trwania tego procesu, staje się on bardziej przewidywalny i łatwiej jest go kontrolować. Zauważono także, że wyniki serii modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu i odpadowej mączki granitowej nie są już tak zbliżone do wyników uzyskanych dla serii modyfikowanych odpadową mączką granitową, gdyż odnotowano wyniki pośrednie pomiędzy seriami osobno modyfikowanymi krzemionkowym popiołem lotnym i odpadową mączką granitową.

Rysunek 79 przedstawia wyniki pomiaru objętości odsączania wody dla zapraw cementowych.

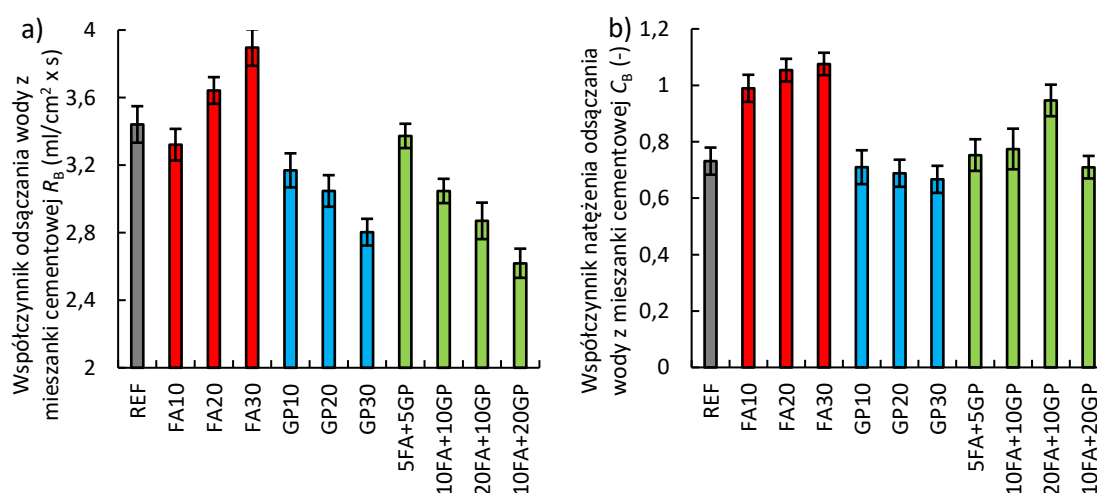


Rysunek 79. Wyniki oznaczenia odsączania wody z mieszanki cementowej – zaprawy

Proces odsączania wody w zaprawach cementowych jest znacznie ograniczony w porównaniu z wcześniej opisanymi zaczynami cementowymi. Maksymalna, pomierzona, sumaryczna objętość

odsączonej wody w procesie dla zaczynów wynosiła 9 ml, podczas gdy dla zapraw odnotowano 5 ml, zatem wartość ta zmniejszyła się o ponad 40%. Taki fakt jest związany z wprowadzeniem do mieszanki dodatkowego materiału jakim jest kruszywo drobne o wysokiej powierzchni właściwej ziaren, co prowadzi do zwiększenia koniecznej objętości wody do otoczenia składników mieszanki, a co z tym związane także utrzymania jej w mieszance, a nie jej odsączenia. Należy stwierdzić, że dla zapraw cementowych (podobnie jak dla zaczynów) największą objętością odsączonej wody charakteryzują się mieszanki modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym. Najmniejszą zaś wykazały się mieszanki modyfikowane odpadową mączką granitową. Seria referencyjna osiągnęła wyniki zbliżone do serii modyfikowanych odpadową mączką granitową, natomiast serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazują wyższą objętość odsączonej wody. Serie w których składzie jest znacząca zawartość krzemionkowego popiołu lotnego (FA10, FA20, FA30 i 20FA+10GP) mają znacznie wyższą sumaryczną objętość odsączonej wody niż pozostałe serie. Można to interpretować faktem stosunkowo niskiej wodozadržności tych mieszanek, ale także właściwościami morfologicznymi krzemionkowego popiołu lotnego. Okrągłe cząstki krzemionkowego popiołu lotnego nie stanowią bowiem przeszkody dla wody, która unosi się po ułożeniu mieszanki, a sama powierzchnia ziaren krzemionkowego popiołu lotnego nie jest chropowata ani nie posiada struktur utrudniających przemieszczanie się wody wokół nich. Z drugiej strony ziarna odpadowej mączki granitowej, które wykazują się najbardziej strzelistym kształtem ziaren wykazują się dodatkowo wysoką możliwością utrzymywania wody w mieszance, co należy uznać za pozytywny wpływ na mieszankę cementową.

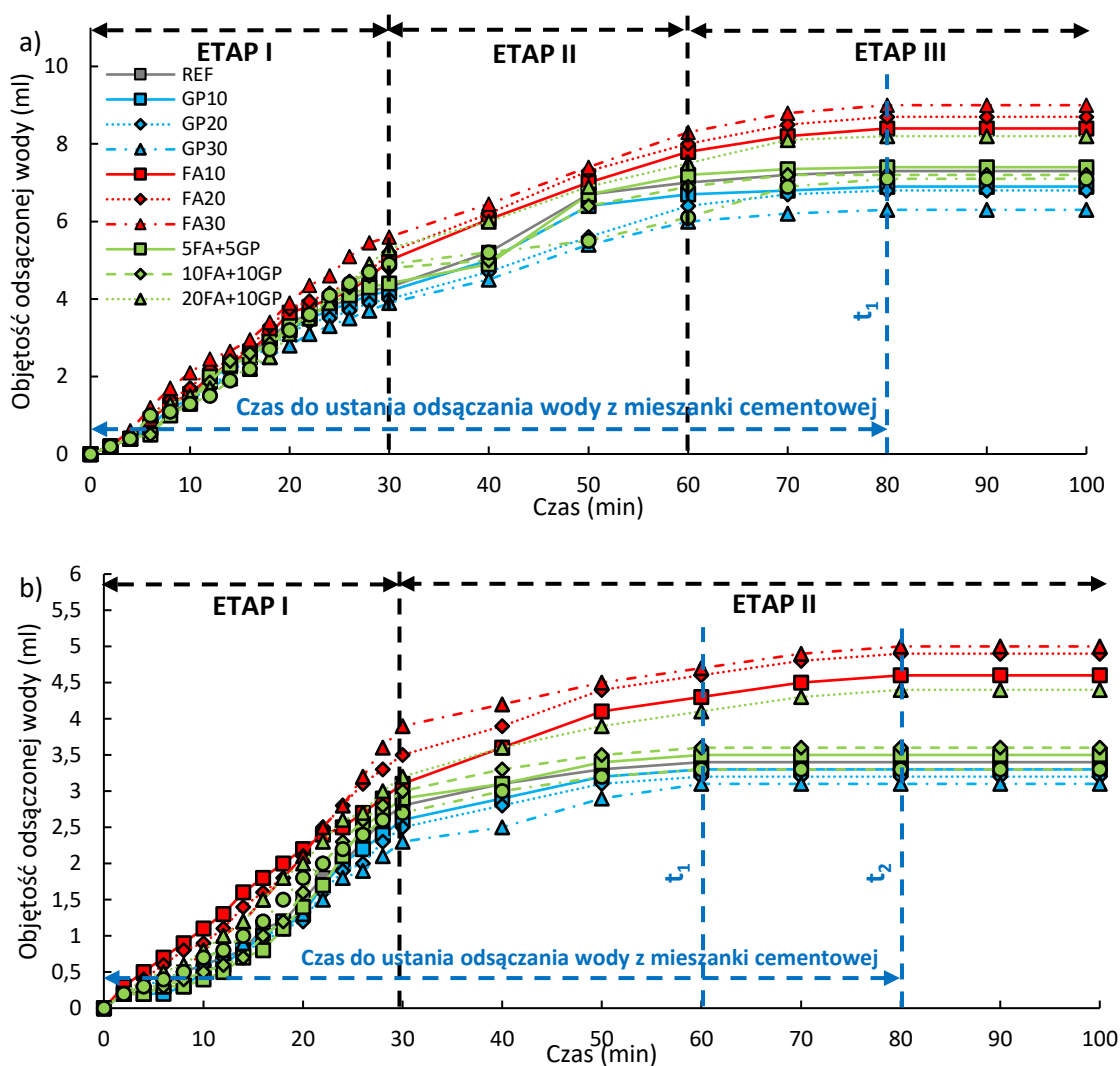
Rysunek 80 przedstawia wyniki oznaczania współczynników odsączenia wody z mieszanki cementowej dla serii zapraw cementowych.



Rysunek 80. Wyniki oznaczenia współczynników odsączenia wody z mieszanki cementowej – zaprawy: a) współczynnik odsączenia wody z mieszanki cementowej  $R_B$  b) współczynnik natężenia odsączenia wody z mieszanki cementowej  $C_B$

Podobnie jak dla wyników uzyskanych dla zaczynów, współczynnik odsączenia wody z mieszanki cementowej  $R_B$  dla serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym (z wyłączeniem FA10) był najwyższy, co należy interpretować, że w tych seriach odsączenie wody z mieszanki przyjmuje najbardziej dynamiczną formę. Z drugiej strony serie modyfikowane odpadową mączką granitową wykazały się znacząco zmniejszoną dynamiką odsączenia wody z mieszanki cementowej. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej uzyskały wyniki pośrednie pomiędzy seriami modyfikowanymi tymi dodatkami osobno. Cały proces odsączenia wody z mieszanki cementowej, określany współczynnikiem natężenia odsączenia wody z mieszanki cementowej  $C_B$  dla serii modyfikowanych większą zawartością krzemionkowego popiołu lotnego (FA10, FA20, FA30, 20FA+10GP), owocował największą objętością odsączonej wody, podczas gdy pozostałe serie badawcze zostały scharakteryzowane zbliżonymi do siebie wynikami tego współczynnika. Co istotne, serie zapraw modyfikowane odpadową mączką granitową nie wykazały już znacząco zmiennych wyników w stosunku do serii referencyjnej (jak to było w przypadku zaczynów).

W analizie procesu odsączenia wody z mieszanki cementowej zauważono, że proces ten charakteryzuje się zmienną dynamiką zależnie od modyfikatora wykorzystanego do jego produkcji, ale także rodzaju wykorzystanej mieszanki. Rysunek 81 przedstawia autorską propozycję podziału procesu odsączenia wody z mieszanki cementowej dla zaczynów i zapraw na etapy, których granice określono na podstawie czasu zaobserwowania zmiany.



Rysunek 81. Analiza odsączania wody z mieszanki cementowej oraz propozycja podziału procesu na etapy: a) zaczyny cementowe b) zaprawy cementowe

Analizując Rysunek 81 należy zauważyć, że odsączanie wody z mieszanki cementowej przebiega odmiennie dla zaczynów cementowych oraz zapraw. W przypadku zaczynów proces jest bardziej dynamiczny, zmienny, przebiega dłużej i z większą intensywnością. Oczywiście jest to związane z mniejszą ilością ziaren w mieszance co sprzyja w przypadku zaczynu do odsączania niepotrzebnej wody na powierzchnię mieszanki. Odsączanie wody z mieszanki cementowej w zaprawach cementowych charakteryzuje się znacząco krótszym przebiegiem i mniejszą intensywnością zmian. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono, że odsączanie wody w zaczynach trwa intensywnie przez pierwsze 80 minut ( $t_1$ ), a po tym czasie następuje koniec odsączania wody z mieszanki co może być związane z postępującym procesem hydratacji cementu, który wymaga znacznej ilości wody, a bardziej zwarta struktura kompozytu utrudnia transport wody w górę jego przekroju. Z drugiej strony, wyniki odsączanej wody z zapraw są znacząco niższe, a sam proces przebiega krócej i połączony jest z niewielką różnicą uzyskanych wyników dla poszczególnych serii mieszanek. W przypadku zapraw:

REF, GP10, GP20, GP30, 5FA+5GP, 10FA+10GP, 10FA+20GP oznaczono zakończenie tego procesu po już po 60 minutach ( $t_1$ ) – tzn. o 20 minut krócej niż w przypadku zaczynów. Dodatkowo zauważono, że w seriach modyfikowanych popiołem lotnym proces jest znacząco dłuższy i trwa aż 80 minut ( $t_2$ ).

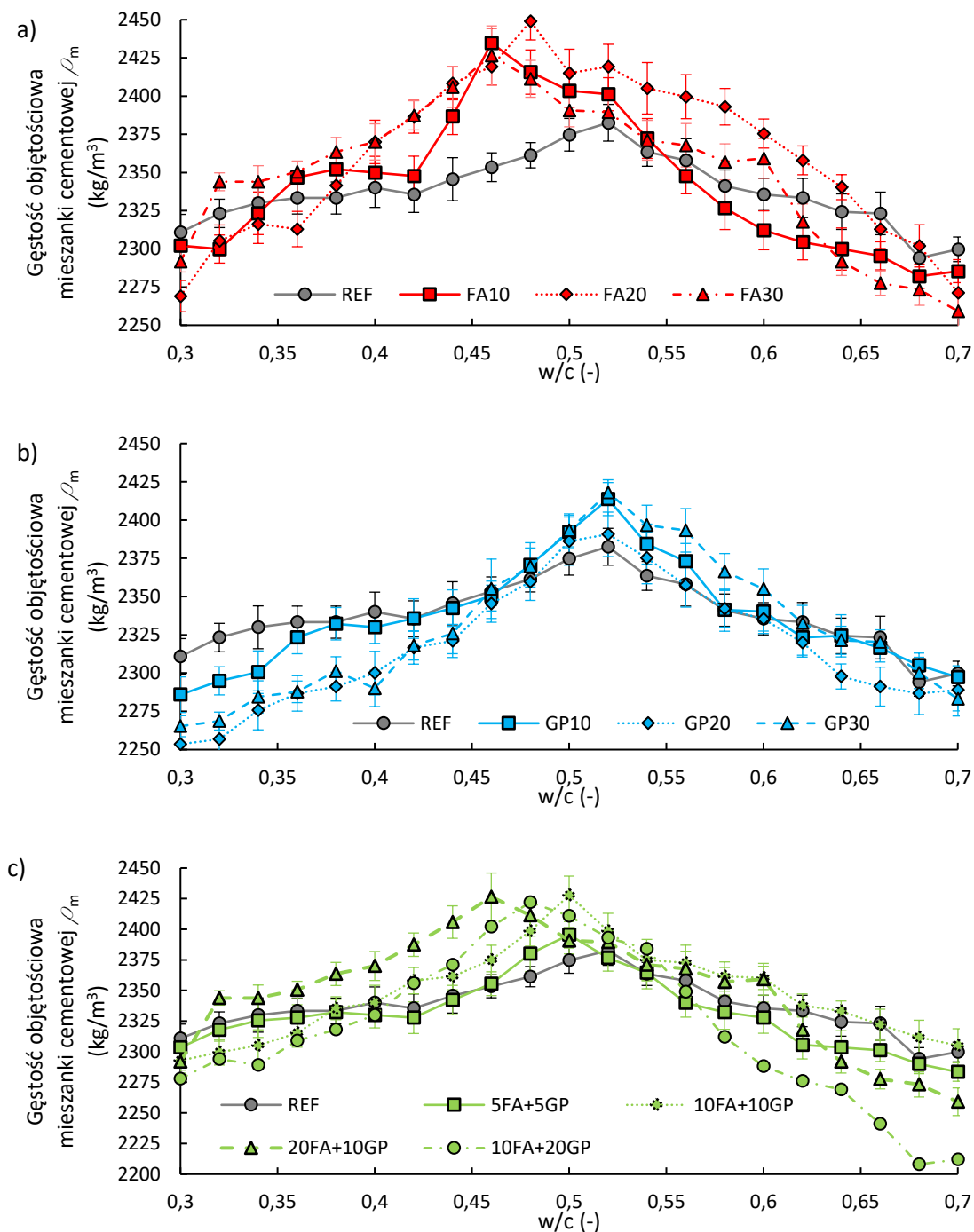
Podział odsączenia wody z mieszanki cementowej dla zaczynów i zapraw został zaproponowany przez autora na podstawie obserwacji poczynionych podczas badań i stanowi jego subiektywną ocenę procesu. Odsączenie wody z mieszanki w zaczynach cementowych z racji większej dynamiki i zmienności procesu zostało podzielone na 3 etapy: I – odsączenie wstępne, II – odsączenie właściwe, III – odsączenie końcowe. W Etapie I obserwuje się znaczącą zmienność oraz wpływ procesów mieszania na mieszankę cementową. W tym etapie ziarna składników są świeżo po ułożeniu w docelowym miejscu i zaczyna się proces ich układania w strukturze. Cement nie jest jeszcze wystarczająco zmieszany z wodą, proces hydratacji cementu jest inicjowany, ale nie jest rozwinięty. Etap II opisuje sytuację kiedy mieszanka zdążyła się ułożyć, a proces polega na odsączeniu z niej jedynie wody, która jest zbędna do procesu hydratacji. Hydratacja cementu postępuje, a struktura ulega zmianie – tworzą się korytarze powietrzne, którymi naddatek wody transportowany jest ku górze mieszanki, następuje lepsza konsolidacja grawitacyjna mieszanki. Etap III opisuje moment, kiedy kompozyt jest na pograniczu fazy ciekłej i stałej, a nadmiar wody został już w większości odprowadzony. Wpływ modyfikatora w tym etapie jest znacznie niższy niż w pozostałych ponieważ struktura kompozytu została już wstępnie określona i charakteryzuje się ona określoną liczbą porów i kanałów powietrznych. Objętość odsączonej wody jest znacznie niższa niż w pozostałych etapach. Dla zapraw cementowych Etap I jest taki sam jak dla zaczynów, natomiast Etap II jest połączeniem Etapów II i III dla zaczynów, ponieważ wykres jest bardziej gładki i nie jest tak jasno widoczny moment przegięcia wykresu.

Odsączenie wody z mieszanki cementowej ma istotny wpływ na właściwości cementowej warstwy wierzchniej [45]. Zastosowanie do mieszanki cementowej dodatków, które pozwalają na zatrzymanie części wody w mieszance cementowej (jak na przykład odpadowa mączka granitowa), prowadzi do zapewnienia jednorodności kompozytu. Niejednorodność właściwości kompozytu cementowego w funkcji jego grubości jest częstą przyczyną uszkodzeń warstwy wierzchniej. Poziome elementy budynków są szczególnie narażone na zwiększone odsączenie wody z mieszanki cementowej, gdyż charakteryzują się one stosunkowo małą grubością oraz znaczną powierzchnią, co sprzyja migracji wody z dolnych partii mieszanki ku górze. Szczególnie ważne jest zatem wykorzystywanie do mieszanek cementowych dodatków, które pozwolą nie tylko zmniejszyć objętość odsączonej wody, ale także zapewnią wymaganą jednorodność właściwości kompozytu.



## 5.2.6. Gęstość upakowania składników

Rysunek 82 przedstawia wyniki oznaczania optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki wykorzystanych w badaniach.



Rysunek 82. Wyniki oznaczania optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki cementowej – zaprawy: a) serie modyfikowane popiołem lotnym b) serie modyfikowane mączką granitową c) serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej

Mieszanka modyfikowana krzemionkowym popiołem lotnym wykazała się najwyższą uzyskaną maksymalną gęstością objętościową mieszanki. Świadczy to, że dodatek krzemionkowego popiołu lotnego poprawia ułożenie składników mieszanki, wypełnia wolne przestrzenie w strukturze i pozwala na uzyskanie najmniejszej liczby pustek powietrznych w mieszance. Zauważono także, że serie modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym osiągnęły swoje najwyższe wyniki gęstości upakowania składników przy zastosowaniu niższego stosunku w/c (0,46 (-)), niż w przypadku serii referencyjnej (0,52 (-)), co może świadczyć o tendencji krzemionkowego popiołu lotnego do zmiany konsystencji mieszanki na bardziej płynną. Zaobserwowano także, że serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym uzyskiwały wysokie gęstości upakowania dla większego zakresu w/c niż pozostałe analizowane kompozycje. Mieszanki modyfikowane odpadową mączką granitową zostały opisane niższymi wynikami maksymalnej gęstości upakowania niż serie modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym, jednak osiągnięte wyniki są wyższe (maksymalnie 2418 kg/m<sup>3</sup>) niż serii referencyjnej (maksymalnie 2383 kg/m<sup>3</sup>) co stanowi wzrost o około 1,5%. Zaobserwowano, że serie modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową osiągnęły maksymalną gęstość upakowania dla wyższego w/c niż serie modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym, a ich wyniki zostały osiągnięte dla wszystkich trzech serii badawczych (GP10, GP20, GP30) dla wartości w/c = 0,52 (-) tj. takiej samej jak seria referencyjna. Może to świadczyć, że zmiana konsystencji związana z dodatkiem odpadowej mączki granitowej na bardziej gęstą nie wpływa w tak znaczący sposób na optymalną gęstość upakowania mieszanki cementowej. Istotna jest także obserwacja, że zastąpienie nawet 30% cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej nie wymagało większej objętości wody do uzyskania optymalnej gęstości upakowania mieszanki. Serie modyfikowane jednocześnie dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej wykazują duże zróżnicowanie uzyskanych wyników. Dla części serii (20FA+10GP oraz 10FA+20GP) uzyskano maksymalną gęstość upakowania mieszanki dla w/c <0,5 (-), co świadczy o znaczącym wpływie dodatku krzemionkowego popiołu lotnego. Z drugiej zaś strony, pozostałe serie (5FA+5GP oraz 10FA+10GP) uzyskały wyniki zbliżone do serii modyfikowanych jedynie odpadową mączką granitową. Wyniki oznaczania optymalnego upakowania uzyskane dla serii jednocześnie modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym i odpadową mączką granitową są wyższe niż serii referencyjnej.

Serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się także największą liczbą wyników wyższych niż wyniki optymalnej gęstości serii referencyjnej (wyniki usytuowane na wykresie ponad linią oznaczającą serie referencyjną), co może świadczyć o uniwersalności stosunku w/c mieszanek modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym biorąc pod uwagę uzyskanie optymalnej gęstości upakowania. Z drugiej strony serie modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową wykazują się znacznie mniejszą liczbą wyników wyższych (dla poszczególnych w/c) od serii referencyjnej. Oznacza to, że serie te są bardziej wrażliwe na zmiany objętości wody w mieszance cementowej i uzyskanie optymalnej gęstości upakowania mieszanki musi być poprzedzone dokładnymi

badaniami jej oznaczenia z zastosowania małej zmiany w/c dla kolejnych serii badawczych. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwalają na uzyskanie pośrednich wyników, jednak za szczególnie pozytywne należy uznać zmniejszenie wrażliwości mieszanki na zmiany w/c, co należy łączyć ze sprzyjającym oddziaływaniem krzemionkowego popiołu lotnego. Tabela 15 przedstawia podsumowanie wyników oznaczania maksymalnej gęstości objętościowej serii badawczych wraz ze wskazaniem optymalnego wskaźnika w/c.

Tabela 15. Podsumowanie wyników oznaczenia optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki cementowej

Seria	Przyjęty w badaniach wskaźnik w/s	Przyjęty w badaniach wskaźnik w/c	Optymalny wskaźnik w/c	Maksymalna gęstość objętościowa mieszanki cementowej
	(-)	(-)	(-)	(kg/m <sup>3</sup> )
REF	0,40	0,40	0,52	2383
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego				
FA10	0,40	0,44	0,46	2435
FA20		0,50	0,48	2449
FA30		0,57	0,46	2427
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej				
GP10	0,40	0,44	0,52	2414
GP20		0,50	0,52	2391
GP30		0,57	0,52	2418
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej				
5FA+5GP	0,40	0,44	0,50	2395
10FA+10GP		0,50	0,50	2428
20FA+10GP		0,57	0,44	2378
10FA+20GP		0,57	0,48	2422

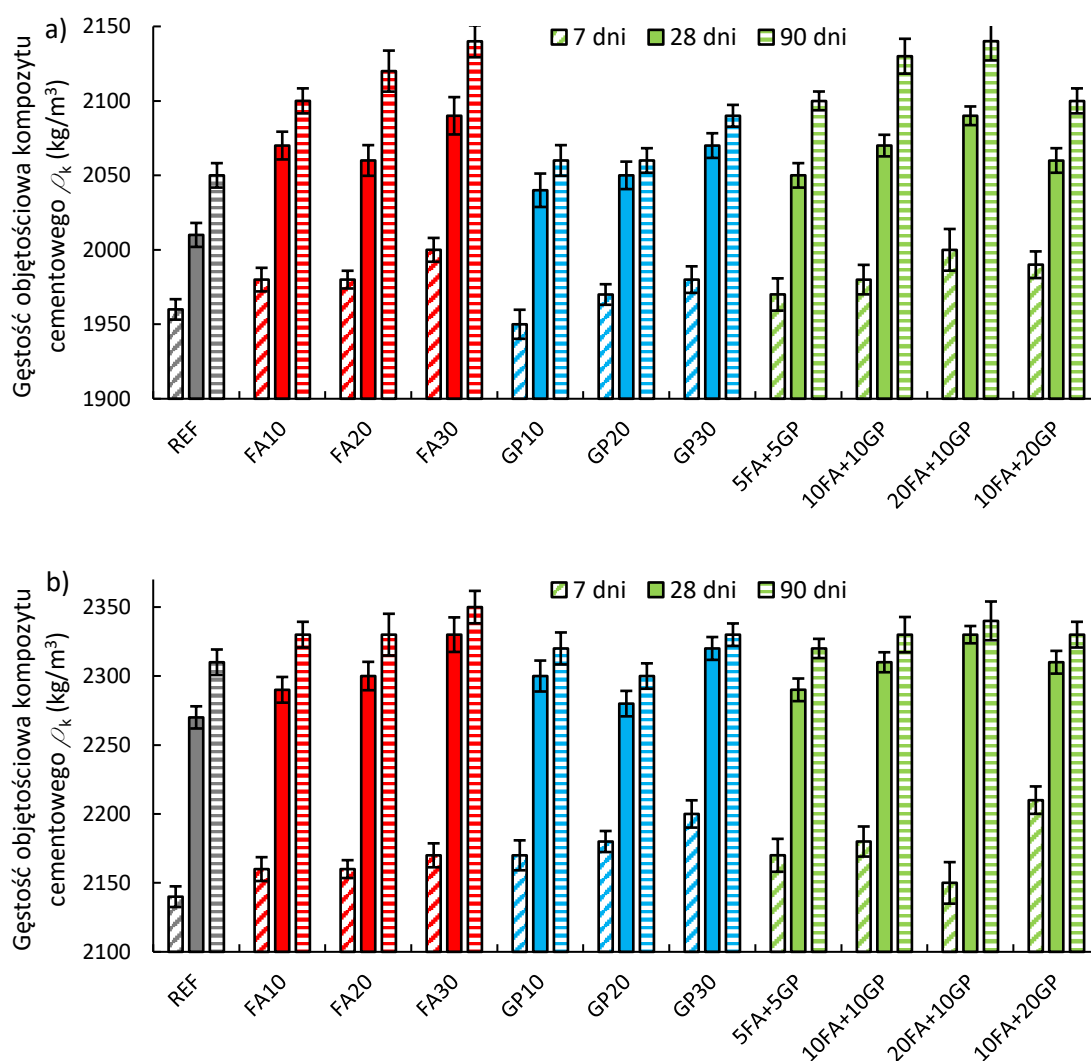
Analiza powyższej tabeli pozwala zauważyć, że przyjęte założenie stałego w/s oraz zmiennego w/c dla badanych kompozycji materiałowych, ze względu na optymalną gęstość upakowania nie był szczególnie dobrym rozwiązaniem. Niemniej jednak, skupiając się na całości prac badawczych zawartych w rozprawie, pozwolił on na zapewnienie istotnej możliwości porównania uzyskanych przez autora wyników do rezultatów opisywanych w literaturze (zwykle naukowcy przyjmują stałą wartość wskaźnika w/s lub w/c w swoich badaniach). Z drugiej zaś strony, przeprowadzone badanie optymalnej gęstości upakowania może posłużyć jako wskaźnik przeprowadzenia takiej modyfikacji kompozycji materiałowej zapraw cementowych, aby zmaksymalizować właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu cementowego (o ile zajdzie taka potrzeba). Tabela 15 pozwala także zaobserwować, że dla niektórych z badanych serii, przyjęte w/c pozwoliło uzyskać bardzo zbliżone do maksymalnych gęstości upakowania składników mieszanek cementowych (np. dla FA10, FA20, GP20, 10FA+10GP). Można to interpretować, że metoda optymalizacji właściwości mechanicznych stwardniałych kompozytów

cementowych za pomocą znajdowania optymalnej gęstości upakowania składników mieszanki może mieć nieznaczny, dodatkowo pozytywny wpływ na tak dobrane kompozycje materiałowe. Wyniki uzyskane dla pozostałych serii materiałowych (niż wymienione w poprzednim zdaniu), zdają się podkreślać, że wykorzystanie metody optymalizacji gęstości upakowania składników mieszanki cementowej, może dodatkowo istotnie wpłynąć na właściwości mechaniczne stwardniałych kompozytów cementowych.

### 5.3. Wyniki badań kompozytów cementowych

#### 5.3.1. Gęstość objętościowa

Rysunek 83 przedstawia wyniki oznaczania gęstości objętościowej kompozytów cementowych modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym, odpadową mączką granitową oraz ich jednoczesnym dodatkiem.

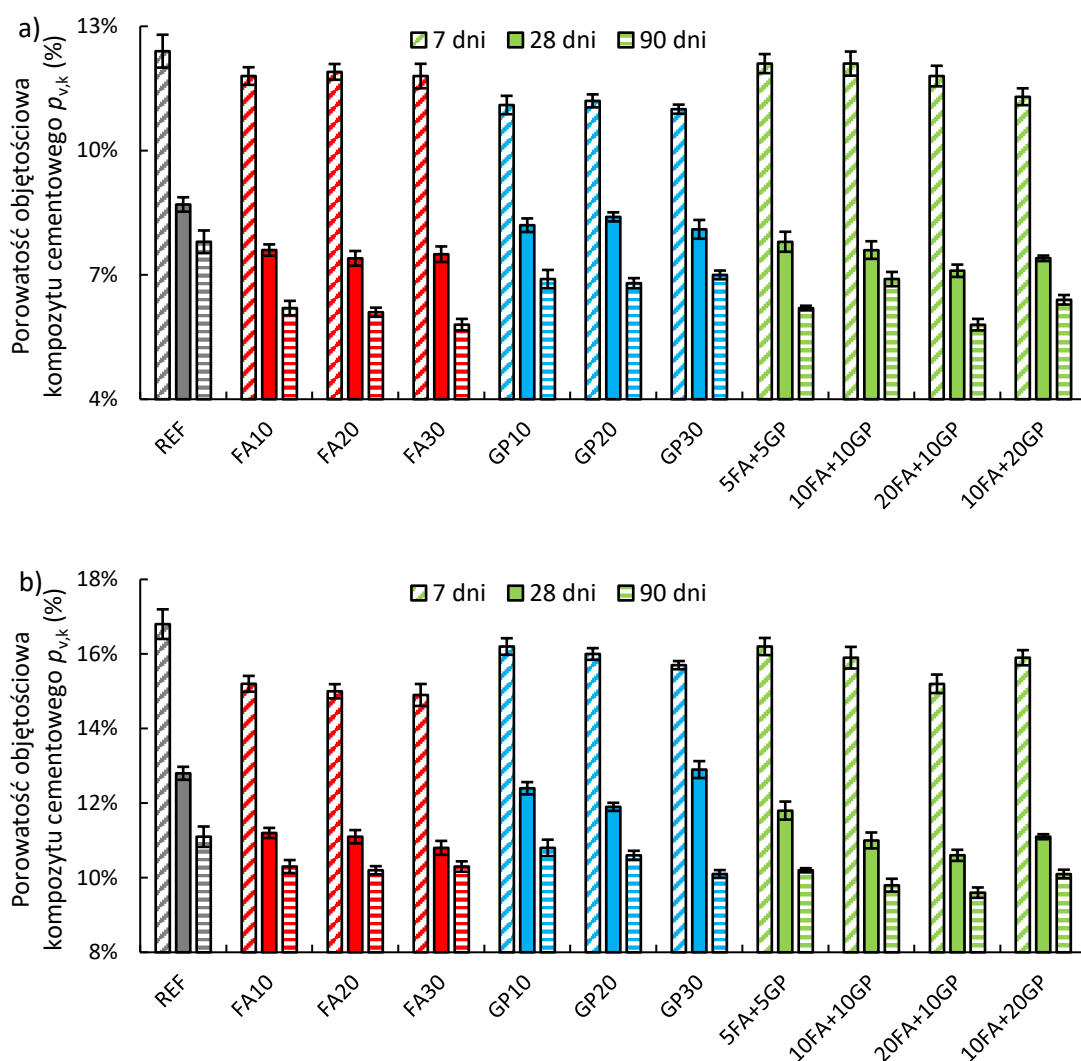


Rysunek 83. Wyniki oznaczania gęstości objętościowej kompozytu cementowego po 7, 28 i 90 dniach pielęgnacji wg. sposobu CC3: a) zaczynny b) zaprawa

Zarówno dla zaczynów jak i zapraw cementowych, w których zastąpiono część cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego można zauważyć trend, że serie te charakteryzują się podwyższoną gęstością objętościową w porównaniu do serii referencyjnej. Zauważono, że w zaczynach cementowych wpływ krzemionkowego popiołu lotnego jest podwyższony (szczególnie po 90 dniach pielęgnacji – można zaobserwować, że seria FA30 wykazuje się wzrostem o 4,4%), natomiast w zaprawach efekt dodatku krzemionkowego popiołu lotnego jest mniej widoczny (wzrost gęstości objętościowej o ok. 1,3% dla serii FA30 po 90 dniach pielęgnacji w stosunku do serii REF). Serie modyfikowane odpadową mączką granitową wykazują się nieznacznie podwyższoną gęstością objętościową w porównaniu do serii referencyjnej, jednak różnica ta jest większa po 7 dniach pielęgnacji, ale zmniejsza się wraz z upływem czasu. Można także stwierdzić, że gęstość objętościowa kompozytów modyfikowanych odpadową mączką granitową nie zmienia się znacząco wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazują się wynikami pomiędzy seriami modyfikowanymi tymi materiałami osobno. Najwyższą gęstość objętościową kompozytu uzyskano dla zaczynów i zapraw dla serii 20FA+10GP co jest poparciem tezy, że oba badane materiały (krzemionkowy popiół lotny i odpadowa mączka granitowa) prowadzą do poprawy gęstości objętościowej kompozytu cementowego w odniesieniu do serii referencyjnej.

### 5.3.2. Porowatość objętościowa

Rysunek 84 przedstawia wyniki badania porowatości objętościowej kompozytów cementowych.



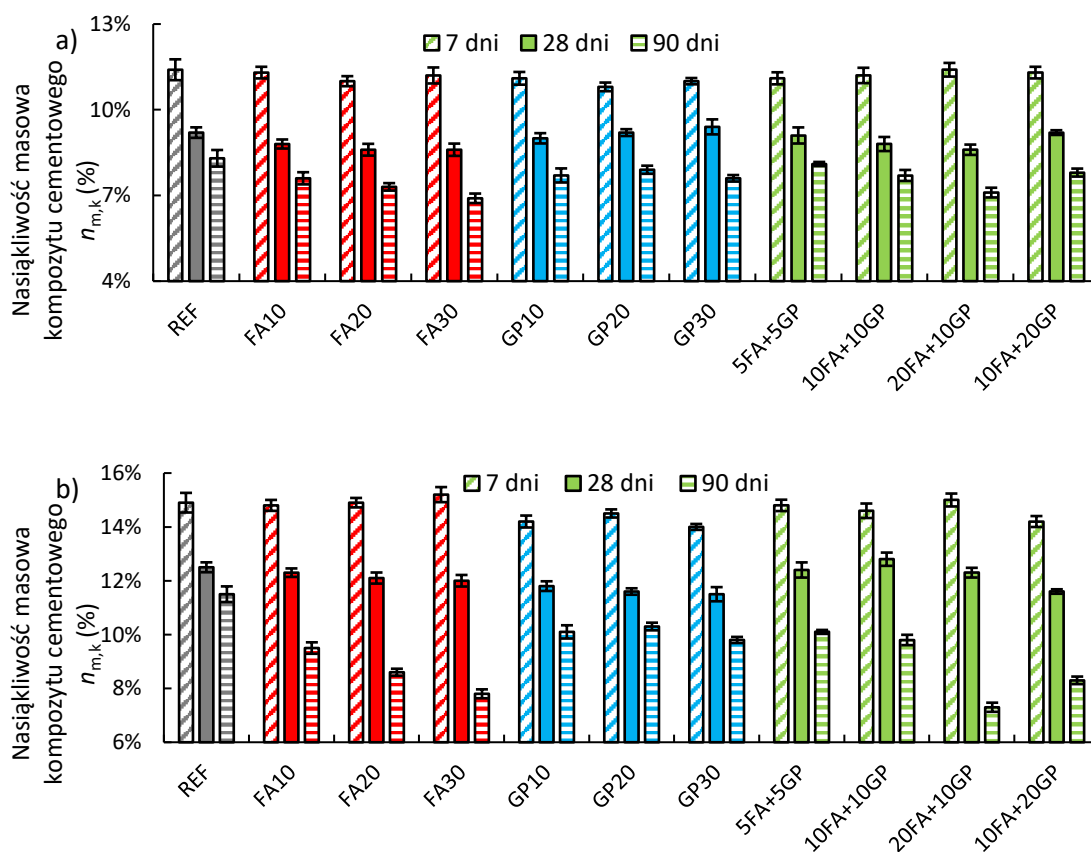
Rysunek 84. Wyniki oznaczenia porowatości kompozytów cementowych po 7, 28 oraz 90 dniach pielęgnacji wg. sposobu CC3: a) zaczyny b) zaprawy

Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazują się znacznie niższą porowatością niż kompozyty referencyjne (dla zaczynów i zapraw) – po 7 dniach pielęgnacji większe obniżenie porowatości zaobserwowano dla zapraw (z 16,8% na 14,8%), a dla zaczynów było to ok. 0,5%. Po 90 dniach pielęgnacji ten trend się odwrócił, gdyż wyższą redukcję porowatości objętościowej zaobserwowano dla zaczynów – z 8,1% na 6%, podczas gdy dla zapraw było to ok. 0,5%. Można także stwierdzić, że nie zauważono istotnej zmiany porowatości objętościowej badanego kompozytu wraz ze zmianą procentową zawartością krzemionkowego popiołu lotnego. Kompozyty modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej również wykazują zmniejszona porowatość objętościowa w stosunku do serii referencyjnej, jednak należy podkreślić, że w przypadku zaczynów

cementowych kompozyty te wykazały się niższą porowatością objętościową w porównaniu z krzemionkowym popiołem lotnym, natomiast dla zapraw kompozyty z odpadową mączką granitową wykazały się większą porowatością objętościową niż serie z krzemionkowym popiołem lotnym, jednak nadal była ona niższa niż serii referencyjnej. Podobnie jak dla serii z krzemionkowym popiołem lotnym, kompozyty z odpadową mączką granitową nie wykazują znaczących różnic wyników wraz ze zróżnicowaniem procentowej zawartości w kompozycji. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej również mają niższe wyniki porowatości objętościowej niż seria referencyjna. Zaobserwowano także, że porowatość objętościowa tych kompozytów jest bardziej zróżnicowana. Kompozyty z jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po 7 dniach pielęgnacji nie wykazywały istotnej poprawy porowatości objętościowej, jednak po 90 dniach to seria 20FA+10GP wykazała się najniższą jej wartością (5,3% dla zaczynów oraz 9,4% dla zapraw w porównaniu do serii REF odpowiednio 7,8% oraz 11,0%).

### 5.3.3. Nasiąkliwość masowa

Rysunek 85 przedstawia wyniki oznaczania nasiąkliwości masowej kompozytów cementowych.



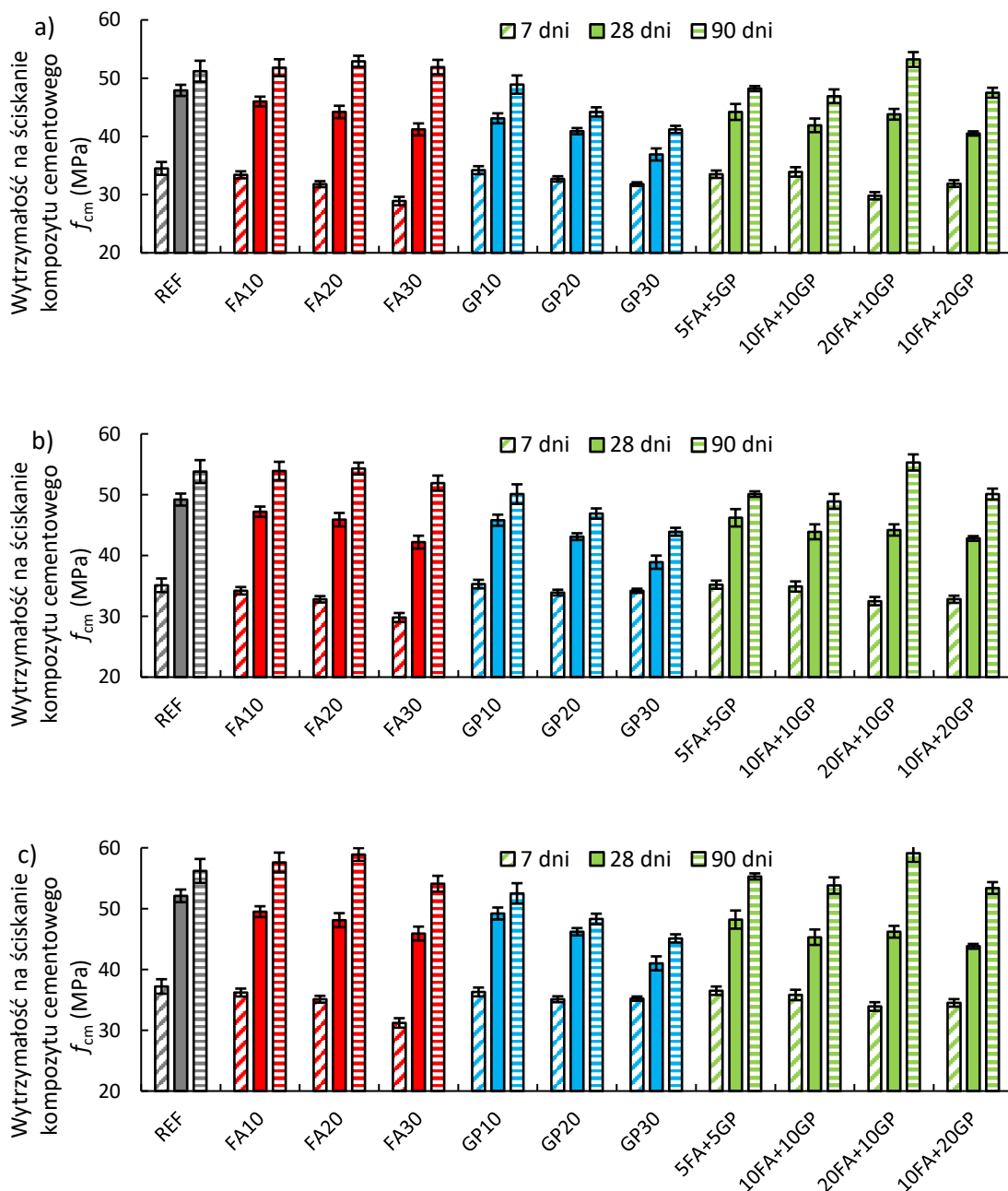
Rysunek 85. Wyniki oznaczenia nasiąkliwości masowej kompozytów cementowych po 7, 28 i 90 dniach pielęgnacji wg. sposobu CC3: a) zaczyny b) zaprawy

Kompozyty cementowe modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym nie wykazują znaczących zmian w nasiąkliwości masowej w porównaniu z serią referencyjną (po 28 dniach pielęgnacji). Dodatkowo nie zauważono także zróżnicowania uzyskanych wyników zależnie od procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego. Co ciekawe, po 90 dniach pielęgnacji opisany wcześniej trend uległ zmianie i serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym uzyskały niższą nasiąkliwość masową niż kompozyt referencyjny (nawet o ok. 3,8% dla serii FA30 zapraw), zaobserwowano także, że wraz ze wzrostem zawartości krzemionkowego popiołu lotnego w kompozycie efekt ten był większy. Kompozyty modyfikowane odpadową mączką granitową wykazują się zmniejszoną nasiąkliwością masową w porównaniu z serią referencyjną. Jednocześnie uzyskiwane wyniki nie zmieniają się wraz ze wzrostem zawartości odpadowej mączki granitowej w kompozycie. Większą redukcję nasiąkliwości masowej kompozytu modyfikowanego odpadową mączką granitową zaobserwowano dla zapraw niż dla zaczynów, gdzie zaobserwowano nawet, że niektóre serie badawcze charakteryzowały się wyższą nasiąkliwością masową niż seria referencyjna. Większą redukcję nasiąkliwości masowej kompozytu z odpadową mączką granitową można zaobserwować po 90 dniach pielęgnacji. Co może być związane z faktem, że oznaczenie nasiąkliwości masowej wykonano dla serii pielęgnowanych wg. sposobu CC3, tj. w wodzie. Dostęp do wody mógł pozwolić na lepsze wykorzystanie zmniejszonej zawartości cementu oraz uzyskanie wyższego stopnia hydratacji cementu. Ten fakt w połączeniu z opisaną wcześniej tendencją odpadowej mączki granitowej do poprawiania wypełniania struktury kompozytu mógł doprowadzić do zmniejszenia się jego nasiąkliwości masowej. Kompozyty cementowe modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po 7 i 28 dniach pielęgnacji wykazują się zbliżonymi wynikami jak uzyskane dla serii referencyjnej. Istotną zmianę zaobserwowano dla kompozytów badanych po 90 dniach pielęgnacji – ich nasiąkliwość masowa była znacząco niższa niż serii referencyjnej. Szczególnie dobre wyniki uzyskano dla serii FA20+10GP, dla której zanotowano redukcję nasiąkliwości masowej z 8,3% (REF) na 7,1% (dla zaczynów) oraz z 11,8% (REF) na 7,9% (dla zapraw). Zaobserwowane wyniki można łączyć dla serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym z wywoływaną przez ten materiał reakcją pucolanową, która pozwala na pozytywny rozwój właściwości w czasie, podczas gdy dla serii modyfikowanych odpadową mączką granitową lepsze wyniki nasiąkliwości masowej można łączyć z poprawą ułożenia składników mieszanki.



## 5.3.4. Wytrzymałość na ściskanie

Rysunek 86 oraz Rysunek 87 przedstawiają wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie odpowiednio dla zaczynów oraz zapraw cementowych.



Rysunek 86. Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych po 7, 28 i 90 dniach ich pielęgnacji – zaczyny: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC3

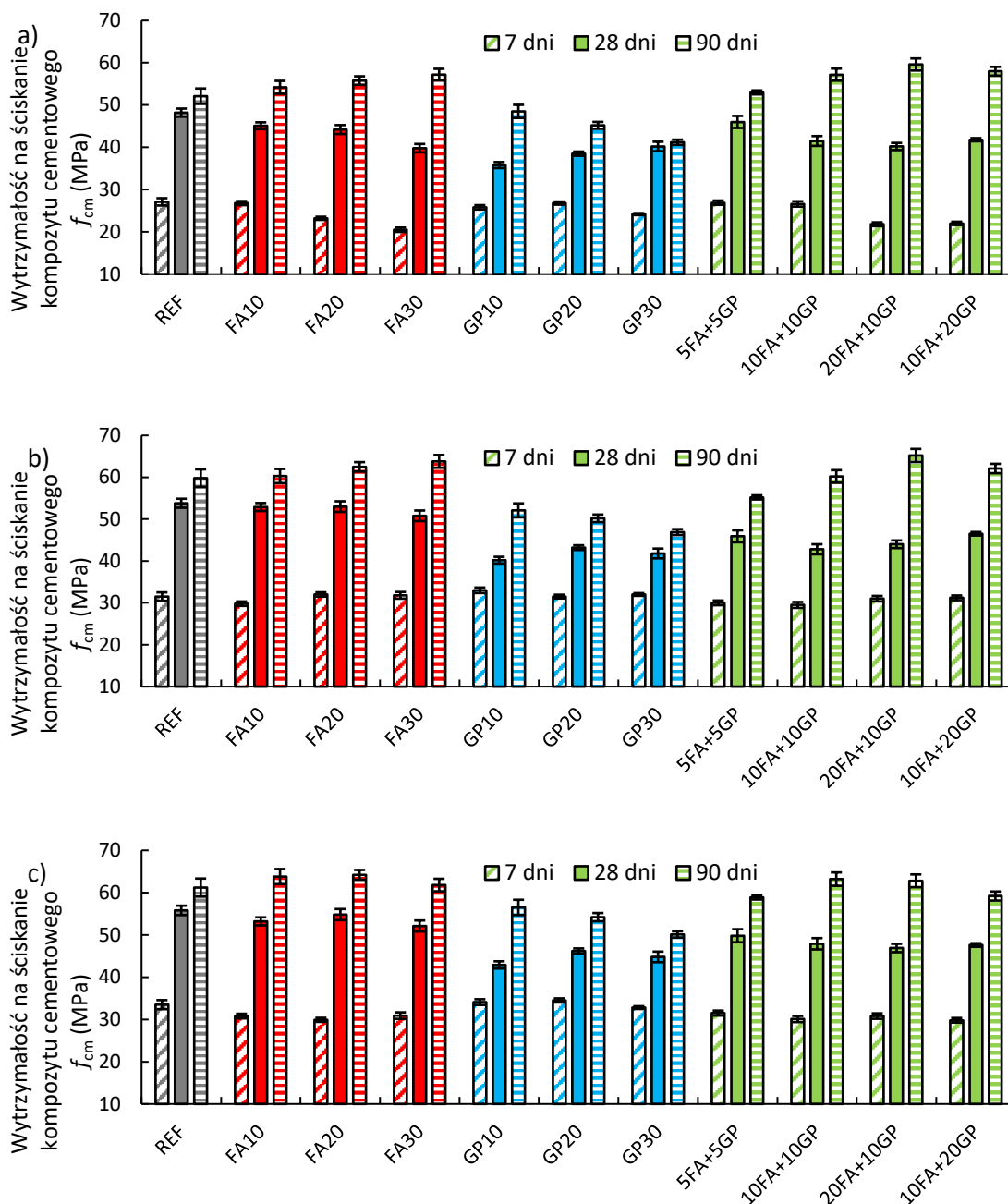
Analizując Rysunek 86a, który przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie zaczynów cementowych pielęgnowanych według sposobu CC1, można zauważyć, że wszystkie serie badawcze

wykazują się niższą wytrzymałością na ściskanie niż seria referencyjna po 7 i 28 dniach pielęgnacji. Po 90 dniach pielęgnacji serie, które zawierają w sobie krzemionkowy popiół lotny zyskały na wytrzymałości i ich wyniki są porównywalne (lub nieco wyższe) niż wytrzymałość na ściskanie serii REF. Analizując wyniki kompozytów modyfikowanych tylko krzemionkowym popiołem lotnym można zauważyć, że po 7 i 28 dniach obserwuje się spadek wytrzymałości kompozytu wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu tym materiałem. Tendencja ta jednak odменя się po 90 dniach pielęgnacji, gdzie dla wszystkich trzech serii badawczych odnotowano zbliżone do siebie wyniki wytrzymałości na ściskanie. W przypadku serii modyfikowanych jedynie odpadową mączką granitową obserwuje się spadek wytrzymałości na ściskanie niezależnie od czasu pielęgnacji. Jednocześnie można stwierdzić, że najmniejsze różnice w stosunku do serii REF występują po 7 dniach pielęgnacji, a następnie wraz ze wzrostem czasu pielęgnacji różnica ta rośnie. Zauważono, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu maleje wytrzymałość na ściskanie niezależnie od czasu pielęgnacji kompozytu. Kompozyty modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazują się także niższą wytrzymałością na ściskanie niż seria referencyjna, jednak uzyskanie wyniki plasują się na wykresie pomiędzy tymi uzyskanymi dla serii z krzemionkowym popiołem lotnym, a serii z odpadową mączką granitową. Co istotne, zauważono, że przy większym dodatku krzemionkowego popiołu lotnego (10% i więcej) znacząco wzrasta wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach pielęgnacji w stosunku do wyników po 28 dniach pielęgnacji.

Rysunek 86b przedstawia wyniki badania wytrzymałości na ściskanie zaczynów pielęgnowanych według sposobu CC2. Dla kompozytów modyfikowanych tylko krzemionkowym popiołem lotnym zauważono (podobnie jak dla sposobu pielęgnacji CC1), że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego maleje wytrzymałość na ściskanie kompozytu. Jednak obserwowane zmiany są niższe niż wykazały to serie pielęgnowane według sposobu CC1. Po 90 dniach pielęgnacji serie modyfikowane tylko krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się znacznie podwyższonymi wynikami w stosunku do serii po 28 dniach pielęgnacji co jest pozytywnym efektem. Zaczyny modyfikowane dodatkiem jedynie odpadowej mączki granitowej (podobnie jak w przypadku sposobu pielęgnacji CC1) wykazują niższe wyniki wytrzymałości na ściskanie niż seria referencyjna. Zauważa się także, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej wytrzymałość na ściskanie spada. Zaobserwowany spadek wytrzymałości dla 10% zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej jest jednak nieznaczny, co pozytywnie świadczy o potencjale wykorzystania tego materiału. Zaczyny modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w większości wykazały się niższymi wynikami wytrzymałości na ściskanie niż seria referencyjna, jednak odnotowane różnice są niższe niż w przypadku pielęgnacji CC1, a nawet seria 20FA+10GP wykazała się wyższą wytrzymałością na ściskanie po 90 dniach niż seria REF. Zaobserwowano, że dla serii 10FA+20GP, która sumarycznie zastępuje aż 30% cementu w kompozycie,

uzyskane wyniki po 90 dniach były wyższe niż uzyskane dla wszystkich serii modyfikowanych odpadową mączką granitową.

Rysunek 86c przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie zaczynów pielęgnowanych według sposobu CC3, a zatem z dostępem ze wszystkich stron do wody, co powinno zaowocować najwyższymi wynikami właściwości mechanicznych kompozytu. Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym (FA10, FA20, FA30) wykazują się po 7 i 28 dniach pielęgnacji niższymi wynikami niż seria referencyjna, a uzyskane wyniki zmniejszają się wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego. Jednak po 90 dniach pielęgnacji zaczyny te charakteryzowały się znaczącym przyrostem właściwości mechanicznych co pozwoliło uzyskać wyniki wytrzymałości zbliżone (FA30) lub wyższe niż serii REF (FA10, FA20). Należy jednak pozytywnie ocenić fakt, że połączenie modyfikacji kompozytu krzemionkowym popiołem lotnym oraz sposobu pielęgnacji CC3 pozwoliło na redukcję nawet 30% cementu w kompozycie bez znaczącego zmniejszenia się jego właściwości mechanicznych. Zaczyny modyfikowane odpadową mączką granitową (GP10, GP20, GP30), podobnie jak dla wcześniej omówionych wyników dla sposobów pielęgnacji CC1 i CC2, wykazują niższą wytrzymałość na ściskanie niż kompozyt referencyjny po 7, 28 oraz 90 dniach pielęgnacji, jednak zaobserwowane różnice są znacznie mniej istotne niż w przypadku wcześniej omówionych sposobów pielęgnacji. Obserwuje się także, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w zaczynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej jego wytrzymałość na ściskanie spada. Zmniejszenie się różnic uzyskanych wyników w stosunku do innych rodzajów pielęgnacji można tłumaczyć faktem, że dzięki większej ilości dostępnej wody w kompozycie (oraz zapobieganiu jej utracie w trakcie pielęgnacji) zmniejszona ilość cementu miała lepsze warunki do hydratacji, co pozwoliło na osiągnięcie wyższego stopnia jego hydratacji. Wyniki wytrzymałości na ściskanie zaczynów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej (podobnie do wcześniej opisanych sposobów pielęgnacji) są niższe niż wytrzymałość serii REF po 7 i 28 dniach pielęgnacji. Jednak po 90 dniach pielęgnacji zaobserwowano, że właściwie wszystkie z analizowanych serii z jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazały się wytrzymałością na ściskanie zbliżoną lub wyższą niż wytrzymałość serii REF po tym czasie, a nawet dla serii 20FA+10GP uzyskano wyniki wyższe niż dla serii REF o 8,3% co jest niezwykle pozytywne. Zaobserwowano także, że w przypadku serii z jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej uzyskane wyniki są bardziej do siebie zbliżone i nie zauważa się tak oczywistej tendencji spadku wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu.



Rysunek 87. Wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie kompozytów cementowych po 7, 28 i 90 dniach ich pielęgnacji – zaprawy: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC3

Rysunek 87a przedstawia wyniki oznaczania wytrzymałości na ściskanie dla zapraw cementowych pielęgnowanych według sposobu CC1. Kompozyty modyfikowane tylko krzemionkowym popiołem lotnym po 7 i 28 dniach pielęgnacji charakteryzowały się niższą wartością wytrzymałości niż seria referencyjna, a różnica ta rosła wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego. Po 90 dniach pielęgnacji można dostrzec w wynikach aktywność pucolanową krzemionkowego popiołu lotnego, którego dodatek doprowadził do uzyskania wyższych

wytrzymałości na ściskanie dla tych serii zapraw, a ich wartość rosła wraz ze wzrostem dodatku krzemionkowego popiołu lotnego. Zaprawy modyfikowane tylko dodatkiem odpadowej mączki granitowej (GP10, GP20, GP30) wykazały się niższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie niż seria referencyjna w całym czasie badania, jednak po 7 dniach zaobserwowane różnice były najmniejsze, a wraz ze wzrostem czasu pielęgnacji kompozytów, rosła także różnica pomiędzy seriami modyfikowanymi odpadową mączką granitową, a serią REF. Zaprawy w których zastąpiono część cementu jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej charakteryzowały się niższymi wartościami wytrzymałości na ściskanie po 7 i 28 dniach, podczas gdy po 90 dniach pielęgnacji uzyskano wyniki zbliżone lub nawet wyższe niż dla serii referencyjnej (dla serii o min. dodatku 10% cementu). Najwyższe wyniki odnotowano dla serii w których zastąpiono aż 30% cementu co można odebrać za pozytywną przesłankę do stosowania tego typu kombinacji materiałowych. Ten fakt może być związany z połączeniem pozytywnego wpływu krzemionkowego popiołu lotnego (zwiększenie gęstości objętościowej, zmniejszenie zapotrzebowania na wodę) oraz odpadowej mączki granitowej (kształt ziaren wspomagający układanie się składników mieszanki, lepsze wypełnienie pustek powietrznych w kompozycie).

Rysunek 87b przedstawia wyniki wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych pielęgnowanych według sposobu CC2. Kompozycje materiałowe w których zastąpiono część cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego wykazują się znacznie lepszymi wynikami niż opisane w poprzednim akapicie dla sposobu pielęgnacji CC1, gdyż po 7 dniach pielęgnacji kompozyty te charakteryzowały się zbliżonymi lub wyższymi wynikami niż seria REF. Po 28 dniach pielęgnacji uzyskano wyniki nieznacznie niższe od serii REF, a po 90 dniach pielęgnacji wyniki wytrzymałości na ściskanie były wyższe niż seria REF, a ich wartość wzrastała wraz ze wzrostem zawartości krzemionkowego popiołu lotnego w kompozycji materiałowej. Zaprawy modyfikowane dodatkiem jedynie odpadowej mączki granitowej po 7 dniach pielęgnacji wg sposobu CC2 wykazały się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż seria REF, co może być związane z tendencją odpadowej mączki granitowej do poprawy gęstości upakowania kompozytu co często odzwierciedla się głównie we wczesnej (poniżej 14 dni) wytrzymałości na ściskanie. Niemniej jednak trend ten nie został utrzymany i po 28 i 90 dniach pielęgnacji odnotowano wyniki niższe niż dla serii REF. Po 28 dniach uzyskane wyniki były do siebie bardzo zbliżone, a po 90 dniach wyniki spadały wraz ze wzrostem procentowej zawartości odpadowej mączki granitowej w kompozycie. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazały się zbliżoną lub wyższą wytrzymałością na ściskanie niż seria REF po 7 dniach. Po 28 dniach pielęgnacji odnotowano jednak wyniki niższe niż dla serii REF. Trend ten jednak odwrócił się po 90 dniach pielęgnacji, kiedy to serie zawierające zarówno odpadową mączkę granitową jak i krzemionkowy popiół lotny uzyskały wyższe wyniki wytrzymałości na ściskanie niż kompozyt referencyjny. Podobnie jak wcześniej nie

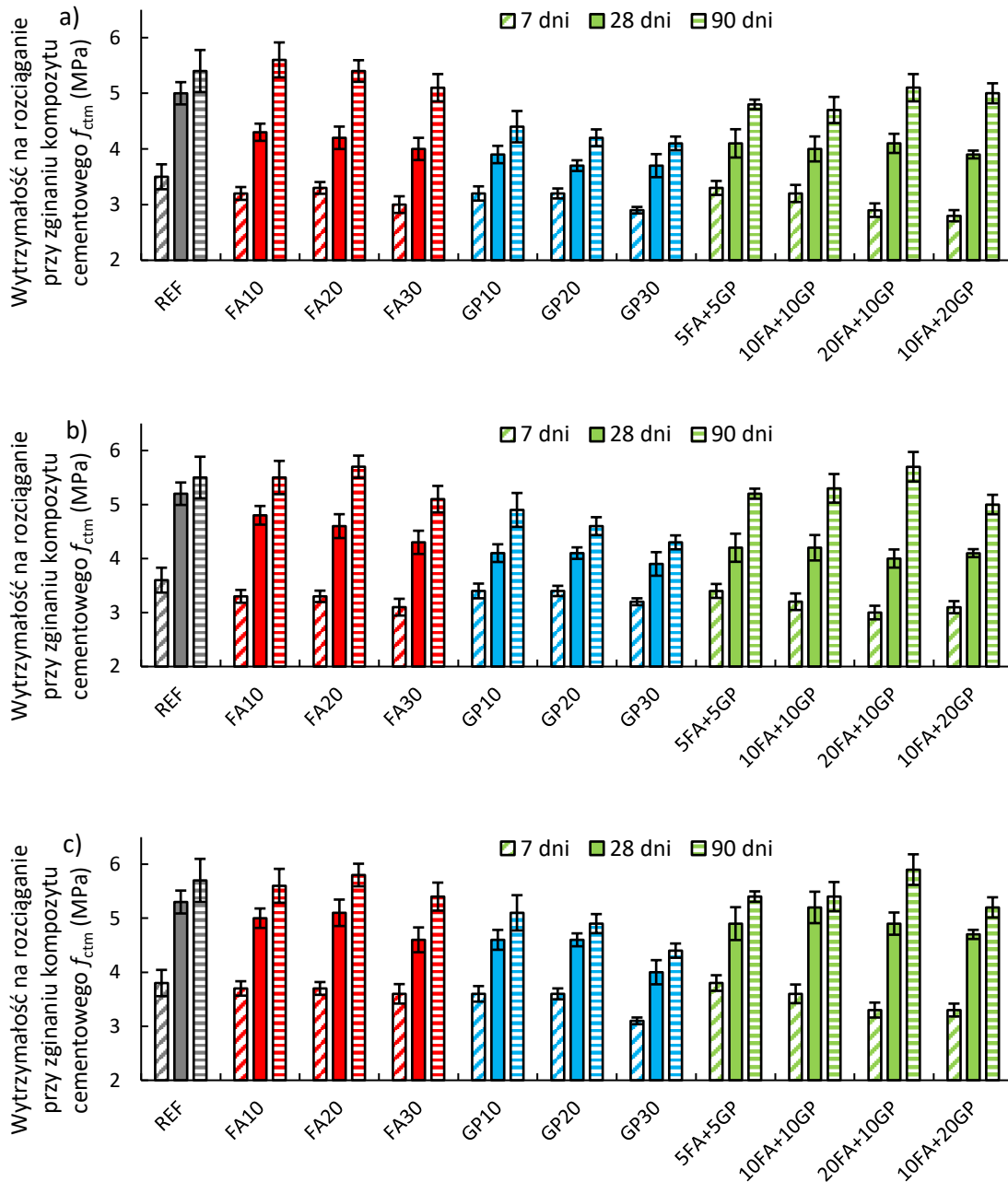
odnotowano istotnych różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami dla różnego procentowego zastąpienia cementu w kompozycie co należy uznać za pozytywny wynik.

Rysunek 87c prezentuje wyniki wytrzymałości na ściskanie zapraw cementowych pielęgnowanych według sposobu CC3. Zaprawy modyfikowane tylko krzemionkowym popiołem lotnym po 7 dniach pielęgnacji wykazywały wyniki niższe niż seria referencyjna. Po 28 dniach pielęgnacji wg sposobu CC3 można zauważyć, że wyniki nadal są nieznacznie niższe niż seria REF, jednak zaobserwowana różnica zmniejszyła się w porównaniu z wynikami po 7 dniach pielęgnacji. Po 90 dniach pielęgnacji dla serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym (FA10, FA20, FA30), uzyskano wyniki wyższe niż dla kompozytu referencyjnego. Zaprawy modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym nie wykazały w tym przypadku znaczących różnic związanych ze zmianą procentowego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego do kompozytu na co może mieć wpływ zastosowanie korzystnego sposobu pielęgnacji. Zaprawy modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową podobnie jak dla sposobu pielęgnacji CC2 wykazały się wyższą wytrzymałością na ściskanie po 7 dniach pielęgnacji niż seria REF. Analogicznie, trend ten zmienił się po 28 i 90 dniach pielęgnacji kiedy odnotowane wyniki są znacząco niższe niż dla serii REF. Szczególnie po 90 dniach pielęgnacji obserwuje się, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie spada jego wytrzymałość na ściskanie. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej charakteryzują się podobną zmiennością wyników jak dla serii pielęgnowanych wg sposobu CC2 – po 7 dniach pielęgnacji ich wytrzymałość była zbliżona do serii REF, po 28 dniach była niższa o ok. 20%, podczas gdy po 90 dniach pielęgnacji zaobserwowano wzrost wytrzymałości, która była wyższa od serii REF o kilka procent. Pozytywnie należy ocenić fakt, że serie 10FA+10GP oraz 20FA+10GP (zatem zastępujące kolejno 20 i 30% cementu w mieszance) charakteryzowały się najwyższymi wynikami ze wszystkich badanych serii pielęgnowanych wg sposobu CC3.

Analizując wpływ warunków pielęgnacji kompozytów dla zaczynów i dla zapraw należy stwierdzić, że ma on istotny wpływ nie tylko na wartość uzyskiwanych wyników wytrzymałości na ściskanie, ale także na charakterystykę ich zmienności. Wyżej przedstawione wyniki wytrzymałości na ściskanie wskazują jasno, że optymalnym sposobem pielęgnacji jest sposób CC3, jednak z racji niemożliwości jego uzyskania w warunkach in situ, należy stwierdzić, że powinnością osób wykonujących cementową warstwę wierzchnią na budowie musi być zapewnienie jak najlepszych warunków pielęgnacji (np. zbliżonych do CC2) co pozwoli na uzyskanie wyższych wytrzymałości na ściskanie. Wyniki uzyskane dla kompozytów pielęgnowanych według sposobu CC1 wykazują średnio 20% niższe wartości niż kompozyty pielęgnowane wg sposobu CC3 oraz ok. 12% niższe wartości niż kompozyty pielęgnowane według sposobu CC2.

## 5.3.5. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Rysunek 88 oraz Rysunek 89 przedstawiają wyniki oznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu odpowiednio dla zaczynów oraz zapraw cementowych.



Rysunek 88. Wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów cementowych po 7, 28 i 90 dniach ich pielęgnacji – zaczyny: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu

CC3

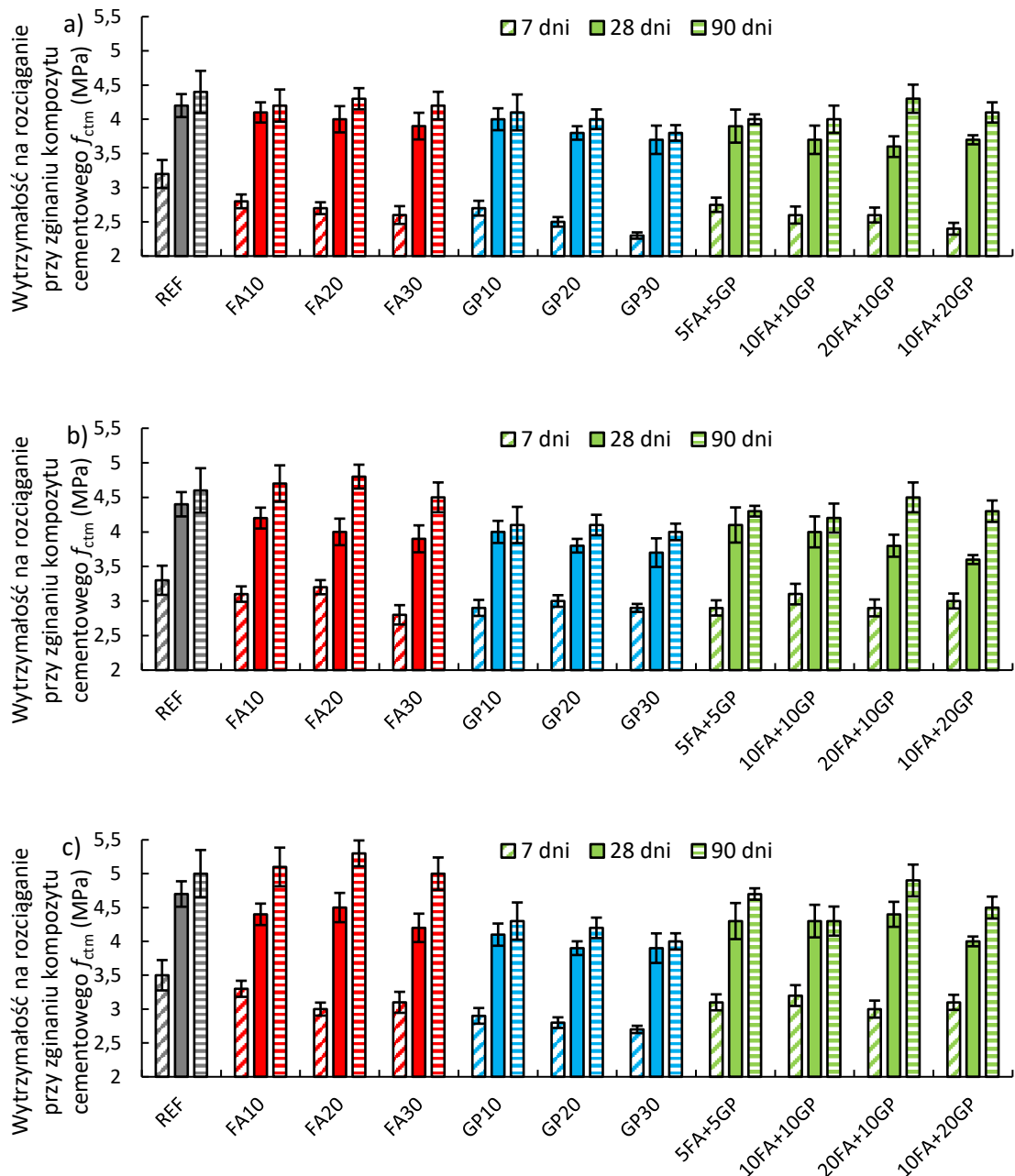
Rysunek 88a przedstawia wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaczynów cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC1. Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się wynikami niższymi niż seria referencyjna (z wyjątkiem serii FA10 po 90 dniach pielęgnacji). Obserwuje się także, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie za pomocą dodatku krzemionkowego popiołu lotnego maleje jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Zaczyny modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej wykazały się również niższymi wynikami niż seria REF, jednak zaobserwowane różnice są znacznie wyższe niż w przypadku serii modyfikowanych jedynie krzemionkowym popiołem lotnym. Zaczyny modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej charakteryzują się także niższą wartością wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu niż seria REF, a uzyskane wyniki plasują te serie pomiędzy wynikami uzyskanymi dla kompozytów modyfikowanych oddzielnie jedynie krzemionkowym popiołem lotnym i odpadową mączką granitową. Należy stwierdzić, że w przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zawartość cementu w kompozycie jest szczególnie istotna w celu uzyskania wymaganej wytrzymałości – szczególnie dla kompozytów pielęgnowanych w warunkach powietrzno – suchych.

Rysunek 88b prezentuje wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zaczynów pielęgnowanych zgodnie ze sposobem CC2. Zaczyny modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się wynikami nieco zmiennymi w porównaniu z akapitem wcześniej. Podobnie jak wcześniej po 7 i 28 dniach pielęgnacji obserwuje się niższe wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, jednak po 90 dniach pielęgnacji badane kompozyty charakteryzowały się wyższą wartością niż seria REF (z wyjątkiem serii FA30, której wynik był nieznacznie niższy). Zaczyny cementowe modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową wykazały się analogicznymi wynikami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu jak dla serii pielęgnowanych według CC1, jednak wyraźnie zmniejszyła się dysproporcja pomiędzy wynikami zaczynów modyfikowanych, a serią REF. Zaczyny modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej charakteryzują się niższą wartością wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu niż seria REF. Po 7 dniach pielęgnacji zaobserwowano, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie, spada jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Tego trendu jednak nie zaobserwowano dla tych kompozycji po 28 i 90 dniach pielęgnacji.

Rysunek 88c obrazuje wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla zaczynów pielęgnowanych wg sposobu CC3. Zaczyny modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym wykazują się zbliżoną wytrzymałością jak seria REF po wszystkich analizowanych czasach pielęgnacji. Można to uznać za znaczący, pozytywny wpływ zastosowanych warunków pielęgnacji. Nie zaobserwowano dla tych serii korelacji pomiędzy procentową zawartością cementu w kompozycie, a jego wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu. Dla zaczynów modyfikowanych dodatkiem jedynie odpadowej mączki granitowej po 7 dniach ich pielęgnacji zaobserwowano, że przy maksymalnym



zastąpieniu do 20% cementu dodatkiem odpadowej mączki grniaowej możliwe jest uzyskanie wyników zbliżonych do serii REF, jednak seria GP30 wykazała się już bardziej znaczącym spadkiem. Po 28 i 90 dniach pielęgnacji odnotowano wyniki niższe niż dla serii REF, a same wyniki zmniejszały się wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie. Zaczyny modyfikowane jednocześnie dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po 7 dniach pielęgnacji charakteryzują się wynikami zbliżonymi do serii REF, jednak różnica ta zwiększa się na niekorzyść wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie. Po 28 dniach pielęgnacji także obserwuje się wyniki zbliżone do tych referencyjnych, jednak nie jest tak jasno widoczny trend związany z wpływem procentowej zawartości modyfikatorów w kompozycie jak to było dla kompozytów po 7 dniach. Po 90 dniach pielęgnacji odnotowano wyniki równe lub wyższe niż seria referencyjna, a dla serii 20FA+10GP odnotowano nawet wynik wyższy o ok. 5%.



Rysunek 89. Wyniki oznaczania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu kompozytów cementowych po 7, 28 i 90 dniach ich pielęgnacji – zaprawy: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC3

Rysunek 89a przedstawia wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zapraw cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC1. Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzują się niższymi wynikami niż seria REF. Obserwuje się też, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego różnica ta rośnie niekorzystnie. Zaprawy modyfikowane jedynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej

wykazują po wszystkich analizowanych czasach pielęgnacji wyniki niższe niż seria REF. Widoczna jest korelacja pomiędzy zawartością cementu w kompozycie, a jego wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazują się niższymi wynikami od serii REF, jednak za pozytywne należy uznać, że właściwie wszystkie z nich plasują się na wykresie pomiędzy wynikami uzyskanymi dla kompozytów modyfikowanych jedynie krzemionkowym popiołem lotnym lub odpadową mączką granitową.

Rysunek 89b prezentuje wartości wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zapraw pielęgnowanych zgodnie ze sposobem CC2. Zaprawy modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się po 7 i 28 dniach pielęgnacji wynikami gorszymi od serii REF, a różnica pomiędzy nimi rośnie wraz ze zmniejszeniem procentowej zawartości cementu w kompozycie. Po 90 dniach pielęgnacji trend ten jednak się zmienia i można zaobserwować, że wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu znacząco rośnie oraz niewidoczna jest korelacja pomiędzy wytrzymałością, a zawartością cementu w kompozycie. Może to być związane z pozytywnym wpływem zastosowanych warunków pielęgnacji na rozwój reakcji pucolanowej, która pozwala wypełnić dodatkowo wolne przestrzenie w kompozycie poprawiając przy tym jego właściwości. Podobnie jak dla sposobu pielęgnacji CC1, serie modyfikowane jedynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej wykazują się najniższymi wartościami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i są one niższe od serii REF po wszystkich analizowanych czasach pielęgnacji. Ewidentnie można także zaobserwować, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu w kompozycie maleje jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po 7 dniach pielęgnacji charakteryzują się najwyższymi wynikami z analizowanych modyfikowanych serii i są one zbliżone do serii REF. Po 28 dniach jednak osiągają one nieco niższe wyniki jak serie modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym, ale przy okazji są one znacznie wyższe niż wyniki uzyskane dla serii modyfikowanych jedynie odpadową mączką granitową. Po 90 dniach trend jest podobny, jednak różnice do serii modyfikowanych tylko krzemionkowym popiołem lotnym są większe.

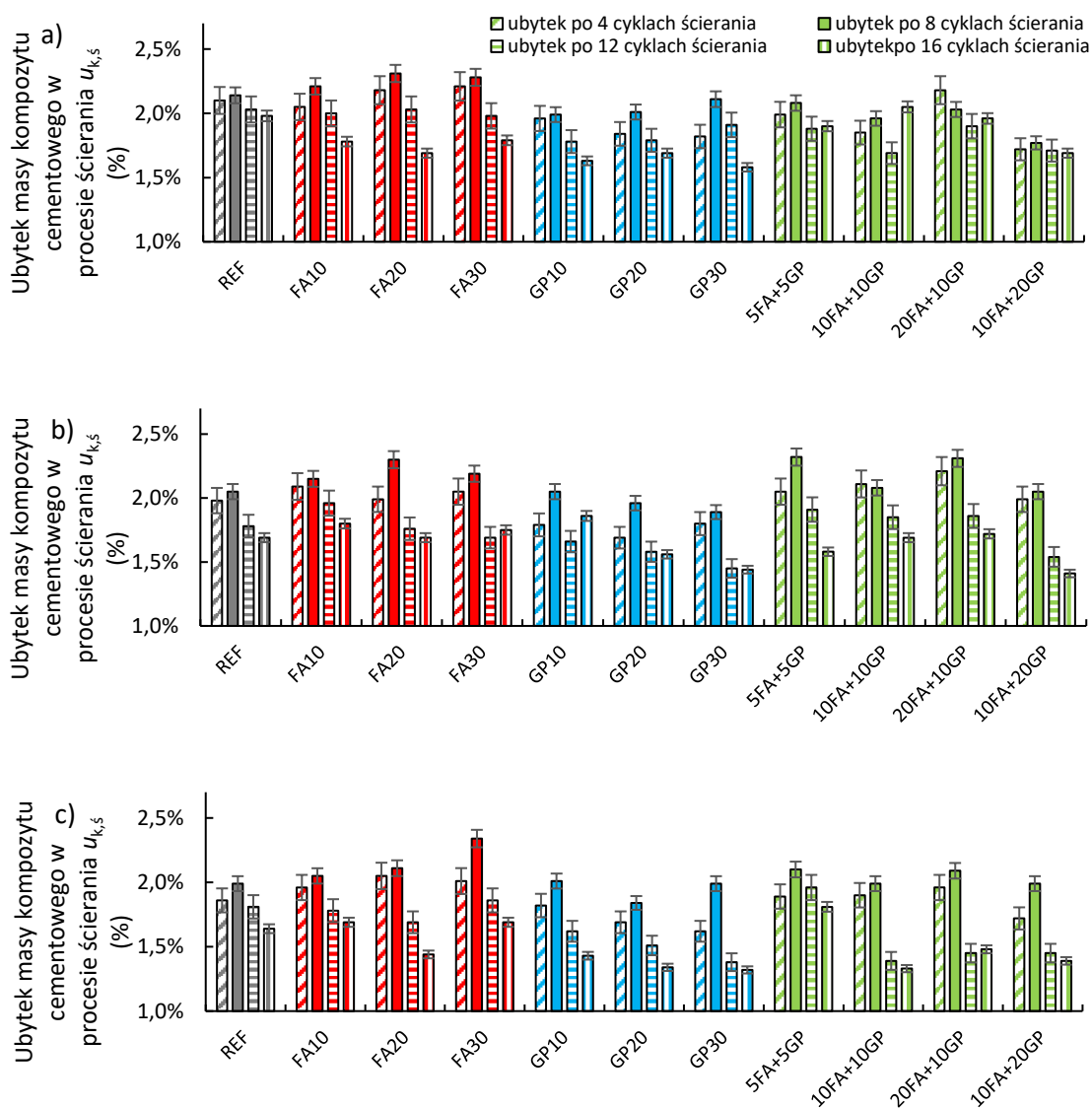
Rysunek 89c obrazuje wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla zapraw pielęgnowanych wg sposobu CC3. Zaprawy modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym po 7 i 28 dniach pielęgnacji wykazują się wynikami niższymi niż seria REF, a ich wartość zmniejsza się wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego. Po 90 dniach pielęgnacji obserwuje się zmianę tego trendu, a uzyskane wyniki są wyższe niż wartości dla serii REF nawet o ok. 8% (FA20). Zaprawy modyfikowane jedynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej podobnie jak wcześniej charakteryzują się najgorszymi wynikami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Dodatkowo wyniki maleją wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem

krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po 7 dniach pielęgnacji wykazują wyniki niższe niż seria REF, jednak są one do niej najbardziej zbliżone ze wszystkich analizowanych serii. Po 28 i 90 dniach jednak ten trend nieznacznie się zmienia, plasując uzyskane wartości pomiędzy tymi uzyskanymi dla serii modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym, a odpadową mączką granitową. W przypadku tych serii nie obserwuje się tak widocznego połączenia pomiędzy procentową zawartością cementu w kompozycie, a jego właściwościami mechanicznymi.

W przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu nie obserwuje się już tak widocznego wpływu modyfikatorów na właściwości mechaniczne kompozytu jak miało to miejsce w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Podobnie jak w literaturze [76, 156], zaobserwowano, że warunki pielęgnacji mają wpływ na uzyskiwane wartości wytrzymałości różnicując je kolejno między sobą o ok. 8% (CC1-CC2) oraz o ok. 13% (CC1-CC3), jednak nie zauważono ich wpływu na zmianę tendencji lub dynamiki uzyskiwanych wyników dla serii modyfikowanych. Efekt sposobu pielęgnacji najlepiej widoczny jest dla serii modyfikowanych jedynie krzemionkowym popiołem lotnym, ale do pozostałych serii nie jest on tak klarowny.

## 5.3.6. Odporność na ścieranie

Rysunek 90 oraz Rysunek 91 przedstawiają odpowiednio wyniki oznaczania ubytku masy zaczynu i zaprawy cementowej w procesie jego ścierania.



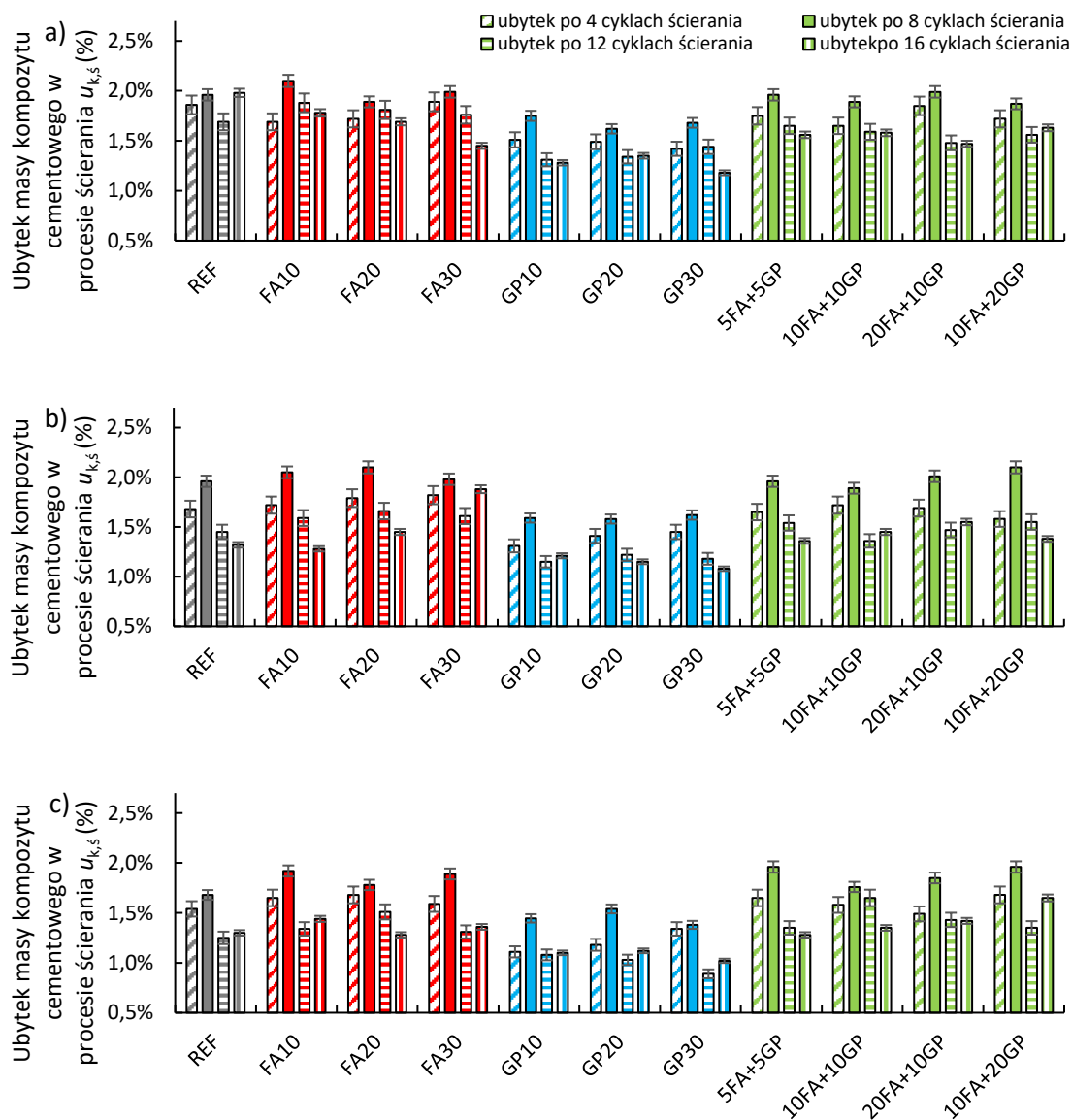
Rysunek 90. Wyniki oznaczania odporności na ścieranie kompozytów cementowych po 28 dniach ich pielęgnacji – zaprawy: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC3

Rysunek 90a przedstawia wyniki odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC1 przez 28 dni. Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzują się zwiększonym ubytkiem masy w stosunku do kompozytu referencyjnego. Dodatkowo wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego rośnie ubytek masy kompozytu w procesie ścierania. Kompozyty modyfikowane odpadową mączką granitową wykazują się zmniejszonym ubytkiem masy w procesie ścierania w porównaniu

z kompozytem referencyjnym. Zauważa się nieznaczny wzrost ubytku wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu. Kompozyty modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazują niższe ubytki masy w procesie ścierania niż seria REF (z wyjątkiem serii 20FA+10GP), a uzyskane wartości pozwalają plasować je pomiędzy wynikami uzyskanymi dla modyfikacji jedynie odpadową mączką granitową, a krzemionkowym popiołem lotnym.

Rysunek 90b prezentuje wartości odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych zgodnie ze sposobem CC2 przez 28 dni. Zaprawy modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się podobnie jak wcześniej podwyższonym ubytkiem masy w procesie ścierania w porównaniu do kompozytu REF, natomiast nie zauważa się już tak widocznej korelacji pomiędzy ubytkiem masy, a procentową zawartością cementu w kompozycie jak było to dla sposobu pielęgnacji CC1. Serie modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową po raz kolejny wykazały się zmniejszonym ubytkiem masy w porównaniu do kompozytu referencyjnego, a ubytek zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości odpadowej mączki granitowej w kompozycie co należy uznać za szczególnie pozytywny efekt. Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej po raz kolejny uzyskały wyniki pośrednie, jednak należy zauważyć, że są one bardziej zbliżone do wartości uzyskanych dla krzemionkowego popiołu lotnego niż do odpadowej mączki granitowej.

Rysunek 90c obrazuje wyniki odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC3 przez 28 dni. Zaprawy modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym wykazują większy ubytek masy niż seria REF, a różnica między nimi rośnie na niekorzyść wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego. Zaprawy modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową ponownie wykazały się najniższym ubytkiem masy w procesie ścierania, a efekt zastosowania dodatku odpadowej mączki granitowej rośnie wraz z jej procentową zawartością w zaprawie (jednak mniej niż było to w przypadku sposobu pielęgnacji CC2). Zaprawy modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej charakteryzują się zbliżonymi wynikami do tych uzyskanych dla zapraw modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym. Za pozytywne należy uznać, że nie zauważa się istotnego wpływu procentowego zastąpienia cementu na uzyskany wynik procentowego ubytku masy w procesie ścierania.



Rysunek 91. Wyniki oznaczania odporności na ścieranie kompozytów cementowych po 90 dniach ich pielęgnacji – zaprawy: a) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC1 b) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC2 c) kompozyty pielęgnowane wg. sposobu CC3

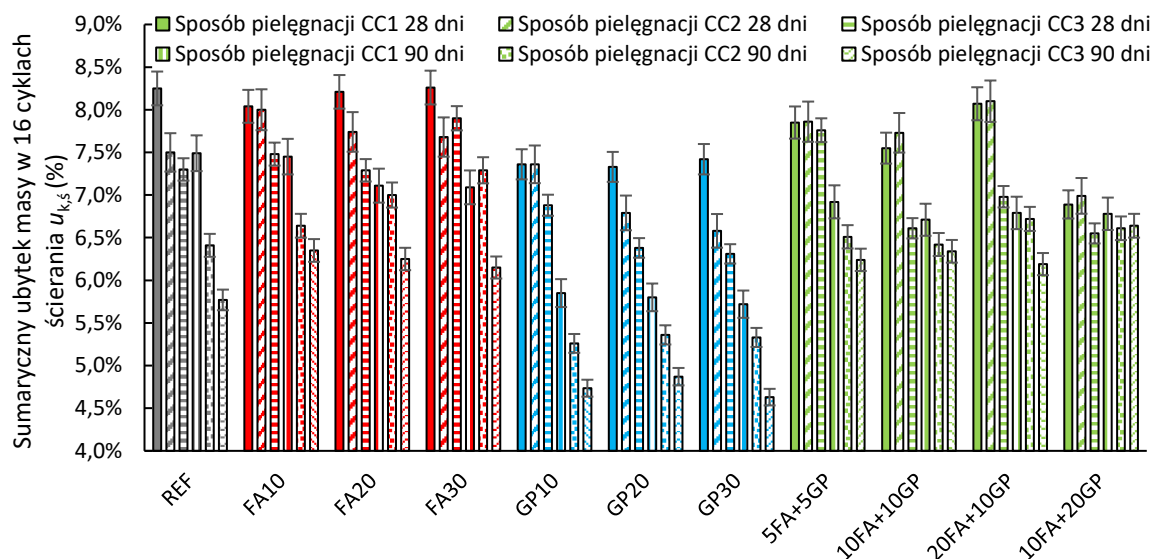
Rysunek 91a przedstawia wyniki odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC1 przez 90 dni. Kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym charakteryzują się zbliżonymi wynikami do serii REF. Nie zauważono wpływu procentowej zawartości cementu w kompozycie na ubytek jego masy w procesie ścierania. Zaprawy modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową wykazują najniższe wyniki ubytku masy w procesie ścierania co podkreśla pozytywny wpływ odpadowej mączki granitowej na odporność na ścieranie. Wyniki uzyskane dla jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej znajdują się pomiędzy tymi uzyskanymi dla serii modyfikowanych jedynie krzemionkowym popiołem lotnym, a odpadową mączką granitową.

Rysunek 91b prezentuje wartości odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych zgodnie ze sposobem CC2 przez 90 dni. Zaprawy modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały się wynikami zbliżonymi do tych opisanych przy analizie sposobu CC1. Zauważa się jednak pozytywny dla krzemionkowego popiołu lotnego efekt zwiększenia odporności kompozytu przy większej liczbie cykli ścierania (powyżej 8). Zaprawy modyfikowane jedynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej podobnie jak wcześniej wykazują najniższy ubytek masy kompozytu w procesie ścierania, uzyskując przy tym wysoką jednorodność kompozytu (wyniki po poszczególnych cyklach zbliżone są do siebie). Kompozyty modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej opisane są wynikami pośrednimi pomiędzy opisanymi wcześniej w tym akapicie, jednak należy podkreślić, że zauważa się korelację pomiędzy procentową zawartością cementu w kompozycie, a jego ubytkiem masy w procesie ścierania – im mniejsza zawartość cementu, tym większy ubytek masy.

Rysunek 91c obrazuje wyniki odporności na ścieranie zapraw cementowych pielęgnowanych wg sposobu CC3 przez 90 dni. Zaprawy modyfikowane jedynie krzemionkowym popiołem lotnym wykazują wyniki analogiczne dla pozostałych sposobów pielęgnacji. Zaprawy modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową kolejny raz uzyskały najniższe ubytki masy w procesie ścierania, osiągając przy tym dobrą jednorodność materiału. Kompozyty modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej uzyskały wyniki zbliżone lub nieznacznie wyższe niż te uzyskane dla kompozytów modyfikowanych jedynie krzemionkowym popiołem lotnym.

Należy podkreślić, że w przypadku określania procentowego ubytku masy kompozytu w procesie ścierania normalne jest uzyskanie zróżnicowanych wyników dla poszczególnych cykli procesu. Kompozyt zwykle nie ma jednorodnych właściwości po całej swojej wysokości, a dół próbki od którego rozpoczyna się proces ścierania zwykle ma nieznacznie gorsze właściwości niż jej środek, co wyjaśnia uzyskanie w wynikach pików rezultatów po 4 i 8 cyklach ścierania. Uzyskane wyniki pozwalają także określić jednorodność kompozytu. Rysunek 92 przedstawia podsumowanie wyników uzyskanych w próbie ścierania zapraw po 28 i 90 dniach.



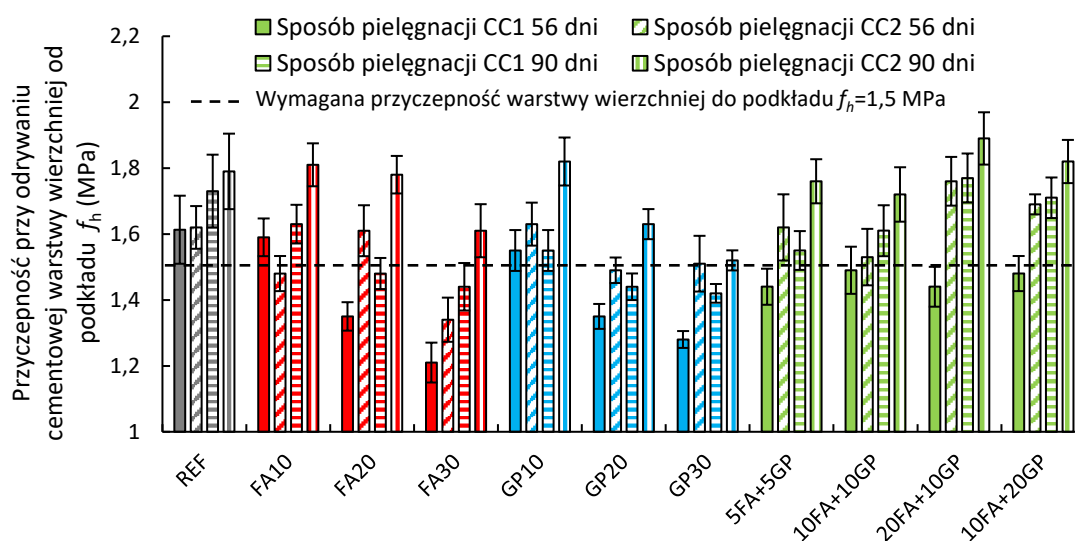


Rysunek 92. Sumaryczny ubytek masy kompozytu cementowego po 16 cyklach ścierania – zaprawy

Zauważa się, że warunki pielęgnacji kompozytu cementowego mają istotny wpływ na jego odporność na ścieranie – warunki CC1 uzyskały najwyższe wyniki ubytku masy kompozytu zarówno po 28 jak i 90 dniach pielęgnacji. Kompozyty pielęgnowane w warunkach CC2 uzyskały lepsze wyniki oznaczania ubytku masy w procesie ścierania, jednak nie są one tak satysfakcjonujące jak mogłoby się to wydawać, gdyż dla kompozytów modyfikowanych (wszystkie poza REF) są one nieznacznie lepsze jak te uzyskane dla CC1. Z drugiej jednak strony zdecydowanie warunki pielęgnacji CC3 są najbardziej korzystne dla kompozytów cementowych i pozwalają na osiągnięcie najniższego ubytku masy kompozytu w procesie ścierania. Warto wspomnieć, że uzyskane wyniki mają także istotny wpływ na cementową warstwę wierzchnią – stosowana zwykle na budowie metoda pielęgnacji CC2 może okazać się niewystarczająca do uzyskania oczekiwanej odporności na ścieranie, dlatego też rekomenduje się wykorzystanie specjalistycznych płynów i przykrycia podłóg w trakcie ich pielęgnacji co może sprzyjać rozwojowi właściwości funkcjonalnych cementowej warstwy wierzchniej.

### 5.3.7. Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu

Rysunek 93 przedstawia wyniki oznaczania przyczepności cementowej warstwy wierzchniej od podkładu.



Rysunek 93. Wyniki oznaczania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu

Kompozyty modyfikowane dodatkiem jedynie krzemionkowego popiołu lotnego charakteryzują się niższą wartością przyczepności przy odrywaniu w porównaniu z serią REF. Niemniej jednak w przypadku kompozytów pielęgnowanych według sposobu CC2 przez 90 dni zaobserwowano, że możliwe jest uzyskanie wyników zbliżonych do serii referencyjnej (serie FA10 i FA20). Wyniki warstwy wierzchniej modyfikowanej krzemionkowym popiołem lotnym wykazują, że wraz ze wzrostem zastąpienia części cementu w kompozycie maleje jego przyczepność przy odrywaniu. Niemniej jednak, aż 6 na 12 (50%) wyników przyczepności osiągnęło wymaganie normowe min. 1,5 MPa. Szczególnie przy zastosowaniu warunków pielęgnacji CC2 możliwe jest więc uzyskanie kompozytów, które spełnią wymogi normowe. Kompozyty modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową mają zróżnicowane wyniki. Przy zastąpieniu 10% cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej wszystkie cztery konfiguracje badawcze wykazały się przyczepnością wyższą niż wymóg normowy, natomiast dla wszystkich analizowanych serii uzyskano aż 7 takich wyników, co jest wynikiem lepszym niż dla kompozytów z cementem. Może to być związane z tendencją odpadowej mączki granitowej do polepszania gęstości upakowania składników, a co z tym związane także zwiększeniem powierzchni adhezji pomiędzy cementową warstwą wierzchnią, a podkładem. Zauważa się także, że wraz ze wzrostem procentowego zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej maleje przyczepność warstwy wierzchniej do podkładu. Szczególnie ważne jest podkreślenie, że dla serii badawczych GP30 pielęgnowanych według sposobu CC2 uzyskano wyniki,

które spełniły wymóg normowy, co jest obiecującą informacją, która potwierdza możliwość zastąpienia nawet 30% cementu w wykorzystywanych warstwach wierzchnich zachowując jednak przy tym odpowiednie warunki pielęgnacji. Nadspodziewanie dobre wyniki uzyskano natomiast dla kompozytów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej. Analizując wcześniej opisane wyniki można byłoby się spodziewać bowiem wyników pośrednich pomiędzy tymi uzyskanymi dla osobnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego lub odpadowej mączki granitowej. Jednak serie składające się z dodatku obu tych materiałów osiągnęły wysokie wyniki przyczepności, które przekraczają normowe wymagania (szczególnie w połączeniu ze sposobem pielęgnacji kompozytu CC2). Seria 20FA+10GP pozwoliła nawet na osiągnięcie wyników wyższych niż w przypadku serii referencyjnej o około 5%. Tabela 16 przedstawia podsumowanie wyników oznaczania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu wraz ze wskazaniem miejsc w których doszło do zniszczenia próbki.

Tabela 16. Podsumowanie wyników oznaczania przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu (odchylenie standardowe uzyskanych wyników nie przekroczyło 5% - nie przedstawiono go w tabeli z racji dbania o jej czytelność)

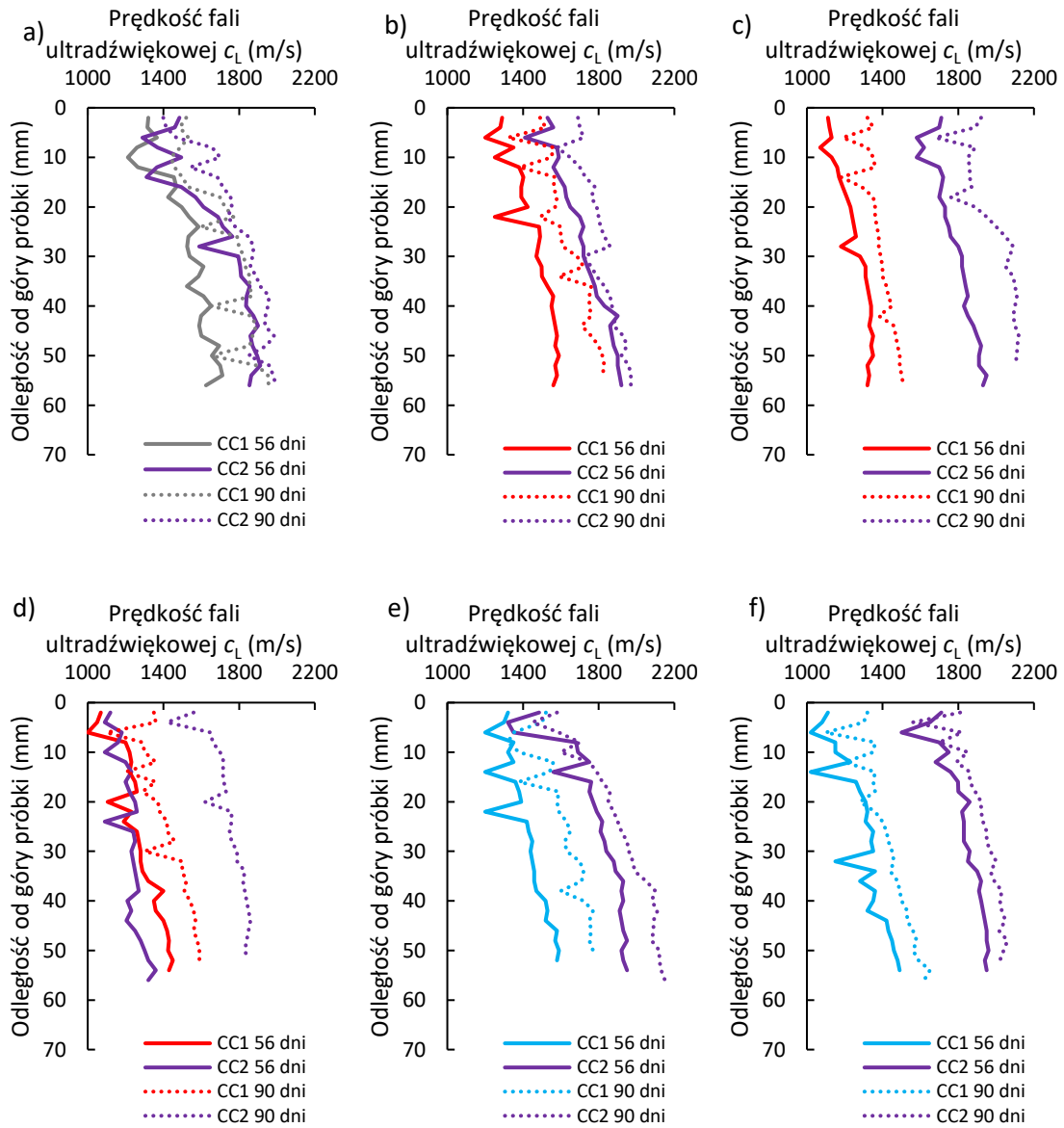
Seria	Sposób pielęgnacji CC1				Sposób pielęgnacji CC2			
	56 dni		90 dni		56 dni		90 dni	
	Przyczepność przy odrywaniu $f_h$ (MPa)	Miejsce zniszczenia	Przyczepność przy odrywaniu $f_h$ (MPa)	Miejsce zniszczenia	Przyczepność przy odrywaniu $f_h$ (MPa)	Miejsce zniszczenia	Przyczepność przy odrywaniu $f_h$ (MPa)	Miejsce zniszczenia
REF	1,61	warstwa	1,73	warstwa	1,62	warstwa	1,79	połączenie
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego								
FA10	1,59	warstwa	1,63	warstwa	1,48	połączenie	1,81	połączenie
FA20	1,35	połączenie	1,48	połączenie	1,61	warstwa	1,78	połączenie
FA30	1,21	połączenie	1,44	połączenie	1,34	połączenie	1,61	połączenie
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej								
GP10	1,55	warstwa	1,55	warstwa	1,63	warstwa	1,82	połączenie
GP20	1,35	połączenie	1,44	połączenie	1,49	połączenie	1,63	połączenie
GP30	1,28	połączenie	1,42	połączenie	1,51	połączenie	1,52	połączenie
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej								
5FA+5GP	1,44	połączenie	1,55	połączenie	1,62	połączenie	1,76	połączenie
10FA+10GP	1,49	warstwa	1,61	warstwa	1,53	połączenie	1,72	połączenie
20FA+10GP	1,44	połączenie	1,77	warstwa	1,76	połączenie	1,89	połączenie
10FA+20GP	1,48	połączenie	1,71	warstwa	1,69	połączenie	1,82	połączenie
średnia :	1,435	średnia:	1,575	średnia:	1,571	średnia:	1,74	-

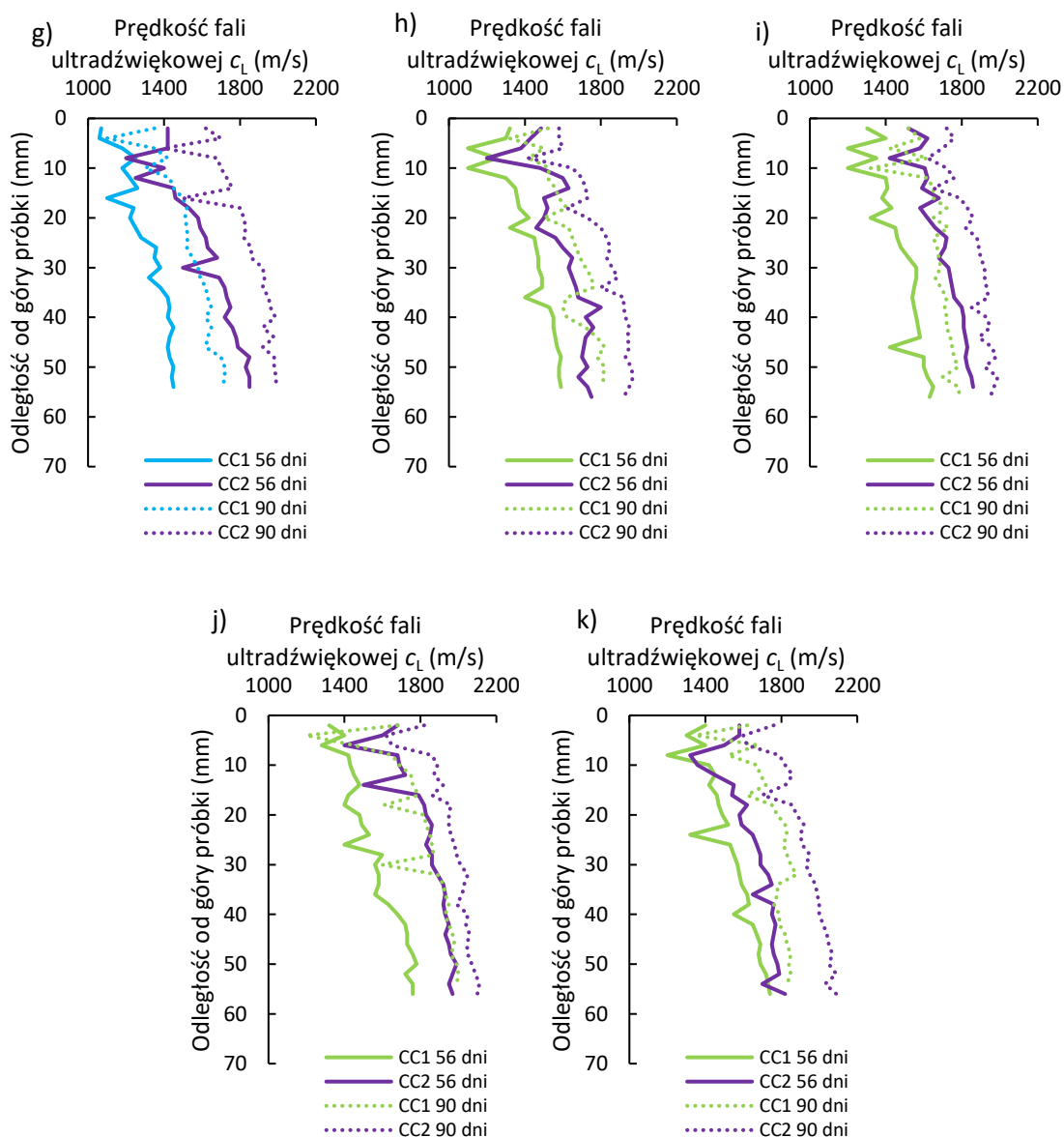
Analiza powyższych wyników pozwala na obserwację, że zwykle próbki ulegały zniszczeniu na połączeniu cementowej warstwy wierzchniej oraz podkładu (opis miejsca zniszczenia jako „połączenie”). Jest to pożądany sposób zniszczenia cementowej warstwy wierzchniej, ponieważ

świadczy on o tym, że kompozyt z którego wykonana została cementowa warstwa wierzchnia posiada wystarczające właściwości mechaniczne i adhezyjne do przeniesienia obciążeń działających na warstwę wierzchnią. W zniszczenia próbki na połączeniu warstwy wierzchniej i podkładu obserwuje się, że znakomita większość tego typu wyników została osiągnięta dla sposobu pielęgnacji CC2, co podkreśla dodatkowo istotność zapewnienia odpowiedniego sposobu pielęgnacji dla kompozytów cementowych stosowanych jako warstwa wierzchnia. Niektóre serie badawcze, zniszczone na połączeniu warstw wykazały się wynikami niższymi niż wymagania normowe (min. 1,5 MPa), co może świadczyć o konieczności zmodyfikowania ich kompozycji materiałowych w sposób umożliwiający uzyskanie wyższych wyników adhezji, jednak zaobserwowane różnice nie są zbyt wysokie. W przypadku zniszczenia „warstwa” jest to model zniszczenia, który opisuje zniszczenie cementowej warstwy wierzchniej w jej przekroju. Oznacza to, że kompozyt nie zyskał wystarczająco na wytrzymałości aby przenieść działające na niego siły lub adhezja pomiędzy warstwą wierzchnią, a podkładem osiągnęła na tyle wysoką wartość, że słabszym elementem w badaniu okazała się sama warstwa wierzchnia. W przypadku tego modelu, jeżeli wartość zniszczenia osiągnie wartość wyższą niż normowa, to wówczas należy sklasyfikować taką próbkę jako spełniającą wymóg minimalnej adhezji do podkładu. Jeżeli dojdzie do zniszczenia wg modelu „warstwa”, a pomierzone siły niszczące próbkę nie przekroczą wymagań normowych należy wprowadzić system naprawczy pozwalający na wzmocnienie kompozytu cementowego lub jego eliminację z dalszych badań. W zbiorze wyników badań próbek, które uległy zniszczeniu wg modelu „warstwa” można zauważyć, że tylko jeden wynik był niższy niż normowy – 1,49 MPa osiągnęła seria 10FA+10GP, jednak mieści się on tuż pod granicą dopuszczenia przez normę zatem należałoby wykonać dodatkowe odwierty w celu jego weryfikacji. Niemniej jednak po 90 dniach ta seria badawcza wykazała się już wynikami wyższymi niż wymagania normowe. Porównując średnie wyniki pomiarów ze wszystkich serii można zauważyć, że w przypadku zastosowania sposobu pielęgnacji CC1 uzyskane wyniki są znacząco niższe niż te uzyskane dla kompozytów pielęgnowanych wg sposobu CC2. Wyniki uzyskane po 90 dniach dla kompozytów pielęgnowanych wg sposobu CC1 osiągnęły taką samą wartość jak kompozyty badane po 56 dniach i pielęgnowane wg sposobu CC2. Ten fakt po raz kolejny podkreśla istotę stosowania odpowiednich warunków pielęgnacji w przypadku cementowej warstwy wierzchniej.

## 5.3.8. Jednorodność stwardniałego kompozytu

Rysunek 94 przedstawia wyniki oznaczania jednorodności stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej.





Rysunek 94. Wyniki oznaczania jednorodności stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej: a) seria referencyjna b) seria FA10 c) seria FA20 d) seria FA30 e) seria GP10 f) seria GP20 g) seria GP30 h) seria 5FA+5GP i) seria 10FA+10GP j) seria 20FA+10GP k) seria 10FA+20GP (w celu dotrzymania czytelności rysunków nie oznaczono błędów względnych wyników – w żadnym wypadku ten parametr nie przekroczył 3% oznaczonych wartości)

Rysunek 94a przedstawia wyniki oznaczania przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w funkcji grubości referencyjnej, cementowej warstwy wierzchniej. Można zauważyć, że wyniki uzyskane dla kompozytów pielęgnowanych wg sposobu CC2 wykazują się lepszą jednorodnością właściwości niż kompozytu pielęgnowane wg sposobu CC1. Bardziej optymalne warunki pielęgnacji kompozytu pozwoliły dodatkowo na uzyskanie wyższych wyników prędkości fali ultradźwiękowej, a co z tym powiązane także rozwój właściwości mechanicznych kompozytu. Wszystkie analizowane próbki

wykazują w górnym obszarze próbki (do ok. 30 mm od ich powierzchni) miejscowe obniżenie prędkości fali ultradźwiękowej, co może służyć do oceny wpływu procesu odsączenia wody z mieszanki cementowej na stwardniały kompozyt, w którym w wyniku odprowadzonej ku górnej powierzchni wody, zwiększył się miejscowo wskaźnik w/c, zmniejszając przy tym gęstość oraz właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu. Uzyskane w pomiarach nieciągłości (miejscowe zmiany) na dalszej odległości od góry próbki (powyżej 30 mm) są zwykle o defektach punktowych/miejscowych w kompozycji (pustka powietrzna, wtrącenie materiałowe) i nie należy ich dodatkowo interpretować w badaniu jednorodności właściwości kompozytu.

Rysunek 94b opisuje wyniki uzyskane dla cementowej warstwy wierzchniej wykonanej wg kompozycji materiałowej FA10. Uzyskane wyniki świadczą jednoznacznie, że kompozyty modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym uzyskują wyższą prędkość fali ultradźwiękowej po 90 dniach pielęgnacji niż po 56 dniach (czego można było się spodziewać po analizie innych wyników badań). Niemniej jednak widać, że warunki pielęgnacji CC2 pozwoliły uzyskać znacznie wyższe wyniki niż warunki CC1 (wyniki uzyskane dla CC1 po 90 dniach pielęgnacji są niższe niż uzyskane dla CC2 po 56 dniach). Uzyskane dla tej serii wyniki były dość zbliżone do siebie i wykazały mniejsze zmiany przebiegu fali przypowierzchniowo (ok. 30 mm od góry próbki) niż było to w przypadku serii REF. Rysunek 94c opisuje wyniki uzyskane dla serii FA20. Ta seria kompozytów charakteryzuje się bardzo dobrą jednorodnością właściwości w funkcji grubości kompozytu o czym świadczy zbliżony do pionowego przebieg zmienności prędkości fali. Wpływ warunków pielęgnacji został jeszcze wyraźniej podkreślony niż w przypadku serii FA10, różnicując przy tym istotnie uzyskane wartości prędkości fali ultradźwiękowej. Rysunek 94d przedstawia wyniki dla serii FA30. W wynikach uzyskanych dla tej serii widać, że w przypadku cementowej warstwy wierzchniej zastąpienie aż 30% cementu dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego prowadzi do zmniejszenia się gęstości, a co z tym związane właściwości mechaniczne kompozytu. Po raz kolejny można stwierdzić, że warunki pielęgnacji CC2 są dużo bardziej korzystne niż warunki CC1, jednak nie tylko pod względem uzyskiwanych wartości prędkości fali, ale także wartość przyrostu właściwości kompozytu wywołaną przez krzemionkowy popiół lotny – dla CC2 uzyskano wyższą wartość przyrostu niż dla CC1.

Rysunek 94e przedstawia wyniki przebiegu prędkości fali ultradźwiękowej w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej modyfikowanej 10% odpadowej mączki granitowej. Podobnie jak wcześniej widoczny jest pozytywny wpływ warunków pielęgnacji CC2 w porównaniu z warunkami CC1. Niemniej jednak widoczny jest także spadek właściwości kompozytu w okolicach jego górnej powierzchni (do ok. 20mm) co można interpretować zwiększoną objętością odsączonej wody z mieszanki cementowej lub wpływem sposobu wykańczania powierzchni warstwy po jej ułożeniu (zbyt słabo zagęszczona mieszanka). Należy jednak stwierdzić, że modyfikacja 10% odpadowej mączki granitowej pozwoliła uzyskać dość wysokie wyniki prędkości fali ultradźwiękowej w porównaniu z analizowanymi wcześniej kompozytami. Rysunek 94f opisuje wyniki dla serii GP20. Podobnie jak dla

serii FA20 można zaobserwować wysokie zróżnicowanie wyników w zależności od sposobu pielęgnacji kompozytu. Jednocześnie, kompozyty pielęgnowane wg sposobu CC2 wykazują mniejszą zmienność wartości prędkości fali ultradźwiękowej w górnej części kompozytu co można uznać za pozytywny efekt. Rysunek 94g przedstawia wyniki uzyskane dla serii GP30. Podobnie jak wcześniej, warunki pielęgnacji CC2 doprowadziły do osiągnięcia lepszych wartości prędkości fali ultradźwiękowej w funkcji grubości kompozytu. Uzyskane wyniki prowadzą do stwierdzenia, że kompozyty serii GP30 charakteryzują się dużą zmiennością właściwości w funkcji grubości warstwy wierzchniej, co może być związane z niską zawartością cementu w kompozycie.

Rysunek 94h przedstawia wyniki analizy zmienności fali ultradźwiękowej w funkcji grubości kompozytu modyfikowanego jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej – seria 5FA+5GP. W tym przypadku zauważa się różnice pomiędzy zaimplementowanymi warunkami pielęgnacji, jednak jest ona stosunkowo niewielka w porównaniu z wcześniej analizowanymi kompozytami. Widoczne jest pogorszenie właściwości kompozytu w jego przypowierzchniowej części (do ok. 20 mm), ale występuje ono głównie dla próbek pielęgnowanych wg sposobu CC1, a w przypadku sposobu CC2 efekt nie jest tak widoczny. Rysunek 94i przedstawia wyniki serii 10FA+10GP. Uzyskane wyniki wykazują osiągnięcie dobrej jednorodności kompozytu cementowego co pozytywnie świadczy o wynikach uzyskanych dla tej serii badawczej. Wartości prędkości fali również wypadają lepiej w stosunku do wcześniej analizowanych kompozytów co należy uznać za pozytywny efekt zastosowania jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej. Rysunek 94j przedstawia wyniki uzyskane dla serii 20FA+10GP. Uzyskane wyniki podobnie do poprzedniej serii wykazują się dobrą jednorodnością właściwości kompozytu. Dodatkowo można zaobserwować, że aktywność krzemionkowego popiołu lotnego w tej kompozycji materiałowej jest podkreślona przez wysokie przyrosty właściwości kompozytu w czasie. Pomierzone wartości prędkości fali ultradźwiękowej plasują ten kompozyt w zbiorze próbek o najwyższych zmierzonych wartościach tego parametru. Rysunek 94k przedstawia wyniki dla serii 10FA+20GP. Podobnie jak wcześniej kompozyty wykazują się dobrą jednorodnością właściwości, a aktywność krzemionkowego popiołu lotnego jest odpowiednio podkreślona co świadczy o tym, że miał on odpowiednie warunki do rozwoju reakcji pucolanowej. Uzyskane wyniki prędkości fali są jednymi z najwyższych ze zbioru analizowanych próbek cementowej warstwy wierzchniej.



## 5.3.9. Analiza ekonomiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych

Tabela 17 przedstawia wyniki obliczenia współczynnika wydajności mechanicznej *MPR*.

Tabela 17. Wyniki analizy współczynnika wydajności mechanicznej zaczynów cementowych

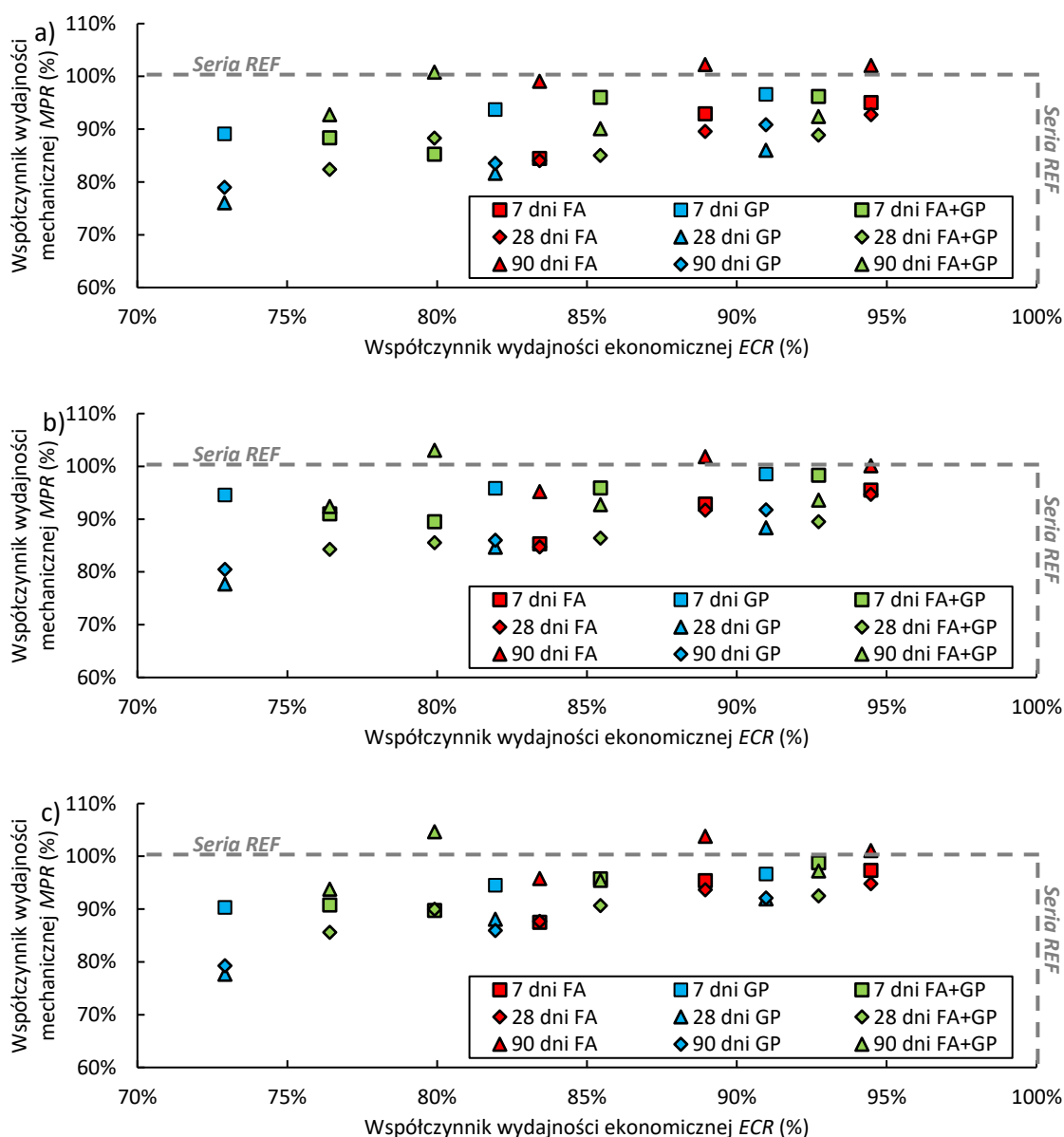
Seria	CC1			CC2			CC3		
	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
REF	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego									
FA10	95	93	102	96	95	100	97	95	101
FA20	93	90	102	93	92	102	95	94	104
FA30	84	84	99	85	85	95	87	88	96
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej									
GP10	97	86	91	99	88	92	97	92	92
GP20	94	82	83	96	85	86	94	88	86
GP30	89	76	79	95	78	80	90	78	79
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej									
5FA+5GP	96	89	92	98	90	94	99	92	97
10FA+10GP	96	85	90	96	86	93	96	91	95
20FA+10GP	85	88	101	90	86	103	90	90	105
10FA+20GP	88	82	93	91	84	92	91	86	94

Tabela 18 przedstawia wyniki określania współczynnika *ECR*.

Tabela 18. Wyniki analizy współczynnika efektywności ekonomicznej dla zaczynów cementowych

Seria	<i>Z</i> <sub>CEM</sub>	<i>Z</i> <sub>FA</sub>	<i>Z</i> <sub>GP</sub>	<i>Z</i> <sub>woda</sub>	<i>C</i> <sub>CEM</sub>	<i>C</i> <sub>FA</sub>	<i>C</i> <sub>GP</sub>	<i>C</i> <sub>woda</sub>	<i>C</i> <sub>serii</sub>	<i>ECR</i>
	(kg/m <sup>3</sup> )				(zł)					(%)
REF	1260	0	0	840	680,4	0	0	3,36	683,76	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego										
FA10	1134	126	0	840	612,36	30,24	0	3,36	645,96	94
FA20	1008	252			544,32	60,48	0		608,16	89
FA30	882	378			476,28	90,72	0		570,36	83
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej										
GP10	1134	0	126	840	612,36	0	6,3	3,36	622,02	91
GP20	1008		252		544,32	0	12,6		560,28	82
GP30	882		378		476,28	0	18,9		498,54	73
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej										
5FA+5GP	1134	63	63	840	612,36	15,12	3,15	3,36	633,99	93
10FA+10GP	1008	126	126		544,32	30,24	6,3		584,22	85
20FA+10GP	882	252	126		476,28	60,48	6,3		546,42	80
10FA+20GP	882	126	252		476,28	30,24	12,6		522,48	76
Przyjęto : <i>c</i> <sub>rynek,CEM</sub> = 540 zł/t ; <i>c</i> <sub>rynek,FA</sub> = 240 zł/t ; <i>c</i> <sub>rynek,GP</sub> = 50 zł/t ; <i>c</i> <sub>rynek,woda</sub> = 4 zł/t										

Rysunek 95 przedstawia wyniki analizy ekonomiczno - mechanicznej dla zaczynów cementowych.



Rysunek 95. Wyniki analizy ekonomiczno - mechanicznej dla zaczynów cementowych: a) sposób pielęgnacji CC1 b) sposób pielęgnacji CC2 c) sposób pielęgnacji CC3

Analizując Rysunek 95 można zauważyć, że wszystkie serie badawcze wykazują się niższym współczynnikiem wydajności ekonomicznej *ECR*, co świadczy, że są koszt materiałów wykorzystanych ich wytworzenia jest znacznie (min. 5%) tańszy niż serii referencyjnej. Świadczy to o potencjale aplikacyjnym badanego rozwiązania, gdyż koszty produkcji są jednymi z kluczowych elementów analizowanych podczas decyzji o wdrożeniu nowego rozwiązania materiałowego. Za pozytywne należy także uznać, że dla każdego sposobu pielęgnacji, aż 3 serie badawcze wykazały się wyższymi współczynnikami wydajności mechanicznej *MPR*, niż seria referencyjna. Serie kompozytów modyfikowanych krzemionkowym popiołem lotnym osiągnęły najlepsze wyniki współczynnika *MPR*

ze wszystkich analizowanych serii (jako grupa), jednak tuż za nią plasują się serie kompozytów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej. Kompozyty modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową wykazały się niższymi parametrami współczynnika *MPR*, jednak pozwoliły one także na osiągnięcie najbardziej korzystnych wyników współczynnika *ECR*, wykazując redukcję kosztów materiałów wykorzystanych do ich produkcji nawet o 27% (podczas gdy redukcja współczynnika *MPR* wyniosła jedynie 10% (7 dni GP). Stosunkowo dobrymi wynikami korelacji pomiędzy *MPR* – *ECR* charakteryzują się serie z jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej (redukcja 20% kosztów materiałów pozwoliła na osiągnięcie nawet 4% wzrostu *MPR* w porównaniu z serią REF). Serie modyfikowane popiołem pomimo bardzo dobrych wyników *MPR* (maksymalnie redukcja o 10% w stosunku do serii REF), pozwoliły jednak uzyskać maksimum 17% redukcji kosztów materiałowych w porównaniu do REF.

Tabela 19 przedstawia wyniki analizy wydajności mechanicznej zapraw cementowych.

Tabela 19. Wyniki analizy współczynnika wydajności mechanicznej zapraw cementowych

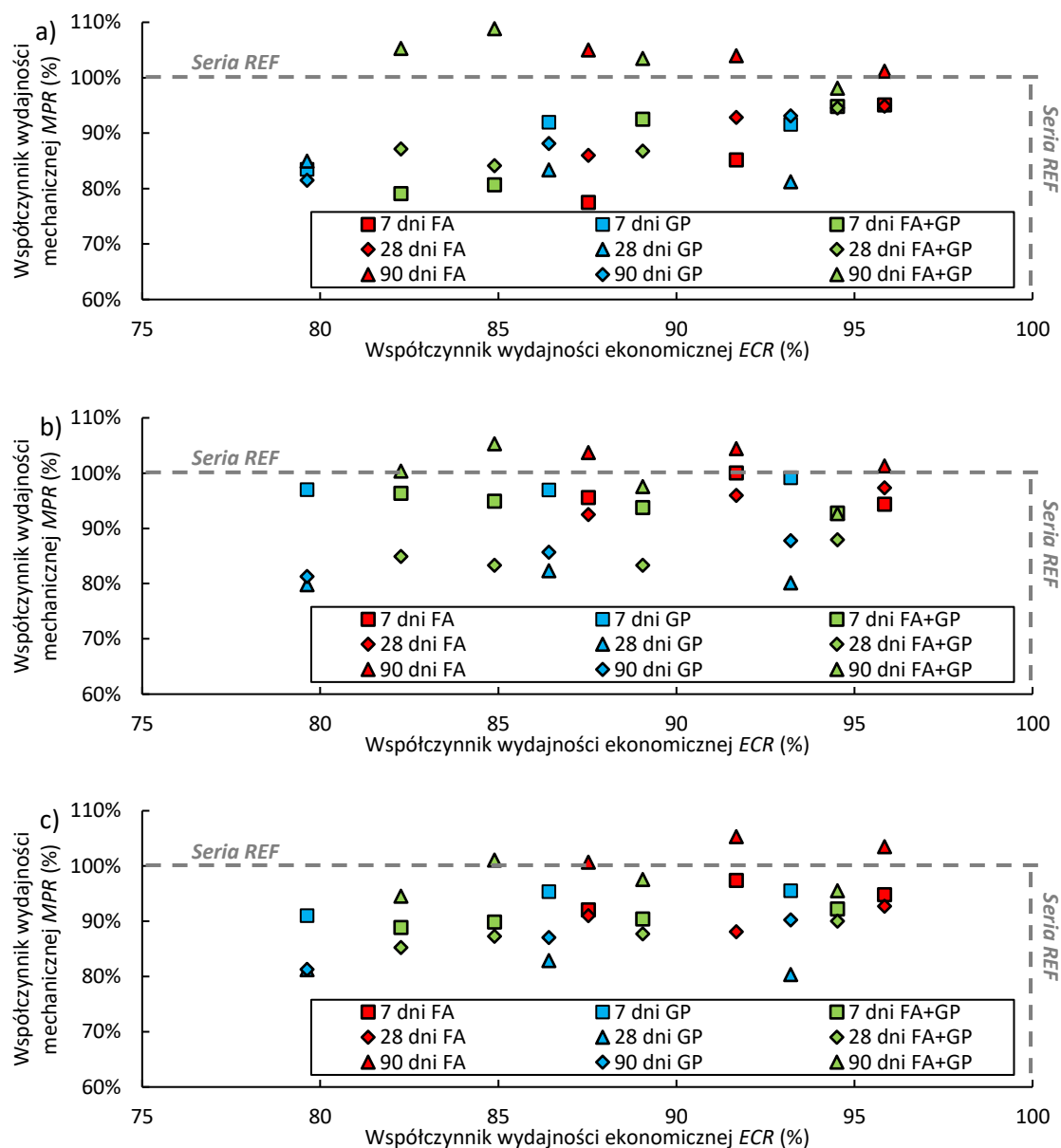
Seria	CC1			CC2			CC3		
	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>	<i>MPR</i> <sub>7d</sub>	<i>MPR</i> <sub>28d</sub>	<i>MPR</i> <sub>90d</sub>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
REF	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego									
FA10	95	95	101	94	97	101	93	95	103
FA20	85	93	104	100	96	104	88	97	105
FA30	78	86	105	96	92	104	91	92	101
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej									
GP10	92	81	93	99	80	88	95	80	90
GP20	92	83	88	97	82	86	95	83	87
GP30	83	85	82	97	80	81	91	81	81
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej									
5FA+5GP	95	95	98	93	88	93	92	90	95
10FA+10GP	93	87	103	94	83	98	90	88	98
20FA+10GP	81	84	109	95	83	105	90	87	101
10FA+20GP	79	87	105	96	85	100	89	85	94

Tabela 20 przedstawia wyniki analizy kosztowej mieszanek cementowych wykorzystanych do produkcji cementowej warstwy wierzchniej.

Tabela 20. Wyniki analizy współczynnika efektywności ekonomicznej dla zapraw cementowych

Seria	Zawartość					C <sub>CEM</sub>	C <sub>FA</sub>	C <sub>GP</sub>	C <sub>woda</sub>	C <sub>kruszywo</sub>	C <sub>serii</sub>	ECR
	CEM	FA	GP	kruszywo	woda							
	(kg/m <sup>3</sup> )											
REF	540	0	0	1620	216	291,60	0	0	0,86	97,2	389,66	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego												
FA10	486	54	0	1620	216	262,44	12,96	0	0,86	97,2	373,46	96
FA20	432	108				233,28	25,92	0			357,26	92
FA30	378	162				204,12	38,88	0			341,06	88
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej												
GP10	486	0	54	1620	216	262,44	0	2,70	0,86	97,2	363,20	93
GP20	432		108			233,28		5,40			336,74	86
GP30	378		162			204,12		8,10			310,28	80
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej												
5FA+5GP	486	27	27	1620	216	262,44	6,48	1,35			368,33	95
10FA+10GP	432	54	54			233,28	12,96	2,70			347,00	89
20FA+10GP	378	108	54			204,12	25,92	2,70			330,80	85
10FA+20GP	378	54	108			204,12	12,96	5,40			320,54	82
Przyjęto : c <sub>rynek,CEM</sub> = 540 zł/t ; c <sub>rynek,FA</sub> = 240 zł/t ; c <sub>rynek,GP</sub> = 50 zł/t ; c <sub>rynek,woda</sub> = 4 zł/t ; c <sub>rynek,kruszywo</sub> = 60 zł/t												

Rysunek 96 przedstawia wyniki analizy ekonomiczno - mechanicznej dla zapraw cementowych.



Rysunek 96. Wyniki analizy ekonomiczno - mechanicznej dla zapraw cementowych: a) sposób pielęgnacji CC1 b) sposób pielęgnacji CC2 c) sposób pielęgnacji CC3

Wyniki analizy ekonomiczno – mechanicznej pozwalają na stwierdzenie, że w przypadku zapraw uzyskano większą liczbę serii materiałowych, które wykazały się wyższym współczynnikiem *MPR* niż seria REF (dla CC1 oraz CC2 jest to 6 kompozycji, dla CC3 są to 4 kompozycje). Jednak jest to powiązane z osiągnięciem przez analizowane serie niższych wyników współczynnika *ECR* w stosunku do zaczynów cementowych (maksymalna redukcja kosztów materiałów wyniosła 20% w porównaniu z wcześniejszymi 27%). Podobnie jak wcześniej, najbardziej zbliżoną do referencyjnej pod względem właściwości mechanicznych i kosztowych okazały się serie modyfikowane krzemionkowego popiołem lotnym, dla których obserwuje się nawet 4% wzrost *MPR* przy jednoczesnym zapewnieniu zmniejszenia kosztów materiałów o 12%. Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu

lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwoliły na osiągnięcie najwyższych wartości *MPR* dla kompozytów pielęgnowanych wg sposobów CC1 i CC2 notując przy tym wzrost odpowiednio 8% oraz 5%. Takie kompozycje materiałowe umożliwiły także redukcję kosztów materiałów wykorzystanych do produkcji zaprawy nawet o 18% co jest pozytywnym efektem. Kompozyty materiałowe modyfikowane odpadową mączką granitową osiągnęły najniższe wartości wydajności mechanicznej, jednak za pozytywne należy uznać, że nie przekroczyły one redukcji o więcej niż 20% w stosunku do serii REF. Z drugiej strony pozwoliły one na uzyskanie największego zmniejszenia się kosztów materiałowych wytworzenia kompozytów – o 20%.

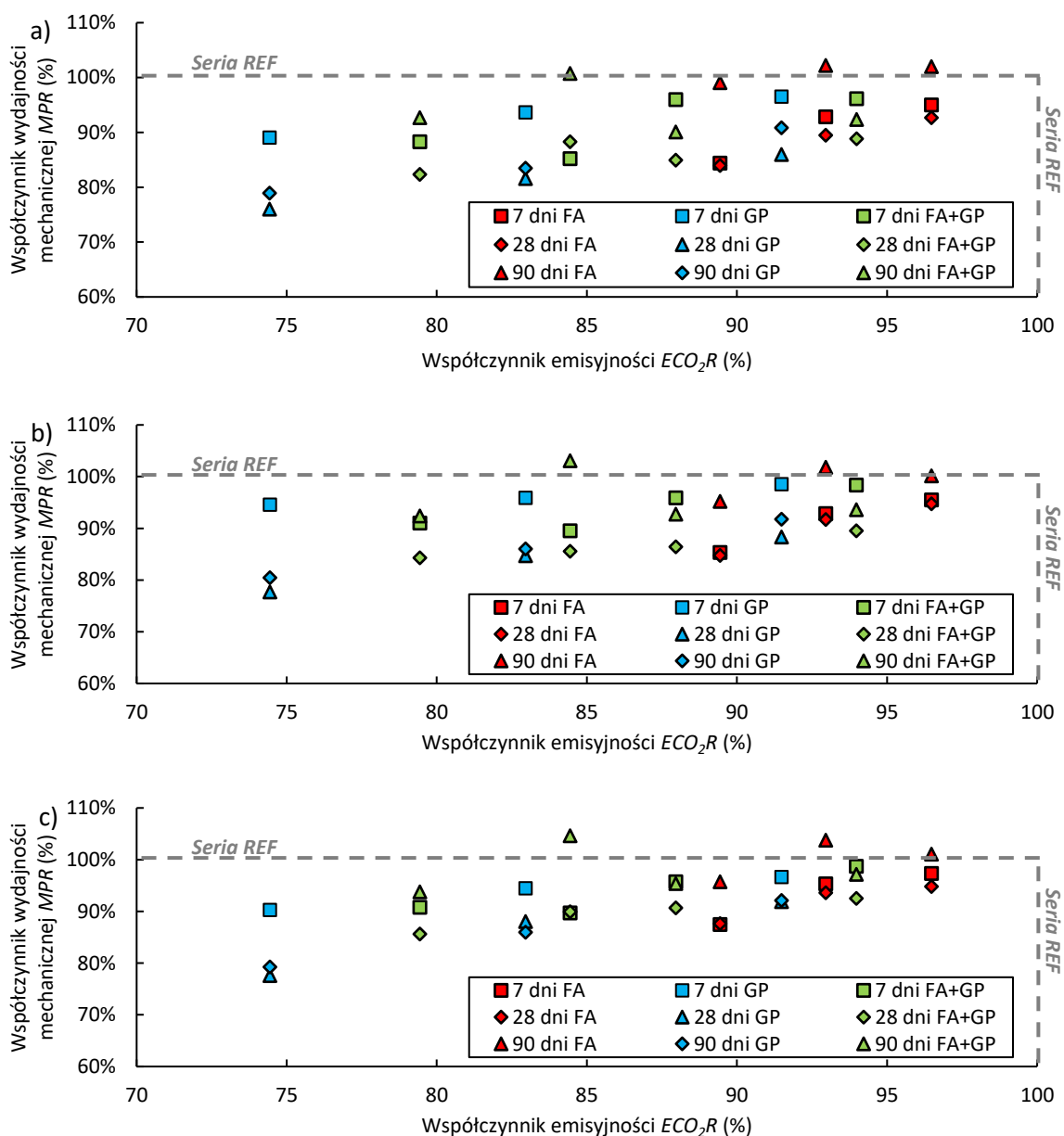
### 5.3.10. Analiza ekologiczno – mechaniczna badanych kompozytów cementowych

Wyniki określania współczynnika emisyjności zaczynów cementowych przedstawia Tabela 21.

Tabela 21. Wyniki analizy współczynnika emisyjności dla zaczynów cementowych

Seria	Zawartość				ECO <sub>2</sub> składnik				ECO <sub>2</sub> serii	ECO <sub>2</sub> R
	Cement	FA	GP	woda	Cement	FA	GP	woda		
	(kg/m <sup>3</sup> )				(kg CO <sub>2</sub> )					
REF	1260	0	0	840	1108,8	0	0	0,0002	1108,8	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego										
FA10	1134	126	0	840	997,92	71,82	0	0,0002	1069,74	96
FA20	1008	252			887,04	143,64			1030,68	93
FA30	882	378			776,16	215,46			991,6202	89
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej										
GP10	1134	0	126	840	997,92	0	16,38	0,0002	1014,3	91
GP20	1008		252		887,04		32,76		919,8002	83
GP30	882		378		776,16		49,14		825,3002	74
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej										
5FA+5GP	1134	63	63	840	997,92	35,91	8,19	0,0002	1042,02	94
10FA+10GP	1008	126	126		887,04	71,82	16,38		975,2402	88
20FA+10GP	882	252	126		776,16	143,64	16,38		936,1802	84
10FA+20GP	882	126	252		776,16	71,82	32,76		880,7402	79

Wyniki analizy ekologiczno – mechanicznej zaczynów przedstawia Rysunek 97.



Rysunek 97. Wyniki analizy ekologiczno - wytrzymałościowej dla zaczynów cementowych: a) sposób pielęgnacji CC1 b) sposób pielęgnacji CC2 c) sposób pielęgnacji CC3

Wyniki analizy ekologiczno - wytrzymałościowej dla zaczynów cementowych wskazują, że kompozyty modyfikowane jedynie odpadową mączką granitową pozwalają na zmniejszenie śladu środowiskowego nawet o 25% w stosunku do serii REF. Kompozyty modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej prowadzą do zmniejszenia współczynnika emisyjności nawet o 20% w porównaniu z serią REF, a serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym pozwalają na najmniejszą redukcję emisyjności bo maksymalnie o 10%.

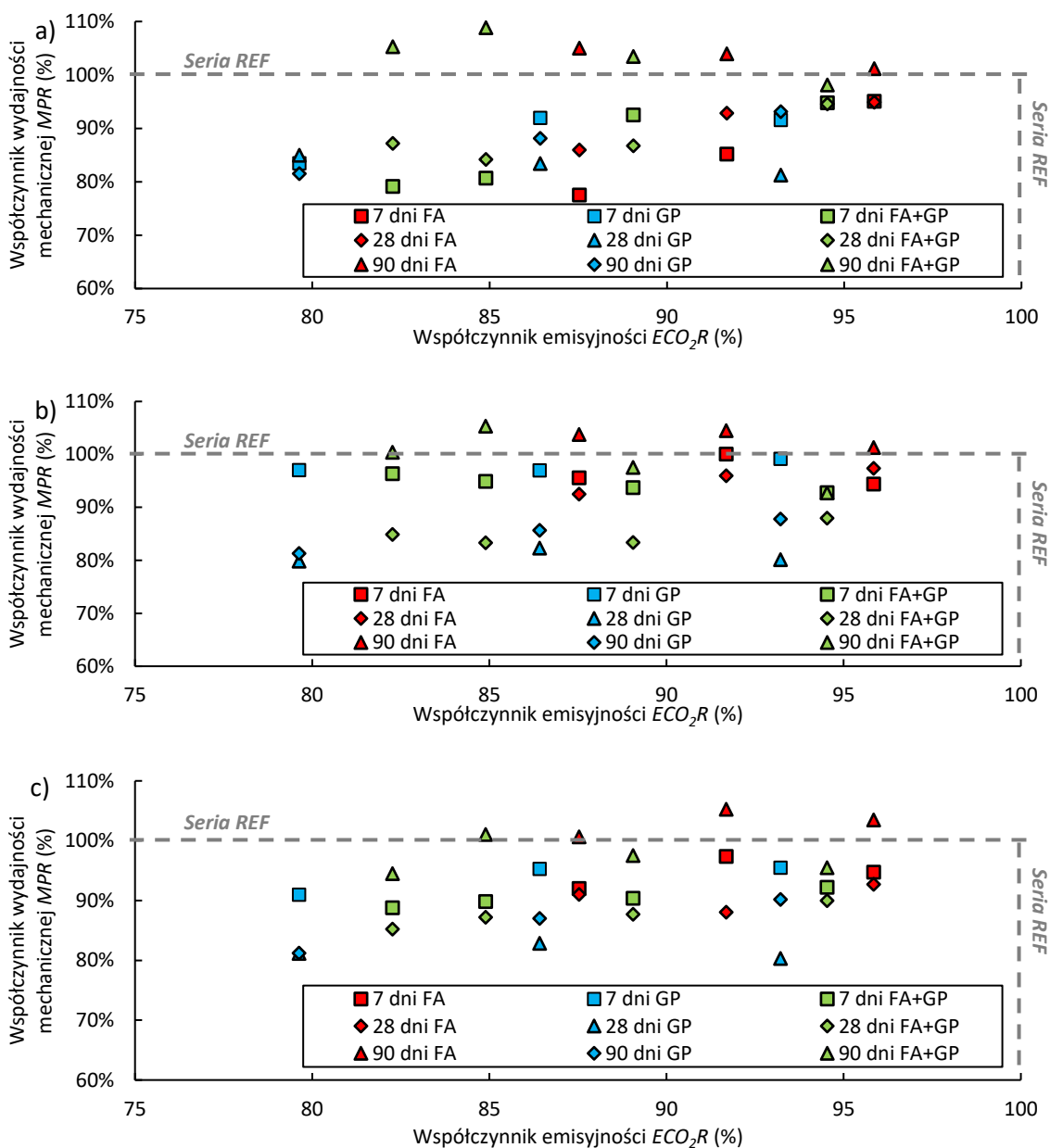
Wyniki przeprowadzonej analizy ekologicznej dla zapraw przedstawia Tabela 22.

Tabela 22. Wyniki analizy współczynnika emisyjności dla zapraw cementowych

Seria	Zawartość					ECO <sub>2</sub> składnik					ECO <sub>2</sub> serii	ECO <sub>2</sub> R
	Cement	FA	GP	kruszywo	woda	Cement	FA	GP	kruszywo	woda		
	(kg/m <sup>3</sup> )					(kg CO <sub>2</sub> )						
REF	540	0	0	1620	216	475,2	0	0	16,2	5E-05	491,40	100
Serie modyfikowane dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego												
FA10	486	54		1620	216	427,68	30,78	0	16,2	5E-05	474,66	97
FA20	432	108				380,16	61,56				457,92	93
FA30	378	162				332,64	92,34				441,18	90
Serie modyfikowane dodatkiem odpadowej mączki granitowej												
GP10	486	0	54	1620	216	427,68	0	7,02	16,2	5E-05	450,90	92
GP20	432		108			380,16		14,04			410,40	84
GP30	378		162			332,64		21,06			369,90	75
Serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej												
5FA+ 5GP	486	27	27	1620	216	427,68	15,39	3,51	16,2	5E-05	462,78	94
10FA+ 10GP	432	54	54			380,16	30,78	7,02			434,16	88
20FA+ 10GP	378	108	54			332,64	61,56	7,02			417,42	85
10FA+ 20GP	378	54	108			332,64	30,78	14,04			393,66	80

W analizie wykorzystano wyniki analizy mechanicznej zapraw cementowych, które przedstawiono wcześniej. Wyniki analizy ekologiczno – mechanicznej dla zapraw przedstawia Rysunek 98.





Rysunek 98. Wyniki analizy ekologiczno - mechanicznej dla zapraw cementowych: a) sposób pielęgnacji CC1 b) sposób pielęgnacji CC2 c) sposób pielęgnacji CC3

Wyniki analizy ekologiczno – mechanicznej dla zapraw pozwalają zauważyć, że podobnie jak dla zaczynów, serie modyfikowane jedynie dodatkiem odpadowej mączki granitowej prowadzą do zmniejszenia emisyjności kompozytu o 20%. Zmniejszyła się jednak różnica pomiędzy seriami modyfikowanymi jedynie odpadową mączką granitową, a tymi modyfikowanymi jednocześnie dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, ponieważ uzyskały one zmniejszenie emisyjności nawet o 18%. Serie modyfikowane krzemionkowym popiołem lotnym wykazały najmniejszą możliwość redukcji emisyjności kompozytów – maksymalnie o 12%.

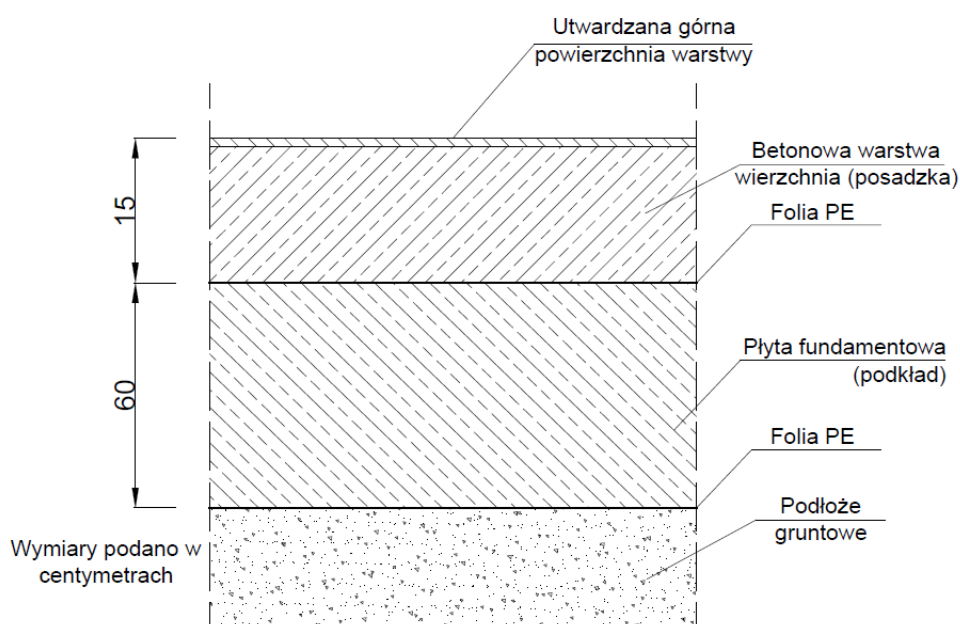
## 6. WDROŻENIE UZYSKANYCH REZULTATÓW Z BADAŃ WŁASNYCH

Uzyskane wyniki badań, opisane w Rozdziale 5 zostały przeanalizowane, a na ich podstawie określono, że najbardziej optymalne dla cementowej warstwy wierzchniej wyniki wykazała seria modyfikowana jednoczesnym dodatkiem 20% krzemionkowego popiołu lotnego i 10% odpadowej mączki granitowej. Wyniki badań opisane powyżej były też przedmiotem patentu uzyskanego przez autora [P1]. Na tej podstawie autor postanowił wykonać badania *in situ* na budowie budynku mieszkalnego z garażem podziemnym. Podczas betonowania garażu podziemnego przygotowano jedno pole badawcze o wymiarach 12 x 6 m oraz o średniej grubości 0,15 m (układ i położenie pola wskazuje Rysunek 99).



Rysunek 99. Lokalizacja pola badawczego na rzucie garażu podziemnego w którym wykonano badania

Na takim polu wykonano cementową warstwę wierzchnią z betonu, który opierał się o powszechnie stosowaną w tym celu recepturę firmy betoniarskiej dostarczającej beton towarowy na budowę, ale ze zmniejszoną o 30% masą cementu, która została zastąpiona dodatkiem odpowiednio tej masy krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w stosunku 2:1 (tj. zgodnie z serią badawczą 20FA+10GP wykorzystaną w badaniach w rozprawie). Zdecydowano się na skorzystanie z właśnie takiej modyfikacji betonu towarowego, dlatego, że dla wskazanej serii badawczej wyniki uzyskane w rozprawie były najbardziej pozytywne w ocenie autora. Rysunek 100 przedstawia przekrój przez podłogę, której częścią była płyta betonowa wykonana w ramach opisywanych badań.



Rysunek 100. Przekrój przez warstwy podłogi w której wykonano betonową warstwę wierzchnią modyfikowaną jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej

Konsystencja mieszanki betonowej była modyfikowana za pomocą plastyfikatorów stosowanych przez firmę dostarczającą mieszankę tak, aby zapewnić taką samą konsystencję mieszanki dla pola badawczego jak dla pozostałej części garażu – konsystencja S3. W ten sposób wykonano pole z betonu towarowego modyfikowanego zgodnie z wynikami badań niniejszej rozprawy (Tabela 23 przedstawia recepturę betonu towarowego wykorzystanego w badaniach w porównaniu do receptury betonu towarowego niemodyfikowanego).

Tabela 23. Receptury materiałowe betonów wykorzystanych do wykonania cementowej warstwy wierzchniej w garażu podziemnym

Składnik	Beton towarowy niemodyfikowany	Beton towarowy modyfikowany jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej
	Zawartość	
	kg/m <sup>3</sup>	
Cement CEM III/A 42,5N	340	238
Odpadowa mączka granitowa	0	34
Woda	160	
Kruszywo 8-16 mm	674	
Kruszywo 2-8 mm	397	
Kruszywo 0-2 mm	677	
Krzemionkowy popiół lotny	50	118
Domieszka odpowietrzająca	1,7	
Domieszka modyfikująca konsystencję	3,06	2,86

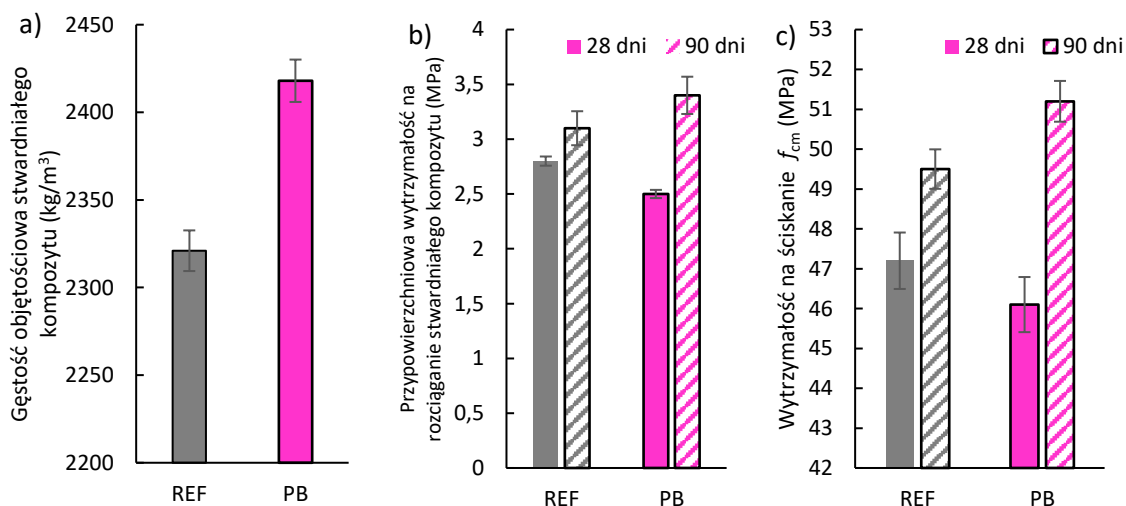
Sposób układania oraz pielęgnacji był taki sam dla pola badawczego ze zmodyfikowaną recepturą, jak dla pozostałej powierzchni garażu podziemnego. Wierzchnia powierzchnia cementowej warstwy wierzchniej podczas pielęgnacji była dodatkowo utwardzana z wykorzystaniem posypki utwardzającej oraz zacierana mechanicznie. Należy wyjaśnić, że rozprawa doktorska dotyczyła cementowej warstwy wierzchniej modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w skali zapraw, jednak zaprawa cementowa nie jest najlepszym kompozytem cementowym do stosowania na warstwę wierzchnią podłóg w garażach podziemnych. Wzmożony ruch pojazdów prowadzi do cyklicznych obciążeń, które bardziej optymalnie przenosi beton. Dodatkowo, betonowa warstwa wierzchnia garaży podziemnych wykazują się większą trwałością oraz mniejszą skłonnością do unoszenia się naroży warstwy wierzchniej – co jest pożądane w garażach podziemnych. Niemniej jednak, prace badawcze przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej dla zaczynów i zapraw cementowych pozwalają przenosić wnioskowanie bezpośrednio także na skalę betonu (gdyż beton w znacznej części składa się z zaprawy cementowej). Należy przy tym jednak pamiętać o wykonywaniu badań kontrolnych. Cały proces wykonywania betonowej warstwy wierzchniej modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej był stale nadzorowany przez autora rozprawy oraz certyfikowane laboratorium badawcze. Po 28 oraz 90 dniach pielęgnacji wykonano badania oznaczania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie stwardniałego kompozytu (min. 6 szt.), wykonano odwierty rdzeniowe (min. 3 szt.), a następnie określono ich gęstość objętościową, jednorodność stwardniałego kompozytu cementowego w funkcji grubości warstwy wierzchniej oraz oznaczono wytrzymałość na ściskanie (min. 3 wyniki).

Wszystkie opisane badania wykonano zarówno dla pola badawczego jak i wybranych miejsc garażu wykonanego z niemodyfikowanego betonu.



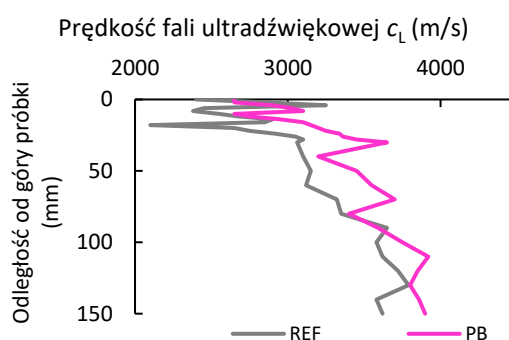
Rysunek 101. Zdjęcia z wykonania oraz badań modyfikowanej cementowej warstwy wierzchniej w praktyce (fotografie własne autora)

Uzyskane wyniki badań przedstawiono poniżej. Skrót REF – opisuje cementową warstwę wierzchnią podłogi garażu wykonaną zgodnie z recepturą betonu towarowego oferowanego przez producenta (niemodyfikowaną), skrót PB – oznacza cementową warstwę wierzchnią podłogi pola badawczego na którym zastosowano kompozycję modyfikowaną.



Rysunek 102. Wyniki badań kompozytów cementowych stosowanych do wykonywania warstwy wierzchniej podłóg modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w praktyce: a) gęstość objętościowa b) przypowierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie przy odrywaniu c) wytrzymałość na ściskanie

Analizując wyniki, które przedstawia Rysunek 102 można zauważyć, że dzięki wykorzystaniu jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej do zastąpienia części cementu w kompozytach cementowych wykorzystywanych w warstwie wierzchniej podłóg możliwe było uzyskanie lepszych właściwości warstwy wierzchniej niż z wykorzystaniem mieszanki niemodyfikowanej (REF). Podkreśla to, że zaobserwowany wpływ tych dodatków na kompozyty cementowe w badaniach opisanych w Rozdziale 6 może być także z powodzeniem zaimplementowany w praktyce budowlanej. Gęstość objętościowa próbek pobranych z pola badawczego (modyfikowany kompozyt) wyniosła o około 5% więcej niż próbek pobranych z pozostałej części garażu (niemodyfikowany kompozyt). Zapewne można to powiązać z ewidentnym wpływem jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej na zwiększenie gęstości upakowania składników mieszanki, co prowadzi też do wzrostu gęstości objętościowej kompozytu cementowego. Szczególnie pozytywne wyniki uzyskano dla badania przypowierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie przy odrywaniu, gdyż kompozyt modyfikowany jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej (PB) po 90 dniach pielęgnacji wykazał się o 10% wyższymi wynikami niż kompozyt niemodyfikowany (REF). Może to być powiązane z zaobserwowaną w rozprawie tendencją kompozycji zawierającej jednocześnie krzemionkowy popiół lotny i odpadową mączkę granitową do redukcji objętości odsączanej wody z mieszanki cementowej. Zmniejszone odsączanie wody z mieszanki cementowej pozwala na uniknięcie zmniejszania się właściwości mechanicznych w strefie przypowierzchniowej warstwy wierzchniej, co pozytywnie działa na jej przypowierzchniową wytrzymałość na rozciąganie. Zaobserwowano też, że jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwolił na zastąpienie 30% cementu w kompozycie cementowym bez istotnej redukcji jego właściwości mechanicznych co należy uznać za pozytywny efekt. Rysunek 103 przedstawia wyniki określania jednorodności stwardniałego kompozytu cementowego w funkcji grubości warstwy wierzchniej podłogi.



Rysunek 103. Wyniki oznaczania jednorodności stwardniałego kompozytu cementowego w funkcji grubości warstwy wierzchniej podłogi

Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej (PB) pozwolił na uzyskanie lepszej jednorodności stwardniałego kompozytu cementowego niż kompozycja niemodyfikowana (REF). W szczególności zauważono, że w przypowierzchniowej części warstwy wierzchniej występują różnice pomiędzy seriami, co może świadczyć o wpływie procesu odsączania wody z mieszanki cementowej na ten efekt. Niemniej jednak należy podkreślić, że obie analizowane warstwy wierzchnie wykazały się pozytywnymi wynikami badań i spełniają stawiane takim elementom wymagania. Można jeszcze dodać, że po roku użytkowania obie warstwy nie wykazują różnic w trwałości oraz żadna z nich nie została uszkodzona. Nie zauważono także żadnych wad badanej warstwy wierzchniej. Biorąc pod uwagę powyższe informacje należy stwierdzić, że praktyczne wdrożenie wyników badań zaobserwowanych w rozprawie powiodło się i może być stosowane także w innych elementach budynków i obiektów budowlanych, ale powinno być poprzedzone niezbędnymi badaniami.

## 7. PODSUMOWANIE, WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

### 7.1. Podsumowanie

Celem naukowym niniejszej rozprawy była ocena wpływu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej na wybrane właściwości kompozytów cementowych. W szczególności celem była ocena wpływu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej na właściwości mieszanki cementowej oraz stwardniałych kompozytów cementowych (właściwości fizyczne, wytrzymałościowe, adhezyjne oraz funkcjonalne). Celem aplikacyjnym było wyselekcjonowanie na drodze badawczej ilości jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, dla której zauważalna będzie poprawa podstawowych właściwości kompozytów cementowych. Celem aplikacyjnym było także wskazanie najbardziej optymalnych dla praktycznego wykorzystania kompozycji materiałowych pod względem kosztu ich wytworzenia, ich właściwości mechanicznych oraz związanej z nimi emisyjności dwutlenku węgla. Wreszcie, celem aplikacyjnym było określenie wpływu sposobu przechowywania kompozytu cementowego na jego właściwości.

Przeprowadzony program badań materiałów wykorzystanych do produkcji serii badawczych pozwolił na określenie ich podstawowych właściwości, w tym składu chemicznego, krzywej uziarnienia, gęstości nasypowej, powierzchni właściwej oraz właściwości morfologicznych ich ziaren. Dzięki temu wyszczególniono podobieństwa oraz różnice wykorzystanych modyfikatorów.

Badania mieszanki cementowej pozwoliły na określenie wpływu krzemionkowego popiołu lotnego, odpadowej mączki granitowej oraz ich jednoczesnego dodatku na właściwości mieszanki. Potwierdzone, znane wcześniej z literatury właściwości krzemionkowego popiołu lotnego prowadzące do bardziej płynnej konsystencji mieszanki oraz tendencja dodatku odpadowej mączki granitowej do zmiany konsystencji na bardziej gęstą pozwoliły na odpowiednią interpretację innych wyników badań. Zaobserwowana neutralizacja skrajnych zmian tych dwóch materiałów dzięki jednoczesnemu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej jest warta do odnotowania i pozwoliła na uzyskanie konsystencji zbliżonej do mieszanki referencyjnej. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwolił także na uzyskanie zbliżonej do referencyjnej gęstości objętościowej mieszanki oraz czasu początku i końca wiązania. Szczególnie pozytywny dla kompozytów cementowych do zastosowania w warstwach wierzchnich podłóg jest zaobserwowany efekt dodatku odpadowej mączki granitowej na ograniczenie odsączania wody z mieszanki cementowej. Ten efekt został także zauważony dla serii w których wykorzystano jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, pozwalając przy tym na znaczne procentowe zastąpienie cementu. Wreszcie, jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwolił na uzyskanie najwyższej wartości gęstości upakowania



składników mieszanki cementowej, wykazując przy tym zbliżoną, optymalną wartość  $w/c$  jak mieszanka referencyjna. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwolił zatem na uzyskanie przez mieszankę bardzo zbliżonych wartości analizowanych właściwości jak mieszanka referencyjna, co należy uznać za pozytywny efekt, gdyż jest on zwykle pożądanym przez praktyków stosujących modyfikowane kompozyty cementowe na warstwę wierzchnią podłóg.

Przeprowadzone badania właściwości fizycznych stwardniałych kompozytów cementowych wykazały, że jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie znacznie wyższych gęstości objętościowych kompozytów nim modyfikowanych w porównaniu z serią referencyjną, a obserwowana różnica wyników tej właściwości rosła dodatkowo wraz z czasem pielęgnacji kompozytu. Zastąpienie części cementu jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwoliło także na zmniejszenie porowatości kompozytów cementowych w porównaniu z serią referencyjną, a obserwowana różnica, podobnie jak wcześniej, zwiększała się korzystnie wraz z upływem czasu pielęgnacji. Stosowanie takiej kombinacji materiałowej kompozytów cementowych jednak nie spowodowało tak znaczącego wpływu na nasiąkliwość masową stwardniałego kompozytu cementowego, zmniejszając co prawda nieznacznie jej wartość, ale jedynie o kilka procent w stosunku do serii referencyjnej.

Oznaczanie właściwości wytrzymałościowych stwardniałych kompozytów cementowych, modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, podkreśliło potencjał stosowania takiej kombinacji materiałowej, gdyż uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dla tych serii były wyższe niż serii referencyjnej. Szczególnie podkreśliło to zdolności odpadowej mączki granitowej do poprawy gęstości upakowania składników mieszanki oraz aktywność pucolanową krzemionkowego popiołu lotnego. Zauważono, że zastąpienie części cementu w kompozycie ma największy, negatywny wpływ na jego wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – dla serii modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej zaobserwowano znacząco niższe wyniki w porównaniu z serią referencyjną.

Stwardniałe kompozyty cementowe modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej wykazały się także zwiększonymi właściwościami adhezyjnymi tj. przyczepnością przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu. Zaobserwowano, że taka modyfikacja kompozycji materiałowej kompozytu pozwala na uzyskanie szczególnie dobrych wyników po dłuższym czasie pielęgnacji, jednak wymaga ona odpowiednio dobranych warunków pielęgnacji. Istotny wpływ na uzyskane wyniki miały także warunki pielęgnacji – stosowanie bardziej wilgotnych warunków pielęgnacji pozwoliło na uzyskanie znacznie wyższych właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych badanych stwardniałych kompozytów

cementowych, co podkreśla praktyczną konieczność zapewnienia odpowiednich warunków pielęgnacji na budowie.

Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej ma także wpływ na właściwości funkcjonalne stwardniałego kompozytu cementowego. Odporność na ścieranie stwardniałych kompozytów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej była zbliżona do serii referencyjnej, jednak należy zauważyć, że w tych badaniach zaobserwowano tendencję zmniejszania odporności na ścieranie wraz ze wzrostem zawartości krzemionkowego popiołu lotnego w kompozycie. Kompozyty cementowe do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach, modyfikowane jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej, wykazały się także wysokim poziomem jednorodności stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej, co należy uznać za pozytywny efekt, a same właściwości mechaniczne tych kompozytów były jednymi z wyższych odnotowanych w badaniu.

Przeprowadzona analiza znaczenia uzyskanych rezultatów z badań własnych stwardniałych kompozytów cementowych do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach pozwoliła na wskazanie optymalnych kompozycji materiałowych, które mogą wygenerować odpowiednie właściwości wytrzymałościowe kompozytu cementowego, zmniejszyć przy tym koszt jego wytworzenia dzięki redukcji kosztu zakupu materiałów, a także określić poziom emisyjności, który związany jest z produkcją kompozytu. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwolił na uzyskanie optymalnych wyników biorąc pod uwagę wszystkie wcześniej wymienione aspekty. Sprawdzono w praktyce wykorzystanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej (stosunek dodatków 2:1, odpowiadający serii badawczej 20FA+10GP), zastępując 30% masy cementu w betonie towarowym stosowanym na warstwę wierzchnią podłóg w garażach. Uzyskane wyniki porównano do standardowo stosowanego betonu towarowego w tym celu. Zaobserwowano, że taka modyfikacja kompozytu pozwoliła uzyskać lepszych wyników badanych właściwości (szczególnie po 90 dniach pielęgnacji stwardniałego kompozytu cementowego). Wyniki tych badań mogą stanowić wyznacznik stosowania takiej modyfikacji także w innych elementach obiektów budowlanych i dobrze wskazują jej potencjał.

Na podstawie uzyskanych w rozprawie rezultatów wnioskuje się, że zastosowanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej celem częściowego zastąpienia cementu w kompozycie cementowym do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach jest bardziej optymalnym sposobem redukcji zużycia cementu niż wykorzystanie tych składników pojedynczo (analizując wyniki całościowo). Szczególnie istotne uznaje się podkreślenie aplikacyjnego potencjału wykorzystania tego materiału, który został wskazany w ramach rozprawy.

Wykonany program badań w ramach rozprawy, pozwolił autorowi na przygotowanie 2 zgłoszeń patentowych [P1-P2], z pośród których jedno – „Sposób redukowania ilości cementu w mieszaninach cementowych oraz mieszanina cementowa realizowana według tego sposobu”, decyzją Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej uzyskało ochronę patentową (decyzja z dnia 24.11.2022r. – zgłoszenie nr P.433120) [P1]. Wcześniej wymienione zgłoszenie patentowe zostało także wdrożone w jednej z firm budowlanych, która w całej Polsce zajmuje się wykonywaniem posadzek betonowych garaży podziemnych oraz hal przemysłowych (na mocy umowy udostępnienia licencji). Zgłoszenie patentowe pod tytułem „Mieszanina cementowa w postaci zaprawy cementowej do otrzymywania posadzek” [P2], także zostało wykorzystane w przemyśle na mocy umowy odpłatnego udostępnienia licencji do praw własności intelektualnej do jednej z firm budowlanych działających we Wrocławiu, która specjalizuje się w wykonywaniu posadzek cementowych w budownictwie mieszkaniowym. Niniejszy akapit podsumowuje, że cel aplikacyjny stawiany w pracy badawczej został osiągnięty, a jego efekty zostały podkreślone przez przemysłowe wykorzystanie dokonań autora rozprawy.

Dzięki przeprowadzeniu zaplanowanego programu badań w rozprawie możliwe było wypełnienie wcześniej zdefiniowanych luk badawczych w literaturze związanej z tematyką rozprawy. Podsumowanie wpływu rozprawy doktorskiej na stan literatury przedstawia Tabela 24.

Tabela 24. Podsumowanie wpływu przeprowadzonych badań na stan literatury związanej z tematyką rozprawy

Badana właściwość	Kompozyt modyfikowany dodatkiem PL, MG lub PL+MG*											
	Zaczyn						Zaprawa					
	PL*		MG*		PL+MG*		PL*		MG*		PL+MG*	
	Było	Jest	Było	Jest	Było	Jest	Było	Jest	Było	Jest	Było	Jest
Właściwości mieszanki cementowej												
Gęstość objętościowa	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+
Czas początku i końca wiązania	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Konsystencja	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wodożądność	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+
Odsączenie wody z mieszanki cementowej	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Gęstość upakowania składników	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+
Właściwości fizyczne stwardniałego kompozytu cementowego												
Gęstość objętościowa	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Porowatość objętościowa	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+
Nasiąkliwość masowa	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+
Właściwości mechaniczne stwardniałego kompozytu cementowego												
Wytrzymałość na ściskanie	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Właściwości adhezyjne stwardniałego kompozytu cementowego												
Przyczepność przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+
Właściwości funkcjonalne stwardniałego kompozytu cementowego												
Odporność na ścieranie	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Jednorodność stwardniałego kompozytu w funkcji grubości cementowej warstwy wierzchniej	+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	-	+
kolory: żółty - wpływ znany w literaturze przed badaniami; czerwony - wpływ nieznan w literaturze; zielony - wpływ określony dzięki badaniom; "+" jeżeli właściwość była badana w literaturze; "-" jeżeli właściwość nie była badana w literaturze; PL - serie modyfikowane popiołem lotnym; MG - serie modyfikowane mączką granitową; PL+MG - serie modyfikowane jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej												

### 7.2. Wnioski

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

1. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej może pozwolić na zastąpienie nawet 30% cementu w odpowiednio zaprojektowanym kompozycie cementowym wykorzystanym jako warstwa wierzchnia podłogi, optymalnie z wykorzystaniem wilgotnych warunków ich pielęgnacji. Jak wykazano w rozprawie kompozycja materiałowa w której zastąpiono 30% cementu dodatkiem 20% krzemionkowego popiołu lotnego i 10% odpadowej mączki granitowej nieznacznie poprawia właściwości fizyczne stwardniałego kompozytu cementowego, prowadzi do zwiększenia właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych stwardniałych kompozytów cementowych do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach, zapewniając przy tym zbliżone właściwości mieszanki cementowej do serii referencyjnej.
2. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala zniwelować wpływ zmniejszenia ilości cementu na właściwości mieszanki cementowej. Prowadzi on do uzyskania zbliżonej konsystencji oraz czasu początku i końca wiązania mieszanki w porównaniu z serią niemodyfikowaną. Pozwala też na uzyskanie nieznacznie zwiększonej gęstości objętościowej mieszanki. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej zmniejsza także odsączenie wody z mieszanki oraz pozwala na uzyskanie większej gęstości upakowania składników mieszanki niż seria referencyjna.
3. Wykorzystanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej może pozwolić na uzyskanie lepszych właściwości mieszanki (konsystencja, czas początku i końca wiązania, wodożądność), niż stosowanie tych materiałów oddzielnie (co zaobserwowano dla serii badawczych 5FA+5GP, 10FA+10GP czy 20FA+10GP), jednak istnieją właściwości na które bardziej pozytywny wpływ mają te materiały stosowane oddzielnie (zastąpienie cementu tylko dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego znacznie poprawia gęstość objętościową mieszanki (wszystkie serie badawcze FA) oraz maksymalną gęstość upakowania jej składników, zmniejsza wodożądność mieszanki (szczególnie seria badawcza FA20), natomiast odpadowa mączka granitowa pozwala na uzyskanie najmniejszego odsączenia wody z mieszanki cementowej (wszystkie serie badawcze GP)).
4. Właściwości mieszanki cementowej (w szczególności odsączenie wody z mieszanki cementowej oraz gęstość objętościowa) są ściśle związane z właściwościami morfologicznymi ziaren oraz krzywą uziarnienia stosowanych materiałów. Odpowiednio dobrana granulacja wykorzystanego w mieszance spoiwa może skutecznie ograniczyć proces odsączenia wody

z mieszanki cementowej oraz zwiększyć gęstość objętościową mieszanki dzięki poprawie upakowania jej składników. Wyniki badań wykazują, że 10% zastąpienia cementu dodatkiem odpadowej mączki granitowej może pozwolić na zmniejszenie objętości odsączonej wody nawet o 3% w porównaniu z mieszanką referencyjną oraz 50% w porównaniu do mieszanki modyfikowanej dodatkiem 10% krzemionkowego popiołu lotnego. Wodożądność kompozycji materiałowej ma także znaczący wpływ na właściwości mieszanki – bardziej wodożądna mieszanka wykazuje się bardziej gęstą konsystencją oraz jest mniej podatna na odsączanie wody z mieszanki cementowej, gdyż wymaga ona większej objętości wody do otoczenia wszystkich swoich składników. Serie modyfikowane odpadową mączką granitową są bardziej wodożądne dlatego też wykazują się zmniejszoną objętością odsączonej wody.

5. Właściwości wytrzymałościowe kompozytów w których zastąpiono część cementu jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej są zróżnicowane i wysoce zależne od warunków pielęgnacji kompozytu cementowego – zwykle kompozyty te jednak wykazują nieznacznie niższe wyniki wytrzymałości na ściskanie oraz znacznie niższe wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (szczególnie po 7 i 28 dniach pielęgnacji). Obserwuje się jednak, że po 90 dniach pielęgnacji zwiększona zawartość krzemionkowego popiołu lotnego pozwala na rozwój właściwości wytrzymałościowych kompozytów i redukuje różnicę w stosunku do kompozytu referencyjnego lub nawet prowadzi do wyższych wyników niż seria niemodyfikowana. Szczególnie pozytywne wyniki wykazała seria modyfikowana dodatkiem 20% krzemionkowego popiołu lotnego oraz 10% odpadowej mączki granitowej po 90 dniach pielęgnacji w wilgotnych warunkach pielęgnacji (ta kompozycja została także wykorzystana przy opisanym praktycznym wdrożeniu wyników rozprawy).
6. Wykazano w rozprawie, że wykorzystanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie wymaganych normowo wyników przyczepności przy odrywaniu cementowej warstwy wierzchniej od podkładu, zapewniając przy tym wysokie prawdopodobieństwo wystarczającej dynamiki rozwoju właściwości adhezyjnych stwardniałego kompozytu, co prowadzi do uzyskania pożądanego modelu zniszczenia w połączeniu cementowej warstwy wierzchniej i podkładu.
7. Zauważono, że zastosowanie jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie lepszych właściwości funkcjonalnych niż kompozyt referencyjny. Modyfikowany w ten sposób stwardniały kompozyt cementowy do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach wykazuje bardziej jednorodne właściwości w funkcji grubości warstwy wierzchniej. Ten rodzaj kompozytu charakteryzuje się niższą tendencją do występowania obniżonych właściwości w okolicach jego górnej powierzchni, co spowodowane jest możliwością ograniczenia odsączania wody z mieszanki

- cementowej oraz optymalnymi właściwościami morfologicznymi zastosowanej mieszanki spoiwa.
8. Na drodze badawczej wyselekcjonowano najbardziej optymalnej ilości jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej – 30%, zastępując przy tym cement tymi materiałami odpowiednio w stosunku 2:1 (seria badawcza 20FA+10GP). Dla takiej kompozycji materiałowej obserwuje się zauważalny wzrost właściwości wytrzymałościowych, adhezyjnych i funkcjonalnych stwardniałego kompozytu cementowego stosowanego na warstwy wierzchnie podłóg, utrzymując przy tym zbliżone właściwości mieszanki oraz właściwości fizyczne stwardniałego kompozytu cementowego do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach.
  9. Jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie znacznie niższej ceny kompozytu cementowego do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach niż kompozyt niemodyfikowany – redukcja kosztu nawet o 24%. Szczególnie dobre parametry wykazuje kompozyt modyfikowany dodatkiem 20% krzemionkowego popiołu lotnego i 10% odpadowej mączki granitowej, pozwalając na uzyskanie najwyższego współczynnika wydajności mechanicznej *MPR* po 90 dniach – 105% (pielęgnowany w wilgotnych warunkach CC3), łącząc przy tym redukcję kosztu materiałowego kompozytu o 20% w stosunku do serii referencyjnej. Ta sama seria materiałowa wykazała się także pozytywnym wynikiem korelacji współczynnika emisyjności *ECO<sub>2</sub>R* – 84% ze współczynnikiem wydajności mechanicznej *MPR* – 105%. Podkreśla to znaczący potencjał wykorzystania jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej do zastąpienia części cementu w kompozytach cementowych do zastosowania w warstwach wierzchnich w podłogach.
  10. Przeprowadzone wdrożenie modyfikacji jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej betonu towarowego do wykorzystania na warstwę wierzchnią w podłogach garaży w budynkach mieszkalnych wykazują ogromny potencjał tej metody do częściowego zastąpienia cementu, podkreślając przy tym jej wpływ na najważniejsze właściwości kompozytów cementowych do zastosowania w warstwie wierzchniej w podłogach.

### 7.3. Konkluzja końcowa

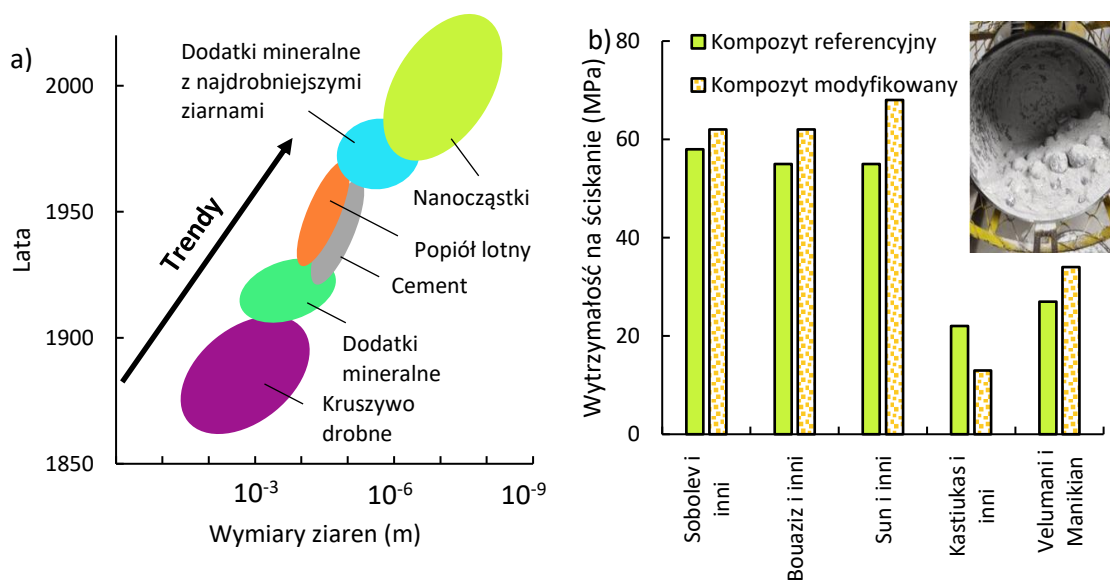
Cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte, a wyniki przeprowadzonych badań wskazują jednoznacznie na innowacyjny charakter wykorzystanej kombinacji materiałów zastępujących część cementu jednoczesnym dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej w mieszance cementowej i stwardniałym kompozycie cementowym. Popularyzacja wyników rozprawy może dodatkowo przyczynić się do zmiany tendencji postrzegania wykorzystanych materiałów (krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej), co pozwoli na zmniejszenie istotnych problemów wskazanych w rozpoznaniu literaturowym, jednocześnie obniżając zużycie cementu i wpływając na poprawę środowiska naturalnego.

### 7.4. Proponowane kierunki dalszych badań

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

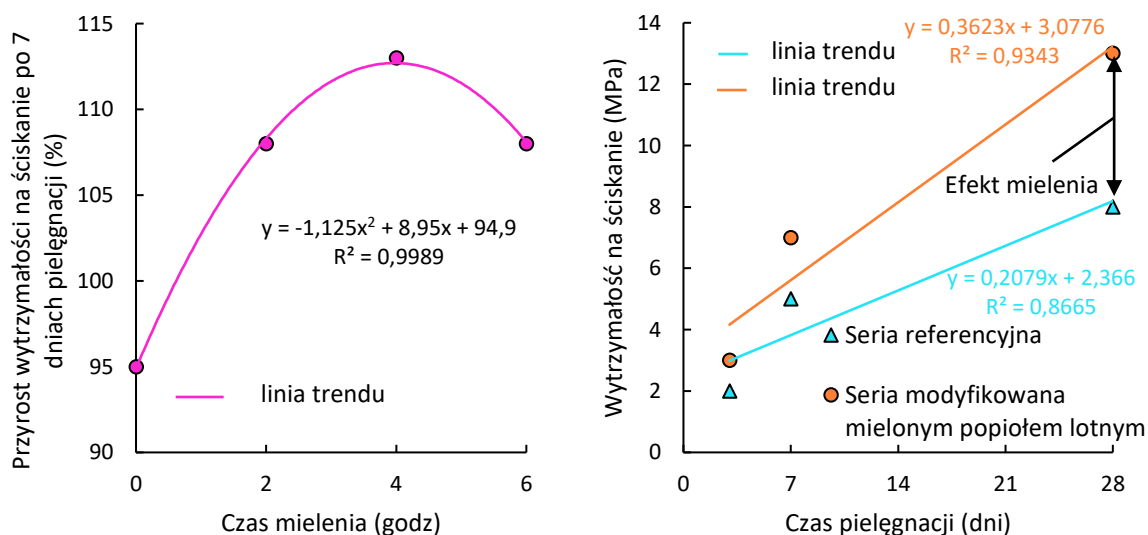
Wykorzystana w rozprawie odpadowa mączka granitowa nie była w żaden sposób przetworzona. Natomiast obecne trendy (Rysunek 104a) wskazują, że w badaniach naukowych kompozytów cementowych dąży się do stosowania jak najmniejszych wymiarów cząstek materiałów. Podjęte przez autorów z literatury próby mielenia materiałów stosowanych do zastąpienia części cementu w kompozycie (Rysunek 104b) wskazują, że funkcjonalizacja mechaniczna ziaren pozwala na osiągnięcie zwiększonych właściwości mechanicznych kompozytów cementowych.





Rysunek 104. Analiza możliwości optymalizacji właściwości odpadowej mączki granitowej: a) trendy wykorzystania dodatków w kompozytach cementowych b) wpływ funkcjonalizacji mechanicznej ziaren odpadowej mączki granitowej na właściwości kompozytu cementowego nimi modyfikowanego (opracowanie własne na podstawie [12, 92, 154, 159, 166])

Funkcjonalizacja mechaniczna popiołu lotnego może pozwolić na uzyskanie wysokiego przyrostu wytrzymałości na ściskanie. Rysunek 105 przedstawia wyniki uzyskane dla funkcjonalizacji mechanicznej krzemionkowego popiołu lotnego opisane w literaturze.



Rysunek 105. Analiza możliwości optymalizacji kompozycji materiałowych cementowej warstwy wierzchniej z wykorzystaniem funkcjonalizacji mechanicznej krzemionkowego popiołu lotnego na podstawie literatury [13, 131]

Funkcjonalizacja mechaniczna może zatem zapewnić zwiększone właściwości mechaniczne kompozytu, ale także pozwolić na wyższe procentowe zastąpienie cementu niż stosowano w badaniach opisanych w rozprawie, co może przyczynić się dodatkowo do poprawy środowiska naturalnego i ograniczenia zużycia cementu na świecie. Niemniej jednak, należy rozważyć bilans zysków i strat związany z funkcjonalizacją mechaniczną materiałów sypkich. Wiadome jest bowiem, że mielenie proszków wymaga specjalistycznego sprzętu (młyny zapewniające możliwość mielenia ziaren materiału do bardzo małych wymiarów) oraz jest bardzo energochłonne, co w obecnej sytuacji na świecie jest znaczącą wadą tego rozwiązania.

Dyskusja naukowców nad tym czy odpadowa mączka granitowa wykazuje właściwości wiążące czy też nie jest ciągle nierozstrzygnięta. Jest to związane z dobrymi właściwościami wypełniającymi mączki granitowej, przez co wielu naukowców interpretuje uzyskane wyniki jako efekt właściwości wiążących mączki granitowej. Autor nie zaobserwował jednak takich wyników w swoich badaniach. Przeprowadzenie badań hydratacji cementu modyfikowanego dodatkiem funkcjonalizowanej odpadowej mączki granitowej może pozwolić wskazać kierunek rozwoju tego materiału oraz określić potencjał zmiany wymiarów jego ziaren. Badania hydratacji mogą pozwolić na odpowiedź na pytanie nurtujące naukowców związanych z tematyką odpadowej mączki granitowej i określić możliwości produkcji nowych rodzajów cementów modyfikowanych dodatkiem odpadowej mączki granitowej.

Uzyskana baza ponad 4 tysięcy wyników badań wykonanych dla kompozytów o różnych składach materiałowych oraz pielęgnowanych w zróżnicowanych warunkach jest trudna do analizy z wykorzystaniem tradycyjnych metod. Wykorzystanie w tym celu sztucznych sieci neuronowych oraz metod uczenia maszynowego może pozwolić na predykcję wyników kompozytów cementowych z uwzględnieniem założeń wstępnych, a co z tym związane znacząco zmniejszyć liczby prób badawczych wykonanych w tej tematyce w przyszłości.

W ramach rozprawy doktorskiej przeprowadzono badania w których nie wykorzystano żadnych związków chemicznych modyfikujących właściwości mieszanki cementowej. Warta sprawdzenia wydaje się możliwość poprawy zaobserwowanego, negatywnego wpływu badanych materiałów na właściwości mieszanki za pomocą dodatku związków chemicznych (plastyfikator, napowietrzacz itp.). Być może doprowadzi to do zwiększenia właściwości mechanicznych kompozytu dzięki ograniczeniu wskaźnika w/c oraz poprawy właściwości mieszanki.

## **Zestawienie prac własnych autora opublikowanych w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej**

### **Patenty i zgłoszenia patentowe:**

- [P1] Chajec A, Sadowski Ł. Patent nr P433120 uzyskany w 2022 r.: Sposób redukowania ilości cementu w mieszaniach cementowych oraz mieszanina cementowa realizowana według tego sposobu.
- [P2] Chajec A, Sadowski Ł, Moj M. Zgłoszenie patentowe nr P438146 zgłoszone w 2021 r.: Mieszanina cementowa w postaci zaprawy cementowej do otrzymywania posadzek.

### **Artykuły naukowe:**

- [A1] Chajec A, Granite powder vs. fly ash for the sustainable production of air-cured cementitious mortars. *Materials*. 2021, vol. 14, nr 5. s. 1208
- [A2] Chajec A, Sadowski Ł, Moj M, Adhesive and functional properties of environmentally friendly cementitious overlays modified by granite powder, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, vol. 117. s. 103008
- [A3] Chajec A, Chowaniec A, Królicka A, Sadowski Ł, Żak A, Piechowka-Mielnik M, Šavija B, Engineering of green cementitious composites modified with siliceous fly ash: understanding the importance of curing conditions, *Construction and Building Materials* 2021, vol. 313. s. 125209
- [A4] Chajec A, Towards the cleaner production of cementitious materials with the synergistic addition of granite powder waste and fly ash. *Chemical Engineering Transactions*. 2022, vol. 94. s. 289-294

### **Rozdziały w monografiach:**

- [M1] Chajec A, Sadowski Ł, Bleeding of cement pastes modified with the addition of granite powder. W: *International RILEM Conference on Early-Age and Long-Term Cracking in RC Structures : CRC 2021* / eds. Fragkoulis Kanavaris, Farid Benboudjema, Miguel Azenha. Cham : Springer, cop. 2021. s. 307-318. (Rilem Bookseries, ISSN 2211-0844; vol. 31).
- [M2] Chajec A, Towards the sustainable use of granite powder waste for manufacturing of cementitious composites. W: *MATBUD'2020 – Scientific-Technical Conference : E-mobility, Sustainable Materials and Technologies*, Kraków, Polska, Październik 19-21, 2020 / eds. T. Tracz, K. Mróz and T. Zdeb. [Les Ulis] : EDP Sciences, 2020. art. 01005, s. 1-8. (MATEC Web of Conferences, ISSN 2261-236X; vol. 322).

## Literatura

1. Abd Elmoaty AEM. 2013. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*. 47: s. 743–52
2. Abukersh SA, Fairfield CA. 2011. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials*. 25: s. 4088–94
3. Agrawal Y, Siddique S, Sharma RK, Gupta T. 2021. Valorization of granite production dust in development of rich and lean cement mortar. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 23: s. 686–98
4. Amani A, Babazadeh A, Sabohanian A, Khalilianpoor A. 2019. Mechanical properties of concrete pavements containing combinations of waste marble and granite powders. *International Journal of Pavement Engineering*. 22: s. 1531–40
5. Amin MN, Khan K, Saleem MU, Khurram N, Niazi MUK. 2017. Aging and Curing Temperature Effects on Compressive Strength of Mortar Containing Lime Stone Quarry Dust and Industrial Granite Sludge. *Materials*. 10: s. 642
6. *ASTM C234-95 Standard Test Method for Bleeding of Cement Pastes and Mortars*. 1995. Washington DC
7. Bakhroum ES, Garas GL, Allam ME, Ezz H. 2017. The Role of Nano-Technology in Sustainable Construction: A Case Study of Using Nano Granite Waste Particles in Cement Mortar. *Engineering Journal*. 21: s. 217–27
8. Banthia N, Gupta R. 2006. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*. 36: s. 1263–67
9. Banthia N, Gupta R. 2009. Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays. *Materials and Structures*. 42: s. 567–79
10. Bicer A. 2018. Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites. *Thermal Science and Engineering Progress*. 8: s. 78–82
11. Binici H, Shah T, Aksogan O, Kaplan H. 2008. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*. 208: s. 299–308
12. Bouaziz A, Hamzaoui R, Guessasma S, Lakhel R, Achoura D, Leklou N. 2017. Efficiency of high energy over conventional milling of granulated blast furnace slag powder to improve mechanical performance of slag cement paste. *Powder Technology*. 308: s. 37–46
13. Bouzoubaâ N, Zhang MH, Bilodeau A, Malhotra VM. 1997. The effect of grinding on the

- 
- physical properties of fly ashes and a portland cement clinker. *Cement and Concrete Research*. 27: s. 1861–74
14. Bouzoubaâ N, Zhang MH, Malhotra VM. 2001. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*. 31: s. 1393–1402
  15. Briki Y, Zajac M, Haha M Ben, Scrivener K. 2021. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age. *Cement and Concrete Research*. 147: s. 106515
  16. Brunarski L, Runkiewicz L. 1983. *Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniach konstrukcji z betonu*. Warszawa: ITB
  17. Canpolat F, Yilmaz K, Köse MM, Sümer M, Yurdusev MA. 2004. Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production. *Cement and Concrete Research*. 34: s. 731–35
  18. Celik K, Meral C, Petek Gursel A, Mehta PK, Horvath A, Monteiro PJM. 2015. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*. 56: s. 59–72
  19. Chaipanich A, Nochaiya T, Wongkeo W, Torkittikul P. 2010. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes–fly ash cement composites. *Materials Science and Engineering: A*. 527: s. 1063–67
  20. Chajec A, Sadowski Ł. 2020. The effect of steel and polypropylene fibers on the properties of horizontally formed concrete. *Materials*. 13: s. 5827
  21. Chen HJ, Shih NH, Wu CH, Lin SK. 2019. Effects of the loss on ignition of fly ash on the properties of high-volume fly ash concrete. *Sustainability*. 11: s. 2704
  22. Chen JJ, Guan GX, Ng PL, Kwan AKH, Chu SH. 2021. Packing optimization of paste and aggregate phases for sustainability and performance improvement of concrete. *Advanced Powder Technology*. 10: s. 987–97
  23. Chen JJ, Li BH, Ng PL, Kwan AKH. 2021. Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and improve performance of mortar. *Journal of Cleaner Production*. 279: s. 123653
  24. Chen L, Wang L, Cho DW, Tsang DCW, Tong L, et al. 2019. Sustainable stabilization/solidification of municipal solid waste incinerator fly ash by incorporation of green materials. *Journal of Cleaner Production*. 222: s. 335–43
  25. Chindaprasirt P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. 2004. Influence of fly ash fineness on

- strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 34: s. 1087–92
26. Cho YK, Jung SH, Choi YC. 2019. Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*. 204: s. 255–64
  27. Choudhary R, Gupta R, Alomayri T, Jain A, Nagar R. 2021. Permeation, corrosion, and drying shrinkage assessment of self-compacting high strength concrete comprising waste marble slurry and fly ash, with silica fume. *Structures*. 33: s. 971–85
  28. Choudhary R, Gupta R, Nagar R. 2020. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*. 239: s. 117888
  29. Choudhary R, Gupta R, Nagar R, Jain A. 2020. Sorptivity characteristics of high strength self-consolidating concrete produced by marble waste powder, fly ash, and micro silica. *Materials Today: Proceedings*. 32: s. 531–35
  30. Chu SH. 2019. Effect of paste volume on fresh and hardened properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 218: s. 284–94
  31. Chu SH. 2021. Development of Infilled Cementitious Composites (ICC). *Composite Structures*. 267: s. 113885
  32. Chu SH, Kwan AKH. 2019. Co-addition of metakaolin and silica fume in mortar: effects and advantages. *Construction and Building Materials*. 197: s. 716–24
  33. Çınar M, Karpuzcu M, Çanakçı H. 2019. Effect of waste marble powder and fly ash on the rheological characteristics of cement based grout. *Civil Engineering Journal*. 5: s. 777–88
  34. Coo M, Pheeraphan T. 2016. Effect of sand, fly ash and limestone powder on preplaced aggregate concrete mechanical properties and reinforced beam shear capacity. *Construction and Building Materials*. 120: s. 581–92
  35. Czarnecki L, Deja J, Furtak K, Halicka A, Kapliński O, et al. 2017. Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. W poszukiwaniu paradygmatu rozwoju budownictwa. *Materiały Budowlane*. 7: s. 34–39
  36. Czarnecki L, Kurdowski W. 2007. Tendencje kształtujące przyszłość betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 1: s. 50–55
  37. Davies D, Cotton R. 1983. Mica pneumoconiosis. *Occupational and Environmental Medicine*. 40: s. 22–27
  38. Day RL, Shi C. 1994. Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-

- 
- pozzolan cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 24: s. 1485–91
39. De Weerd K, Haha M Ben, Le Saout G, Kjellsen KO, Justnes H, Lothenbach B. 2011. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*. 41: s. 279–91
40. De Weerd K, Kjellsen KO, Sellevold E, Justnes H. 2011. Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement and Concrete Composites*. 33: s. 30–38
41. Deja J, Uliasz-Bochenczyk A, Mokrzycki E. 2010. CO<sub>2</sub> emissions from Polish cement industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 4: s. 583–88
42. Dobiszewska M. 2019. *Kompozyty cementowe z dodatkiem pyłu bazaltowego*. Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy
43. Dobiszewska M, Beycioğlu A. 2017. Investigating the influence of waste basalt powder on selected properties of cement paste and mortar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 245: s. 022027
44. Du Y, Yang W, Ge Y, Wang S, Liu P. 2021. Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. 287: s. 125018
45. Elyamany HE, Abd Elmoaty AEM, Mohamed B. 2014. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*. 53: s. 295–307
46. Erdoğdu K, Türker P. 1998. Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*. 28: s. 1217–22
47. Fan Y, Yin S, Wen Z, Zhong J. 1999. Activation of fly ash and its effects on cement properties. *Cement and Concrete Research*. 29: s. 467–72
48. Fernández-Jiménez A, Palomo A, Criado M. 2005. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*. 35: s. 1204–9
49. Flaga K, Derkowski W, Surma M. 2016. Concrete strength and elasticity of precast thin-walled elements. *Cement, Wapno, Beton*. 21: s. 310–17
50. Fonseca AV Da, Carvalho J, Ferreira C, Santos JA, Almeida F, et al. 2006. Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*. 24: s. 1307–48
51. Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ, Frost CD. 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*. 42: s. 2033–48

52. Gao X, Yuan B, Yu QLL, Brouwers HJHJH. 2017. Characterization and application of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and waste granite powder in alkali activated slag. *Journal of Cleaner Production*. 164: s. 410–19
53. Garbacz A, Courard L, Kostana K. 2006. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. *Materials Characterization*. 56: s. 281–89
54. Garbacz A, Sokołowska JJ. 2013. Concrete-like polymer composites with fly ashes – Comparative study. *Construction and Building Materials*. 38: s. 689–99
55. Gardner LJ, Bernal SA, Walling SA, Corkhill CL, Provis JL, Hyatt NC. 2015. Characterisation of magnesium potassium phosphate cements blended with fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Research*. 74: s. 78–87
56. Gesoğlu M, Güneyisi E, Kocabağ ME, Bayram V, Mermerdaş K. 2012. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*. 37: s. 160–70
57. Ghannam S, Najm H, Vasconez R. 2016. Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*. 9: s. 1–9
58. Ghorbani S, Ghorbani S, Elmi A, Soleimani V, Taji I, et al. 2021. Simultaneous effect of granite waste dust as partial replacement of cement and magnetized water on the properties of concrete exposed to NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. *Construction and Building Materials*. 288: s. 123064
59. Ghorbani S, Taji I, de Brito J, Negahban M, Ghorbani S, et al. 2019. Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. *Construction and Building Materials*. 194: s. 143–52
60. Ghorbani S, Taji I, Tavakkolizadeh M, Davodi A, de Brito J. 2018. Improving corrosion resistance of steel rebars in concrete with marble and granite waste dust as partial cement replacement. *Construction and Building Materials*. 185: s. 110–19
61. Giergiczny Z. 2019. Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. 124: s. 105826
62. Gleeson DB, Clipson N, Melville K, Gadd GM, McDermott FP. 2005. Characterization of fungal community structure on a weathered pegmatitic granite. *Microbial ecology*. 50: s. 360–68
63. Golewski GL. 2015. *Procesy pęknięcia w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych*. Lublin: Politechnika Lubelska
64. Golewski GL. 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: s. 298–304



- 
65. Golewski GL. 2019. *Beton modyfikowany popiołem lotnym krzemionkowych poddany ekspozycji niskich temperatur*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
  66. Grodzicka A. 2004. Wybrane zagadnienia z betonu wysokowartościowego. *Dni Betonu, Polski Cement*. 1: s. 1–14
  67. Güneysisi E, Gesoğlu M. 2008. Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin. *Materials and Structures*. 41: s. 1519–31
  68. Gupta LK, Vyas AK. 2018. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*. 191: s. 155–64
  69. Gupta S, Kashani A, Mahmood AH, Han T. 2021. Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash – Effect on mechanical and durability properties. *Construction and Building Materials*. 291: s. 123363
  70. Hager I, Sitarz M, Mróz K. 2021. Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application – Effect of slag addition. *Journal of Cleaner Production*. 316: s. 128168
  71. Hajduk P. 2013. *Projektowanie podłóg przemysłowych*. Warszawa: PWN SA
  72. Hansel H. 1968. *Podstawy rachunku błędów*. Warszawa: PWN SA
  73. Hemalatha MS, Santhanam M. 2018. Characterizing supplementary cementing materials in blended mortars. *Construction and Building Materials*. 191: s. 440–59
  74. Hoła J, Sadowski L, Schabowicz K. 2011. Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods. *Automation in Construction*. 20: s. 799–807
  75. Hoła J, Sadowski Ł, Hoła A. 2018. The effect of failure to comply with technological and technical requirements on the condition of newly built cement mortar floors. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 233: s. 268–75. SAGE PublicationsSage UK: London, England
  76. Horszczaruk E, Sikora P, Cendrowski K, Mijowska E. 2017. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. *Construction and Building Materials*. 137: s. 420–31
  77. Hou PK, Kawashima S, Wang KJ, Corr DJ, Qian JS, Shah SP. 2013. Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar. *Cement and Concrete Composites*. 35: s. 12–22
  78. <http://e-gospodarkaodpadami.pl/rynek/gdzie-sie-podzialy-haldy->
  79. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en10-residues-from-combustion-of-residues-from-combustion-of-coal>

80. [https://umwd.dolnyslask.pl/fileadmin/user\\_upload/Gospodarka/zdjecia/2018-06-27\\_Raport\\_koncowy\\_UMWD.pdf](https://umwd.dolnyslask.pl/fileadmin/user_upload/Gospodarka/zdjecia/2018-06-27_Raport_koncowy_UMWD.pdf)
81. Irfan TY, Dearman WR. 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 1978 17:1. 17: s. 79–90
82. Jain A, Chaudhary S, Choudhary · Sumit, Gupta R. 2022. Resistance of fly ash blended self-compacting concrete incorporating granite powder against acid and sulphate environments. *Arabian Journal of Geosciences* 2022 15:12. 15: s. 1–13
83. Jain A, Chaudhary S, Gupta R. 2022. Mechanical and microstructural characterization of fly ash blended self-compacting concrete containing granite waste. *Construction and Building Materials*. 314: s. 125480
84. Jain A, Choudhary S, Gupta R, Chaudhary S, Gautam L. 2022. Effect of granite industry waste addition on durability properties of fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 340: s. 127727
85. Jain A, Gupta R, Chaudhary S. 2019. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 221: s. 539–52
86. Jain KL, Sancheti G, Gupta LK. 2020. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. *Construction and Building Materials*. 252: s. 119075
87. Jamróży Z. 2015. *Beton i jego technologie*. Warszawa: PWN SA
88. Janowska-Renkas E. 2010. Wpływ mączki granitowej jako wypełniacza w cemencie na właściwości betonu. *Roczniki Inżynierii Budowlanej*. 10: s. 19–23
89. John VM, Damineli BL, Quattrone M, Pileggi RG. 2018. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*. 114: s. 65–78
90. Jurczak R, Szmatuła F, Rudnicki T, Korentz J. 2021. Effect of Ground Waste Glass Addition on the Strength and Durability of Low Strength Concrete Mixes. *Materials*. 14: s. 190
91. Kaniraj SR, Havanagi VG. 1999. Compressive strength of cement stabilized fly ash-soil mixtures. *Cement and Concrete Research*. 29: s. 673–77
92. Kastiukas G, Zhou X, Castro-Gomes J. 2016. Development and optimisation of phase change material-impregnated lightweight aggregates for geopolymer composites made from aluminosilicate rich mud and milled glass powder. *Construction and Building Materials*. 110: s. 201–10
93. Kaszyńska M, Rucinska T. 2008. Wpływ kompozycji kruszywa na właściwości lekkich betonów

- 
- samozagęszczalnych. *Konferencja "Dni Betonu."* 1: s. 1–11
94. Khan M, Ali M. 2018. Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber. *Construction and Building Materials*. 182: s. 703–15
95. Kim SJ, Yang KH, Moon GD. 2015. Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder. *Materials*. 8: s. 5847–61
96. Kurda R, de Brito J, Silvestre JD. 2017. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*. 84: s. 198–213
97. Kurdowski W. 2010. *Chemia cementu i betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu
98. Kwan AKH, Li Y. 2013. Effects of fly ash microsphere on rheology, adhesiveness and strength of mortar. *Construction and Building Materials*. 42: s. 137–45
99. Lam L, Wong YL, Poon CS. 1998. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive and Fracture Behaviors of Concrete. *Cement and Concrete Research*. 28: s. 271–83
100. Lam L, Wong YL, Poon CS. 2000. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. *Cement and Concrete Research*. 30: s. 747–56
101. Lee C, Lee S, Nguyen N. 2016. Modeling of Compressive Strength Development of High-Early-Strength-Concrete at Different Curing Temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 10: s. 205–19
102. Lee CY, Lee HK, Lee KM. 2003. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Research*. 33: s. 425–31
103. Leung HY, Kim J, Nadeem A, Jaganathan J, Anwar MP. 2016. Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*. 113: s. 369–75
104. Li LG, Wang YM, Tan YP, Kwan AKH. 2019. Filler technology of adding granite dust to reduce cement content and increase strength of mortar. *Powder Technology*. 342: s. 388–96
105. Li Y, Yu H, Zheng L, Wen J, Wu C, Tan Y. 2013. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. *Construction and Building Materials*. 38: s. 1–7
106. Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. 2011. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 41: s. 1244–56
107. Małolepszy J, Gajewski R. 2008. Skąły węglanowe jako cenne źródło kruszyw do betonu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*. 2: s. 64–69
108. Mármol I, Ballester P, Cerro S, Monrós G, Morales J, Sánchez L. 2010. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. *Cement and Concrete Composites*.

32: s. 617–22

109. Mashaly AO, Shalaby BN, Rashwan MA. 2018. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*. 169: s. 800–818
110. Massazza F. 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*. 15: s. 185–214
111. Mehta A, Siddique R, Singh BP, Aggoun S, Łagód G, Barnat-Hunek D. 2017. Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*. 150: s. 817–24
112. Mehta PK, Gjörv OE. 1982. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume. *Cement and Concrete Research*. 12: s. 587–95
113. Millán-Corrales G, González-López JR, Palomo A, Fernandez-Jiménez A. 2020. Replacing fly ash with limestone dust in hybrid cements. *Construction and Building Materials*. 243: s. 118169
114. Mu Y, Saffarzadeh A, Shimaoka T. 2017. Influence of ignition process on mineral phase transformation in municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash: Implications for estimating loss-on-ignition (LOI). *Waste Management*. 59: s. 222–28
115. Muraleedharan M, Nadir Y. 2021. Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review. *Ceramics International*. 47: s. 13257–79
116. Nepomuceno M, Oliveira L, Lopes SMR. 2012. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*. 26: s. 317–26
117. Nguyen MH, Nguyen VT, Huynh TP, Hwang CL. 2021. Incorporating industrial by-products into cement-free binders: Effects on water absorption, porosity, and chloride penetration. *Construction and Building Materials*. 304: s. 124675
118. Niewiadomski P. 2019. *Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na właściwości betonu samozagęszczającego się, Rozprawa doktorska*. Wrocław: Politechnika Wrocławska
119. Nochaiya T, Wongkeo W, Chaipanich A. 2010. Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement-fly ash-silica fume concrete. *Fuel*. 89: s. 768–74
120. Nowogonska B, Korentz J. 2020. Value of technical wear and costs of restoring performance characteristics to residential buildings. *Buildings*. 10: s. 9
121. Ostrowski K, Stefaniuk D, Sadowski Ł, Krzywiński K, Gicala M, Różańska M. 2020. Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-

- 
- performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 238: s. 117794
122. Owsiak Z. 2004. Alkali–aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate. *Cement and Concrete Research*. 34: s. 7–11
123. Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. 1999. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*. 29: s. 1323–29
124. Papadakis VG. 1999. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part I. Low-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. 29: s. 1727–36
125. Papadakis VG. 2000. Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. 30: s. 1647–54
126. Paul SC, van Rooyen AS, van Zijl GPAG, Petrik LF. 2018. Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*. 189: s. 1019–34
127. Poon CS, Kou SC, Lam L. 2006. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures 2006 40:9*. 40: s. 981–88
128. Poon CS, Wong YL, Lam L. 1997. The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly-ash cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*. 11: s. 383–93
129. Prokopski G, Huts A, Marchuk V. 2021. The use of granite dust as an effective filler of concrete mixtures. *Achives of Civil Engineering*. 67: s. 159–74
130. Prokopski G, Marchuk V, Huts A. 2020. Granite dust as a mineral component of a dry cement mortar mixtures. *Archives of Civil Engineering*. 66: s. 81–96
131. Qian J, Shi C, Wang Z. 2001. Activation of blended cements containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. 31: s. 1121–27
132. Rafieizonooz M, Mirza J, Salim MR, Hussin MW, Khankhaje E. 2016. Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*. 116: s. 15–24
133. Rashwan MA, Al - Basiony TM, Mashaly AO, Khalil MM. 2020. Behaviour of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement. *Journal of Building Engineering*. 32: s. 101697
134. Rid ZA, Shah SNR, Memon MJ, Jhatial AA, Keerio MA, Goh WI. 2022. Evaluation of combined utilization of marble dust powder and fly ash on the properties and sustainability of high-strength concrete. *Environmental Science and Pollution Research*. 29: s. 28005–19

135. Rojo-López G, Nunes S, González-Fonteboa B, Martínez-Abella F. 2020. Quaternary blends of portland cement, metakaolin, biomass ash and granite powder for production of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 266: s. 121666
136. Sadek DM, El-Attar MM, Ali HA. 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 121: s. 19–32
137. Sadowski L, Hoła J. 2013. Neural prediction of the pull-off adhesion of the concrete layers in floors on the basis of nondestructive tests. *Procedia Engineering*. 57: s. 986–95
138. Sadowski Ł. 2019. *Adhesion in Layered Cement Composites*. Springer
139. Sadowski Ł, Hoła J. 2022. *Non-Destructive Diagnostics of Concrete Floors: Methods and Case Studies*. CRC Press
140. Sahoo K, Dhir PK, Teja PRR, Sarkar P, Davis R. 2020. Seismic Safety Assessment of Buildings with Fly-Ash Concrete. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 25: s. 402–24
141. Sakai E, Miyahara S, Ohsawa S, Lee SH, Daimon M. 2005. Hydration of fly ash cement. *Cement and Concrete Research*. 35: s. 1135–40
142. Santos Nascimento ES, Souza PC de, Oliveira HA de, Melo Júnior CM, Oliveira Almeida VG de, Melo FMC de. 2021. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. *Journal of Cleaner Production*. 321: s. 129002
143. Sathawane SH, Vairagade VS, Kene KS. 2013. Combine Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on Concrete by 30% Cement Replacement. *Procedia Engineering*. 51: s. 35–44
144. Schwarz N, Neithalath N. 2008. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. *Cement and Concrete Research*. 38: s. 429–36
145. Shamsabadi EA, Ghalehnovi M, de Brito J, Khodabakhshian A, Asadi Shamsabadi E, et al. 2018. Performance of concrete with waste granite powder: the effect of superplasticizers. *Applied Sciences*. 8: s. 1808
146. Sharbaf M, Najimi M, Ghafoori N. 2022. A comparative study of natural pozzolan and fly ash: Investigation on abrasion resistance and transport properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 346: s. 128330
147. Shi ZQ, Chung DDL. 1997. Improving the abrasion resistance of mortar by adding latex and carbon fibers. *Cement and Concrete Research*. 27: s. 1149–53
148. Siad H, Lachemi M, Sahmaran M, Mesbah HA, Hossain KMA. 2018. Use of recycled glass

- 
- powder to improve the performance properties of high volume fly ash-engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*. 163: s. 53–62
149. Sikora P, Augustyniak A, Cendrowski K, Nawrotek P, Mijowska E. 2018. Antimicrobial Activity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, and ZnO Nanoparticles in Scope of Their Further Application in Cement-Based Building Materials. *Nanomaterials*. 8: s. 212
150. Sikora P, Horszczaruk E, Rucińska T, Straszyńska A. 2015. Wpływ wysokiej temperatury na właściwości mechaniczne zapraw cementowych ze stłuczką szklaną. *Materiały Budowlane*. nr 5: s. 118–20
151. Silva B, Aira N, Martínez-Cortizas A, Prieto B. 2009. Chemical composition and origin of black patinas on granite. *Science of The Total Environment*. 408: s. 130–37
152. Singh S, Nagar R, Agrawal V. 2016. A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand. *Journal of Cleaner Production*. 126: s. 74–87
153. Singh S, Nagar R, Agrawal V, Rana A, Tiwari A. 2016. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*. 116: s. 223–35
154. Sobolev K, Lin Z, Cao Y, Sun H, Flores-Vivian I, et al. 2016. The influence of mechanical activation by vibro-milling on the early-age hydration and strength development of cement. *Cement and Concrete Composites*. 71: s. 53–62
155. Stawiski B, Kania T. 2020. Tests of Concrete Strength across the Thickness of Industrial Floor Using the Ultrasonic Method with Exponential Spot Heads. *Materials*. 13: s. 2118
156. Stryzewska T. 2014. The change in selected properties of ceramic materials obtained from ceramic brick treated by the sulphate and chloride ions. *Construction and Building Materials*. 66: s. 268–74
157. Stryzewska T, Dudek M. 2020. Selection of Method of Chemical Analysis in Measuring the Salinity of Mineral Materials. *Materials*. 13: s. 559
158. Sujjavanich S, Suwanvitaya P, Chaysuwan D, Heness G. 2017. Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 155: s. 830–37
159. Sun H, Hohl B, Cao Y, Handwerker C, Rushing TS, et al. 2013. Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. *Cement and Concrete Composites*. 44: s. 41–49
160. Sunayana S, Barai S V. 2017. Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method. *Construction and Building Materials*. 156: s. 376–86

161. Szymanowski J. 2021. *Wpływ dodatku wybranych nanocząstek na podstawowe właściwości cementowej warstwy wierzchniej wysokiej wytrzymałości w podłogach, Rozprawa doktorska.* Wrocław: Politechnika Wrocławska
162. Tchadjé LN, Djobo JNY, Ranjbar N, Tchakouté HK, Kenne BBD, et al. 2016. Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceramics International*. 42: s. 3046–55
163. Termkhajornkit P, Nawa T, Kurumisawa K. 2006. Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash-cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 28: s. 781–89
164. Termkhajornkit P, Nawa T, Yamashiro Y, Saito T. 2009. Self-healing ability of fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Composites*. 31: s. 195–203
165. Thongsanitgarn P, Wongkeo W, Chaipanich A, Poon CS. 2014. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. *Construction and Building Materials*. 66: s. 410–17
166. Velumani P, Manikandan P. 2021. Steel mill scale waste and granite powder waste in concrete production -An experimental study. *Materials Today: Proceedings*. 37: s. 1748–52
167. Vieira CM. MF, Soares T. M, Sánchez R, Monteiro S. N. 2004. Incorporation of granite waste in red ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 373: s. 115–21
168. Vijayalakshmi M, Sekar ASSSS, Ganesh Prabhu G. 2013. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*. 46: s. 1–7
169. Wang L, Jin M, Guo F, Wang YAN, Tang S. 2021. Pore structural and fractal analysis of the influence of fly ash and silica fume on the mechanical property and abrasion resistance of concrete. *Fractals*. 29: s. 2140003
170. Wang L, Zhou SH, Shi Y, Tang SW, Chen E. 2017. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete. *Composites Part B: Engineering*. 130: s. 28–37
171. Wong HS, Head MK, Buenfeld NR. 2006. Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images. *Cement and Concrete Research*. 36: s. 1083–90
172. Wu W, Wang R, Zhu C, Meng Q. 2018. The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 185: s. 69–78
173. Xie X.J., Liu B.J., Yin J. ZS. 2002. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash. *Cement and Concrete Research*. 32: s. 477–80



- 
174. Xu A, Sarkar SL. 1994. Microstructural Development in High-Volume Fly-Ash Cement System. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 6: s. 117–36
175. Xu A, Sarkar SL, Nilsson LO. 1993. Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar. *Materials and Structures*. 26: s. 414–24
176. Yang J, Hu H, He X, Su Y, Wang Y, et al. 2021. Effect of steam curing on compressive strength and microstructure of high volume ultrafine fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*. 266: s. 120894
177. Yang J, Huang J, Su Y, He X, Tan H, et al. 2019. Eco-friendly treatment of low-calcium coal fly ash for high pozzolanic reactivity: A step towards waste utilization in sustainable building material. *Journal of Cleaner Production*. 238: s. 117962
178. Yang J, Zeng L, He X, Su Y, Li Y, et al. 2021. Improving durability of heat-cured high volume fly ash cement mortar by wet-grinding activation. *Construction and Building Materials*. 289: s. 123157
179. Yang R, Yu R, Shui Z, Gao X, Xiao X, et al. 2020. Feasibility analysis of treating recycled rock dust as an environmentally friendly alternative material in Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Journal of Cleaner Production*. 258: s. 120673
180. Yang S, Zhang J, An X, Qi B, Shen D, Lv M. 2021. Effects of fly ash and limestone powder on the paste rheological thresholds of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 281: s. 122560
181. Yen T, Hsu TH, Liu YW, Chen SH. 2007. Influence of class F fly ash on the abrasion–erosion resistance of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. 21: s. 458–63
182. Yoshitake I, Ueno S, Ushio Y, Arano H, Fukumoto S. 2016. Abrasion and skid resistance of recyclable fly ash concrete pavement made with limestone aggregate. *Construction and Building Materials*. 112: s. 440–46
183. Yu Z, Ye G, Zhuqing Yu GY. 2013. The pore structure of cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*. 45: s. 30–35
184. Zajac M, Ben Haha M. 2014. Experimental investigation and modeling of hydration and performance evolution of fly ash cement. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 47: s. 1259–69
185. Zeng Q, Li K, Fen-Chong T, Dangla P. 2012. Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes. *Construction and Building Materials*. 27: s. 560–69
186. Zhang F, Cheng T, Zhu Z, Hu D, Shao J. 2021. The Effect of Pre-heating Treatment and Water–Cement Ratio on the Shearing Behavior and Permeability of Granite–Cement Interface Samples.

187. Zhang H, Ji T, He B, He L. 2019. Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 213: s. 469–82
188. Zhang K, Liu F, Yue Q, Feng J. 2020. Effect of granite powder on properties of concrete. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 15: s. 2468
189. Zhang P, Dai Y, Ding X, Zhou C, Xue X, Zhao T. 2018. Self-healing behaviour of multiple microcracks of strain hardening cementitious composites (SHCC). *Construction and Building Materials*. 169: s. 705–15
190. Zhang Z, Yang F, Liu JC, Wang S. 2020. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. *Cement and Concrete Research*. 137: s. 106200
191. Zhao Y, Chen X, Wen T, Wang P, Li W. 2022. Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition. *Construction and Building Materials*. 318: s. 126016
192. Zhuqing Yu, Jian Ma, Guang Ye, Klaas van Breugel XS. 2017. Effect of fly ash on the pore structure of cement paste under a curing period of 3years. *Construction and Building Materials*. 144: s. 493–501

## Streszczenie

Rozprawa dotyczy określenia na drodze badawczej wpływu jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego oraz odpadowej mączki granitowej na wybrane właściwości mieszanki i kompozytów cementowych. Przeprowadzona analiza właściwości ziaren popiołu lotnego, mączki granitowej i cementu pozwoliła wskazać ich właściwości morfologiczne oraz zdefiniować różnice pomiędzy nimi. Ziarna cementu oraz mączki granitowej mają strzelistą, zbliżoną do równoległoboku budowę oraz mają wzajemnie do siebie zbliżone właściwości morfologiczne, podczas gdy ziarna popiołu lotnego są bardziej okrągłe oraz charakteryzują się większą powierzchnią właściwą ziarna niż cement. Wyniki badań mieszanki cementowej wskazały, że jednoczesny dodatek krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej pozwala na uzyskanie właściwości zbliżonych do serii referencyjnej (bez jednoczesnego dodatku krzemionkowego popiołu lotnego i odpadowej mączki granitowej), dodatkowo prowadzi także do ograniczenia odsączenia wody z mieszanki cementowej oraz poprawia jednorodność warstwy wierzchniej w funkcji jej grubości. Właściwości wytrzymałościowe cementowej warstwy wierzchniej modyfikowanej jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej wykazują poprawę w stosunku do serii referencyjnej oraz pozwalają na zastąpienie nawet 30% cementu w kompozycie z wykorzystaniem jednoczesnego dodatku 20% krzemionkowego popiołu lotnego i 10% odpadowej mączki granitowej. Wykonana analiza wytrzymałościowo – kosztowa oraz wytrzymałościowo – ekologiczna pozwoliły na podkreślenie zalet kompozytów modyfikowanych jednoczesnym dodatkiem popiołu lotnego i mączki granitowej, która prowadzi do zwiększenia właściwości mechanicznych, redukując przy tym koszty wytworzenia kompozytu oraz zmniejszając jego ślad środowiskowy. W rozprawie zasygnalizowano także znaczenie aplikacyjne przeprowadzonych badań poprzez opis wdrożenia wyników rozprawy w praktyce budowlanej.

## Summary

The dissertation concerns the determination by the research of the effect of the simultaneous addition of silica fly ash and waste granite powder on selected properties of the cementitious mix and composites. The conducted analysis of the properties of fly ash, granite powder and cement grains allowed to indicate their morphological properties and define the differences between them. The grains of cement and granite powder have a slender, parallelogram-like structure and have similar morphological properties, while fly ash grains are rounder and have a larger specific surface area than cement. The test results of the cement mix showed that the simultaneous addition of silica fly ash and waste granite powder allowed to obtain properties similar to the reference series (without simultaneous addition of siliceous fly ash and granite powder waste), additionally it also reduced the drainage of water from the cement mix and improved the homogeneity of the surface layer as a function of its thickness. The strength properties of cement surface layers modified with the simultaneous addition of fly ash and granite powder show an improvement compared to the reference series and allow for the replacement of up to 30% of cement in the composite with the simultaneous addition of 20% of silica fly ash and 10% of waste granite powder. The strength and cost analysis as well as the strength and ecological analysis made it possible to highlight the advantages of composites modified with the simultaneous addition of fly ash and granite powder, which leads to an increase in mechanical properties while reducing the cost of manufacturing the composite and reducing its environmental footprint. The dissertation also indicated the application significance of the conducted research by describing the implementation of the dissertation results in construction practice.