



Uniwersytet Bielsko-Bialski
Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska
Katedra Inżynierii Materiałowej

ROZPRAWA DOKTORSKA

Kształtowanie właściwości cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających

mgr inż. Adam Chleboś

Praca wykonana pod kierunkiem
dr hab. inż. Wacława Brachaczka, prof. UBB
w Katedrze Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego

Bielsko-Biała 2024

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi i wieloletniemu opiekunowi naukowemu dr hab. inż. Wacławowi Brachaczkowi, prof. UBB za zaangażowanie, opiekę, uwagi merytoryczne, poświęcony czas i wyrozumiałość podczas przygotowania rozprawy.

Pragnę również złożyć podziękowania Rodzicom Ewie i Januszowi oraz Żonie Joannie, Pani Kierownik i pracownikom Laboratorium firmy Sempre Farby oraz Przewodniczącemu Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa dr hab. inż. Januszowi Fabii, prof. UBB za okazane wsparcie i pomoc w stworzeniu niniejszej rozprawy.

SPIS TREŚCI

1	STRESZCZENIE	8
2	ABSTRACT.....	10
3	WSTĘP.....	12
4	PRZEGLĄD LITERATURY	15
4.1	Wpływ wilgoci na degradację budynku	15
4.2	Sposoby oddziaływania wilgoci na budynek.....	16
4.3	Mechanizm zawilgacania murów.....	18
4.4	Materiały do wykonywania izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych...	20
4.5	Istota cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających	23
4.6	Wymagania normowe stawiane cementowo-polimerowym zaprawom uszczelniającym	25
4.7	Charakterystyka składników stosowanych w składzie zapraw uszczelniających....	26
4.7.1	Cement.....	26
4.7.2	Dodatki pochodzenia mineralnego i odpadowego.....	27
4.7.2.1	Granulowany żużel wielkopiecowy (S).....	29
4.7.2.2	Popiół lotny krzemionkowy (V)	31
4.7.2.3	Pył krzemionkowy (D).....	34
4.7.2.4	Zmielony wapień (L, LL)	36
4.7.3	Wapno	39
4.7.4	Modyfikatory polimerowe	40
4.7.5	Kruszywa	42
4.7.6	Domieszki	43
4.7.6.1	Domieszki wpływające na lepkość	43
4.7.6.2	Superplastyfikatory	43
4.7.7	Mikrobrojenie	45

5	CEL I PRZYJĘTE TEZY ROZPRAWY	46
6	CZEŚĆ MATERIAŁOWA	47
6.1	Cement	47
6.2	Wapno hydratyzowane	48
6.3	Modyfikatory polimerowe	48
6.4	Kruszywa	48
6.5	Domieszki	49
6.6	Mikrobrojenie	50
6.7	Dodatki mineralne.....	50
7	PRZYGOTOWANIE I SKŁAD PRÓBEK ZAPRAW USZCZELNIAJĄCYCH	51
7.1	Przygotowywanie suchych mieszanek	51
7.2	Przygotowywanie ciekłych składników zapraw dwukomponentowych.....	51
7.3	Mieszanie zapraw z wodą lub komponentem płynnym	51
7.4	Skład receptury zaprawy do określenia wpływu modyfikatorów polimerowych.....	52
7.5	Skład receptury zaprawy do określenia wpływu dodatków mineralnych	53
8	METODYKA BADAŃ.....	55
8.1	Pomiar konsystencji.....	55
8.2	Pomiar wodoszczelności.....	56
8.3	Pomiar przyczepności do podłoża.....	60
8.4	Badanie zdolności do mostkowania pęknięć.....	62
8.5	Badanie mikrostruktury	64
8.6	Badanie porowatości	65
8.7	Badanie porowatości po kondycjonowaniu w komorze starzeniowej	65
8.8	Pomiar odkształcalności poprzecznej.....	67
9	WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA.....	70
9.1.1	Dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego.....	70

9.1.2	Wpływ modyfikatora polimerowego na konsystencję zaprawy	71
9.1.3	Wpływ modyfikatora polimerowego na szczelność zaprawy	73
9.1.4	Wpływ rodzaju modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy.....	75
9.1.4.1	Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność początkową zaprawy	75
9.1.4.2	Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po zanurzeniu	77
9.1.4.3	Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym.....	79
9.1.4.4	Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania.....	80
9.1.5	Analiza wpływu modyfikatora polimerowego na zdolność zaprawy do mostkowania pęknięć.....	81
9.1.6	Wpływ modyfikatorów polimerowych na mikrostrukturę zaprawy.....	82
9.2	Ocena wpływu dodatków mineralnych pochodzenia odpadowego na wybrane właściwości cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej	88
9.2.1	Wpływ dodatków mineralnych na konsystencję zaprawy	89
9.2.2	Wpływ dodatków mineralnych na zdolność zaprawy do mostkowania rys podłoża.....	91
9.2.3	Wpływ dodatków mineralnych na szczelność zaprawy	93
9.2.4	Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy.....	95
9.2.4.1	Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność początkową zaprawy	95
9.2.4.2	Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po zanurzeniu w wodzie.....	96
9.2.4.3	Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym.....	98
9.2.4.4	Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania	99
9.2.5	Badanie wpływu dodatków mineralnych na porowatość zaprawy.....	101
9.2.6	Analiza wpływu dodatków mineralnych w składzie spoiwa na trwałość zaprawy określoną jako zmiana porowatości powierzchniowej po dojrzewaniu w komorze starzeniowej	103

9.2.7	Wpływ dodatków mineralnych na elastyczność zaprawy	104
9.2.8	Ocena jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na szczelność zaprawy uszczelniającej.....	105
9.2.9	Ocena jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na przyczepności zaprawy uszczelniającej.....	106
10	PRAKTYCZNE ASPEKTY DOTYCZĄCE ZAPRAW USZCZELNIAJĄCYCH..	111
11	WNIOSKI	117
12	BIBLIOGRAFIA.....	120
13	SPIS ILUSTRACJI.....	131
14	SPIS TABEL.....	135
15	DOROBEK NAUKOWY AUTORA	136
15.1	Wykaz publikacji naukowych	136
15.2	Wykaz udziału w konferencjach naukowych	138
15.3	Wykaz projektów i patentów.....	139

1 STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska zatytułowana „Kształtowanie właściwości cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających” podzielona jest na dwie części: opisową i badawczą. W części opisowej zamieszczono przegląd literatury, obejmujący zagadnienia: wpływ wilgoci na trwałość budynku, sposoby jej oddziaływania na budynek, mechanizm zawilgacania murów, przegląd materiałów przeznaczonych do wykonywania hydroizolacji, zasady działania cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających i charakterystyka stosowanych w nich składników. Podjęto próbę oceny sposobów podejścia do wymagań, stawianych materiałom przeznaczonym do wykonywania hydroizolacji, ujętych w obowiązujących normach.

Analizując literaturę przedmiotu, nie znaleziono wyników badań wpływu składników pochodzenia odpadowego (uboczne produkty przemysłowe), takich jak: granulowany żużel wielkopiecowy, popiół lotny krzemionkowy, pył krzemionkowy oraz pochodzenia naturalnego - zmielony wapień, na istotne właściwości hydroizolacji. Przewodnym tematem rozprawy było wypełnienie tej luki poprzez przeprowadzenie badań w tym obszarze. Stanowiły one ważny krok z punktu widzenia wpływu na środowisko i gospodarki obiegu zamkniętego, co wpisuje się w aktualną politykę, zmierzającą do redukcji emisji CO₂ poprzez ograniczenie udziału w składzie badanych zapraw wysokoemisyjnego cementu portlandzkiego i jednoczesne zastosowanie dodatków, będących ubocznymi produktami energetyki i hutnictwa.

Celem określenia wpływu dodatków mineralnych, w pierwszej kolejności przeprowadzono optymalizację właściwości cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej obejmującą m.in. wybór i określenie udziału odpowiedniego modyfikatora polimerowego. Na ustalonej w ten sposób recepturze dokonywano modyfikacji z udziałem dodatków, aby określić ich wpływ na kluczowe właściwości zaprawy, za jakie uznano wodoszczelność i przyczepność do podłoża po normowych warunkach kondycjonowania imitujących różne, skrajne warunki atmosferyczne. Sprawdzano urabialność i odkształcalność oraz zdolność do mostkowania pęknięć podłoża zapraw z dodatkami mineralnymi. Przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego analizowano mikrostrukturę wytworzonej membrany przeciwwodnej oraz jej porowatość. Określono wpływ starzenia zaprawy przeprowadzonego w komorze do przyspieszonych badań starzeniowych na zmianę porowatości powierzchniowej.

Zaobserwowano korelację pomiędzy właściwościami roboczymi zaprawy a wodoszczelnością i przyczepnością do podłoża. Stąd też istotną częścią badań był dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego, wywierającego wpływ na urabialność zapraw. Na

podstawie badań wstępnych dobrano superplastyfikator w postaci polikondensatu sulfonowanej melaminy i formaldehydu (SMF), który w największym stopniu wpływał na urabialność. Z jednej strony pozwolił on znacznie ograniczyć ilość wody zarobowej, co miało korzystny wpływ na zdolność do mostkowania spękań podłoża, z drugiej znacznie poprawiona została przyczepność zaprawy po różnych warunkach dojrzewania.

Spośród badanych dodatków wykazano korzystny wpływ granulowanego żużla wielkopieczowego na przyczepność początkową oraz po zanurzeniu w wodzie i starzeniu termicznym. Żużel wielkopieczowy charakteryzował się najkorzystniejszym wpływem na wodoszczelność, zdolność do mostkowania pęknięć podłoża i urabialność zaprawy. W przypadku popiołu lotnego krzemionkowego wykazano korzystny wpływ na przyczepność początkową, po zanurzeniu oraz starzeniu termicznym. Dodatek ten wpłynął także na redukcję porowatości i poprawę szczelności zapraw z jego udziałem. Również dodatek pyłu krzemionkowego powodował poprawę wodoszczelności, przyczepności początkowej i po starzeniu termicznym oraz zmniejszenie porowatości zapraw.

Udowodniono, że jednokomponentowa cementowo-polimerowa zaprawa modyfikowana polimerem w postaci proszku redyspergowalnego, zawierająca produkty pochodzenia odpadowego, może wykazywać korzystniejsze właściwości niż dwukomponentowa zaprawa z modyfikatorem w postaci płynnej dyspersji polimerowej.

2 ABSTRACT

The doctoral dissertation titled "Development of properties of cement-polymer sealing mortars" is divided into two parts: descriptive and research. The descriptive part contains a review of the literature on the subject, covering the following issues: the impact of moisture on the durability of a building, the ways it affects the building, the mechanism of moisture in walls, a review of materials intended for waterproofing, a presentation of the principle of operation of cement-polymer sealing mortars and the characteristics of the raw materials used in them. An attempt was made to assess the methods of approaching the requirements for materials intended for waterproofing, included in the applicable standards.

Analyzing the literature on the subject, no research results were found on the impact of materials of waste origin, such as granulated blast furnace slag, silica fly ash, silica fume and limestone powder on significant waterproofing properties. The main topic of the dissertation was to fill this gap by conducting research in this area. They were an important step from the point of view of environmental impact, which is in line with current policy aimed at reducing CO₂ emissions by limiting the share of high-emission Portland cement and at the same time using recycled additives.

In order to determine the influence of mineral additives, first of all, tests were carried out to optimize the properties of the cement-polymer sealing mortar, including: selection and determination of the share of an appropriate polymer modifier. Modifications were made to the recipe established in this way with the use of waste mineral additives to determine their impact on the key properties of the mortar, such as waterproofness and adhesion to the substrate after standard conditioning conditions imitating various extreme weather conditions. The workability and deformability of mortars with mineral additives and their ability to bridge cracks in the substrate were checked. The microstructure of the produced anti-water membrane and its porosity were analyzed using a scanning electron microscope. The influence of mortar aging carried out in an accelerated aging test chamber on the change in surface porosity was determined.

A correlation was observed between the working properties of the mortar and its waterproofness and adhesion to the substrate. Therefore, an important part of the research was the selection of an appropriate polymer modifier that influenced the workability of mortars. Based on preliminary tests, a superplasticizer was selected in the form of sulfonated melamine-formaldehyde polycondensate (SMF), which had the greatest impact on workability. On the one hand, it allowed the amount of mixing water to be significantly reduced, which had a beneficial

effect on the ability to bridge cracks in the substrate, and on the other hand, the adhesion of the mortar after various conditioning conditions was significantly improved.

Among the tested additives of waste origin, a beneficial effect of granulated blast furnace slag on the initial adhesion and after immersion in water and thermal aging was demonstrated. Blast furnace slag had the most beneficial effect on waterproofness, the ability to bridge cracks in the substrate and the workability of the mortar. In the case of silica fly ash, a beneficial effect on initial adhesion, after immersion and thermal aging was demonstrated. This addition also reduced porosity and improved the tightness of samples containing it. The addition of silica fume also resulted in improved waterproofness, initial adhesion and after thermal aging, and reduced porosity.

It has been proven that a single-component cement-polymer mortar modified with a polymer in the form of a redispersible powder, containing waste products, may have more favorable properties than a two-component mortar with a modifier in the form of a liquid polymer dispersion.

3 WSTĘP

Cementowo-polimerowe zaprawy uszczelniające przeznaczone są do wykonywania poziomych i pionowych hydroizolacji budynków. Terminem hydroizolacja określa się zabezpieczenie elementów obiektu przed szkodliwym działaniem wody [1]. Wilgoć odgrywa kluczowe znaczenie w kontekście trwałości konstrukcji. Z uwagi na specyfikę oddziaływania wody na konstrukcję, większość działań związanych z izolacją obiektów budowlanych koncentruje się w części podziemnej i cokołowej obiektu, gdzie coraz popularniejsze staje się stosowanie cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających. Pominięcie, niewłaściwe wykonanie lub uszkodzenie hydroizolacji przyczynia się do zawilgocenia konstrukcji obiektu, co prowadzi do pogorszenia komfortu użytkowania obiektu i degradacji.

Z uwagi na przeznaczenie zapraw uszczelniających będących tematem rozprawy, w ramach przeglądu literatury określono główne sposoby oddziaływania wilgoci na budynek, jej wpływ na degradację obiektu oraz przedstawiono mechanizm zawilgacania muru. Krótko omówiono alternatywne materiały do wykonywania hydroizolacji. Scharakteryzowano zasadę działania cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających i przedstawiono różne normowe podejścia do tego typu materiałów izolacyjnych. Ponadto scharakteryzowano i uzasadniono wybór składników stosowanych do badań, w tym dodatków pochodzenia naturalnego i odpadowego. Przedstawiono opracowaną, na bazie własnych badań i doświadczeń, procedurę wykonywania hydroizolacji cementowo-polimerowych.

Zaletą cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających jest ich duża uniwersalność i mineralny charakter, co pozwala wykorzystywać je zarówno do izolacji elementów podziemnych, jak i podpiłtkowych na zewnątrz oraz wewnątrz budynku [1,2,3]. Jest to nowy materiał, którego korzystne właściwości wynikają ze współpracy cementu nadającego twardość i właściwości wytrzymałościowe z polimerem odpowiedzialnym za wysoką elastyczność i wodoodporność [4].

W dotychczasowej praktyce istotny wpływ na kształtowanie wymienionych właściwości miały modyfikatory polimerowe. Polimery są organicznymi związkami, powstającymi w wyniku reakcji polimeryzacji w której pomiędzy monomerami wytwarzają się wiązania kowalencyjne, tworząc długie łańcuchy. Są one zbudowane z wielu powtarzających się, uporządkowanych w sposób regularny fragmentów – merów [5]. Modyfikator polimerowy może być wprowadzany do układu cementowego w postaci płynnej dyspersji (układ ciało stałe-ciecz), emulsji (układ niemieszających się cieczy), roztworu wodnego, ciekłej żywicy syntetycznej (układ dwuskładnikowy żywica-utwardzacz) lub w formie sproszkowanej jako

proszek redyspergowalny [6]. Proszki redyspergowalne otrzymywane są poprzez suszenie dyspersji polimerowej na drodze rozpylenia pod ciśnieniem, przy udziale dodatków zapobiegających zbrylaniu [7]. Po połączeniu z wodą ponownie tworzą one dyspersję.

Na rynku dostępne są zaprawy dwukomponentowe, w których ściśle określone są proporcje mieszania części sypkiej z płynną dyspersją polimerową, przez co proces ich mieszania bywa uciążliwy dla wykonawcy [3,8]. Ponadto właściwości stwardniałej zaprawy zależą od sposobu mieszania, proporcji komponentów oraz czasu, w jakim rozrobiona zaprawa zostanie zaaplikowana.

Rozwój proszków redyspergowalnych umożliwia produkcję jednokomponentowych zapraw w postaci sypkiej, co pozwala uniknąć konieczności mieszania ze sobą kilku komponentów, a właściwości robocze ustalane są tylko przez dodatek wody. Jednokomponentowe zaprawy uszczelniające są wygodniejsze w zarobieniu oraz wykluczają ryzyko popełnienia błędu przy dobieraniu proporcji mieszania poszczególnych komponentów.

O ile wpływ modyfikatorów polimerowych na właściwości zapraw jest opisany w literaturze, to brakuje informacji dotyczących wpływu ubocznych produktów przemysłowych, tj. granulowanego żużla wielkopieczowego, popiołu lotnego krzemionkowego, pyłu krzemionkowego oraz zmielonego wapienia na właściwości zapraw uszczelniających. W szczególności brak jest wiedzy dotyczącej sposobu oddziaływania tych dodatków na kluczowe właściwości w aspekcie wykonania hydroizolacji.

Pogarszający się stan powietrza oraz znaczny wpływ przemysłu na środowisko naturalne sprawiają, że wprowadzane są kolejne nowe ograniczenia dotyczące emisji CO₂, mające na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej [9,10]. Ograniczenia te mocno wpływają na przemysł cementowy, z uwagi na znaczny wpływ tej branży na emisję dwutlenku węgla. Szacuje się, że produkcja cementu odpowiada za ok. 5÷7% całkowitej emisji dwutlenku węgla wywołanej działalnością człowieka [11,12,13]. Około 50% emisji stanowi emisja surowcowa z procesów produkcji klinkieru (głównie rozkład węglanu wapnia) CaCO₃, 40% związanych jest ze spalaniem paliw do ogrzania pieca cementowego i zapewnienia temperatury syntezy klinkieru portlandzkiego (ok. 1450°C), a ok. 10% związanych jest z zapotrzebowaniem zakładu produkcyjnego na energię elektryczną oraz transport [11,14,15]. Głównym spoiwem stosowanym w analizowanych próbkach był cement portlandzki CEM I, którego co najmniej 95% masy stanowi klinkier portlandzki, zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 [16].

Zgodnie z obowiązującymi trendami dążenia do ograniczenia emisji i zagospodarowywania wartościowych surowców odpadowych, sprawdzono możliwość

zamiany części cementu przez dodatki mineralne: granulowany żużel wielkopieczowy, popiół lotny krzemionkowy, pył krzemionkowy oraz zmielony wapień pochodzenia naturalnego.

Analizując literaturę przedmiotu, najistotniejszymi właściwościami zapraw hydroizolacyjnych są wodoszczelność i przyczepności do podłoża po normowych cyklach sezonowania imitujących różne, skrajne warunki atmosferyczne. W dotychczasowej praktyce właściwości te były modelowane z zastosowaniem modyfikatorów polimerowych [4]. Przyjęty przez autora rozprawy plan badań zakładał zastępowanie części cementu zarówno jednym dodatkiem mineralnym pochodzenia odpadowego, jak i zastępowanie go dwoma dodatkami w różnych proporcjach. Zbadano wpływ tych modyfikacji na porowatość, urabialność, elastyczność, trwałość i mikrostrukturę zaprawy oraz zdolność do mostkowania spękań podłoża. Dokonano próby powiązania mikrostruktury i porowatości próbek z wymienionymi właściwościami. Porowatość określono przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego.

Istotną częścią rozprawy był dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego. W rozprawie sprawdzano skuteczność wybranych modyfikatorów polimerowych w postaci płynnej dyspersji oraz w postaci proszków redyspergowalnych. Były to kopolimery styrenu i akrylu, octanu winylu i etylenu, octanu winylu i akrylu oraz octanu winylu i wersenianu winylu.

Rezultatem przeprowadzonych badań jest opracowana modelowa receptura jednokomponentowej zaprawy hydroizolacyjnej o optymalnych właściwościach, do wykonania której zastosowano produkty pochodzenia odpadowego. Wyniki badań, otrzymane w skali laboratoryjnej i na konkretnych obiektach, potwierdziły skuteczność otrzymanych zapraw hydroizolacyjnych. Zdobyte w ten sposób doświadczenie pozwoliło na sporządzenie dokładnej instrukcji wykonywania hydroizolacji przy użyciu jednokomponentowych cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających.

Przedstawione w pracy badania przeprowadzone zostały w Laboratorium Badań i Rozwoju firmy Sempre Farby oraz laboratoriach Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego.

4 PRZEGLĄD LITERATURY

4.1 Wpływ wilgoci na degradację budynku

Woda jest czynnikiem w największym stopniu wpływającym na degradację budynków [1]. Jest ona czynnikiem koniecznym do zaistnienia wszystkich procesów korozyjnych zachodzących w materiałach budowlanych [17]. Znajdująca się w naczyniach kapilarnych przegrody woda odpowiedzialna jest m.in. za zjawisko przemarzania [1].

Wraz z wilgocią, podciągana z gruntu lub pochodząca z opadów, transportowane do muru przedostają się sole [1,2]. Mogą one także stanowić składnik zastosowanych materiałów budowlanych [18]. Są to zwłaszcza sole dobrze rozpuszczalne w wodzie, w których łatwo dochodzi do rozpadu na jony [18]. Do najbardziej agresywnych zaliczane są głównie azotany, siarczany i chlorki [18,19,20]. Sole rozpuszczone w wodzie przemieszczają się wraz z nią w przegrodzie i kumulują się zwłaszcza w strefie odparowywania wody [18]. Destrukcja substancji budowlanej jest wynikiem procesu krystalizacji, która przebiega w trakcie odparowania wilgoci. Wytrącające się z roztworów sole generują naprężenia rozciągające [20]. Wzrostowi przesylenia roztworów towarzyszy dalszy wzrost kryształów soli. Tym samym następuje dalszy przyrost ciśnienia na powierzchnię porów, prowadzący do ich rozsadzenia [1,20].

Wysoki poziom zawilgocenia stwarza korzystne warunki do rozwoju degradacji mikrobiologicznej, szczególnie niekorzystnej dla zdrowia w przypadku wystąpienia od strony wnętrza [1]. Zawilgocona przegroda wykazuje znacznie gorsze właściwości termoizolacyjne niż przegroda sucha, co udowadniają Brachaczek, Chleboś i Kubecka-Pomper [21]. Przekłada się to na obniżenie komfortu użytkowania obiektu oraz wyższe zapotrzebowanie na energię potrzebną do ogrzania pomieszczeń [21].

Wysoka wilgotność prowadzi do rozmiękania materiałów, co powoduje obniżenie wytrzymałości mechanicznej elementów muru, a w konsekwencji obniżenie jego stateczności. Dotyczy to przede wszystkim zaprawy wapiennej występującej w historycznych budynkach. Jej degradacja może przekładać się na występowanie deformacji i spękań muru [20]. Na etapie wykonania projektu renowacji budynku, kluczowe jest określenie głównych źródeł zawilgocenia. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie diagnostyki obiektu opartej na pomiarach poziomu zawilgocenia i rozkładzie wilgoci po obwodzie budynku oraz na jego wysokości [2].

Z uwagi na warunki zewnętrzne, takie jak m.in. opady, wilgotność powietrza i promieniowanie słoneczne, pomiar wilgotności wykonuje się w środkowej części przekroju

murów [22]. W diagnostyce, obok wilgotności, określa się również rodzaj materiału budowlanego i poziom obciążenia solami [1,22]. Klasyfikację poziomów zawilgocenia murów według wilgotności masowej zgodnie z normą PN-EN ISO 12570:2002 [23] zamieszczono w tabeli 1.

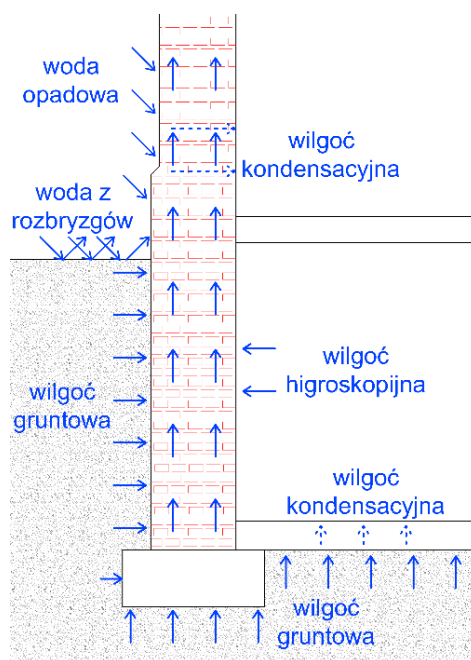
Tabela 1. Klasyfikacja zawilgocenia murów zgodnie z PN-EN ISO 12570:2002 [23]

Wilgotność masowa, % masy	Kategoria
<3%	mur o dopuszczalnej wilgotności
3-5%	mur o podwyższonej wilgotności
5-8%	mur średnio zawilgocony
8-12%	mur mocno zwilgocony
>12%	mur mokry

Przegrody o wilgotności masowej przekraczającej 5% uważa się za zawilgocone i wówczas zachodzi konieczność podjęcia działań mających na celu obniżenie poziomu zawilgocenia [20].

4.2 Sposoby oddziaływania wilgoci na budynek

Problemy z wilgocią w historycznych budynkach są wypadkową jednoczesnego oddziaływania kilku czynników [2]. Na rys. 1 przedstawiono główne rodzaje wilgoci oddziałujące na budynek.



Rys. 1 Główne źródła zawilgocenia budynku [ilustracja własna]

Najczęstszymi przyczynami zawilgocenia są poziome oddziaływanie wody opadowej na nadziemne elementy budynku lub wilgoci z gruntu na ściany fundamentowe znajdujące się w gruncie oraz pionowe oddziaływanie wody z gruntu na poziome elementy konstrukcji fundamentów, co pokazano na schemacie rys. 1. Wpływ na stopień oddziaływania wody ma rodzaj i układ warstw gruntu, rzeźba i spadek terenu mogące powodować spływ i napieranie wody opadowej na budynek, a także poziom wód gruntowych [17,22]. Podwyższenie wilgotności może mieć podłoże higroskopijne. Bywa także wynikiem kondensacji pary wodnej, co może być związane ze zbyt niską izolacyjnością termiczną przegrody. Przyczynami zawilgocenia mogą być ponadto awarie, uszkodzenia i błędnie wykonane pokrycia dachowe, okapy, obróbki blacharskie, rynny i rury spustowe [2,19,20].

Spośród elementów naziemnych konstrukcji najbardziej narażoną na działanie wilgoci jest strefa cokołowa - obszar budynku do ok. 50 cm powyżej poziomu gruntu [2]. Jest to związane z faktem, że strefa ta jest w najmniejszym stopniu chroniona przez dach i okapy przed działaniem bezpośrednim wody opadowej oraz dodatkowo, podczas opadu deszczu, oddziałuje na nią woda z rozbryzgów [2].

Zjawiskiem odpowiadającym za transport wilgoci do elementów podziemnych jest kapilarne podciąganie wody z gruntu. Wilgoć przedostająca się do murów budynku jest następnie transportowana systemem naczyń kapilarnych w górę na wysokość ok. 1,5 m powyżej poziomu źródła wilgoci [1,19], co przedstawiają strzałki skierowane w górę zaznaczone wewnątrz muru na rys. 1. Długotrwały transport kapilarny wilgoci w murze prowadzić może

do powstawania wysoleń na jego powierzchni, przede wszystkim w górnej części zawilgoconego obszaru. Wysolenia te intensyfikują poziom zawilgocenia muru, z uwagi na ich higroskopijny charakter, powodując absorpcję wody bezpośrednio z otoczenia [19]. Problem ten dotyczy w największym stopniu azotanów w związku z ich silnymi właściwościami higroskopijnymi [18].

Rozwiązaniem omawianych w rozdziale problemów jest wykonanie przeciwwilgociowej lub przeciwwodnej izolacji pionowej budynku. Dobór odpowiednich rozwiązań technologiczno-materiałowych, oprócz uwzględnienia głównych przyczyn zawilgocenia obiektu i oceny ich stopnia oddziaływania na budynek, opiera się również na analizie zastosowanych rozwiązań materiałowych i określeniu stanu podłoża [8]. Najskuteczniejszym rozwiązaniem problemów związanych z działalnością soli w budynku jest zastosowanie systemu tynków renowacyjnych [2,24]. Ich poprawne wykonanie musi być połączone z jednoczesnym wyeliminowaniem źródła wilgoci, wraz z którą sole są transportowane do wyżej położonych partii muru [21,25].

4.3 Mechanizm zawilgacania murów

Znajomość mechanizmu zawilgacania murów jest niezwykle istotna w aspekcie projektowania materiałów przeznaczonych do izolacji. Poznanie procesów odpowiedzialnych za przedostawanie się wilgoci do muru pozwala ustalić źródło problemu i określić główne wymagania stawiane projektowanym materiałom.

Problem kapilarnego podciągania wilgoci jest jedną z głównych przyczyn degradacji budynków historycznych. W wielu europejskich krajach został on zauważony już w XIX wieku [19]. Zjawisko kapilarnego podciągania wilgoci występuje jedynie w materiałach hydrofilowych. Takie właściwości wykazuje większość tradycyjnych materiałów budowlanych, przede wszystkim cegły, zaprawy i tynki [20].

Materiał określa się jako kapilarno-porowaty w przypadku, gdy w jego strukturze występują niewielkich rozmiarów wolne przestrzenie, tworzące kapilary, łączące ze sobą większe pory [17]. Taki charakter materiału umożliwia mu transport wilgoci z ośrodka wilgotnego [20]. Wyróżnić można 3 typy porów występujących w materiałach: zamknięte, przelotowe i nieprzelotowe. Spośród nich jedynie pory otwarte umożliwiają transport cieczy oraz gazów. W związku z tym, przy ocenie szczelności zapraw uszczelniających miarodajną metodą są metody mikroskopowe, określające porowatość powierzchniową powłoki [17].

Podciąganie kapilarne zachodzi jedynie w porach aktywnych kapilarnie. Za takie uznaje się pory o średnicy w zakresie 0,1÷100 μm [20,26]. Pory o takiej średnicy dominują w tradycyjnym murze ceglanym [20]. Występowanie zjawiska kapilarnego podciągania wilgoci związane jest z istnieniem niezrównoważonych sił powierzchniowych [19]. Istnieje ono do momentu powstania równowagi pomiędzy wypadkową sił powierzchniowych P i ciężarowi podniesionego słupa wody w kapilarze Q. Stan takiej równowagi przedstawia wzór (3):

$$P = Q \quad (3)$$

gdzie:

P – wypadkowa sił powierzchniowych, N

Q – ciężar podniesionego słupa wody w kapilarze, N

gdzie:

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

$$P = 2\pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos\theta \quad (5)$$

gdzie:

r – promień porów, m

h – wysokość słupa wody w kapilarze względem zwierciadła wody, m

ρ – gęstość cieczy, kg/m³

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

γ – napięcie powierzchniowe cieczy, N/m

θ – kąt zwilżania, °

Wysokość podciągania kapilarnego opisana jest wzorem (6):

$$h = \frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (6)$$

gdzie:

h – maksymalna wysokość podciągania wody w kapilarach, m

γ – napięcie powierzchniowe cieczy, N/m

θ – kąt zwilżania, °

ρ – gęstość cieczy, kg/m³

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

r – promień porów, m

Ze wzoru (6) wynika, iż im mniejsza średnica porów, tym wyższa jest wysokość podciągania kapilarnego. Jednakże w porach o średnicy mniejszej niż 0,1 μm, zwanych żelowymi, nie dochodzi do transportu wilgoci – są one jedynie wypełniane wodą pod wpływem

kondensacji kapilarnej [27]. Ponadto wysokość podciągania uzależniana jest od rodzaju cieczy, warunkującego wartość kąta zwilżania.

Proces zawilgacania ściany rozpoczyna samoczynne zwilżenie i rozplływ wody po powierzchni strony kontaktowej przegrody. Następuje to wskutek działania sił kapilarnych muru powodujących podciąganie wody i nasycanie porów. Podciąganie wilgoci z gruntu następuje do momentu zrównoważenia ilości wody podciąganej i odparowywanej przez powierzchnię materiału [19].

Zastosowanie opracowanego w rozprawie rozwiązania materiałowego skutecznie eliminuje przedstawiony w niniejszym rozdziale proces zawilgacania murów. Powłokowa hydroizolacja wykonana przy użyciu cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej tworzy szczelną barierę oddzielającą mur od źródła wilgoci, tym samym eliminując powierzchnię strony kontaktowej przegrody.

4.4 Materiały do wykonywania izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych

W renowacji zasolonych i zawilgoconych murów za najważniejsze uważa się usunięcie źródeł przedostawania się wilgoci do murów oraz zabezpieczenie ich substancji przed dalszą degradacją. W zabiegach osuszających stosowane są metody prowadzące do przerwania pionowego transportu wody z gruntu w części podziemnej budynku (na przykład na drodze iniekcji chemicznej) oraz zabezpieczenia strefy cokołowej muru przed bezpośrednim oddziaływaniem wody opadowej oraz z rozbryzgów. Skutecznym i uniwersalnym rozwiązaniem jest wykonanie powierzchniowej powłoki przeciwwilgociowej przy zastosowaniu omawianych zapraw uszczelniających.

Głównymi wymaganiami jakie spełniać powinny materiały przeznaczone do wykonywania powłokowych izolacji przeciwwilgociowych, są odporność na oddziaływanie wody, elastyczność (odkształcalność) i przyczepność do podłoża. Ze względu na sposób aplikacji materiały te dzieli się na bezspoinowe i rolowe [1]. W przypadku rolowych, montaż wymaga zastosowania odpowiedniej substancji klejącej.

W przeszłości większość materiałów do hydroizolacji bazowała przede wszystkim na bitumach. Do materiałów takich zalicza się: asfaltowe papy i membrany samoprzylepne na osnowie stosowane do wykonywania samodzielnych izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych, zarówno w gruncie, jak i izolacji dachów [3]. Są one mocowane do podłoża za pomocą masy asfaltowej lub lepiku. Charakteryzuje je łatwy montaż bez konieczności

zgrzewania i natychmiastowe uzyskiwanie dużej odporności na działanie wilgoci i wody pod ciśnieniem [28]. Obecnie na rynku dostępne są również modyfikowane papy asfaltowe w postaci pap termozgrzewalnych i membran samoprzylepnych. Osnowy pap asfaltowych wykonane są najczęściej z tkanin technicznych, włókniny przesywanej i włókien szklanych. W dachach zielonych spotkać można papy z wkładką miedzianą, której celem jest ochrona przed działaniem korzeni [1,29]. Dostępne są również papy paroizolacyjne z wkładką z folii aluminiowej [3]. Za osnowę membran samoprzylepnych służyć mogą: włóknina poliestrowa, welon szklany z siatką lub bez, tkanina szklana oraz osnowa mieszana [30]. O właściwościach technicznych pap decydują przede wszystkim rodzaj osnowy oraz rodzaj i zawartość modyfikatora polimerowego [3].

Do rolowych materiałów uszczelniających zalicza się także materiały z tworzyw sztucznych i kauczuku, takie jak folie z polichloru winylu PVC, występujące w kilku wariantach: dwuwarstwowe, niewzmacniane, laminowane od strony spodniej włókniną polimerową lub na bazie włókien szklanych oraz zbrojone wewnątrz włókniną polimerową lub siatką, lub na bazie włókien szklanych. W podobnych wariantach (zbrojone, niewzmocnione lub wielowarstwowe) dostępne są rolowe materiały uszczelniające na bazie polipropylenu PP, polietylenu PE. Membrany typu EPDM dostępne w postaci zbrojonej siatką polimerową lub na bazie włókien szklanych, laminowane od spodu włókniną polimerową lub na bazie włókien szklanych, a także powleczone masą klejącą, również zaliczane są do materiałów rolowych [3]. Tego typu folie mocowane są do podłoża przy użyciu odpowiednich klejów, poprzez wulkanizowanie lub zgrzewanie. Zaletą materiałów rolowych jest ich natychmiastowe działanie i mniejsza podatność na wpływ błędów wykonawczych poza łączeniami, co przekłada się m.in. na pewność uzyskania wymaganej grubości warstwy izolującej. Materiały te bardzo dobrze spisują się na prostych elementach płaskich o dużej powierzchni bez przerw w ciągłości np. w postaci rur instalacji, czy dylatacji. Trudności sprawiają również miejsca łączenia poszczególnych pasów oraz ostre krawędzie i ubytki podłoża [1,29].

Kolejnymi produktami są bentonitowe maty i membrany izolacyjne. Bentonit charakteryzuje się znacznym pęcznieniem w kontakcie z wodą i przy odpowiednim obciążeniu znacznie zmniejsza on przepuszczalność wody. Ponadto posiada on właściwości samoregeneracyjne związane z pęcznieniem. Coraz większą popularność w przypadku renowacji zyskuje iniekcja kurtynowa wykonywana poprzez wtłaczanie w grunt zawiesiny bentonitowej [3].

Materiały bezspoinowe umożliwiają lepsze uszczelnienie miejsc newralgicznych i nieregularnych powierzchni podłoża [1]. Najczęściej mogą one być aplikowane zarówno przy użyciu narzędzi do nakładania ręcznego tj. pacy, szczotki, jak i również poprzez natrysk [8]. Aplikacja natryskowa znacznie przyspiesza czas pracy, jednakże niesie za sobą ryzyka związane z niedostosowaniem się do zaleceń technicznych producenta oraz brakiem doświadczenia. Może to prowadzić do naniesienia niewłaściwej grubości warstwy materiału, dlatego też istotna jest kontrola grubości świeżej warstwy przy użyciu odpowiedniego przyrządu oraz niezwłoczne wypełnienie miejsca wykonywanego pomiaru. Producenci materiałów uszczelniających zobowiązani są do udzielenia szczegółowych informacji technicznych dotyczących parametrów urządzeń do aplikacji natryskowej, takich jak rodzaj dyszy, ciśnienie, długość przewodów doprowadzających materiał do dyszy [8].

Za przykład materiałów bezspoinowych posłużyć mogą masy bitumiczne wykorzystywane do izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych [1]. Jednymi z najstarszych bezspoinowych materiałów uszczelniających są roztwory i emulsje asfaltowe. Są one stosowane zarówno do tworzenia powłok izolacyjnych, jak i do gruntowania pod właściwą izolację z bitumicznych materiałów rolowych i lepików, mas asfaltowych oraz mas KMB [8]. Są wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne [3]. Z uwagi na brak zdolności do mostkowania rys wymagają równego, dobrze wysezonowanego podłoża [8]. Dzielą się na anionowe, kationowe i niejonowe w zależności od zastosowanych emulgatorów. Emulsje niejonowe stosuje się zwłaszcza w przypadku podłoża porowatych, co ma związek z powolnym wiązaniem tego typu wyrobów. Emulsje kationowe wyróżniają się najszybszym wiązaniem, co pozwala stosować je w okresach wiosennym i jesiennym, podczas gdy wolniej wiążące anionowe stosuje się jedynie w okresie letnim [3]. Pozwala to na głębszą penetrację porów podłoża. Modyfikowane polimerami, żywicami lub cyklokauczukami masy bitumiczne dostępne są na rynku jako masy KMB. Zgodnie z dotyczącą ich normą PN-EN 15814+A2:2015-02 [31] mogą one być stosowane jedynie w częściach podziemnych obiektów budowlanych. Modyfikacje zapewniają większą odporność na działanie wody, w tym także wody pod ciśnieniem, oraz większą elastyczność i lepsze mostkowanie rys. Dostępne są one w wersjach jedno- oraz dwuskładnikowych [17,29]. Masy KMB tolerują podwyższoną wilgotność podłoża. Wymagają równego podłoża, są wrażliwe na punktowe lub liniowe uszkodzenia. Przy ich aplikacji problem może sprawiać konieczność sprawdzania grubości warstwy. W zależności od grubości warstwy po wyschnięciu, mogą służyć jako izolacja przeciwwilgociowa lub przeciwwodna,

jednakże z uwagi na wrażliwość na negatywne parcie wody, w przypadku izolacji fundamentów zalecane jest wykonanie warstwy dociskowej [3].

Spotykane są również hybrydowe masy uszczelniające zwane masami reaktywnymi – mineralne materiały o cechach zbliżonych do KMB. Cechuje je dobre mostkowanie rys, możliwość aplikacji na wilgotne podłoże oraz kompatybilność z bitumicznymi podłożami. Wyróżnia je dobra odporność na czynniki zewnętrzne, takie jak promieniowanie UV, korozja biologiczna, działanie szkodliwych soli, w tym chlorków i siarczanów [3]. Do bezspoinowych materiałów uszczelniających zalicza się także stosowane, głównie do przeciwwilgociowych izolacji podpłytkowych, dyspersyjne folie w płynie. Ich spoiwem nadającym elastyczność, przyczepność do podłoża oraz odpowiadającym dodatkowo za tworzenie szczelnego filmu co przekłada się na wodoszczelność wyschniętej powłoki, jest wodna dyspersja żywic syntetycznych [32].

Na innej zasadzie działania opierają się chemicznie aktywne krystaliczne zaprawy uszczelniające. Wskutek obecności wilgoci i wolnych jonów wapnia wytwarzają one w izolowanym podłożu nierozpuszczalne struktury krystaliczne. Tworzone kryształy wnikają w strukturę podłoża i uszczelniają je, zabezpieczając przed wnikaniem wody [8]. Coraz popularniejsze stają się również cementowo-polimerowe zaprawy uszczelniające. Wyróżnia je możliwość stosowania nawet na podłoże o wysokiej wilgotności. Są odporne na negatywne parcie wody, czynniki atmosferyczne i na działanie soli rozpuszczonych w wodzie. Zachowują elastyczność również w niskich temperaturach [3]. Zaprawy te występują w postaci dwukomponentowej oraz jednokomponentowej [2]. Dwukomponentowa zaprawa uszczelniająca składa się z sypkiej części cementowej oraz płynnej dyspersji polimerowej. Celem przygotowania materiału do użycia, części należy ze sobą wymieszać w odpowiednich proporcjach. Jednokomponentowa zaprawa ma postać sypkiej mieszanki na bazie cementu oraz sproszkowanego polimeru – proszku redyspergowalnego. Materiał należy wymieszać z wodą zarobową. Cementowo-polimerowe zaprawy uszczelniające mogą być stosowane zarówno do wykonywania izolacji przeciwwilgociowych, jak i do izolacji przeznaczonych do stosowania w przypadku wody pod ciśnieniem. Ilość zastosowanych warstw oraz ich grubość wpływają na sposób wykorzystania materiałów [1,4].

4.5 Istota cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających

Idea cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających opiera się na uzyskaniu właściwości wymaganych dla hydroizolacji dzięki współdziałaniu cementu oraz polimeru.

Cement zapewnia utwardzonej, związanej hydroizolacji wysoką wytrzymałość mechaniczną i twardość, natomiast polimer pozwala na osiągnięcie wysokiej elastyczności, wodoszczelności, wytrzymałości na rozciąganie i zginanie oraz zdolności do pokrywania rys. Zarówno cement, jak i polimer odpowiedzialne są za zapewnienie wysokiej przyczepności materiału do podłoża [4,33].

Wraz z wymieszaniem zaprawy z wodą rozpoczynają się procesy koalescencji polimeru oraz reakcje hydratacji cementu. Proces koalescencji, prowadzący do tworzenia się ciągłej błonki polimeru, spowodowany jest wiązaniem wody przez cement i jej częściowym odparowywaniem. Polega on na łączeniu się ze sobą rozproszonych w wodzie monomerów, czemu towarzyszy zmniejszenie stopnia dyspersji układu [34,35]. Szybkość koalescencji polimeru i hydratacji cementu jest zróżnicowana i zazwyczaj hydratacja poprzedza zjawisko tworzenia filmu przez polimer. Przebiegająca równolegle z koalescencją hydratacja cementu skutkuje powstaniem układu hybrydowego składającego się z fazy polimerowej połączonej z siecią krystaliczną produktów hydratacji cementu, w wyniku czego powstaje ciągła osnowa, w której produkty hydratacji cementu i faza polimerowa wzajemnie się przenikają. Wpływ na utworzoną w ten sposób osnowę wywierać może rodzaj modyfikatora polimerowego, jego ilość, jak również postać (płynna, sypka) w jakiej jest on wprowadzony do składu zaprawy [4,36,37]. Odnotowano podwyższoną zawartość polimeru na powierzchni styku z podłożem [38]. Zawartość polimeru przy podłożu może świadczyć o tym, że w trakcie wysychania modyfikator polimerowy wraz z zaczynem był transportowany wraz z wodą ku powierzchni interfazy zaprawa-podłoże. Zjawisko to przypisać można wpływowi sił kapilarnych i parowania, które indukują strumienie roztworów przepływających w układzie porów wzajemnie ze sobą połączonych [38].

Po utworzeniu przez polimer filmu, szczelnie przylegająca do podłoża zaprawa wytwarza szczelną powłokę, która fizycznie blokuje dostęp wilgoci. Poprawnie wykonana izolacja części podziemnej z użyciem cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej powinna stworzyć swoistą nieprzepuszczalną wannę całkowicie oddzielającą budynek od wilgoci, stąd też ten typ rozwiązania określany jest jako izolacja wannowa [1,39].

W przypadku zapraw jednoskładnikowych istnieje możliwość lepszego dostosowania konsystencji z uwagi na brak konieczności zachowania sztywnych proporcji części sypkiej do mokrej [1,4]. Przekłada się to na możliwość dopasowania właściwości roboczych do wymagań podłoża i sposobu aplikacji. Płynna konsystencja pozwala na aplikację zaprawy szczotą i jest zalecana do nakładania pierwszej warstwy oraz do podłoża mniej regularnych celem lepszego

wypełnienia jego szczelin i nierówności. Bardziej stała konsystencja uzyskana dzięki zastosowaniu mniejszej ilości wody zarobowej, pozwala na aplikację pacą na równych podłożach i uzyskiwanie konkretnej, wymaganej grubości warstwy.

4.6 Wymagania normowe stawiane cementowo-polimerowym zaprawom uszczelniającym

Stosowaną w Polsce normą, dotyczącą wyrobów przeznaczonych do wykonywania izolacji przeciwwilgociowych mającą status zharmonizowanej, jest PN-EN 14891:2017 [40]. Dotyczy ona wszystkich wyrobów aplikowanych w postaci ciekłej na bazie zapraw cementowych modyfikowanych polimerami, dyspersji i żywic reaktywnych. Prezentuje ona metody badań i wymagane właściwości użytkowe dotyczące materiałów przeznaczonych do wykonania hydroizolacji. Zgodnie z normą, dopuszczenie produktu do sprzedaży uzależnione jest od pomyślnego przejścia badania wodoszczelności (wodoprzepuszczalności) w akredytowanym laboratorium zewnętrznym – badanie to jako jedyne spośród wyszczególnionych w normie, objęte jest systemem 3 stopniowej oceny i weryfikacji stałości właściwości użytkowych wyrobu. Norma PN-EN 14891:2017 [40] za miarę wodoprzepuszczalności przyjęła ilość zaabsorbowanej wody przez betonowy podkład, na którego powierzchnię zaaplikowano badany materiał, a następnie oddziaływano na niego wodą pod stałym ciśnieniem. Maksymalna dopuszczalna ilość zaabsorbowanej przez próbkę wody wynosi 20 g.

Kolejnymi właściwościami podlegającymi ocenie są przyczepność do podłoża betonowego po różnych warunkach sezonowania oraz mostkowanie pęknięć podłoża. Warunki sezonowania w badaniu przyczepności miały odwzorowywać występujące w naszej strefie klimatycznej skrajne warunki pogodowe, oddziaływaniu których poddawana może być zaprawa aplikowana na zewnątrz pomieszczeń. Norma wymaga, by przyczepność, po każdym z przedstawionych warunków sezonowania, wynosiła co najmniej $0,5 \text{ N/mm}^2$, natomiast zdolność do mostkowania pęknięć podłoża musi wynosić co najmniej 0,75 mm.

Norma PN-EN 14891:2017 [40] skupia się jedynie na konkretnych właściwościach badanego materiału, nie uwzględniając spełniania swojej funkcji w określonych warunkach zewnętrznych. Jest ona poddawana krytyce z uwagi na marginalizację czynników środowiskowych, takich jak konkretne zastosowanie, obciążenie wodą [39]. Pełniejszą analizę przydatności do zastosowania danego materiału uszczelniającego zawierają niemieckie normy z serii DIN 18531÷DIN 18535. Stanowią one swego rodzaju kompendium wiedzy dla projektantów i wykonawców prac izolacyjnych. Oceniają one przede wszystkim skuteczność

wykonanych prac. Definiują kryteria i wymagania wpływające na poprawność robót od etapu projektowania, przez wykonawstwo, po odbiory [39]. Rozróżniają one podejście do poszczególnych fragmentów budynku, takich jak płyty i ściany fundamentowe, stropodachy, cokoły. Norma DIN 18533-1:2017-07 [41] dotyczy materiałów uszczelniających mających kontakt z gruntem. W jej skład wchodzi 3 części: zawierająca wymagania i zasady projektowania i wykonawstwa, dotycząca hydroizolacji z materiałów rolowych oraz bezspoinowych [39,41]. Punktami odniesienia normy DIN 18533-1:2017-07 [41], do doboru odpowiedniego rozwiązania, są stopień obciążenia wodą, oddziaływanie od podłoża (uwzględnienie rys i dylatacji) i klasa użytkowania pomieszczeń [42]. Dla poszczególnych warunków brzegowych norma definiuje szereg wymagań dla konkretnych typów materiałów. Dotyczą one m.in. grubości, ilości warstw, wodoszczelności, wytrzymałości na rozciąganie, itp. [41].

4.7 Charakterystyka składników stosowanych w składzie zapraw uszczelniających

Dobór odpowiednich składników do opracowania receptury cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej, poprzedzony był analizą dostępnej literatury i opierał się o liczne badania wstępne oraz badania własne wykonywane przez autora w skali laboratoryjnej. W niniejszym rozdziale scharakteryzowano składniki, które powszechnie wykorzystywane są w recepturach zapraw uszczelniających oraz dodatki mineralne pochodzenia naturalnego i z ubocznych produktów przemysłowych, których użyteczność pod kątem wykorzystania w zaprawie uszczelniającej sprawdzono w rozprawie.

4.7.1 Cement

Cement jest spoiwem mineralnym o właściwościach hydraulicznych. W zaprawach uszczelniających stosuje się głównie cement portlandzki CEM I z uwagi na wysoką wodoodporność betonów i zapraw [33,43,44]. Ponadto CEM I charakteryzuje się wysoką odpornością na działanie chlorków, co ma istotne znaczenie w przypadku zapraw uszczelniających, które mogą mieć styczność z wodą chlorowaną [44,45,46]. Jony chlorkowe Cl^- , reagując z fazą C_3A , której wysoka zawartość jest charakterystyczna dla cementu CEM I, tworzą sól Friedela – chloroglinian wapnia. Związek ten poprawia szczelność struktury wyrobu cementowego [45]. Co istotne z punktu widzenia niniejszej rozprawy, cement CEM I spełnia wymagania normy PN-EN 197-1:2012 [16] dotyczące składu, którego co najmniej 95% masy stanowi klinkier portlandzki. Ma to przełożenie na największą stałość składu i właściwości

w kolejnych dostawach, co może mieć znaczenie w przypadku badań i zastosowań rozłożonych w czasie. Odporność na czynniki pogodowe i temperaturowe spoiwa pozwalają na stosowanie tego typu zapraw również na zewnątrz pomieszczeń. Cement odpowiedzialny jest za zapewnienie zaprawie wymaganych właściwości wytrzymałościowych i trwałości oraz nadaje on zaprawom uszczelniającą częściowej paroprzepuszczalności [33].

4.7.2 Dodatki pochodzenia mineralnego i odpadowego

W ostatniej dekadzie nastąpił duży wzrost świadomości dotyczącej wpływu przemysłu cementowego na środowisko. Efektem tego jest dążenie do osiągnięcia przez tę branżę neutralności klimatycznej [9]. Jednym z rozwiązań wpisujących się w ten trend jest częściowe zastępowanie wysokoemisyjnego cementu portlandzkiego CEM I mineralnymi dodatkami pochodzenia naturalnego i odpadowego [14,15]. W dostępnej literaturze niewiele jest badań dotyczących stosowania tego typu surowców w zaprawach cementowo-polimerowych.

Mając na uwadze wysoką emisyjność cementu CEM I, celem wpisania się w założenia strategii zrównoważonego rozwoju w zakresie zagospodarowywania odpadów i redukcji emisji, producenci branży cementowej i chemii budowlanej wprowadzają do cementów oraz zapraw dodatki pochodzenia mineralnego i odpadowego [10]. Do cementów o niższym śladzie węglowym zalicza się cementy o niższej zawartości klinkieru portlandzkiego: portlandzki wieloskładnikowy (CEM II), hutniczy (CEM III), pucolanowy (CEM IV) lub wieloskładnikowy (CEM V). W tabeli 2 przedstawiono normowe [16] dopuszczalne zawartości udziału masowego klinkieru oraz sumy nieklinkierowych składników głównych w wyżej wymienionych rodzajach cementu.

Tabela 2. Normowe [16] udziały masowe klinkieru oraz nieklinkierowych składników głównych cementów powszechnego użytku

Nazwa cementu	Oznaczenie cementu wg PN-EN 197-1:2012 [16]	Zawartość klinkieru portlandzkiego (% mas.)	Suma udziału nieklinkierowych składników głównych (% mas.)
Cement portlandzki	CEM I	95 ÷ 100	-
Cement portlandzki wieloskładnikowy	CEM II/A	80 ÷ 94	6 ÷ 20
	CEM II/B	65 ÷ 79	21 ÷ 35
Cement hutniczy	CEM III/A	35 ÷ 64	36 ÷ 64

	CEM III/B	20 ÷ 34	66 ÷ 80
	CEM III/C	5 ÷ 19	81 ÷ 95
Cement pucolanowy	CEM IV/A	65 ÷ 89	11 ÷ 35
	CEM IV/B	45 ÷ 64	36 ÷ 55
Cement wielkoskładnikowy	CEM V/A	40 ÷ 64	36 ÷ 60
	CEM V/B	20 ÷ 38	62 ÷ 80

Jak przedstawiono w tabeli 2, udziały wagowe składników głównych nieklinkierowych w cementach CEM II÷CEM V mieszczą się w przedziale od 20% do aż 95%.

Do niskoemisyjnych składników, stosowanych w składzie betonu zalicza się składniki, które norma PN-EN 206:2014-04 [47] określa jako dodatki do betonu i dzieli je na dwie kategorie:

- dodatki typu I – dodatki prawie obojętne,
- dodatki typu II – dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych.

Najpopularniejszym dodatkiem typu I jest zmielony wapień (mączka wapienna) (L, LL). Do dodatków typu II o właściwościach pucolanowych zalicza się popiół lotny krzemionkowy (V) i pył krzemionkowy (D), natomiast do dodatków o utajonych właściwościach hydraulicznych granulowany żużel wielkopiecowy (S) [47].

Cement CEM I charakteryzuje się szybszym początkowym przyrostem wytrzymałości oraz wyższą odpornością na działanie wody i zamrażania w porównaniu do cementów z udziałem dodatków mineralnych [45,48,49]. Stosowanie cementu CEM I gwarantowało stabilność właściwości wyrobów. Wprowadzenie wymienionych dodatków mineralnych do składu cementu może mieć wpływ m.in. na czas wiązania, kinetykę wydzielania ciepła, dynamikę przyrostu wytrzymałości wczesnej, mikrostrukturę, właściwości wytrzymałościowe, zwłaszcza po oddziaływaniu wody i mrozu, stosunek w/c, urabialność, reologię, odporność chemiczną i trwałość, co potwierdzają liczne publikacje [13,14,46,50,51,52,53, 54,55,56,57,58,59]. O wpływie dodatków na te właściwości decyduje przede wszystkim ich rodzaj i udział w składzie kompozytu cementowego. Zestawione w tabeli 2 duże zakresy dopuszczalnych sumarycznych udziałów składników nieklinkierowych mogą powodować duże różnice we właściwościach cementów o tym samym oznaczeniu.

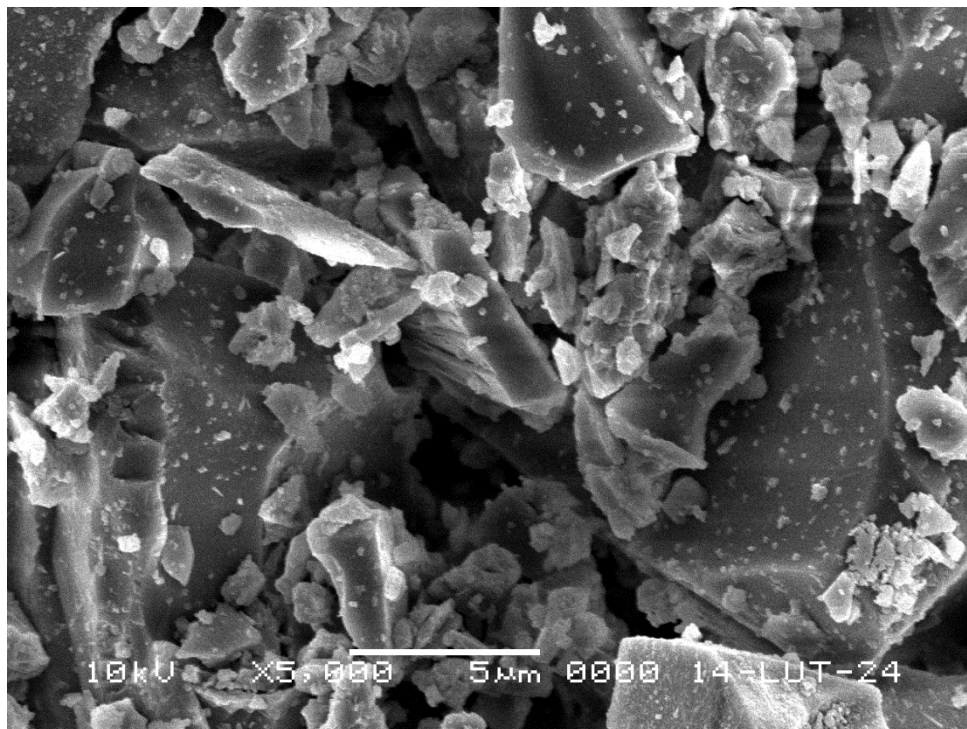
Skutecznym rozwiązaniem redukującym szkodliwe emisje związane z produkcją zapraw cementowych, jest redukcja udziału cementu CEM I w recepturze kosztem częściowego zastępowania dodatkami mineralnymi. Pozwala to na pełniejszą kontrolę wpływu

wymienionych składników na właściwości zaprawy, z uwagi na dokładniejszą informację o ich realnym udziale.

Poniżej scharakteryzowano nieklinkierowe składniki główne stosowane w cementach CEM II÷CEM V zastępujące częściowo klinkier portlandzki oraz w zaprawach zastępujące częściowo cement CEM I.

4.7.2.1 *Granulowany żużel wielkopiecowy (S)*

Żużel wielkopiecowy jest produktem ubocznym otrzymywanym podczas procesu wytopienia surówki w wielkim piecu hutniczym. Surowce składowe wprowadzane do pieca to ruda żelaza, koks i topniki obniżające temperaturę topnienia rud i pomagające w oddzieleniu metalu od innych domieszek zawartych w rudzie [15]. Wielki piec ogrzewany jest w wyniku spalania koksu gorącym powietrzem w temperaturze ok. 1500°C [60]. Uzyskiwanie stopionego żużłu wielkopiecowego następuje w wyniku wytopu wsadu na powierzchni surówki. Granulacja następuje, po oddzieleniu ciekłego żużla od surówki, poprzez gwałtowne chłodzenie ciekłego żużla powietrzem lub wodą [15]. Szybkie schłodzenie płynnego żużłu pozwala na otrzymanie mikrostruktury zapewniającej odpowiedni poziom aktywności. Wysoka zawartość fazy szklistej w granulowanym żużlu odpowiada za aktywność granulowanego żużla wielkopiecowego [61]. Jego powierzchnia właściwa po zmieleniu bywa znacznie wyższa niż cementu i wynosi od 4250 do 4700 cm²/g (met. Blaine'a)[60]. Stopień zmielenia żużla ma wpływ na właściwości wytrzymałościowe betonów i zapraw z jego udziałem, czas wiązania oraz na tempo przyrostu wytrzymałości [54]. Ziarna zmielonego żużla mają kanciasty kształt i szorstką, porowatą powierzchnię [55], co widoczne jest na zdjęciu mikroskopowym zamieszczonym na rys. 2.



Rys. 2 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań granulowanego żużla wielkopieczowego [badania własne]

Granulowany żużel wielkopieczowy jest zaliczany do materiałów o utajonych właściwościach hydraulicznych – w kontakcie z klinkierem portlandzkim, siarczanami lub wapnem wykazuje właściwości o charakterze hydrauliczno-pucolanowym [61,62]. W co najmniej dwóch trzecich powinien on składać się z sumy tlenku wapnia (CaO), tlenku magnezu (MgO) i dwutlenku krzemu (SiO_2) [54].

Granulowany mielony żużel wielkopieczowy stosowany jest m.in. w cementach portlandzkich żużlowych CEM II/A,B-S, portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M, cementach wieloskładnikowych CEM V oraz w cementach hutniczych CEM III, których jest głównym składnikiem – maksymalny dopuszczalny w normie PN-EN 197-1:2012 [16] udział masowy żużlu w CEM III/C wynosi 95%. Cementy zawierające zmielony granulowany żużel wielkopieczowy charakteryzują się niższym ciepłem hydratacji, niskim skurczem, lepszą urabialnością oraz niższą alkalicznością [62]. Wyróżnia je wolniejsze tempo przyrostu wytrzymałości w początkowych okresach dojrzewania i znaczny przyrost wytrzymałości po dłuższych okresach twardnienia (powyżej 28 dni) [54,56]. Według Lothenbach et al. [62], po dłuższych czasach hydratacji cementów z dodatkiem żużla wielkopieczowego odnotowywano obniżony udział portlandytu w stosunku do cementów portlandzkich CEM I. Autorzy publikacji podają także, że dodatek żużla wielkopieczowego do cementu portlandzkiego

powoduje zwiększenie ilości wytworzonego C-S-H, który charakteryzuje się obniżonym stosunkiem CaO/SiO₂ [62].

Dodatek żużła wielkopiecowego zwiększa szczelność wyrobu cementowego i tym samym zapewnia wyższą odporność na agresję chemiczną [60]. Badania wykazały, że dodatek zmielonego granulowanego żużła wielkopiecowego znacząco zmniejsza średnicę porów w betonie i powoduje poprawę odporności na działanie siarczanów i azotanów [13]. Poprawia on również odporność korozyjną cementu [56,63]. Może jednak, przy znacznej zawartości, mieć wpływ na zwiększenie podatności na karbonatyzację kompozytu cementowego [13].

Zhao et al. [64] otrzymali zadowalające rezultaty badań, mających na celu sprawdzenie możliwości zastosowania odpadów hutniczych, w tym żużła wielkopiecowego, w składzie zaprawy przeznaczonej do hydroizolacji – cechowała się ona m.in. wysoką elastycznością.

4.7.2.2 Popiół lotny krzemionkowy (V)

Popioły lotne stosowane w przemyśle cementowym są pozostałością po spalaniu pyłu węglowego z węgla kamiennego w paleniskach elektrociepłowni i elektrowni w temperaturze 1300°C÷1450°C [53]. Wykazują się dużą miękkością i składem chemicznym zbliżonym do ilastych surowców naturalnych. Są cennym, wysoce pożądanym dodatkiem mineralnym w produkcji cementu i betonu [53]. Zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 [16], popiół lotny krzemionkowy wchodzi w skład cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A,B-V, portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M oraz cementów pucolanowych CEM IV i wieloskładnikowych CEM V. Jest on zaliczany do materiałów pucolanowych – sam nie wykazuje właściwości wiążących, lecz w obecności wody wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapnia Ca(OH)₂, pochodzącym z hydrolizy faz krzemianowych klinkieru portlandzkiego (alitu i belitu), tworząc materiał o właściwościach hydraulicznych [53].

Wg Giergicznego [53], w kontekście oceny przydatności popiołu jako aktywnego dodatku mineralnego do cementu lub betonu, istotniejszym od składu chemicznego, jest udział substancji amorficznej, głównie szkła. Głównymi składnikami popiołów lotnych krzemionkowych są nieorganiczne składniki węgla pochodzące z termicznego rozkładu minerałów ilastych, pirytu i kalcytu [15,53]. Popiół lotny V charakteryzuje się wysoką zawartością fazy szklistej wynoszącą 60÷85% [65].

Ze względu na zawartość strat prażenia norma PN-EN 450-1:2012 [66] dzieli popioły lotne na 3 kategorie:

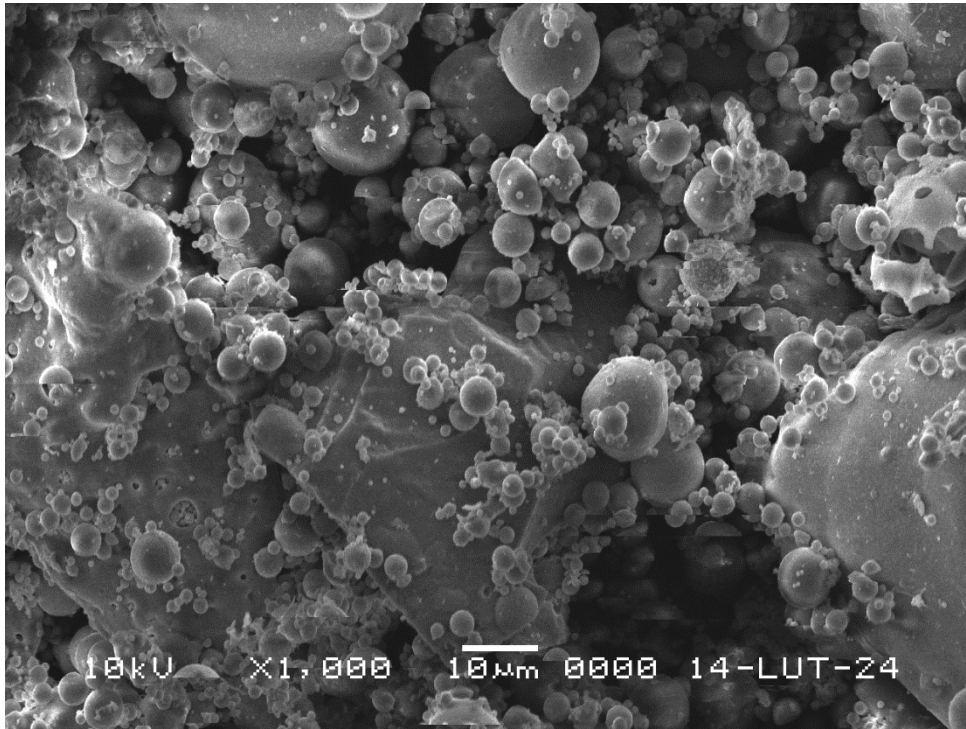
- kategoria A – zawartość strat prażenia ≤ 5,0%
- kategoria B – zawartość strat prażenia ≤ 7,0%

- kategoria C – zawartość strat prażenia $\leq 9,0\%$

Wzrostowi strat prażenia towarzyszy obniżenie zawartości pozostałych składników istotnych dla aktywności pucolanowej, zwłaszcza fazy szklistej [67]. Na reaktywność popiołów lotnych wpływ mają także mialkość, morfologia ziaren, obróbka termiczna i stosowanie dodatków chemicznych [53]. Wysokie straty prażenia, występujące zwłaszcza przy produkcji surowca w mniej efektywnych elektrowniach starszego typu i związana z nimi podwyższona zawartość niespalonego węgla, powodują wzrost wodożądności popiołu [15]. Przekłada się to na obniżenie wodo- i mrozoodporności gotowego wyrobu cementowego [14]. O obecności niespalonego węgla świadczy m.in. kolor popiołu – im wyższa jest jego zawartość, tym ciemniejszą barwę ma popiół [46,67]. Z uwagi na wprowadzane w ostatnich latach w Polsce modernizacje elektrowni prowadzące do znacznie wyższej sprawności, straty prażenia uległy obniżeniu i wynoszą one najczęściej 1÷5% masy [46]. Przy stosowaniu popiołów o wysokich stratach prażenia obserwowano wypływanie ziaren niespalonego węgla na powierzchnię betonu, co utrudniało proces powierzchniowego utwardzania betonu z wykorzystaniem odpowiednich posypek oraz wywoływało niekorzystny efekt wizualny, co uniemożliwiało na przykład wykonywanie betonu architektonicznego [67].

Innymi niepożądanymi składnikami z punktu widzenia wykorzystania w przemyśle cementowym są zbyt duża zawartość związków siarki i wolnego wapna [53]. Odnotowano negatywny wpływ zbyt dużej zawartości związków żelaza (hematytu lub magnetytu) na przebieg reakcji pucolanowej [68]. Związki te powstają na powierzchni ziaren popiołu i blokują dostęp wody do fazy szklistej [46]. Zbyt wysoka zawartość wolnego wapna CaO może powodować nierównomierną zmianę objętości podczas twardnienia wyrobu cementowego, co wpływa na jego wytrzymałość. Podobnie negatywne oddziaływanie ma również niezwiązany tlenek magnezu MgO, występujący w popiele w formie peryklazu [46].

Popiół lotny krzemionkowy występuje w postaci drobnych, głównie kulistych cząstek wychwytywanych z gazów odlotowych o średnicy z zakresu 3÷40 μm , co widoczne jest na zdjęciu mikroskopowym rys. 3.



Rys. 3 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań popiołu lotnego krzemionkowego [badania własne]

Niespalony węgiel w postaci koksiku występuje w postaci nieregularnych ziaren o większej średnicy ($>45 \mu\text{m}$) i rozwiniętej powierzchni [67]. Podwyższony udział strat prażenia powoduje spadek efektywności działania domieszek chemicznych, przede wszystkim plastyfikatorów, superplastyfikatorów i środków spieniających, których znaczna część jest absorbowana na powierzchni niespalonego węgla (koksiku) [67]. Powierzchnia właściwa popiołu zawiera się między 2000 i 4200 cm^2/g (met. Blaine'a), choć spotkać można także popioły o mniejszym stopniu rozdrobnienia [53,67].

Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego V ma pozytywny wpływ na zmniejszenie porowatości ogólnych zapraw cementowych oraz przyczynia się do zmniejszenia wielkości porów dominujących wskutek wypełniania wolnych przestrzeni produktami reakcji pucolanowej oraz nieprzereagowanymi ziarnami [53,67,69]. Cementy z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego charakteryzują się wydłużonym początkiem czasu wiązania, dłuższym czasem zachowania dobrej urabialności, niższym ciepłem hydratacji i wysokim przyrostem wytrzymałości na ściskanie i odporności na pękanie w dłuższym okresie [46,70]. W obecności popiołu hydratacja glinianu trójwapniowego ulega przyspieszeniu w wyniku adsorpcji jonów Ca^{2+} na powierzchni popiołu [71]. Powoduje to przyspieszenie rozpuszczania się glinianu trójwapniowego w wodzie zarobowej oraz tworzenie żelowej warstwy produktów hydratacji na powierzchni popiołu. Składa się ona z uwodnionych glinokrzemianów wapniowych i w wyniku ciśnienia osmotycznego pęka ona, uwalniając z powierzchni popiołu

jony H_3SiO_4^- i $\text{AL}(\text{OH})_4$, które tworzą uwodnione krzemiany i siarczanogliniany wapnia, wypełniające przestrzeń międzyziarnową [71].

Kluczowym dla aktywności popiołu jest wywołanie na powierzchni jego ziaren mikrospełnień, co inicjuje przechodzenie jonów z powierzchni ziaren do roztworu [53]. Bardzo istotną rolę w tym procesie odgrywa wysokie pH roztworu. Dongxu et al. [72], Katz [73], Fraay, Bijen i Haan [74] Lee i Van Deventer [75] w swoich badaniach udowodnili, że rozpuszczanie popiołu lotnego nie występuje przy pH nieprzekraczającym 13,2, natomiast powyżej tej wartości zachodzi ono szybko. Dodatek substancji podwyższających alkaliczność układu, takich jak np. związki sodu czy szkło wodne pozwala przyspieszyć reakcję popiołu krzemionkowego.

Cechą charakterystyczną zapraw z dodatkiem popiołów krzemionkowych jest niska zawartość wodorotlenku wapniowego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [53]. Zmniejszona porowatość i niska zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sprawiają, że zaprawy cementowe z tym dodatkiem wykazują się zwiększoną odpornością na korozję chemiczną, co ma niezwykle istotne znaczenie zwłaszcza w przypadku materiałów przeznaczonych do kontaktu z wodą [15]. Betony wykonane z cementu z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi po niskociśnieniowej obróbce termicznej [46].

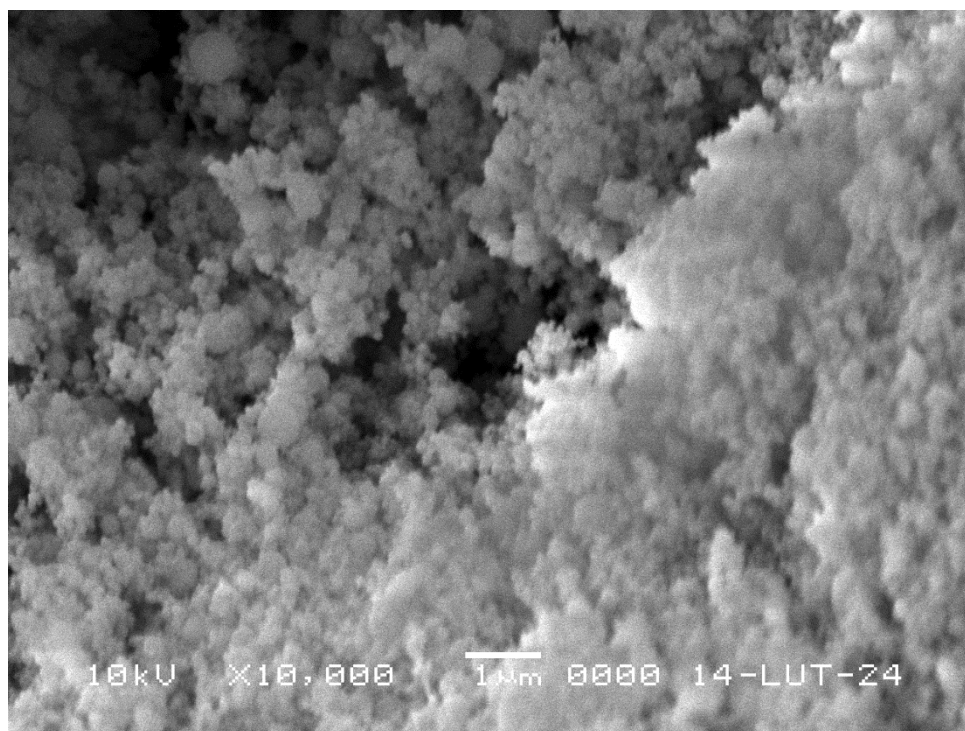
Gorninski, Dal Molin i Kazmierczak [76] podjęli próbę połączenia wysokiego udziału polimeru z popiołem lotnym krzemionkowym. Rezultatem tego była poprawa modułu sprężystości wyrobu cementowego.

4.7.2.3 Pył krzemionkowy (D)

Pył krzemionkowy jest materiałem odpadowym wytwarzanym w piecach hutniczych. Powstaje on w elektrycznych piecach łukowych przy produkcji krzemu lub stopów żelazokrzemu [52]. W temperaturze do 2000°C w obecności węgla i wiórów drzewnych dochodzi do redukcji kwarcu wysokiej czystości ($\geq 99\%$ SiO_2), powstają pary dwutlenku krzemu, które kondensują w strefie niższej temperatury do drobnych cząstek [52,77]. Do lat sześćdziesiątych był on uwalniany do atmosfery wraz z dymem, dopiero wprowadzenie bardziej rygorystycznych przepisów zapoczątkowało przechwytywanie pyłu przez odpowiednie systemy filtrowe w hutach [52].

Zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012 pył krzemionkowy jest składnikiem cementu portlandzkiego krzemionkowego CEM II/A-D, cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M oraz cementów pucolanowych CEM IV i wieloskładnikowych CEM V [16]. Zawartość amorficznej krzemionki w pyłe krzemionkowym wynosi co najmniej 85% [50,78].

Na aktywność pucolanową pyłu krzemianowego mają wpływ przede wszystkim zawartość krzemionki amorficznej oraz wielkość ziaren – wyższa zawartość krzemionki i mniejsza średnica ziaren wpływają na zwiększenie reaktywności dodatku [77]. Charakteryzuje się on bardzo drobnym, niemal idealnie kulistym uziarnieniem o średnicy w zakresie 20÷500 nm oraz bardzo wysoką powierzchnią właściwą w granicach 13000 do 20000 m²/kg [51,77]. Zdjęcie mikroskopowe ziaren użytego do badań pyłu krzemionkowego zamieszczono na rys. 4.



Rys. 4 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań pyłu krzemionkowego [badania własne]

Dzięki małej średnicy ziaren i wysokiej powierzchni właściwej, pył krzemionkowy wypełnia wolne przestrzenie między większymi ziarnami, zwiększając przyczepność połączenia zaczyn-kruszywo oraz zmniejszając ilość i średnicę porów kapilarnych. Przekłada się to na zmniejszenie ilości porów aktywnych kapilarnie i tym samym na poprawę szczelności zaprawy [15,50]. Oznacza to lepszą odporność na karbonatyzację gotowego wyrobu [50].

Dodatek pyłu krzemionkowego w betonach wpływa na redukcję wielkości mikropęknięć w warstwach stykowych kruszywa grubego z zaczynem [58]. Badania wykazują ponadto poprawę odporności na pękanie betonów, w których zastosowano pył krzemionkowy [58]. Wchodzi on w reakcję z wodorotlenkiem wapnia, co podobnie, jak wysoka szczelność, przekłada się na poprawę odporności chemicznej betonów i zapraw z jego udziałem [79]. Bardzo drobne uziarnienie pyłu krzemionkowego może wiązać się ze zwiększeniem wodożądności, co może mieć wpływ na pogorszenie wytrzymałości oraz trwałości gotowego

wyrobu cementowego [15]. Czapik i Wolniewicz [50] zwracają uwagę, że istotne jest równomierne rozdypergowanie pyłu krzemionkowego w całej objętości zaprawy, gdyż ma on tendencję do tworzenia aglomeratów, które nie ulegają pełnej reakcji i pogarszają wytrzymałość i jednorodność wyrobu [50]. Stosowanie dodatku pyłu może być niebezpieczne w konstrukcjach żelbetowych z uwagi na obniżenie pH betonu wskutek redukcji zbyt dużej zawartości $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w cieczy porowej, który umożliwia pasywację stali. Zbyt wysoki udział pyłu krzemionkowego może zatem powodować ryzyko korozji stali zbrojeniowej [79]. Z uwagi na wymienione zagrożenia, najczęściej zaleca się, by udział masowy pyłu krzemionkowego w spoiwie nie przekraczał 10% [50]. Obniżone pH wyrobu cementowego może być zjawiskiem pożądanym – wg. Garcia Calvo et al. [80] i Lothenbach et al. [62], beton taki charakteryzuje się dużą odpornością na oddziaływanie wód gruntowych, dzięki czemu jest stosowany m.in. w konstrukcjach podziemnych składowisk materiałów niebezpiecznych, w tym odpadów radioaktywnych.

Wraz ze wzrostem udziału pyłu krzemionkowego w zaczynie cementowym następuje spadek portlandytu, który zużywany jest w reakcji pucolanowej [50]. Faza C-S-H zapraw z dodatkiem pyłu krzemionkowego charakteryzuje się niskim stosunkiem CaO/SiO_2 [80].

Badania nad użyciem pyłu krzemionkowego w betonach i zaprawach cementowych rozpoczęły się już w latach 50-tych XX wieku [52,81]. Jest powszechnie wykorzystywany m.in. przy wykonywaniu betonów wysokowartościowych HPC i ultrawysokowartościowych UHPC, w których odpowiednią urabialność, pogarszaną przez wysoką wodożądność tego dodatku, uzyskuje się poprzez odpowiednio dobrane plastyfikatory i superplastyfikatory [50,77]. Wyniki badań wykazują poprawę wytrzymałości na ściskanie betonów, w których określoną część cementu zamieniono na pył krzemionkowy [58,79]. Betony i zaprawy z udziałem tego dodatku charakteryzują się bardzo korzystnymi właściwościami mechanicznymi, takimi jak wysoka wczesna wytrzymałość na ściskanie, wysoka wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, dobry moduł sprężystości i udarność [58,77]. Cechuje je wysoka trwałość i odporność ogniowa [77].

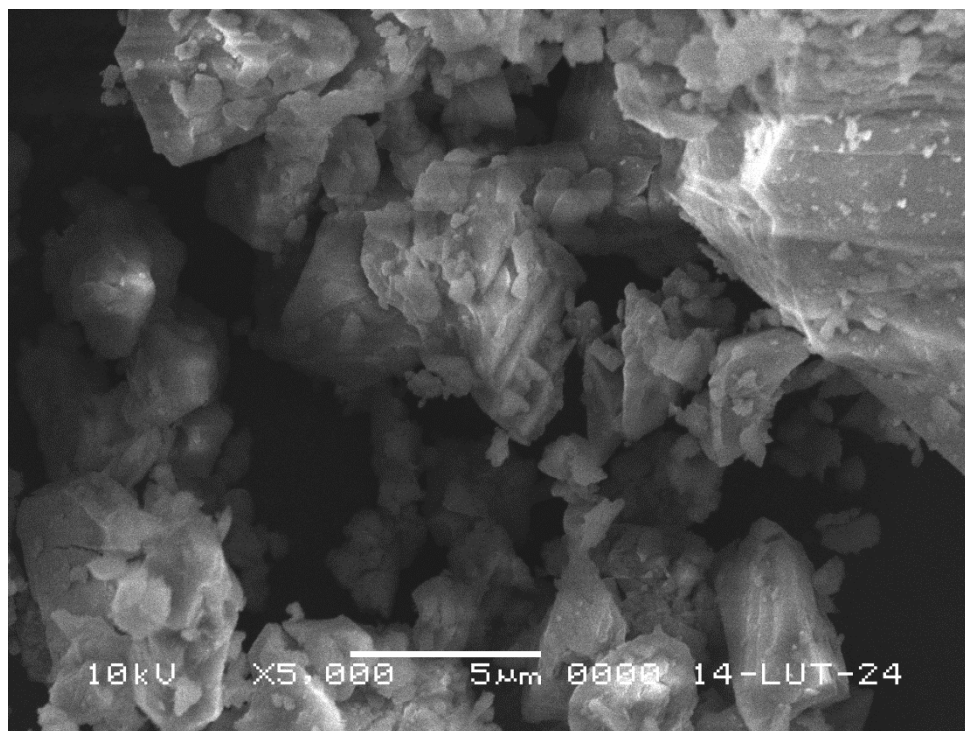
W pracy poświęconej cementowo-polimerowej zaprawie uszczelniającej [82], Kovalenko wskazał na korzystny wpływ pyłu krzemionkowego i modyfikatorów polimerowych na poprawę nasiąkliwości, przyczepności do podłoża i udarności.

4.7.2.4 Zmielony wapień (L, LL)

Składnik ten uzyskiwany jest poprzez zmielenie kamienia wapiennego (wapienia). Głównym składnikiem wapienia stosowanego w przemyśle cementowym jest kalcyt CaCO_3 , stanowiący co najmniej 75% jego masy [12]. Jest on składnikiem cementów portlandzkich

wapiennych CEM II/A,B-L,LL oraz portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A,B-M [16]. Zamieszczone w normie PN-EN 197-1:2012 [16] znaczenia L i LL odnoszą się do całkowitej zawartości węgla organicznego (TOC). W przypadku wapienia z oznaczeniem L zawartość ta nie powinna przekraczać 0,50% masy, natomiast w przypadku oznaczenia LL zawartość ta nie może być wyższa niż 0,20% masy.

Cementy portlandzkie wapienne o udziale masowym wapienia nie przekraczającym 15% charakteryzują się korzystną wytrzymałością wczesną i obniżoną wodożądnością [83]. Ponadto zaprawy i betony z ich udziałem wykazują się dobrą urabialnością i ograniczeniem „bleedingu” – wypływania wody na powierzchnię. Właściwości wytrzymałościowe wyrobów cementowych z udziałem cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL są zbliżone do uzyskiwanych z użyciem cementu portlandzkiego CEM I [83]. Powszechne stosowanie wapienia ma w dużej mierze związek z dużą dostępnością tego surowca oraz jego miękkością w porównaniu z innymi składnikami głównymi cementu [56]. Zmielony wapień posiada korzystny wpływ na właściwości wyrobu cementowego, głównie dzięki wysokiej powierzchni właściwej – wynosi ona ok. 5000 cm²/kg (met. Blaine’a) [78]. Dzięki niej materiał zmniejsza odległość między cząsteczkami zaczynu. Fizyczne wypełnienie struktury wyrobu czyni gotowy wyrób bardziej wytrzymałym, mniej porowatym i poprawia jego mrozoodporność i trwałość [12,84]. Szczególnie korzystny wpływ ma najdrobniejsza frakcja wapienia poniżej 10 μm, która wypełnia wolne przestrzenie między cząsteczkami cementu [56]. Ziarna użytego do badań zmielonego wapienia widoczne są na zdjęciu mikroskopowym pokazanym na rys. 5.



Rys. 5 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań pyłu krzemionkowego [badania własne]

Dodatek zmielonego wapienia ma również udział w procesie hydratacji cementu. Drobinki wapienia mogą tworzyć dodatkowe ogniska krystalizacji, co przekłada się na przyspieszenie hydratacji i procesu wiązania cementu. Zmielony wapień reaguje z uwodnionymi glinianami wapienia tworząc uwodnione karbogliniany ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$), które dodatkowo wypełniają przestrzeń pomiędzy ziarnami kruszywa, uszczelniając zaprawę i zwiększając wytrzymałość połączenia zaczyn – kruszywo [56]. Obecność uwodnionych karboglinianów hamuje przejście etryngitu w monosiarczan, przez co w produktach hydratacji ilość monosiarczanu spada, a zwiększa się udział etryngitu [84]. Karbogliniany w niewielkim stopniu powodują zwiększenie reaktywności klinkieru i poprawę wytrzymałości na ściskanie w początkowej fazie twardnienia cementu [56]. Zmielony wapień w zaprawach cementowych rozpraszając ziarna zmielonego klinkieru portlandzkiego, poprawia im dostęp do wody, co powoduje zwiększenie ich stopnia przereagowania [12].

Badania wykazały, że wraz ze zwiększeniem rozdrobnienia kamienia wapiennego następuje skrócenie początku i końca czasu wiązania cementu z jego udziałem [56]. Yang, Wang i Chen [85] wykazali, że zamiana większej części cementu wapieniem (ponad 10% masowych) powoduje pogorszenie odporności betonu na karbonatyzację, a jednocześnie redukuje skurcz betonu przy wysychaniu [85]. Dodatek zmielonego wapienia poprawia odporność na korozję siarczanową [56,86]. Wyroby cementowe z dodatkiem zmielonego wapienia charakteryzują się obniżoną mrozoodpornością [83,84]. Odnotowano, że mieszanina

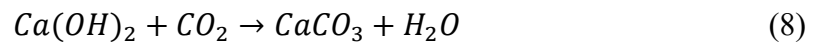
zmielonego wapienia i żużla wykazuje się wyraźnie gorszymi właściwościami wytrzymałościowymi od cementu portlandzkiego CEM I [56]. Marzouki et al. [87] wykazali wpływ zmielonego wapienia na zwiększenie sorpcyjności betonu, jednakże przy odpowiedniej modyfikacji receptury dodatkami upłynniającymi i uszczelniającymi możliwe jest uzyskanie dobrej szczelności i niewielkiej głębokości penetracji wody [83].

4.7.3 Wapno

Wapno, zwłaszcza hydratyzowane, jest powszechnie wykorzystywane w cementowych zaprawach budowlanych z uwagi na korzystny wpływ na plastyczność i retencję wody [88]. Wapno palone wytwarzane jest poprzez wypalanie skały wapiennej składającej się głównie z węglanu wapnia CaCO_3 w temperaturze 1000-1200°C [89]. Wapno gaszone Ca(OH)_2 otrzymuje się w wyniku kontrolowanego gaszenia wapna palonego (7) [89,90].



Wapno hydratyzowane w zasadzie nie twardnieje pod wodą i nie wykazuje właściwości hydraulicznych [91]. Proces wiązania i twardnienia wapna powietrznego następuje po wymieszaniu go z wodą wskutek odparowywania wody i krystalizacji wodorotlenku wapnia, a następnie reakcji z atmosferycznym dwutlenkiem węgla, co przedstawia reakcja (8) [89].



Na szybkość wiązania wapna powietrznego mają wpływ przede wszystkim wilgotność i temperatura otoczenia – wysoka wilgotność znacznie spowalnia karbonatację [90]. Wysoka jakość wapna hydratyzowanego wynika z dużej zawartości składnika głównego i niewielkiej ilości zanieczyszczeń (przede wszystkim węglanów i siarczanów), drobnego uziarnienia oraz stałości objętości (wymagana ekspansja: ≤ 2 mm metodą wzorcową i ≤ 20 mm metodą alternatywną wg normy PN-EN 459-1:2003 [92]) związanej z brakiem lub niewielką ilością niedogaszonych tlenków CaO i MgO [91].

Wapno charakteryzuje się drobnym uziarnieniem – 70% ziaren ma średnicę poniżej 10 μm [93]. Przekłada się to na wyższe od cementu zapotrzebowanie na wodę zarobową [90], lecz również na poprawę szczelności gotowego wyrobu w związku ze zdolnością do wypełniania wolnych przestrzeni [93]. Wapno charakteryzuje się dłuższym, niż w przypadku cementu, czasem utwardzania [90] oraz długim czasem zachowania właściwości roboczych [93]. Zastosowanie wapna w zaprawach poprawia ich przyczepność do różnego rodzaju podłoży. Nadaje także zaprawom cementowym wyższą odkształcalność i redukuje ryzyko wystąpienia spękań [93]. Pomijalnie nieznaczny jest natomiast wpływ wapna na wytrzymałość na ścislenie gotowego wyrobu cementowo-wapiennego [94]. Tworzona przez wapno struktura

charakteryzuje się dużą porowatością otwartą, z niewielkim udziałem porów aktywnych kapilarnie. Chłodziński [91] łączy to z wysoką dyfuzyjnością zapraw z udziałem wapna. Niekorzystnym w aspekcie wykorzystania w zaprawach uszczelniających jest fakt, iż badania wykazują jednak wyraźną tendencję do wzrostu nasiąkliwości zapraw wraz ze zwiększaniem udziału wapnia [95].

Stosowanie wapna w zaprawach budowlanych ma również na celu przeciwdziałanie biologicznej deterioracji na powierzchni przegrody. Na powierzchni ścian stale lub przez długi czas narażonych na działanie wilgoci, na podłożach o odczynie od kwaśnego do słabo zasadowego (odczyn pH w zakresie 2÷8) występują korzystne warunki do rozwoju grzybów, glonów, sinic, pleśni, mchów i porostów, których źródłem pożywienia są substancje organiczne występujące w podłożu [96,97]. Szczególnie narażone są fragmenty budynku o małym nasłonecznieniu, takie jak ściany północne, mocno zacienione oraz strefa cokołowa [2,17,97]. Istotne znaczenie mają również takie czynniki klimatyczne jak: temperatura, wilgotność powietrza, oddziaływanie wiatru oraz sąsiedztwo zieleni, które zwiększają emisję zanieczyszczenia biologicznego [96]. Biodegradacja potęgowana jest przez zanieczyszczenie powietrza i kwaśne deszcze [98]. Powierzchnie porowate są znacznie bardziej narażone na porażenie od powierzchni gładkich [99]. Objawia się ona początkowo powstawaniem barwnych nalotów obniżających estetykę przegrody, wywoływanych przez organizmy zasiedlające powierzchnię (np. chlorofile, karotenoidy) [96,99]. Wraz z wilgocią mikroorganizmy wnikają w pory i szczeliny podłoża powodując jego naprężenia, co w konsekwencji prowadzi do jego fizycznego uszkodzenia [100]. Pozytywny wpływ wapna ma związek z jego wysoko zasadowym charakterem, który stanowi naturalną ochronę poprzez tworzenie bardzo niekorzystnych warunków do wystąpienia tego typu degradacji biologicznej i mikrobiologicznej [97].

4.7.4 Modyfikatory polimerowe

Jednym z najważniejszych składników cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej jest modyfikator polimerowy, którego rolą jest przede wszystkim zapewnienie zaprawie odpowiedniej urabialności, elastyczności i zdolności do mostkowania rys podłoża jak również szczelności [4].

Pierwsze publikacje, dotyczące modyfikacji polimerami wyrobów cementowych powstawały w latach 80-tych [36,71] oraz 90-tych XX wieku [43,101,102]. W większości przypadków w badaniach tych wykorzystywano wodne dyspersje polimerowe. Ohama [103] wyjaśnił korzystny wpływ polimerów na elastyczność i przyczepność do podłoża. W pracach

[76,102] i [103] analizowany był wpływ modyfikacji polimerowych na właściwości betonów, a nie zapraw cementowych. Stwierdzono pozytywny wpływ dodatku modyfikatora polimerowego na szczelność, wytrzymałość na zginanie i urabialność [104].

Przez lata dominował pogląd o przewadze płynnych dyspersji polimerowych nad proszkami w aspekcie skuteczności tworzonych zapraw uszczelniających [105]. Zwracano uwagę na niehomogeniczność struktury zaprawy z użyciem proszków redyspergowalnych [43].

Analogiczne do zamieszczonych w rozprawie badań nad wyborem odpowiedniego polimeru oraz jego dozowania przeprowadzili Wang et al. W swojej publikacji [106] udowodnili, że wraz ze zwiększaniem udziału modyfikatorów polimerowych poprawiała się wodoodporność i zmniejszała porowatość próbek. Podobne badania opisane przez Zhang et al. [107] wykazały korzystny wpływ polimerów na odporność na pękanie, szczelność i trwałość zapraw cementowych.

Dodatek modyfikatorów polimerowych wpływa na zwiększenie retencji wody i zmniejszenie jej odparowywania poprzez tworzenie powierzchniowego filmu polimerowego [108]. Ponadto modyfikator polimerowy redukuje skurcz zaprawy. Jest on odpowiedzialny za nadawanie zaprawie wymaganej przyczepności również do podłoża o charakterze nieminerale, powszechnie stosowanych w budownictwie, takich jak styropian, wełna mineralna, drewno oraz PCV. Ponadto polimery poprawiają odporność zaprawy na ścieranie i agresję chemiczną [25].

Odnotowano przypadki, w których dodatek polimeru powodował zwiększenie porowatości zaprawy i pogorszenie wytrzymałości na ściskanie [101,109]. Analiza szybkości propagacji fali ultradźwiękowej w twardniejącej zaprawie przeprowadzona przez Kuleszę i Dębskiego [109] wykazuje, iż wraz ze wzrostem udziału proszku redyspergowalnego (kopolimery etylenu i octanu winylu oraz styrenowo-akrylowy) następuje spowolnienie szybkości wiązania zaprawy. W większym stopniu dodatek proszkowego polimeru wpływa na opóźnienie początku, niż na końca czasu wiązania [109]. Duży udział polimeru wpływa na zmianę lepkości zaprawy. Przekłada się to na eliminację zjawiska segregacji i redukcję spływu materiału z powierzchni pionowych [110].

Do modyfikacji cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających stosowane są produkty na bazie homopolimerów, kopolimerów, jak i tripolimerów [111]. Do najważniejszych należą homopolimery polioctanu winylu oraz poliakrylany. Spośród kopolimerów najbardziej rozpowszechnione są kopolimery: styrenowo-akrylowe, polioctanu winylu z etylenem i z akrylanami. Stosunkowo nowymi modyfikatorami są kopolimery z grupy octanu winylu

i estru winylowego kwasu wersenowego. Wbudowana w łańcuch polimerowy jednostka strukturalna VeoVa zwiększa odporność na oddziaływanie promieniowania UV, obniża napięcie powierzchniowe i zwiększa hydrofobowość.

Wpływ na właściwości polimerów wywierają takie czynniki jak: wzajemne proporcje poszczególnych jednostek strukturalnych w łańcuchu polimerowym, stopień rozgałęzienia łańcuchów oraz długość łańcuchów polimerowych. Polimery różnią się między sobą lepkością oraz minimalną temperaturą, przy której cząsteczki polimeru wzajemnie się łączą, tworząc elastyczną i ciągłą powłokę. Temperatura ta określana jest jako MFFT – minimalna temperatura tworzenia filmu [112, 113].

Wpływ postaci polimeru na właściwości stwardniałych kompozytów cementowych był przedmiotem badań Adlera [105]. Lepsze efekty modyfikacji materiałów cementowych uzyskał on przez zastosowanie polimerów w formie wodnych dyspersji niż w postaci proszków. Również Afridi, Ohama, Demura i Iqbal [43] wykazali, że stan skupienia modyfikatorów polimerowych wywiera wpływ na równomierne rozprowadzenie polimeru w stwardniałej zaprawie. Na podstawie obserwacji mikroskopowych SEM zauważyli znaczne różnice w strukturze wytworzonego filmu. Stwierdzili, iż mikrostruktura zapraw modyfikowana za pomocą proszków była niejednorodna, włóknista, porowata z licznymi zgrubieniami i nierównościami.

4.7.5 Kruszywa

Odpowiedni dobór kruszyw jest istotny przy projektowaniu wyrobów cementowych z uwagi na wpływ na odporność korozyjną i szczelność [114], co ma bardzo istotne znaczenie w kontekście zapraw uszczelniających. Kruszywa kwarcowe charakteryzują się większą odpornością chemiczną, a zaprawy z ich udziałem charakteryzują się wyższą wytrzymałością na ścislenie w porównaniu z kruszywami węglanowymi na bazie węgla wapnia [115]. Jak wskazuje skala Mohsa [116], kwarc charakteryzuje się większą twardością od kalcytu. Santos i Julio [117] udowodnili, że chropowatość powierzchni wyrobu cementowego ma wpływ na przyczepność aplikowanych na niego kolejnych warstw. Efekt zwiększonej chropowatości można uzyskać poprzez odpowiedni dobór kruszyw.

Zastosowanie mączki kwarcowej przekłada się na mniejszą głębokość penetracji wody oraz wyższą mrozoodporność wyrobu cementowego [118]. Efekt ten jest bardzo pożądanym również w przypadku m.in. betonów z proszków reaktywnych, w których mączki kwarcowe znajdują powszechne zastosowanie [119]. Drobne wypełniacze ograniczają porowatość struktury warstwy stykowej kruszywo-zaczyn cementowy, co pozwala uzyskać bardziej

jednorodną mikrostrukturę matrycy cementowej [120]. Wypełnienie wolnych przestrzeni, skutkujące zagęszczeniem struktury matrycy cementowej, ma wpływ także na poprawę wytrzymałości na ściskanie [118].

4.7.6 Domieszki

4.7.6.1 Domieszki wpływające na lepkość

Domieszki wpływające na lepkość zapraw są istotnymi składnikami zapraw cementowych przeznaczonych do aplikacji także na powierzchnie pionowe, a więc również zapraw uszczelniających. Eliminują one ryzyko wystąpienia segregacji i skurczu zaprawy oraz nadają odpowiednią konsystencję i tiksotropię, co przekłada się na ograniczenie spływu z powierzchni pionowych [110].

W celu zapewnienia odpowiedniej retencji wody, co prowadzi do stworzenia odpowiednich warunków do hydratacji cementu, w zaprawach cementowych zastosowanie znajdują zagęstniki celulozowe. Zapewniają lepszą stabilizację i homogenizację oraz odpowiadają za nadanie zaprawie wydłużonego czasu otwartego [108]. W zaprawach cementowych powszechnie stosowane są modyfikowane etery celulozy – w miejscu atomu wodoru wprowadzane są grupy hydroksylowe innej grupy funkcyjnej, najczęściej metylowej lub etylowej [121].

Gołaszewski [110] wyróżnia dwa mechanizmy działania domieszek zwiększających lepkość wyrobów cementowych: adsorpcyjny i nieadsorpcyjny. Mechanizm adsorpcyjny, charakteryzujący działanie eteru skrobi, polega na adsorpcji dodatku na powierzchni cementu, tworząc tymczasową strukturę utrudniającą dalsze uwadnianie [110,122]. Mechanizm nieadsorpcyjny występuje w przypadku eteru celulozy. Jego działanie ma podwójny mechanizm - w małej dawce, głównie przez sorpcję, celuloza wiąże wolną wodę; w dużej, poprzez interakcję grup funkcyjnych polimeru z cząsteczkami wody, wytwarza przestrzenną strukturę, w której wiązana jest część wody wolnej.

Zmiany reologiczne w czasie, spowodowane domieszkami zwiększającymi lepkość zaprawy, mogą wiązać się z ich działaniem na opóźniające powstawanie portlandytu [123].

4.7.6.2 Superplastyfikatory

Wprowadzanie modyfikacji różniących się między sobą powierzchnią właściwą może mieć przełożenie na ilość wody potrzebną do zwilżenia ich ziaren. Korzystnym rozwiązaniem w takiej sytuacji jest wprowadzenie superplastyfikatora, który powoduje deflokulację zaczynu cementowego i zwiększenie ilości wody wolnej w mieszance [129].

Gołaszewski [110] przedstawia następujący podział superplastyfikatorów ze względu na ich skład chemiczny i strukturę:

- sole sulfonowanych polimerów naftalenowo-formaldehydowych (SNF),
- sole sulfonowanych polimerów melaminowo-formaldehydowych (SMF),
- polimery karboksylowe PCE (polimery i kopolimery karboksylowych kwasów akrylowych (PC) i polimery usieciowane (CLPC)),
- inne.

Polimery superplastyfikatorów SNF i SMF mają postać długich łańcuchów z bocznymi grupami funkcyjnymi $-SO_3$ i rzadziej $-COOH$. Ich działanie opiera się na adsorpcji długich łańcuchów głównych na powierzchni ziaren cementu i produktów hydratacji, przez co wzrasta liczba ładunków ujemnych powodujących odpychanie elektrostatyczne. Jednocześnie boczne grupy funkcyjne wzmacniają siły elektrostatycznego odpychania. Powoduje to upłynnienie układu i stabilizację ziaren cementu w układzie, a stopień upłynnienia jest proporcjonalny do wielkości sił elektrostatycznego odpychania [110].

Superplastyfikatory PCE charakteryzują się większą od SNF i SMF ilością grup jonowych $-COOH$, wyższą masą cząsteczkową i przestrzenną strukturą – posiadają one rozbudowane łańcuchy boczne złożone z bloków merów pochodnych karboksylowych, karboksylanowych, alikloestrowych i polieteroestrowych. Działanie superplastyfikatorów PCE opiera się na wywoływanie efektu sterycznego – adsorbują one na powierzchni ziaren cementu tworząc przestrzenną barierę utrudniającą, która utrudnia ich zbliżenie i tworzenie konglomeratów [110,129]. Na skuteczność działania superplastyfikatorów mają wpływ długość łańcucha głównego i bocznych oraz częstotliwość występowania łańcuchów bocznych. Według Gołaszewskiego [110] im większa długość i liczba łańcuchów bocznych, tym silniejszy efekt upłynnienia i tym bardziej rozłożone w czasie jest jego zmniejszenie. Ponadto mniejsza częstość występowania łańcuchów bocznych powoduje silniejsze upłynnienie, natomiast większa przekłada się na wydłużenie czasu upłynnienia [110].

Ilość zaabsorbowanego superplastyfikatora dla danego cementu rośnie wraz ze wzrostem jego ilości do osiągnięcia ilości granicznej – tzw. punktu saturacji [130]. Powyżej tej wartości nie jest on adsorbowany, lecz zwiększa się jego wolna ilość. Jego adsorpcja uzależniona jest od powierzchni właściwej cementu – w przypadku cementów o wysokiej powierzchni właściwej zachodzi konieczność dozowania większej ilości superplastyfikatora [110]. Adsorpcja superplastyfikatorów na powierzchni ziaren cementu nie następuje w sposób równomierny. Gołaszewski [110] podaje kolejność i wielkość adsorpcji na poszczególnych składnikach

cementu: $C_3A > C_4AF \gg C_3S$. Mieszanki o wyższej zawartości C_3A charakteryzują się zatem większym zapotrzebowaniem na superplastyfikator.

4.7.7 Mikrobrojenie

Wprowadzenie do matrycy cementowej rozproszonego mikrobrojenia pomaga mostkować rysy i spękania podłoża, co może mieć istotne znaczenie w kontekście materiałów przeznaczonych do wykonywania powłokowych hydroizolacji [124]. Jako tego typu mikrobrojenia bardzo dobrze nadają się włókna polipropylenowe z uwagi na ich odporność na działanie wysoce alkalicznego środowiska, jakim jest zaczyn cementowy [125]. Są one nietoksyczne i odporne na działanie bakterii, grzybów i częściowo również na agresję chemiczną. Wykazują się one wysokim współczynnikiem tarcia, poprawiającym współpracę z matrycą cementową oraz posiadają wysoką wytrzymałość na rozciąganie [125].

W wyniku chemicznej modyfikacji powierzchni włókna są zwilżane, co pomaga w równomiernym rozdypergowaniu pozostałych składników zaprawy [125]. Dodatkowo środek zwilżający ma zapobiegać wpływowi włókien na pogarszanie urabialności zaprawy [125,126]. Włókna tworzące mikrobrojenie ograniczają możliwość wystąpienia rys i spękań związanych zarówno ze skurczem cementu, jak i naprężeniami zewnętrznymi – w momencie pęknięcia matrycy cementowej, obciążenia przejmowane są przez włókna [126]. Wytworzona przez włókna struktura ogranicza osiadanie ziaren kruszywa prowadzące do segregacji mieszanki oraz wydzielania mleczka cementowego na powierzchnię wyrobu cementowego [127].

Włókna celulozowe poprawiają urabialność i ułatwiają homogenizację zapraw [128]. W niewielkim stopniu poprawiają one retencję wody w układzie i wydłużają czas otwarty [108]. Bardzo skutecznie obniżają natomiast spływ zapraw z powierzchni pionowych [128].

5 CEL I PRZYJĘTE TEZY ROZPRAWY

Głównym celem dysertacji doktorskiej było opracowanie uniwersalnej receptury jednokomponentowej cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej przeznaczonej do wykonywania pionowych i poziomych izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych z wykorzystaniem dodatków mineralnych.

Przeprowadzone przez autora rozprawy badania i uzyskane wyniki dostarczyły istotnej wiedzy w zakresie wytwarzania cementowych zapraw budowlanych, przez co mają wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa.

Do osiągnięcia celu pracy przyjęto następujące tezy naukowe:

- Teza 1 – możliwe jest stworzenie cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej z wykorzystaniem dodatków mineralnych, a ich wprowadzenie do receptury jako zamiennik cementu portlandzkiego CEM I przy optymalnych proporcjach wymiany, spowoduje poprawę właściwości użytkowych wyrobu po stwardnieniu.

- Teza 2 – możliwe jest opracowanie cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej na bazie proszkowych modyfikatorów polimerowych o właściwościach lepszych niż właściwości dwukomponentowych zapraw uszczelniających na bazie wodnych dyspersji polimerowych, zwłaszcza w aspekcie wymagań normowych dotyczących wodoszczelności, przyczepności do podłoża i zdolności do mostkowania pęknięć podłoża.

- Teza 3 – opracowany w ramach realizacji rozprawy skład zaprawy hydroizolacyjnej może wykazywać się dużą uniwersalnością niezależnie od jakości podłoża, na które jest aplikowany oraz warunków klimatycznych i pogodowych.

W celu realizacji założonego celu pracy przeprowadzono szereg badań, mających na celu określenie wpływu czynników materiałowych na właściwości zaprawy. Dokonano analizy sposobu oddziaływania dodatków na najważniejsze właściwości w oparciu o badania normowe oraz własne, które, zdaniem autora, najlepiej odwzorowują rzeczywiste warunki. Stosując metody mikroskopowe podjęto próbę analizy powiązania mikrostruktury zapraw z właściwościami wybranych polimerów analizowanych pod kątem możliwości ich zastosowania w składzie badanej zaprawy. Przeanalizowano wpływ modyfikacji dodatkami mineralnymi na odkształcalność wyrobu. Wykorzystując metody starzeniowe, imitujące rzeczywiste niekorzystne warunki pogodowe, określono trwałość zapraw.

6 CZĘŚĆ MATERIAŁOWA

Na podstawie analizy literatury oraz badań rozpoznawczych dokonano wyboru dodatków, na podstawie których opracowana została receptura zaprawy testowej. W celach porównawczych zdecydowano się na opracowanie składu receptury z zastosowaniem modyfikatorów polimerowych w postaci płynnej. W skład tej receptury wchodzi takie składniki jak cement, wapno, modyfikatory polimerowe, kruszywa, domieszki reologiczne, superplastyfikator i dodatki mineralne. W niniejszym rozdziale scharakteryzowano właściwości poszczególnych składników.

6.1 Cement

W badaniach zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R. Udział masowy cementu w składzie zaprawy uszczelniającej ustalono na podstawie badań wstępnych, m.in. badań zamieszczonych w publikacji [4]. Skład chemiczny i mineralny zastosowanego cementu oraz jego właściwości zestawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3 Skład chemiczny i mineralny zastosowanego cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R

Skład chemiczny [% masy]										Skład mineralny [% masy]			
Strata prażenia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O	K ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
2,24	20,6	5,0	2,6	64,2	1,4	2,9	0,05	0,15	0,78	67,0	12,8	9,1	7,6

Tabela 4 Właściwości fizyczne i mechaniczne użytego cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R

Właściwość	Jednostka	Uzyskany wynik
Pow. właściwa	cm ² /g	3800
Stołość objętości	mm	0,2
Początek czasu wiązania	minuta	202
Wytrzymałość na ściskanie po upływie:		
2 dni	MPa	28,8
28 dni	MPa	58,2

6.2 Wapno hydratyzowane

Wapno CL 90-S zgodnie z normą PN-EN 459-1:2003 [92] jest klasyfikowane jako wapno powietrzne wapniowe wytwarzane z wapieni czystych (CL), hydratyzowane (S) gaszone CaOH_2 , bez żadnych dodatków materiałów hydraulicznych, a co najmniej 90% jego masy stanowi suma tlenku wapnia CaO i tlenku magnezu MgO . Z uwagi na hydrofilowy charakter, jego dozowanie ograniczono do niewielkiej ilości.

6.3 Modyfikatory polimerowe

Wyznaczono 5 rodzajów polimerów produkowanych przemysłowo. Ostatecznego wyboru odpowiedniego polimeru dokonano na podstawie oceny wpływu wstępnie wyselekcjonowanych modyfikatorów polimerowych na szczelność zapraw i ich przyczepność do podłoża oraz mostkowanie spękań. Ponadto analizowano ich wpływ na mikrostrukturę zapraw.

Wstępnie wyselekcjonowanymi modyfikatorami polimerowymi były dwie wodne dyspersje polimerowe, które posłużyły do wytworzenia dwukomponentowej zaprawy hydroizolacyjnej i trzy proszki redyspergowalne:

- ZH1/ASA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy - w postaci wodnej dyspersji o zawartości części stałych $55\div 57\%$, wielkość ziaren $200\div 400$ nm, o temperaturze MFFT 1°C , o proporcji styren:akryl 6:4,
- ZH2/SA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy – w postaci wodnej dyspersji o zawartości części stałych $54\text{-}57\%$, o temperaturze MFFT -5°C , o proporcji styren:akryl 6:4,
- ZH3/CF/EVA – EVA kopolimer etylenu i octanu winylu - proszek redyspergowalny o średnim rozmiarze cząstek $90\ \mu\text{m}$ i o temperaturze MFFT 0°C , o udziale etylenu 20%,
- ZH4/ORG/VAAc – VAAc kopolimer octanu winylu i akrylu – proszek redyspergowalny o temperaturze MFFT 0°C ,
- ZH5/VA/VeoVa – VeoVa kopolimer octanu winylu i wersenianu winylu - proszek redyspergowalny o temperaturze MFFT 0°C .

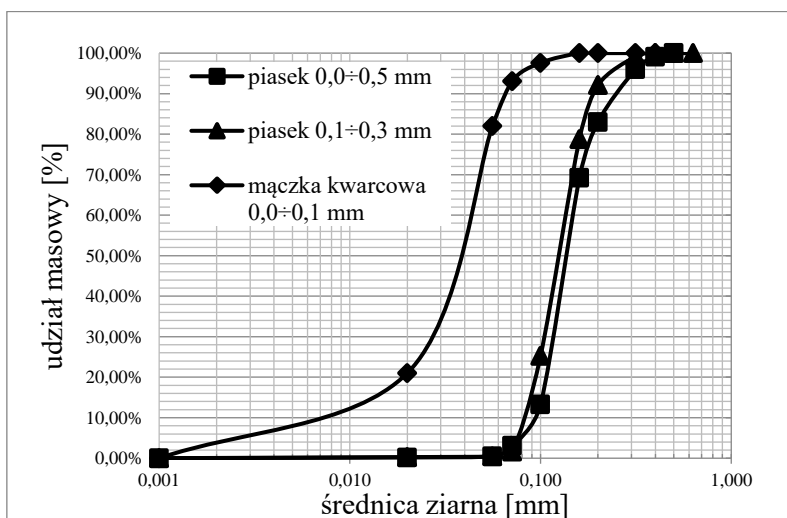
6.4 Kruszywa

Z uwagi na niższą nasiąkliwość i porowatość oraz wyższą odporność chemiczną i właściwości mechaniczne niż w przypadku kruszyw na bazie węgla wapnia, podjęto decyzję o zastosowaniu kruszyw kwarcowych. W zaprawie rolę tę pełnią trzy rodzaje kruszyw o różnych uziarnieniach:

- piasek kwarcowy o uziarnieniu $0,0\div 0,5$ mm,

- piasek kwarcowy o uziarnieniu $0,1 \div 0,3$ mm,
- mączka kwarcowa o uziarnieniu $0,0 \div 0,1$ mm.

Krzywe przesiewu zastosowanych kruszyw przedstawione zostały na rys. 6.



Rys. 6 Krzywe przesiewu kruszyw zastosowanych w badanych zaprawach uszczelniających

Piasek frakcji $0,0 \div 0,5$ mm został wprowadzony w celu uzyskania bardziej chropowatej faktury, która miała zapewnić zwiększenie powierzchni styku z kolejną warstwą. Piasek o drobnej frakcji $0,1 \div 0,3$ mm zastosowano w celu wypełnienia większych przestrzeni międzyziarnowych, natomiast mączka kwarcowa, pełniąca rolę drobnego wypełniacza, została użyta z uwagi na chęć zapewnienia możliwie jak największego zmniejszenia średnicy porów i zapewnienia odpowiedniej szczelności.

6.5 Domieszki

W celu nadania zaprawom odpowiedniej konsystencji, właściwości roboczych i zapewnienia jak najwyższej tiksotropii układu, zastosowano domieszki, zwiększające lepkość układu. Były to zagęstnik celulozowy – hydroksymetylopropyloceluloza o lepkości $25000 \div 35000$ cps (2% roztwór badany w temp. 20°C na wiskozymetrze Brookfielda) oraz eter skrobi – o lepkości 15 mPas (2% roztwór badany w temp. 20°C na wiskozymetrze Höplera). Wprowadzenie domieszek miało również na celu zmniejszenie wrażliwości zaprawy na zmianę ilości wody zarobowej.

W celu wyeliminowania wpływu zastosowanych dodatków na konsystencję i urabialność zaprawy przy zachowaniu stałej ilości wody zarobowej, w recepturach stosowano dodatek superplastyfikatora – polikondensatu sulfonowanej melaminy i formaldehydu (SMF).

6.6 Mikrobrojenie

Celem zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie i zginanie, poprawy elastyczności oraz zapewnienia zdolności do mostkowania spękań podłoża, w recepturze zastosowano także włókna polipropylenowe FPE o długości 200–500 μm i średnicy ok. 10 μm , zawierające środek zwilżający PVA (ok. 1% m/m) umożliwiającą równomierne rozmieszczenie włókien w całej objętości wyrobu cementowego oraz włókna celulozowe długości do 400 μm i średnicy do 45 μm .

6.7 Dodatki mineralne

W zaprawie uszczelniającej zastosowano dodatki będące ubocznymi produktami przemysłowymi oraz surowcem naturalnym (wapień). Dodatkami tymi były:

- granulowany żużel wielkopiecowy,
- popiół lotny krzemionkowy,
- pył krzemionkowy,
- zmielony wapień.

Składy chemiczne zastosowanych w badaniach dodatków mineralnych zostały zestawione w tabeli 5.

Tabela 5 Składy chemiczne zastosowanych dodatków mineralnych [% masy]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O	K ₂ O	Straty prażenia
Granul. żużel wielkopiecowy	39,67	8,76	0,67	40,61	7,33	1,62	<0,001	<0,01	0,42	2,1
Popiół lotny krzemionkowy	51,20	25,60	6,01	3,58	2,64	0,39	<0,01	1,17	3,13	1,6
Pył krzemionkowy	95,18	0,52	0,16	0,75	0,31	0,06	0,21	<0,01	0,55	2,4
Zmielony wapień	1,35	0,62	0,41	54,15	<0,01	0,70	<0,001	<0,01	<0,01	39,1

7 PRZYGOTOWANIE I SKŁAD PRÓBEK ZAPRAW USZCZELNIAJĄCYCH

Program prac badawczych podzielony został na 2 etapy:

1. Dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego i jego udziału masowego w składzie zaprawy uszczelniającej.
2. Sprawdzenie wpływu dodatków mineralnych pochodzenia odpadowego na właściwości zaprawy uszczelniającej.

Do każdego badania przygotowano po 3 próbki dla każdej sprawdzanej receptury. W niniejszej rozprawie zamieszczono uśrednione wartości pomiarów.

7.1 Przygotowywanie suchych mieszanek

Wszystkie składniki odważano ręcznie z wykorzystaniem wag laboratoryjnych. W przypadku surowców o udziale masowym nie większym niż 1% mas., odważano je na wadze z dokładnością do $1 \cdot 10^{-3}$ g, natomiast pozostałe składniki odważano na wadze z dokładnością do $1 \cdot 10^{-2}$ g. Po umieszczeniu w pojemniku wszystkich sypkich składników zaprawy, mieszano je przy użyciu żyroskopowego mieszalnika.

7.2 Przygotowywanie ciekłych składników zapraw dwukomponentowych

W przypadku ciekłych komponentów dwukomponentowych zapraw, wodną dyspersję polimerową mieszano z odpowiednią ilością wody przy użyciu laboratoryjnego urządzenia do dyspergowania i mieszania m.in. gruntów, farb i tynków. W trakcie wprowadzania dyspersji i wody do pojemnika, prędkość mieszania wynosiła 500 obrotów/minutę, natomiast po wprowadzeniu wszystkich składników zwiększano prędkość do 800 obrotów/minutę. Całkowity czas mieszania wynosił 5 minut.

7.3 Mieszanie zapraw z wodą lub komponentem płynnym

Próbki z proszkowymi modyfikatorami polimerowymi wsypywano do uprzednio odmierzonej, stałej dla wszystkich próbek zapraw ilości wody zarobowej.

W przypadku zapraw z wykorzystaniem płynnej dyspersji polimerowej, do naczynia zawierającego jej odmierzoną ilość wsypywano suchą mieszaninę suchych składników wraz z kruszywami i dodatkami mineralnymi.

W poszczególnych eksperymentach zmianie ulegała ilość wodnej dyspersji – przeliczona na suchą masę. Ilość dyspersji odmierzana była w taki sposób, aby po stwardnieniu otrzymać

udział polimeru identyczny z zaprawami bazującymi na modyfikatorach proszkowych. Proporcje odmierzenia składników zamieszczono w rozdziałach 7.4 i 7.5 z recepturami zapraw.

Następnie przy użyciu mieszalnika normowego zaprawę mieszano z wodą lub komponentem płynnym, zgodnie z wytycznymi normy EN 1015-2:2000 [131], w następujących reżimie:

1. 30 sekund: mieszanie maszynowe,
2. 60 sekund: zbieranie zaprawy z brzegu naczynia przy użyciu kielni,
3. 60 sekund: mieszanie maszynowe,
4. 5 minut: przerwa,
5. 15 sekund: mieszanie maszynowe.

7.4 Skład receptury zaprawy do określenia wpływu modyfikatorów polimerowych

W celu określenia odpowiedniego modyfikatora i jego optymalnej zawartości, bazową recepturę modyfikowano zmieniając udział polimeru i jednocześnie zastępując go piaskiem kwarcowym 0,0÷0,5 mm. Procedurę tę powtarzano dla każdego analizowanego modyfikatora polimerowego. Skład uogólnionej receptury uszczelniającej zamieszczono w tabeli 6.

Tabela 6 Skład uogólnionej receptury zaprawy uszczelniającej do badań wpływu modyfikatorów polimerowych na właściwości hydroizolacji

Składnik	Udział masowy [% mas.]
Cement portlandzki CEM I 42,5 R	15,00
Wapno hydratyzowane CL 90-S	3,00
Modyfikator polimerowy	0; 15,0; 20,0; 26,0
Mączka wapienna 0,0÷0,1 mm	1,00
Piasek kwarcowy 0,1÷0,3 mm	4,03
Piasek kwarcowy 0,0÷0,5 mm	49,9; 55,9; 60,9; 75,9
Hydroksymetylopropylo celuloza	0,10
Eter skrobi	0,03
Włókna celulozowe	0,34
Włókna polipropylenowe FPE	0,60
Superplastyfikator	0,00÷0,50
Woda (% masy części sypkiej)	28,00 %
Stosunek woda/cement (w/c)	1,87

Celem zapewnienia stałego składu receptury dla każdego badanego udziału modyfikatora, w przypadku płynnych dyspersji polimerowych masa części sypkiej mieszanej z mieszaniną polimeru i wody była pomniejszona o masę części stałych zawartych w polimerze. W tabeli 7 zestawiono proporcje mieszania zaprawy dwukomponentowych. Przedstawiono ilości sypkiej mieszanki (pomniejszanej o ilość piasku kwarcowego 0,0÷0,5 mm wraz ze zwiększaniem udziału modyfikatora w ilościach identycznych, jak w przypadku próbek z proszkami redyspergowalnymi), płynnej dyspersji polimerowej oraz wody stosowanej w badaniach wpływu polimeru w postaci płynnej, w celu zapewnienia we wszystkich próbkach takiego samego udziału części stałej, polimeru i wody. W obliczeniach założono uśredniony udział części stałych wynoszący 57% masy płynnego komponentu i udział wody wynoszący 43% masy płynnego komponentu.

Tabela 7. Proporcje mieszania zapraw dwukomponentowych z udziałem płynnych dyspersji polimerowych

Udział masowy modyfikatora	15% masy części stałych	20% masy części stałych	26% masy części stałych
Ilość dodanej części sypkiej (pomniejszona o ilość piasku 0,0÷0,5 mm)	850 g	800 g	740 g
Ilość dodanej wodnej dyspersji polimerowej	268 g	357 g	474 g
Zawartość stałej masy polimeru w wodnej dyspersji polimerowej	150 g	200 g	260 g
Zawartość wody w wodnej dyspersji polimerowej	118 g	157 g	214 g
Ilość dodanej wody	162 g	123 g	66

7.5 Skład receptury zaprawy do określenia wpływu dodatków mineralnych

Na podstawie wyników badań wpływu wybranych modyfikatorów polimerowych na wybrane właściwości zapraw, przeprowadzonych na recepturze bazowej zamieszczonej w tabeli 6, dokonano wyboru odpowiedniego modyfikatora i ilość jego dozowania. W ten sposób uzyskano nową recepturę bazową, którą następnie modyfikowano poprzez częściowe zastępowanie cementu CEM I dodatkami mineralnymi. Zastępowano nimi kolejno 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% i 15% masowych cementu CEM I. W taki sposób zachowano stały udział

masowy sumy mas cementu i dodatków niskoemisyjnych we wszystkich badanych zaprawach. Przeprowadzono także badania mające na celu określenie wpływu częściowej zamiany cementu na jednocześnie dwa dodatki mineralne na szczelność oraz przyczepność zaprawy uszczelniającej. W tym przypadku każdorazowo 10% masy cementu zastępowano dwoma składnikami, których proporcje masowe wynosiły 3:7, 5:5 lub 7:3. Dodatkowo, w porównaniu do składu zaprawy przeznaczonej do określenia optymalnego modyfikatora polimerowego, zamieszczonego w tabeli 7, na tym etapie zdecydowano się na wprowadzenie superplastyfikatora do próbki referencyjnej, celem znacznego ograniczenia stosunku wody zarobowej do cementu. Miało to na celu przede wszystkim uzyskanie korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych uzyskiwanych przez stwardniałą zaprawę. Skład nowej uogólnionej receptury zaprawy do badań wpływu dodatków mineralnych zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8 Skład uogólnionej receptury zaprawy uszczelniającej do badań wpływu dodatków mineralnych na właściwości zaprawy

Składnik	Udział masowy [% mas.]
Cement portlandzki CEM I 42,5 R	12,75÷15,00
Granulowany żużel wielkopiecowy	0,00÷2,25
Popiół lotny krzemionkowy	0,00÷2,25
Pył krzemionkowy	0,00÷2,25
Zmielony wapień	0,00÷2,25
Wapno hydratyzowane CL 90-S	3,00
Modyfikator polimerowy	26,0
Mączka wapienna 0,0÷0,1 mm	1,00
Piasek kwarcowy 0,1÷0,3 mm	4,03
Piasek kwarcowy 0,0÷0,5 mm	49,70
Hydroksymetylopropylo celuloza	0,10
Eter skrobi	0,03
Włókna celulozowe	0,34
Włókna polipropylenowe FPE	0,60
Superplastyfikator	0,40÷1,00
Woda (% masy części sypkiej)	22,00 %
Stosunek woda/cement (w/c)	1,47÷1,76

8 METODYKA BADAŃ

Wszystkie zaprawy odważano, przygotowywano do badań i mieszano z wodą lub płynnym komponentem zgodnie z wytycznymi i recepturami zamieszczonymi w rozdziale 7 „PRZYGOTOWANIE PRÓBEK”.

8.1 Pomiar konsystencji

Celem oceny właściwości roboczych zaprawy przeprowadzono badanie konsystencji świeżej zaprawy zgodnie z normą EN 1015-3:2000 [132] przy użyciu stolika rozplýwu (rys. 7).



Rys. 7 Stolik rozplýwu używany do badań konsystencji zgodnie z PN-EN 1015-3:2000 [132] [zdjęcie własne]

Celem poprawnego przeprowadzenia badania, czystą powierzchnię tarczy oraz wewnętrzną powierzchnię formy smarowano niewielką ilością oleju mineralnego o bardzo niskiej lepkości. Następnie formę umieszczano centralnie na powierzchni tarczy, po czym wypełniano ją świeżo rozmieszaną zaprawą w dwóch warstwach. Każdą z nich zagęszczano poprzez 10-krotne opuszczenie ubijaka z ustalonej wysokości. Nadmiar materiału wystający ponad powierzchnię formy zebrano przy użyciu płaskiego zbieraka. Następnie podnoszono formę i powodowano rozplýw zaprawy poprzez 15-krotne wstrząsanie stolikiem przy stałej częstotliwości wynoszącej ok. 1 wstrząs na sekundę. Pomiaru średnicy rozplýwu dokonano

w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Wynik wyrażano jako uśrednioną średnicę rozptywu próbki z dokładnością do 1 mm.

Opierając się na doświadczeniach z praktyki oraz na podstawie badań rozpoznawczych, uznano, iż najkorzystniejsze właściwości robocze uzyskują zaprawy dla rozptywu wynoszącego ok. 125 mm.

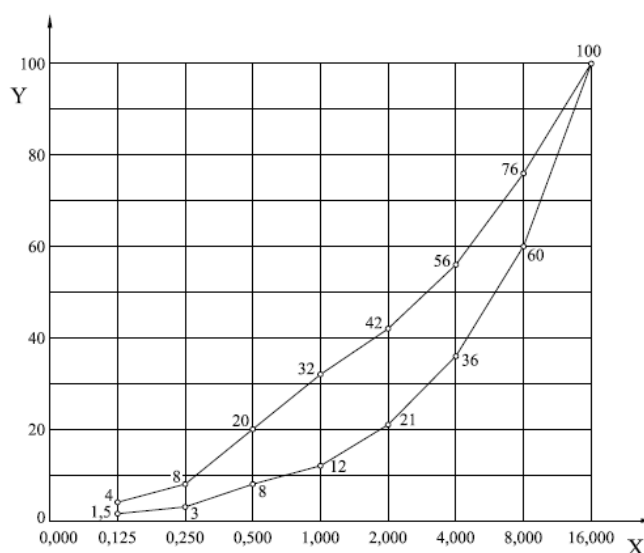
Z uwagi na wpływ stosowanych modyfikatorów polimerowych o różnej wodozadności, konsystencję (rozptyw) regulowano przy użyciu superplastyfikatora. Był on dodawany w ilościach, zapewniających zaprawie stały rozptyw wynoszący 125 ± 5 mm, niezależnie od udziału polimeru. Sprawdzenie konsystencji, poprzedzające właściwe badania i ewentualna korekta udziału superplastyfikatora, wykonywane były w przypadku wszystkich badań.

8.2 Pomiar wodoszczelności

Wodoszczelność określano zgodnie z PN-EN 14891: 2017 [40] na próbkach zapraw naniesionych na sześciennie kostki betonowe o boku 15 cm. Receptura betonu, z którego wykonano kostki była zgodna z zamieszczoną w normie:

- cement CEM I 42,5 R: 250 kg/m^3
- woda zarobowa: 250 kg/m^3
- kruszywo $0 \div 16 \text{ mm}$: 1750 kg/m^3

Rozkład wielkości ziaren w kruszywie zastosowanym w składzie betonu przedstawiono na rys. 8.



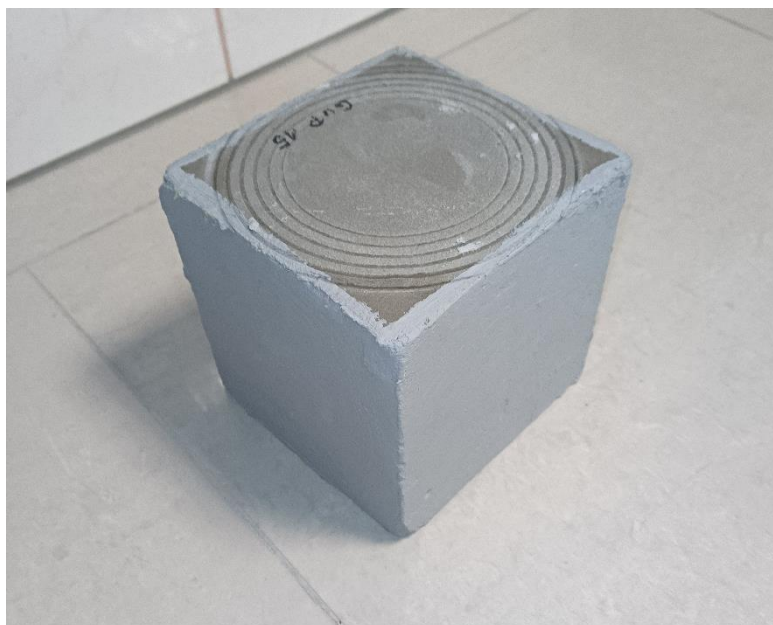
Rys. 8 Rozkład wielkości ziaren w kruszywie betonu przeznaczonego do badań szczelności, gdzie: oś X: nominalna wielkość oczka w sicie [mm]; oś Y: ilość przechodząca przez sito [% mas.] [40]

Uzyskane próbki sezonowano przez okres 3 miesięcy w temperaturze 20°C i względnej wilgotności powietrza 55%.

Zaprawę, z określonym na podstawie badania konsystencji dodatkiem superplastyfikatora mieszano z wodą zgodnie z normą EN 1015-3:2000 [132]. Następnie nanoszono na jedną ze ścian, dwiema warstwami o grubości 2 mm każda. Do tego celu stosowano pacę zębatą o wymiarach zębów 4 mm x 4 mm i odstępnie 8 mm między ich osiami. Druga warstwa nakładana była 24 godziny po aplikacji pierwszej warstwy.

Tak przygotowane próbki sezonowane były przez 14 dni w temperaturze 22±2°C i względnej wilgotności powietrza 50±5%. Po tym czasie pozostałe ściany kostek oraz niewielką ramkę grubości ok. 1 cm od krawędzi, naniesioną na ściankę z badaną próbką uszczelniono materiałem na bazie żywicy akrylowej – folią w płynie. Jej wysokie właściwości uszczelniające potwierdzone zostały w zewnętrznym laboratorium badawczym – Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie. Jednostka ta posiada akredytację w zakresie badania wodoszczelności zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] i w wykonanym przez nią badaniu folii w płynie, użytej do uszczelniania pozostałych ścianek próbki, przyrost masy po oddziaływaniu wodą wyniósł tylko 3,0 g.

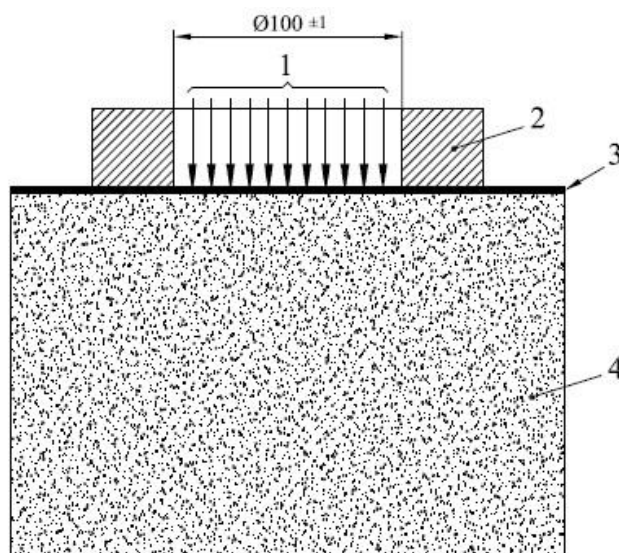
Po zabezpieczeniu pozostałych ścianek, próbki sezonowane były przez tydzień. Na rys. 9 przedstawiono poprawnie przygotowaną próbkę po zakończeniu badania wodoszczelności.



Rys. 9 Próbka po zakończonym badaniu wodoszczelności [zdjęcie własne]

Każdorazowo sezonowanie próbek odbywało się w warunkach znormalizowanych – w temperaturze 22±2°C i względnej wilgotności powietrza 50±5%.

Po wysezonowaniu, próbki zapraw ważono i umieszczano w urządzeniu przeznaczonym zarówno do badania szczelności materiałów przeznaczonych do wykonywania izolacji przeciwwilgociowych zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40], jak i nasiąkliwości betonu zgodnie z DIN 1048:1991 [133]. Schemat badania wodoszczelności zamieszczony w normie PN-EN 14891:2017 [40] przedstawiony został na rys 10.



Rys. 10 Schemat badania wodoszczelności próbki zaprawy uszczelniającej [40]; 1-woda pod ciśnieniem, 2-pierścień uszczelniający, 3-badana zaprawa uszczelniająca, 4-podkład betonowy

Próbki badanej zaprawy uszczelniającej po badaniu wodoszczelności sezonowano przez 28 dni w temperaturze $22 \pm 2^\circ\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza $50 \pm 5\%$. Następnie ważono je i umieszczano w urządzeniu do oznaczania nasiąkliwości. Kostki skierowane były ścianką z badaną zaprawą w dół, gdzie podawana była woda pod ciśnieniem. Zgodnie ze schematem rys. 10, powierzchnia na którą oddziaływała woda, ograniczona była gumową okrągłą uszczelką. Celem zapewnienia szczelności układu, kostki dociśnięte były od góry śrubami dociskowymi. Zdjęcie urządzenia do badania wodoszczelności, przy użyciu którego badane były próbki, zamieszczono na rys. 11.



Rys. 11 Urządzenie do badania szczelności betonu wg DIN 1048:1991 [133] oraz wodoszczelności materiałów uszczelniających wg [40] w trakcie badania analizowanych zapraw [zdjęcie własne]

Woda do próbek włączana była pod stałym ciśnieniem 1,5 bara przez okres 7 dni. Ciśnienie wody regulowane było za pomocą kompresora z ustawionym stałym ciśnieniem wychodzącym. Po zakończeniu badania zamykano zawory każdego stanowiska badawczego, ścierano wilgotną szmatką wodę zgromadzoną na powierzchni próbki, po czym niezwłocznie ważono próbkę, celem oznaczenia przyrostu masy. Miarą wodoszczelności była ilość zaabsorbowanej wody. Zgodnie z normą PN-EN 14891: 2017 [40] zaprawę uznaje się za szczelną, jeżeli ilość zaabsorbowanej wody nie przekracza 20 gramów. Normowy [40] warunek wodoszczelności przedstawia równanie (9):

$$\Delta_M = M_K - M_0 \leq 20 \text{ g} \quad (9)$$

gdzie:

Δ_M – przyrost masy próbki – ilość zaabsorbowanej wody, g

M_K – masa kostki betonowej po zakończeniu działania wodą, g

M_0 – masa kostki betonowej przed rozpoczęciem działania wodą, g

Punktem odniesienia do oceny wpływu wybranych polimerów na wodoprzepuszczalność były zaprawy bez modyfikatorów polimerowych (referencyjne).

Sprawdzano także, czy woda nie przeniknęła do wnętrza kostki betonowej. W przypadku przeniknięcia wody przez spodnią powierzchnię próbki lub pojawienia się śladów wody na niestykających się z nią powierzchniach, badanie jest przerywane, a zaprawę uznaje się za niespełniający wymaganej wodoszczelności.

8.3 Pomiar przyczepności do podłoża

Badania przyczepności zaprawy uszczelniającej do podłoża wykonywano zgodnie z normą PN-EN 14891:2017 [40]. Zakłada ona cztery różniące się między sobą warunkami kondycjonowania próbek badania przyczepności:

- przyczepność początkowa,
- przyczepność pod oddziaływaniem wody,
- przyczepność po starzeniu termicznym,
- przyczepność po cyklach zamrażania-rozmrażania.

W każdym z wymienionych badań próbkę przygotowano zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40]. Zaprawę uszczelniającą, z określonym na podstawie wcześniejszego badania konsystencji dodatkiem superplastyfikatora, mieszano z wodą zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w rozdziale 7 „PRZYGOTOWANIE PRÓBEK”, a następnie наносono przy użyciu pacy zębatej o wymiarach zębów 6 mm x 6 mm i odstępem między ich osiami wynoszącym 12 mm na wyschniętą, wysezonowaną płytę betonową, spełniającą wymagania PN-EN 1323:2008 [134]. Po 5 minutach na kleju układano płytki ceramiczne formatu 50 x 50 mm typu V1 spełniające wymagania normy PN-EN 12004-1:2017-03 [135]. Płytki układano w odległości 50 mm od siebie i każdą z nich obciążano przez 30 s ciężarkiem, wywierającym siłę $20 \pm 0,05$ N. Widok próbki przeznaczonej do badania przyczepności przedstawiono na rys. 12.



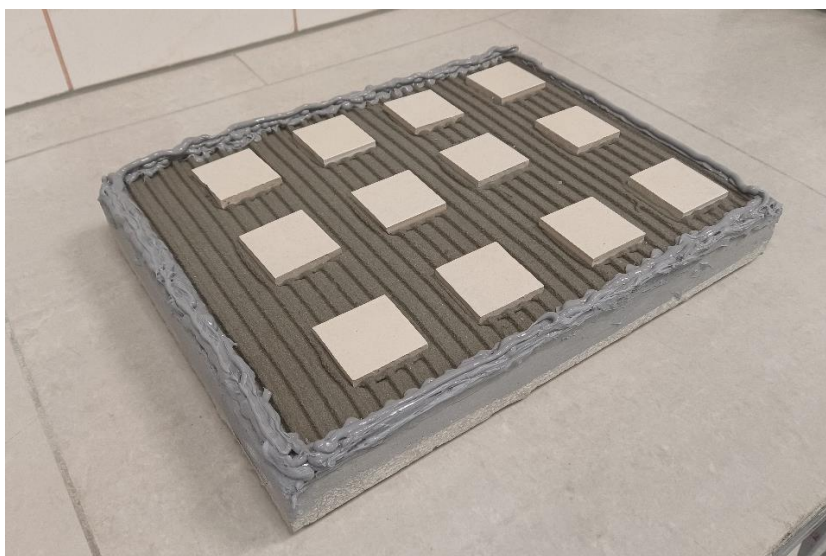
Rys. 12 Próbka zaprawy uszczelniającej przeznaczona do badania przyczepności początkowej zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] [zdjęcie własne]

Przy każdym typie badania przyczepności, przygotowane w taki sposób próbki początkowo, przechowywane były w temperaturze $22 \pm 2^\circ\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza

50±5%. W przypadku badania przyczepności początkowej, w takich warunkach próbkę przechowywano przez okres 28 dni.

Celem oznaczenia przyczepności po starzeniu termicznym, próbka po 14 dniach umieszczana była w suszarce laboratoryjnej z obiegiem powietrza, gdzie utrzymywano stałą temperaturę wynoszącą 70°C.

W przypadku badania przyczepności po zanurzeniu, po obwodzie powierzchni płyty, na którą zaaplikowano badaną zaprawę, wykonywano szczelną ramkę o wysokości ok. 1 cm przy użyciu silikonu budowlanego i po upływie 7 dni od aplikacji płytek, przygotowaną w ten sposób formę zalewano wodą do uzyskania poziomu 6 mm. Gotową, wypełnioną wodą próbkę do badań przedstawiono na rys. 13.



Rys. 13 Próbkę zaprawy uszczelniającej przeznaczoną do badania przyczepności po zanurzeniu w wodzie zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] [zdjęcie własne]

W procedurze badania przyczepności po cyklach mrożenia-rozmrażania, wszystkie ścianki płyty betonowej, włącznie ze spodem, uszczelniano materiałem wodoodpornym. Po 7 dniach kondycjonowania w temperaturze 22±2°C i względnej wilgotności powietrza 50±5%, próbkę zanurzano w wodzie o temperaturze pokojowej na 21 dni. Po tym okresie rozpoczynano 25 cykli. Każdy cykl przebiegał w następujący sposób:

- wyjmowano próbkę z wody i w ciągu 2 h ± 20 min obniżano temperaturę do -15±3°C,
- przetrzymywano próbkę przez 2 h ± 20 min w temperaturze -15±3°C,
- zanurzano próbkę w wodzie o temperaturze 20±3°C, podnoszono temperaturę do 15±3°C i utrzymywano ją przez 2 h ± 20 min.

Po ostatnim cyklu wycierano powierzchnie płytek i przymocowywano do nich uchwyty do rozciągania przy użyciu epoksydowego kleju dwuskładnikowego, którego wytrzymałość była wyższa od zakładanej przyczepności analizowanych zapraw.

W przypadku pozostałych badań, uchwyty przymocowywano po upływie 27 dni od nałożenia zaprawy. Następnego dnia wzdłuż obwodu każdej płytki nacinano powierzchnię płyty betonowej i oznaczano przyczepność przy użyciu aparatu typu pull-off, przykładając siłę zrywającą ze stałą prędkością 250 ± 50 N/s. Przyczepność jest określona jako siła zrywająca odniesiona do powierzchni styku próbki z podłożem. Normowy [40] warunek przyczepności przedstawia równanie (10):

$$S = \frac{L}{A} \geq 0,5 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

gdzie:

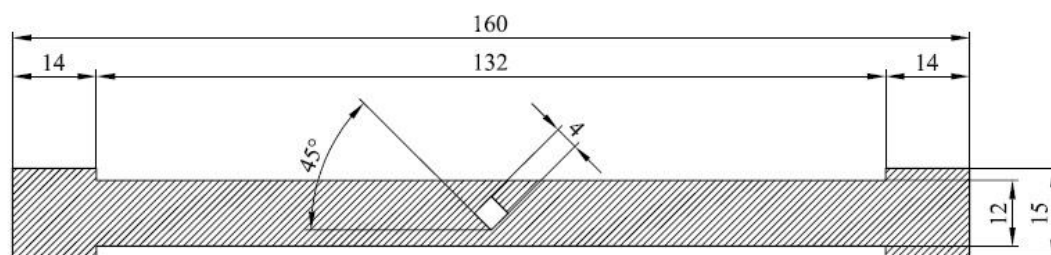
S – przyczepność próbki do podłoża, N/mm^2

L – całkowite obciążenie - siła przy której nastąpiło oderwanie próbki od podłoża, N

A – powierzchnia styku próbki z podłożem, mm^2

8.4 Badanie zdolności do mostkowania pęknięć

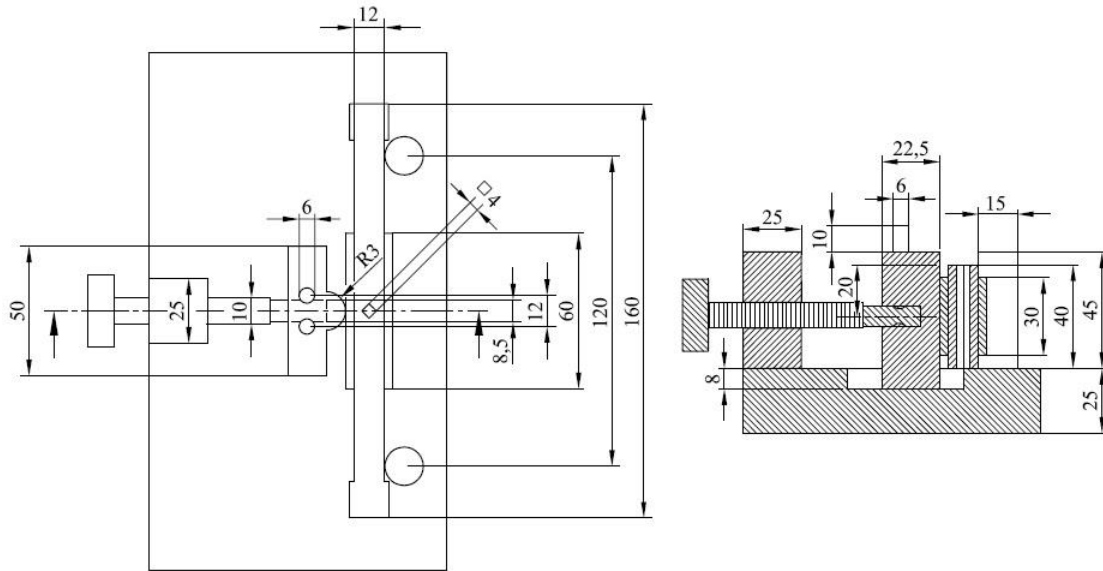
Badanie zdolności zaprawy do mostkowania spękań przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 14891:2017 [40]. Analizowaną zaprawę uszczelniającą badano na beleczkach z kwadratowym otworem, wykonanych z zaprawy cementowej. Wymiary beleczek oraz skład zaprawy cementowej określono w normie. Na rys. 14 przedstawiono zamieszczoną w normie PN-EN 14891:2017 [40] widok próbki do badania zdolności do mostkowania rys.



Rys. 14 Próbka do badania zdolności do mostkowania pęknięć [40]

Po zakończeniu sezonowania próbek zaprawy w wodzie przez okres 28 dni, próbkę wyjmowano z wody i przez 24 h przechowywano w temperaturze 20°C . Po tym okresie, na przeciwległe powierzchnie próbki, наносzono wymieszaną z wodą badaną zaprawę uszczelniającą przy użyciu odpowiedniego szablonu w dwóch warstwach o grubości 2 mm każda. Tak przygotowywaną próbkę sezonowano przez 28 dni w temperaturze $22 \pm 2^\circ\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza wynoszącej $50 \pm 5\%$.

Następnie beleczkę łamano przy użyciu odpowiedniego uchwytu mocującego, umożliwiającego złamanie próbki bez uszkodzenia warstwy badanej zaprawy uszczelniającej. Próbkę umieszczano w uchwycie i dokręcano śrubę do momentu pojawienia się pęknięcia w pobliżu kwadratowego otworu. Na rys. 15 przedstawiono schemat zamieszczony w normie PN-EN 14891:2017 [40] schemat uchwytu mocującego.



Rys. 15 Schemat uchwytu mocującego do badania zdolności do mostkowania pęknięć [40]

Mostkowanie pęknięć określano z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej, przy prędkości przesuwu wynoszącej 0,15 mm/min. Do umieszczonej w zacisku próbki przykładano obciążenie wstępne rozciągające o sile 20 N, ustawiano wydłużenie w pozycji zerowej, a następnie rozpoczynano właściwe badanie przy prędkości przesuwu wynoszącej 0,15 mm/min. Rys. 16 przedstawia próbkę zaprawy podczas trwania badania mostkowania pęknięć.



Rys. 16 Próbka zaprawy podczas badania zdolności do mostkowania pęknięć na maszynie wytrzymałościowej [zdjęcie własne]

Badanie kończyło się wraz z pojawieniem się pierwszego widocznego uszkodzenia na powierzchni badanej zaprawy uszczelniającej. Zaprawa uszczelniająca spełniała [40] wymaganie zdolności do mostkowania pęknięć podłoża, jeśli odczytana wartość była nie mniejsza niż 0,75 mm.

8.5 Badanie mikrostruktury

Ocenę wpływu dodatków na mikrostrukturę stwardniałych zapraw prowadzono na próbkach otrzymanych z receptur zamieszczonych w tabeli 7. Zaprawa aplikowana była na podłoże betonowe w 2 warstwach o grubości 2 mm – druga warstwa nakładana była 24 h po aplikacji pierwszej.

Próbki sezonowano przez 28 dni w temperaturze 22°C w szczelnym pojemniku, który miał za zadanie ochronę zapraw przez karbonatyzacją. Następnie próbki odrywane były od podłoża za pomocą piły wolnoobrotowej i skalpela w taki sposób, by nie uszkodzić struktury zaprawy. Próbki do badań pobierano z powierzchni wewnętrznej części zaprawy oraz z granicy zaprawa-podłoże.

Badania porównawcze mikrostruktury analizowanych zapraw przeprowadzono wykorzystując technikę mikroskopii elektronowej SEM Phenom ProX (Phenom World) z mikroanalizatorem EDS (napięcie 10 kV). Obserwacje prowadzono po wysuszeniu próbek

zapraw do stałej masy. Następnie pokrywano je cienką warstwą złota metodą napyłania jonowego. Obserwację prowadzono przy powiększeniu 2250x. Przeanalizowano rozkład atomów Si, C, Ca i Al. Obecność węgla w zaprawie powiązano z rozmieszczeniem modyfikatora polimerowego o charakterze organicznym.

8.6 Badanie porowatości

Porowatość analizowanych próbek określano na stwardniałych zaprawach aplikowanych na cienkim podłożu (o grubości ok. 2 cm) o niskiej nasiąkliwości w 2 warstwach grubości 2 mm każda. Druga warstwa nakładana była 24 h po położeniu pierwszej. Tak przygotowane próbki przechowywano przez 28 dni w temperaturze $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza 55%.

Następnie pobierano próbkę zaprawy z podłoża za pomocą piły wolnoobrotowej i skalpela w taki sposób, by nie uszkodzić struktury zaprawy. Porowatość określano jedynie na powierzchni próbki, gdyż jedynie pory na powierzchni można powiązać ze szczelnością próbek, ponieważ jak wspomniano w rozdziale 4.3 „Mechanizm zawilgacania murów”, za szczelność odpowiedzialne są pory przelotowe. Tylko one w wyniku oddziaływania sił kapilarnych stwarzają możliwość przedostawania się wody w głąb wytworzonej powłoki. W porównaniu do innych metod określania porowatości takich jak porozymetria rtęciowa, zastosowana metoda jest mało inwazyjna, gdyż nie generuje naprężeń rozciągających w mikrostrukturze zaprawy. Przedstawiona metodyka pozwala bardzo dokładnie ocenić rzeczywisty rozkład porów powierzchniowych.

Porowatość powierzchniową zaprawy ustalano przy użyciu mikroskopu skaningowego Phenom ProX. Na podstawie 9 różnych zdjęć, niepokrywających się fragmentów powierzchni próbki wykonanych w niewielkim powiększeniu 300x przy optymalnym skupieniu i kontraście, urządzenie obliczało łączną powierzchnię porów próbki. Pory analizowano dwustopniowo. W pierwszej kolejności wykonywano zdjęcie mikroskopowe powierzchni, a następnie otrzymany obraz poddawano obróbce wykorzystując do tego celu oprogramowanie PoroMetric z pakietu Phenom Pro G6 Desktop SEM. W wyniku obróbki numerycznej uzyskano obraz powierzchni, na którym pory zaznaczane były w kolorze. Przez porównanie uzyskanego obrazu ze zdjęciem powierzchni możliwe było wyeliminowanie obszarów błędnie zinterpretowanych przez program jako pory.

8.7 Badanie porowatości po kondycjonowaniu w komorze starzeniowej

Do oceny trwałości zapraw wykorzystano komorę starzeniową, symulującą niekorzystne warunki atmosferyczne, jakim w warunkach rzeczywistych może być poddana zaprawa

uszczelniająca. Z uwagi na fakt oddziaływania w komorze przede wszystkim na zewnętrzną powierzchnię próbek, za kryterium szczelności obrano zmianę powierzchni zewnętrznej próbek wskutek starzenia, którą najlepiej opisuje badanie powierzchniowej porowatości zaprawy.

Celem porównania wyników z badaniami porowatości powierzchniowej, próbki zapraw do badania przygotowywane były na identycznym, nisko nasiąkliwym podłożu, na które aplikowano 2 warstwy zaprawy o grubości 2 mm każda.

W przypadku badania porowatości po dojrzewaniu w komorze starzeniowej, po tygodniu przechowywania w warunkach $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza 55%, próbki umieszczano w komorze do przyspieszonych badań starzeniowych Q-Lab QUV. W urządzeniu próbki badanych zapraw poddano naprzemiennemu działaniu wysokiej temperatury i deszczu zgodnie z wymaganiami normy EN-12467+A2:2018-06 [136], która zakłada 25- lub 50-krotne powtórzenie cykli oddziaływania. Celem możliwie jak najdokładniejszego odwzorowania długiego oddziaływania niekorzystnych zmiennych warunków atmosferycznych, w przypadku badanych próbek zapraw uszczelniających, maszynę zaprogramowano na 165 cykli trwających łącznie 1000 godzin. Przebieg każdego cyklu był zgodny z wymaganiami normy EN-12467+A2:2018-06 [136]. Dokładny program badań starzeniowych przedstawiony został w tabeli 9.

Tabela 9. Program badania próbek zapraw w komorze do przyspieszonych badań starzeniowych zgodny z normą EN-12467+A2:2018-06 [136]

Cykl	Czas trwania
Natrysk wodą	2 h 50 min \pm 5 min
Przerwa	10 min \pm 1 min
Promieniowanie ciepłe do 60°C	2 h 50 min \pm 5 min
Przerwa	10 min \pm 1 min
Łączny czas trwania cyklu	6 h \pm 12 min
Liczba powtórzeń	165 razy

Na rys. 17 przedstawiono komorę do przyspieszonych badań starzeniowych wykorzystaną do określenia trwałości zaprawy wraz z częścią próbek zapraw uszczelniających poddanych badaniom.



Rys. 17 Komora do przyspieszonych badań starzeniowych Q-Lab QUV, przy użyciu której oceniano trwałość zaprawy poprzez określenie zmiany porowatości powierzchniowej próbek po cyklach starzenia [zdjęcie własne]

Po zakończeniu starzenia, próbki osuszano do stałej masy, po czym poddawano je badaniu porowatości powierzchniowej.

Porowatość po kondycjonowaniu w maszynie starzeniowej określano przy użyciu oprogramowania PoroMetric, obliczającego powierzchnię porów na obrazie zdjęć mikroskopowych wykonanych przy użyciu mikroskopu skaningowego Phenom ProX. Analizowano 9 różnych zdjęć, niepokrywających się fragmentów powierzchni próbki zaprawy wykonanych przy takim samym powiększeniu 300x i przy identycznym skupieniu i kontraście.

8.8 Pomiar odkształcalności poprzecznej

Elastyczność stwardniałej zaprawy uszczelniającej oznaczano zgodnie z normą PN-EN 12004-2:2017-03 [137]. W tym celu próbka zaprawy poddawana była trójpunktowemu obciążeniu zginającemu.

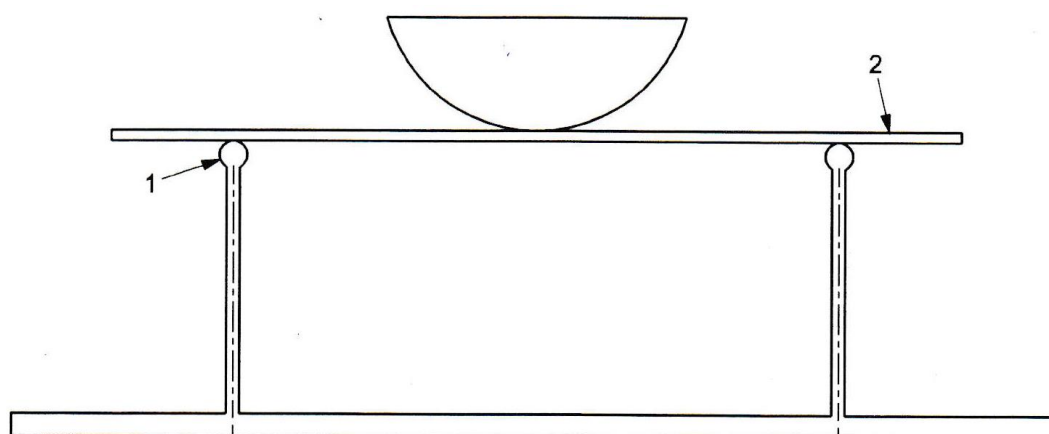
Zaprawa wymieszana z wodą zgodnie z wytycznymi z rozdziału 7 „PRZYGOTOWANIE PRÓBEK” aplikowana była na folię polietylenową umieszczoną na sztywnym podkładzie, na który dociskany był szablon o prostokątnym otworze o wymiarach 45 ± 1 x 280 ± 1 mm

i grubości $5\pm 0,1$ mm. Po wypełnieniu otworu próbką zaprawy zagęszczano ją poprzez wykonanie 70 wstrząsów, a następnie delikatnie usuwano szablony. Następnie próbkę umieszczano, pod pokrytym środkiem antyadhezyjnym, szablonem z otworem o wymiarach $300\pm 1 \times 45\pm 1$ mm i grubości $3\pm 0,05$ mm. Szablon obciążano obciążnikiem wywierającym siłę $100\pm 0,1$ N, co zapewniało całkowite wypełnienie szablonu do wymaganej grubości. Po godzinie usuwano obciążnik, a nadmiar zaprawy usuwano z boku szablonu.

Po 48 h usuwano szablony, a próbka zaprawy dojrzewała w pojemniku z tworzywa sztucznego przez 12 dni w temperaturze $22\pm 2^\circ\text{C}$. Następnie wyjmowano ją i przetrzymywano w laboratorium w temperaturze $22\pm 2^\circ\text{C}$ i względnej wilgotności powietrza 55% przez kolejne 14 dni. Po tym czasie próbkę zaprawy zdejmowano z folii i w przypadku wystąpienia ostrych, pozadzieranych nierównych krawędzi, delikatnie przecierano je papierem ściernym o ziarnistości P120 celem uzyskania równej powierzchni.

Następnie przy użyciu suwmiarki mierzono grubość próbki z dokładnością do 0,01 mm w trzech miejscach: na środku i w odległości 50 ± 1 mm od każdego końca. Na tej podstawie oznaczano średnią grubość i odrzucano każdą próbkę niespełniającą dopuszczalnej grubości, wynoszącej $3,0\pm 0,1$ mm.

Tak przygotowaną próbkę umieszczano w prasie do badania odkształcenia poprzecznego na dwóch metalowych podpórkach cylindrycznych o średnicy $10\pm 0,1$ mm i rozstawie między osiami wynoszącym 200 ± 1 mm. Obciążenie poprzeczne przykładane było przez półkolistą kształtkę dociskową o promieniu 50 ± 1 mm, szerokości 97 ± 1 mm, i głębokości 60 ± 1 mm. Była ona zatem szersza od szerokości badanej próbki. Schemat zginania próbki przedstawiono na rys. 18.



Rys. 18 Schemat trójpunktowego zginania próbki celem określenia odkształcalności poprzecznej zaprawy, 1 – cylindryczna podpórka o średnicy $10\pm 0,1$ mm; 2 – próbka o grubości $3,0\pm 0,1$ mm [137]

Po umieszczeniu próbki zaprawy na podpórkach obniżano kształtkę dociskową. Za punkt początkowy przyjmowano moment styku kształtki dociskowej z powierzchnią próbki. Odształcanie następowało z prędkością 2 mm/min do momentu uszkodzenia próbki. Zakres maszyny pomiarowej wynosił 16÷17 mm.

Po uszkodzeniu próbki odczytywano wielkość odształcenia od punktu początkowego z dokładnością do 0,1 mm, będącą wynikiem badania elastyczności próbki [137].

9 WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Głównym celem pracy było opracowanie receptury uniwersalnej jednokomponentowej cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej z wykorzystaniem dodatków mineralnych pochodzących z recyklingu. Zakres badań podzielony został na 2 etapy.

W pierwszym etapie opracowano recepturę zaprawy wzorcowej poprzez dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego. Recepturę opracowano głównie w oparciu o badania wpływu modyfikatorów polimerowych na podstawowe właściwości zapraw uszczelniających takie jak wodoszczelność, przyczepności do podłoża po normowych warunkach sezonowania (przyczepność początkowa, po zanurzeniu, po starzeniu termicznym i po cyklach zamrażania-rozmrażania), a także zdolność do mostkowania pęknięć podłoża.

W drugim etapie badań recepturę bazową zaprawy uszczelniającej modyfikowano poprzez stosowanie dodatków mineralnych. Sprawdzano wpływ częściowej zamiany cementu portlandzkiego CEM przez dodatki mineralne na szereg istotnych właściwości. Oprócz wodoszczelności, przyczepności i mostkowania pęknięć, sprawdzano również wpływ dodatków mineralnych na konsystencję, porowatość, trwałość i elastyczność.

9.1.1 Dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego

Dobór modyfikatora polimerowego, zarówno jakościowy, jak i ilościowy, przeprowadzono w oparciu o wiedzę projektanta, wcześniejsze doświadczenia praktyczne oraz badania rozpoznawcze.

Badania podzielono na następujące etapy główne, obejmujące określenie wpływu modyfikatorów polimerowych na:

1. konsystencję zaprawy – wyznaczenie udziału superplastyfikatora dla każdej badanej zaprawy, celem zachowania stałej konsystencji przy stałym udziale wody zarobowej,
2. wodoszczelność zaprawy,
3. przyczepności zaprawy do podłoża po różnych cyklach sezonowania,
4. zdolność do mostkowania rys podłoża,
5. mikrostrukturę zaprawy.

Kluczowe było przeprowadzenie badań wyjaśniających wpływ modyfikatorów polimerowych na właściwości zapraw uszczelniających po stwardnieniu. W tym celu przeprowadzono badania szczelności i przyczepności do podłoża zapraw z różnym udziałem wybranych polimerów, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 14891:2017 [40]. Na podstawie uzyskanych wyników określono optymalny udział masowy modyfikatorów polimerowych,

przy którym przeprowadzono dodatkowo badanie zdolności do mostkowania pęknięć również w oparciu o normę PN-EN 14891:2017 [40].

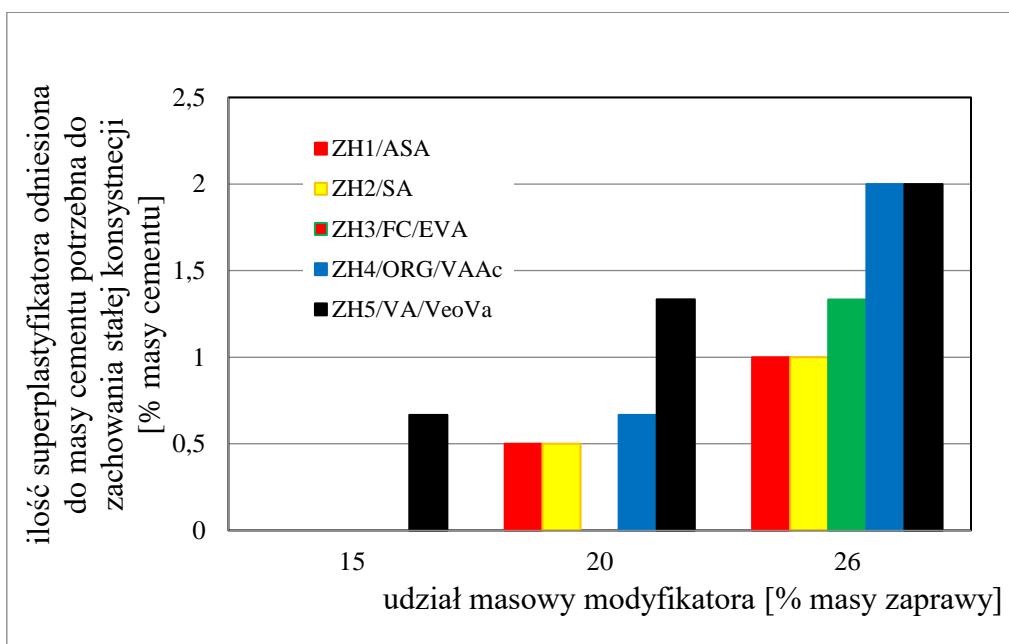
Na przykładzie modyfikatora o najmniej korzystnych właściwościach uszczelniających przedstawiono wpływ jednoczesnej zmiany udziału polimeru i cementu na szczelność oraz przyczepność do podłoża. Na tej podstawie sprawdzono poprawność przyjętego w założeniach udziału masowego cementu w składzie zaprawy uszczelniającej.

Badania nad doбором odpowiedniego modyfikatora prowadzono na recepturze bazowej, której uogólniony skład zamieszczony został w tabeli 7. Przedstawione w rozdziale wyniki zostały opublikowane w artykule [4].

9.1.2 Wpływ modyfikatora polimerowego na konsystencję zaprawy

Z uwagi na różną wodożądność stosowanych proszków polimerowych oraz różną ilość wodnej dyspersji polimerowej potrzebnej do uzyskania określonej zawartości polimeru (w przeliczeniu na stałą masę), celem zachowania stałości konsystencji i stałej ilości wody zarobowej, właściwości robocze (konsystencję) zaprawy regulowano przy użyciu superplastyfikatora.

Na rys. 19 przedstawiono w jaki sposób wraz ze zmianą udziału poszczególnych modyfikatorów polimerowych, zmieniała się ilość superplastyfikatora potrzebna do uzyskania stałej konsystencji w ustalonym zakresie 120÷130 mm, przy stałym stosunku wodno-cementowym wynoszącym 1,87. Ilość superplastyfikatora na wykresie odniesiona była do masy cementu.



Rys. 19 Ilość superplastyfikatora odniesiona do masy cementu potrzebna do uzyskania stałej konsystencji (120÷130 mm) wraz ze zmianą rodzaju i udziału modyfikatora polimerowego, gdzie: ZH1/ASA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy; ZH2/SA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy; ZH3/CF/EVA – EVA kopolimer etylenu i octanu winylu; ZH4/ORG/VAAc – VAAc kopolimer octanu winylu i akrylu; ZH5/VA/VeoVa – VeoVa kopolimer octanu winylu i wersenianu winylu

Jak przedstawiono na rys. 19, w przypadku zapraw, w których udział modyfikatorów w postaci płynnej dyspersji polimerowej wynosił 15% masowych, do uzyskania wymaganej konsystencji nie było konieczności stosowania superplastyfikatora. Wraz ze zwiększaniem udziału polimeru do 26% masy zaprawy zwiększało się zapotrzebowanie na ilość superplastyfikatora. W przypadku obu modyfikatorów w postaci płynnej, największa ilość superplastyfikatora wymagana dla zapraw o udziale masowym polimeru, wynoszącym 26% wynosiła 1% masy cementu. Wpływ modyfikatorów polimerowych w postaci płynnej na konsystencję był mniejszy niż w przypadku proszków redyspergowalnych.

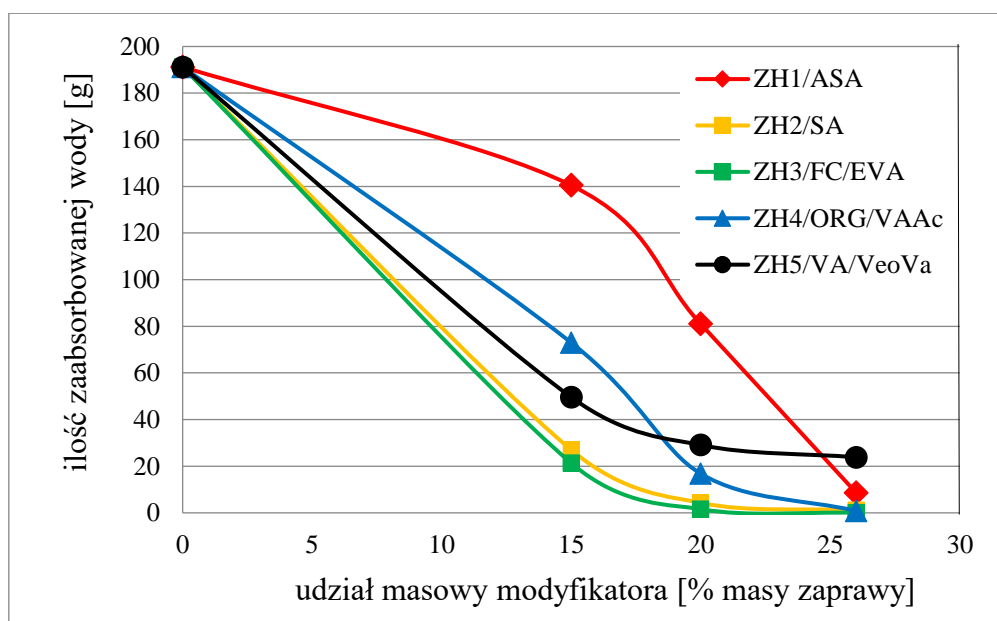
Identyczna tendencja wzrostu zapotrzebowania na superplastyfikator wraz ze zwiększaniem udziału polimeru występowała w przypadku proszków redyspergowalnych. Zarówno dla udziału modyfikatora wynoszącego 15%, 20% jak i 26% masowych, najwyższe zapotrzebowanie na superplastyfikator występowało w przypadku modyfikatora ZH5/VA/VeoVa. W przypadku zapraw zawierających 15% masowych polimeru, jedynie w jego przypadku zachodziła konieczność stosowania superplastyfikatora celem zachowania wymaganych właściwości roboczych. Dla zaprawy zawierającej 26% masowych polimeru ZH5/VA/VeoVa, wymagany udział superplastyfikatora wynosił 2% masy cementu – taki sam jak dla zaprawy z proszkiem redyspergowalnym ZH4/ORG/VAAc.

Spośród proszkowych modyfikatorów polimerowych najmniejsze zapotrzebowanie na wodę zarobową wykazywał proszek redyspersyjny ZH3/FC/EVA, który jedynie w przypadku zaprawy zawierającej 26% modyfikatora polimerowego wymagał stosowania superplastyfikatora w ilości 1,33% masy cementu.

Przedstawione na rys. 19 wymagane ilości superplastyfikatora zostały wprowadzone do receptur każdej z zapraw tak, by dalsze badania mające na celu wybór odpowiedniego modyfikatora polimerowego prowadzono na zaprawach o stałej konsystencji i stałym stosunku w/c.

9.1.3 Wpływ modyfikatora polimerowego na szczelność zaprawy

Wyniki badań wodoszczelności zaprawy uszczelniającej wyrażonej jako przyrost masy zaprawy po 7 dniach wtłaczania wody pod ciśnieniem 1,5 MPa wraz ze zmianą udziału i rodzaju modyfikatora polimerowego przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20 Zależność szczelności wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody od udziału masowego modyfikatora polimerowego

Analizując wyniki przedstawione na rys. 20 zauważyć można, że zaprawa bez modyfikatora polimerowego charakteryzowała się najwyższą przepuszczalnością wody – ilość zaabsorbowanej wody wyniosła 190 g.

Największą szczelnością charakteryzowały się zaprawy z użyciem modyfikatora ZH3/CF/EVA. W tym przypadku, już przy 15% masowych modyfikatora, ilość zaabsorbowanej wody wynosiła graniczną dopuszczalną normowo masę 20 g. Zwiększenie udziału masowego proszku redyspersyjnego do 20% pozwoliło obniżyć masę zaabsorbowanej wody do 1,6 g.

Dalszy wzrost zawartości modyfikatora nie wywierał już znacznego wpływu na wodoprzepuszczalność – uzyskiwane wartości oscylowały w granicach błędu pomiarowego.

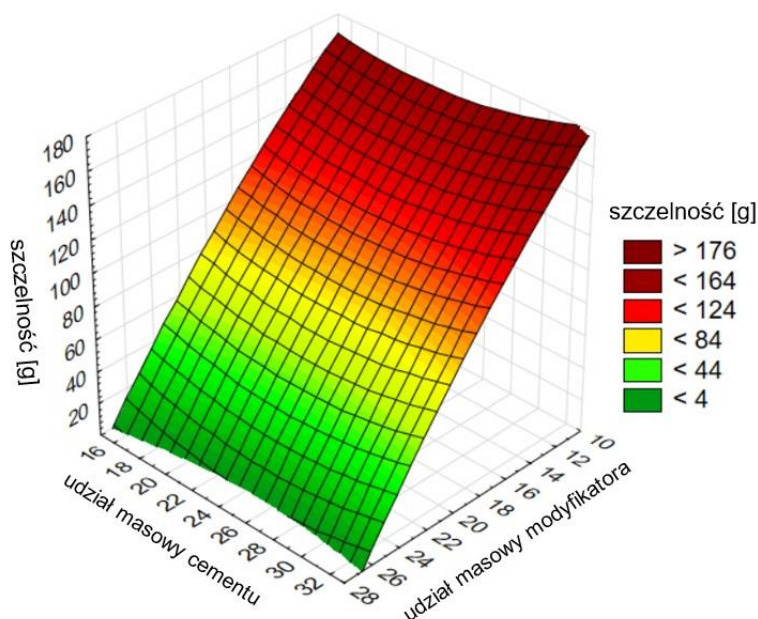
Drugi najlepszy wynik szczelności uzyskały zaprawy z modyfikatorem ZH2/SA w postaci wodnej dyspersji. Zaprawa zawierająca 15% masowych charakteryzowała się nieco większym przyrostem masy po oddziaływaniu wodą, wynoszącym 27 g. Zaprawy z większym udziałem tego modyfikatora z dużym zapasem spełniały normowe wymagania dotyczące przepuszczalności wody i osiągały wyniki zbliżone do wyników zapraw modyfikowanych proszkiem redyspergowalnym ZH3/FC/EVA.

Dla zapraw modyfikowanych proszkiem redyspergowalnym ZH4/ORG/VAAc w ilości 15% masy zaprawy, przyrost masy wskutek oddziaływania wodą wynosił 72 g i był niemal 2,5 razy wyższy niż w przypadku zaprawy zawierającej taką samą ilość modyfikatora polimerowego ZH3/CF/EVA. W przypadku modyfikatora ZH4/ORG/VAAc wymaganą normowo szczelność zaprawy otrzymano przy zawartości polimeru wynoszącej 20% masy zaprawy – ilość zaabsorbowanej wody wyniosła 16,8 g.

Analizując wyniki badań wodoprzepuszczalności z użyciem proszku redyspergowalnego ZH5/VA/VeoVa z grupami VeoVa, należy stwierdzić, że w porównaniu do polimeru ZH3/CF/EVA jego skuteczność jest niższa. Przy udziale masowym modyfikatora ZH5/VA/VeoVa polimerowego wynoszącym 15%, absorpcja wody wynosiła 45 g, a przy 20% masowych obniżyła się do 30 g. Dalszy wzrost zawartości tego polimeru w niewielkim stopniu wpływał na zmianę szczelności. Reasumując, należy stwierdzić, iż przy zastosowaniu proszku redyspergowalnego ZH5/VA/VeoVa nie uzyskano zaprawy, którą zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 14891:2017 [40] można byłoby zaklasyfikować jako szczelną.

Wyraźnie odmienne wyniki uzyskano dla modyfikatora polimerowego ZH1/ASA stosowanego w postaci wodnej dyspersji. Na rys. 20 można zauważyć, że jego pozytywny wpływ na wodoszczelność jest wyraźny dopiero przy zawartości polimeru wynoszącej 26% masy zaprawy – przy mniejszym udziale masowym modyfikatora, zaprawa znacznie przekraczała wymaganą normowo maksymalną ilość zaabsorbowanej wody [4].

W przypadku modyfikatora ZH1/ASA o najmniej korzystnym wpływie na wodoszczelność wykonano badanie wpływu większych jego ilości na wynoszących: 20%, 26% i 33% i przy zwiększonych zawartościach cementu. Wyniki przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rys. 21.



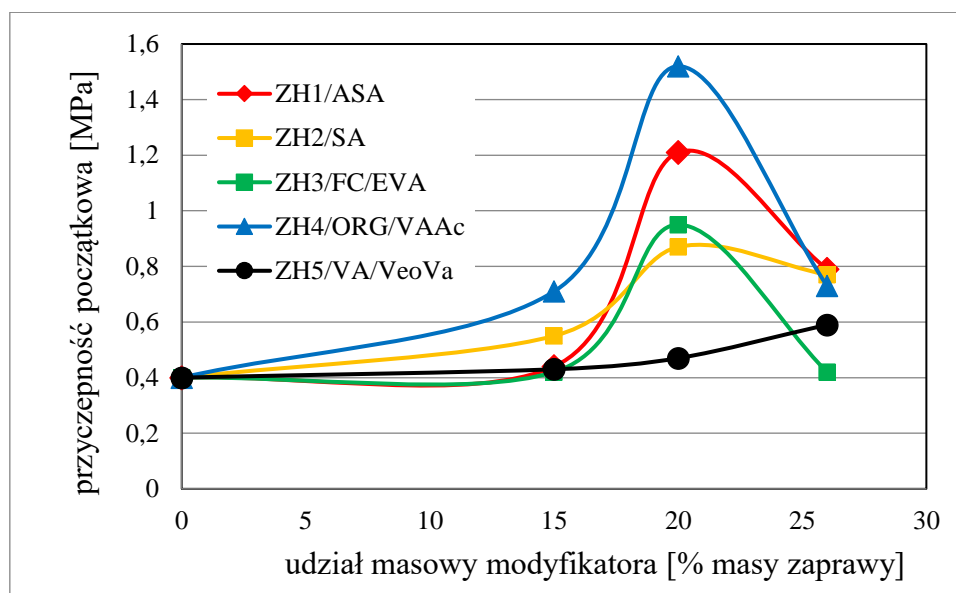
Rys. 21 Wpływ jednoczesnej zmiany ilości modyfikatora polimerowego i cementu na wodoszczelność zaprawy uszczelniającej wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody na przykładzie polimeru ZHI/ASA

Analizując wyniki badań przedstawione na rys. 21, nie stwierdzono jednoznacznego wpływu ilości cementu na ilość zaadsorbowanej wody. O ile występowała wyraźna różnica w wodoprzepuszczalności zapraw zawierających cement w ilości 26 i 33% masowych, to wodoszczelność zapraw zawierających cement w udziale masowym wynoszącym 15% i 20% była również wysoka i mieściła się w porównywalnym zakresie.

9.1.4 Wpływ rodzaju modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy

9.1.4.1 Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność początkową zaprawy

Na rys. 22 przedstawiono wyniki badań przyczepności początkowej zapraw do podłoża betonowego wraz ze zmianą udziału i rodzaju modyfikatora polimerowego.



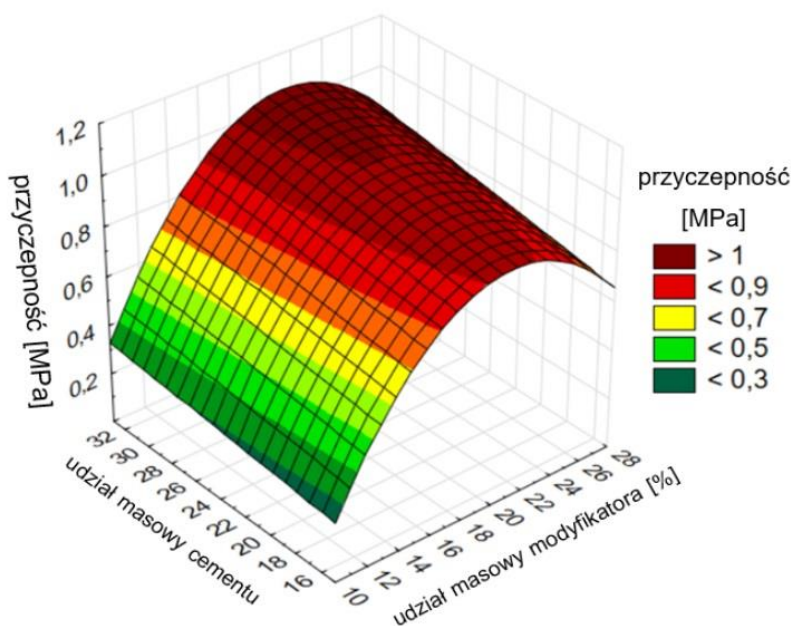
Rys. 22 Zależność przyczepności początkowej zaprawy uszczelniającej do podłoża betonowego od udziału masowego modyfikatora polimerowego

Zaprawa bez modyfikatora polimerowego charakteryzowała się niską przyczepnością do matrycy betonowej wynoszącą zaledwie 0,4 MPa. Analizując wyniki przedstawione na rys. 20, można stwierdzić, że dodatek polimeru przy zawartości masowej wynoszącej 15% w niewielkim stopniu wpływał na przyczepność zapraw. Wyraźny wzrost przyczepności zaobserwowano dopiero przy udziale masowym modyfikatora polimerowego wynoszącym 20%. W przypadku polimerów ZH1/ASA, ZH2/SA, ZH3/CF/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc można wyznaczyć graniczną zawartość modyfikatora, przy której przyczepność jest najwyższa. Wynosiła ona 20% masy zaprawy. Po przekroczeniu tej ilości przyczepność ponownie maleje.

Najmniejszy wpływ na przyczepność początkową wywierał proszek redyspersyjny ZH5/VA/VeoVa. Największy, pozytywny wpływ na poprawę przyczepności zaprawy miały natomiast modyfikatory polimerowe ZH4/ORG/VAAc oraz ZH1/ASA. Przy ich udziale masowym wynoszącym 20% przyczepność do podłoża betonowego znacznie przekraczała 1 MPa. W przypadku zaprawy, której 20% masy stanowił modyfikator polimerowy ZH3/CF/EVA, przyczepność była zbliżona do 1 MPa. Zwiększenie udziału masowego modyfikatorów ZH1/ASA, ZH3/CF/EVA i ZH4/ORG/VAAc do 26% skutkowało obniżeniem przyczepności. Najmniejszy spadek przyczepności przy zwiększeniu udziału modyfikatora do najwyższej sprawdzanej zawartości odnotowano w przypadku wodnej dyspersji ZH2/SA (rys. 22) [4].

Działanie polimeru ZH5/VA/VeoVa było odmienne. Wraz ze wzrostem ilości modyfikatora, przyczepność zaprawy równomiernie wzrastała. Przy zawartości 20% była ona znacznie mniejsza niż w przypadku pozostałych polimerów. Przy udziale modyfikatora wynoszącym 26%, przyczepność osiągnęła tylko 0,60 MPa.

Na rys. 23 przedstawiony został wpływ jednoczesnej zmiany ilości modyfikatora polimerowego ZH1/ASA i cementu CEM I 42,5 R na przyczepność początkową zaprawy.

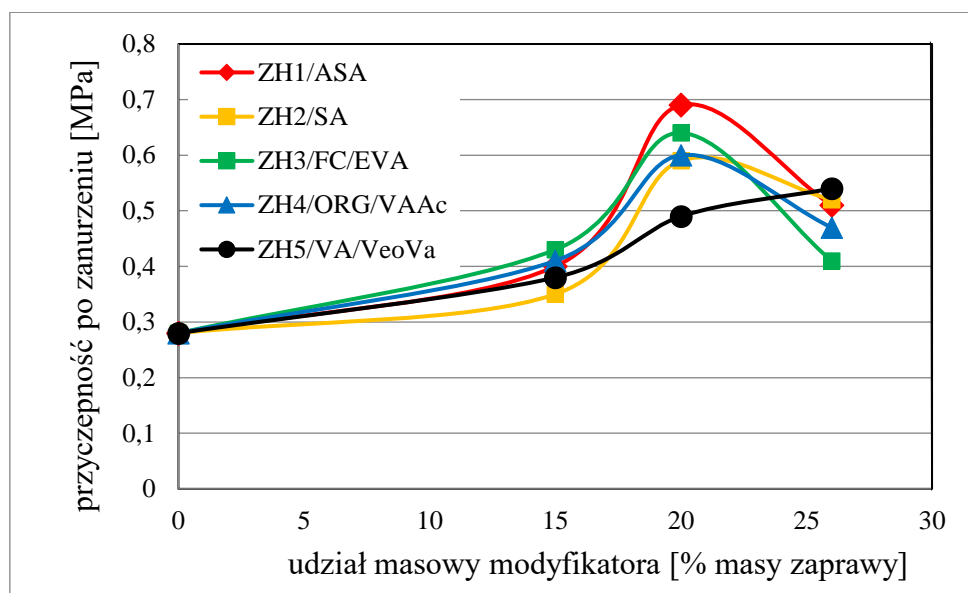


Rys. 23 Wpływ jednoczesnej zmiany ilości modyfikatora polimerowego i cementu na przyczepność początkową zaprawy uszczelniającej na przykładzie polimeru ZH1/ASA

Z wyników przedstawionych w formie graficznej na rys. 23 wynika, że w analizowanym zakresie zmian tych składników, zwiększenie ilości cementu przyczyniło się do poprawy przyczepności zapraw uszczelniających, jednakże zdecydowanie większy wpływ na przyczepność do podłoża wywiera modyfikator polimerowy. Na podstawie tego badania oraz analizy jednoczesnego wpływu zmiany ilości modyfikatora polimerowego i cementu na wodoszczelność (rys. 21) ostatecznie zatwierdzono udział masowy cementu w zaprawie uszczelniającej, wynoszący 15%. Wszystkie dalsze badania prowadzone były przy tym udziale cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R.

9.1.4.2 Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po zanurzeniu

Niezwykle istotnym badaniem w aspekcie zastosowania zapraw do tworzenia hydroizolacji jest ocena ich przyczepności do podłoża betonowego po kondycjonowaniu (dojrzewaniu) w wodzie. Na rys. 24 przedstawiono wyniki badań przyczepności po zanurzeniu w wodzie zapraw wraz ze zmianą udziału i rodzaju modyfikatora polimerowego.



Rys. 24 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po zanurzeniu od udziału masowego modyfikatora polimerowego

Zaprawa bez modyfikatora polimerowego charakteryzowała się niską przyczepnością po zanurzeniu w wodzie do matrycy betonowej – wyniosła ona zaledwie 0,28 MPa. Jak przedstawiono na rys. 24, każda zaprawa z modyfikatorem polimerowym wykazywała się wyraźnie większą przyczepnością od zaprawy referencyjnej. Zaprawa z 20% masowymi modyfikatora ZH1/ASA charakteryzowała się najwyższą przyczepnością wynoszącą 0,69 MPa. Drugi najlepszy wynik przyczepności po zanurzeniu osiągnęła próbka zaprawy zawierająca 20% masowych polimeru ZH3/FC/EVA – 0,64 MPa.

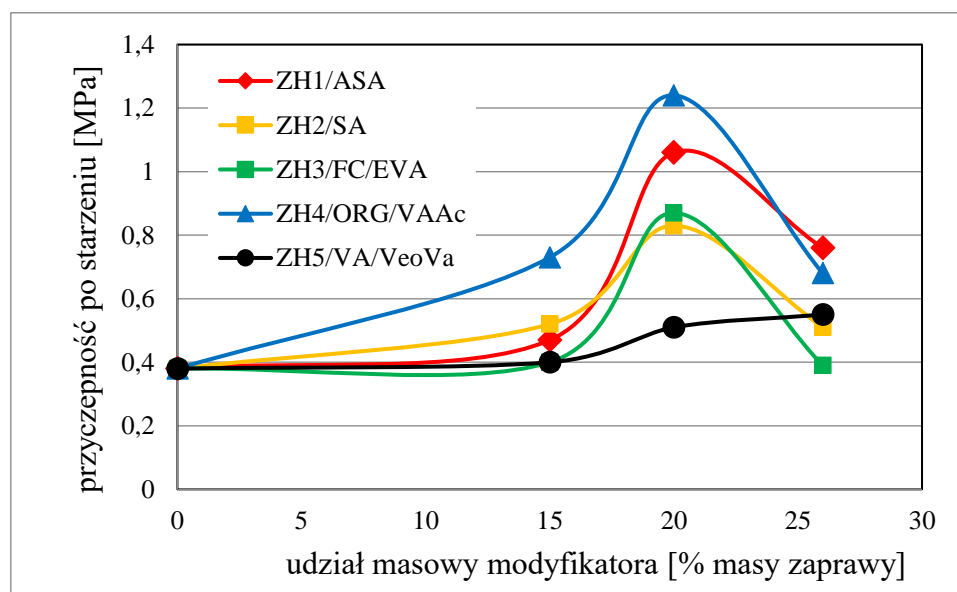
Dla modyfikatorów ZH1/ASA, ZH2/SA, ZH3/CF/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc wyraźnie zauważalne jest maksimum przyczepności przy 20% udziale w składzie zaprawy. Wraz z dalszym zwiększaniem udziału tych polimerów, przyczepność po zanurzeniu ponownie spadała. Największy spadek przyczepności odnotowano w przypadku 26% udziału modyfikatora ZH3/FC/EVA – przyczepność wynosiła ona jedynie 0,41 MPa (rys. 24).

Podobnie jak przy badaniu przyczepności początkowej, w całym analizowanym przedziale wraz ze zwiększaniem udziału modyfikatora ZH5/VA/VeoVa przyczepność po zanurzeniu rosła – przy 20% udziale wynosiła 0,49 MPa i była ona niższa niż dla pozostałych polimerów, lecz przy 26% udziale przyczepność zaprawy była najwyższą spośród wszystkich modyfikatorów i wynosiła 0,54 MPa. Dla tego modyfikatora odnotowano także najmniejsze różnice w porównaniu z wynikami przyczepności początkowej. W tym aspekcie największą podatnością na działanie wody charakteryzowała się zaprawa modyfikowana polimerem

ZH4/ORG/VAAc – jej przyczepność po zanurzeniu była ok. 2 razy niższa od przyczepności początkowej.

9.1.4.3 Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym

Kolejnym normowym badaniem był pomiar przyczepności zapraw po starzeniu termicznym, a uzyskane wyniki wraz ze zmianą udziału i rodzaju modyfikatora polimerowego przedstawiono w formie graficznej na rys. 25.



Rys. 25 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po starzeniu termicznym od udziału masowego modyfikatora polimerowego

Przyczepność próbki referencyjnej po starzeniu termicznym była nieznacznie niższa od przyczepności początkowej – wynosiła ona 0,38 MPa. Z rys. 25 wynika, że wprowadzenie do zapraw polimerów spowodowało poprawę przyczepności po starzeniu termicznym. Wzrost przyczepności wskutek modyfikacji polimerem był najniższy w przypadku zapraw modyfikowanych 1% dodatkiem proszku redyspergowalnego ZH5/VA/VeoVa – praktycznie nie było widać wpływu na zmianę przyczepności. Zwiększanie udziału do 20% i 26% masowych spowodowało wzrost przyczepności po starzeniu termicznym do poziomu spełniającego wymagania normowe: odpowiednio 0,51 MPa i 0,55 MPa.

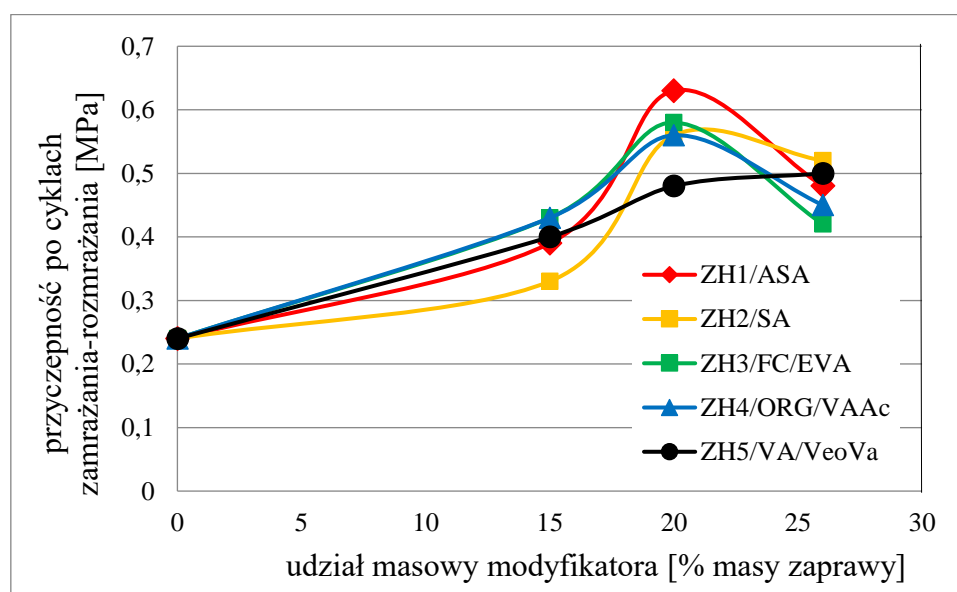
Podobnie jak w pozostałych badaniach przyczepności, zaprawy modyfikowane polimerami ZH1/ASA, ZH2/SA, ZH3/FC/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc osiągały najwyższe przyczepności przy masowym polimeru wynoszącym 20%. Najwyższe przyczepności po starzeniu, ponad dwukrotnie przekraczające wymagane wartości normowe, osiągały zaprawy z modyfikatorami ZH4/ORG/VAAc oraz ZH1/ASA. Wynosiły one odpowiednio 1,24 MPa i 1,06 MPa. Najniższą

pryczepnością przy 20%, modyfikatora charakteryzowała się zaprawa z polimerem ZH5/VA/VeoVa – jej przyczepność oscylowała na granicy wymaganej normą wynoszącej 0,5 MPa.

Dalsze zwiększanie zawartości polimeru do 26% masowych zaprawy negatywnie wpływało na odnotowywane wyniki przyczepności po starzeniu dla wszystkich modyfikatorów oprócz ZH5/VA/VeoVa. Dla tego polimeru nastąpił wzrost przyczepności do 0,55 MPa. Największy spadek przyczepności do poziomu 0,39 MPa niespełniającej wymagania normowego nastąpił dla modyfikatora ZH3/FC/EVA. Największą przyczepność do podłoża po starzeniu termicznym przy 26% masowych polimeru wykazała zaprawa z modyfikatorem ZH1/ASA – wynosiła ona 0,76 MPa (rys. 25).

9.1.4.4 Wpływ modyfikatora polimerowego na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania

Ostatnim normowym badaniem dotyczącym adhezji był test przyczepności zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania. Uzyskane wyniki badań, wraz ze zmianą udziału i rodzaju modyfikatora polimerowego przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po cyklach zamrażania-rozmrażania od udziału masowego modyfikatora polimerowego

Spośród wszystkich warunków kondycjonowania próbek zapraw, cykle zamrażania-rozmrażania okazały się najbardziej wymagającymi dla zaprawy referencyjnej – jej przyczepność wyniosła zaledwie niespełna 0,25 MPa. Jak pokazano na rys. 26, modyfikacja zaprawy polimerami wyraźnie pozytywnie wpłynęła na uzyskiwane wyniki. Wyraźnie widoczne jest maksimum przyczepności, które dla zapraw z modyfikatorami ZH1/ASA,

ZH2/SA, ZH3/CF/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc występuje przy udziale wynoszącym 20%. Podobnie jak w przypadku przyczepności po zanurzeniu, największą przyczepnością charakteryzowała się zaprawa zawierająca modyfikator ZH1/ASA – wynosiła ona 0,63 MPa. Po zwiększeniu udziału masowego każdego z tych modyfikatorów, przyczepność spadała.

Przy udziale modyfikatora wynoszącym 20%, najniższą przyczepność, wynoszącą 0,48 MPa, jako jedyną niespełniającą wymagań normowych, odnotowywano dla zaprawy z udziałem proszku redyspergowalnego ZH5/VA/VeoVa.

Przy zwiększonej ilości modyfikatora polimerowego do 26% najlepszą przyczepnością charakteryzowała się próbka zaprawy z polimerem ZH2/SA – 0,52 MPa. Najniższą przyczepność wynoszącą 0,42 MPa odnotowano dla zaprawy modyfikowanej proszkiem redyspergowalnym ZH3/FC/EVA.

9.1.5 Analiza wpływu modyfikatora polimerowego na zdolność zaprawy do mostkowania pęknięć

Po analizie wyników badań przyczepności i wodoszczelności ustalono, iż optymalny udział masowy modyfikatora polimerowego wynosi 20%. Na próbkach zapraw z taką zawartością modyfikatora polimerowego przeprowadzono badanie zdolności zapraw do mostkowania pęknięć, wyrażonej jako maksymalne rozwarście rysy. Wyniki badania zostały zestawione w tabeli 10.

Tabela 10 Wyniki badania zdolności do mostkowania rys zaprawy modyfikowanej wybranymi polimerami

Oznaczenie próbki	Średnia wartość mostkowania rys [mm]	Wymaganie normowe wg PN-EN 14891:2017 [40] [mm]
ZH1/ASA (20% mas. zaprawy)	1,67	$\geq 0,75$
ZH2/SA (20% mas. zaprawy)	1,98	
ZH3/FC/EVA (20% mas. zaprawy)	2,63	
ZH4/ORG/VAAc (20% mas. zaprawy)	2,15	
ZH5/VA/VeoVa (20% mas. zaprawy)	2,04	

Wszystkie analizowane zaprawy z dużym zapasem spełniły normowe wymagania dotyczące mostkowania rys wynoszące 0,75 mm. Zaprawa modyfikowana wodną dyspersją ZH1/ASA, dla której otrzymano najbardziej niekorzystny wynik, wynoszący 1,67 mm, charakteryzowała się zdolnością do mostkowania rys o rozwarości ponad dwukrotnie większej od wymaganej.

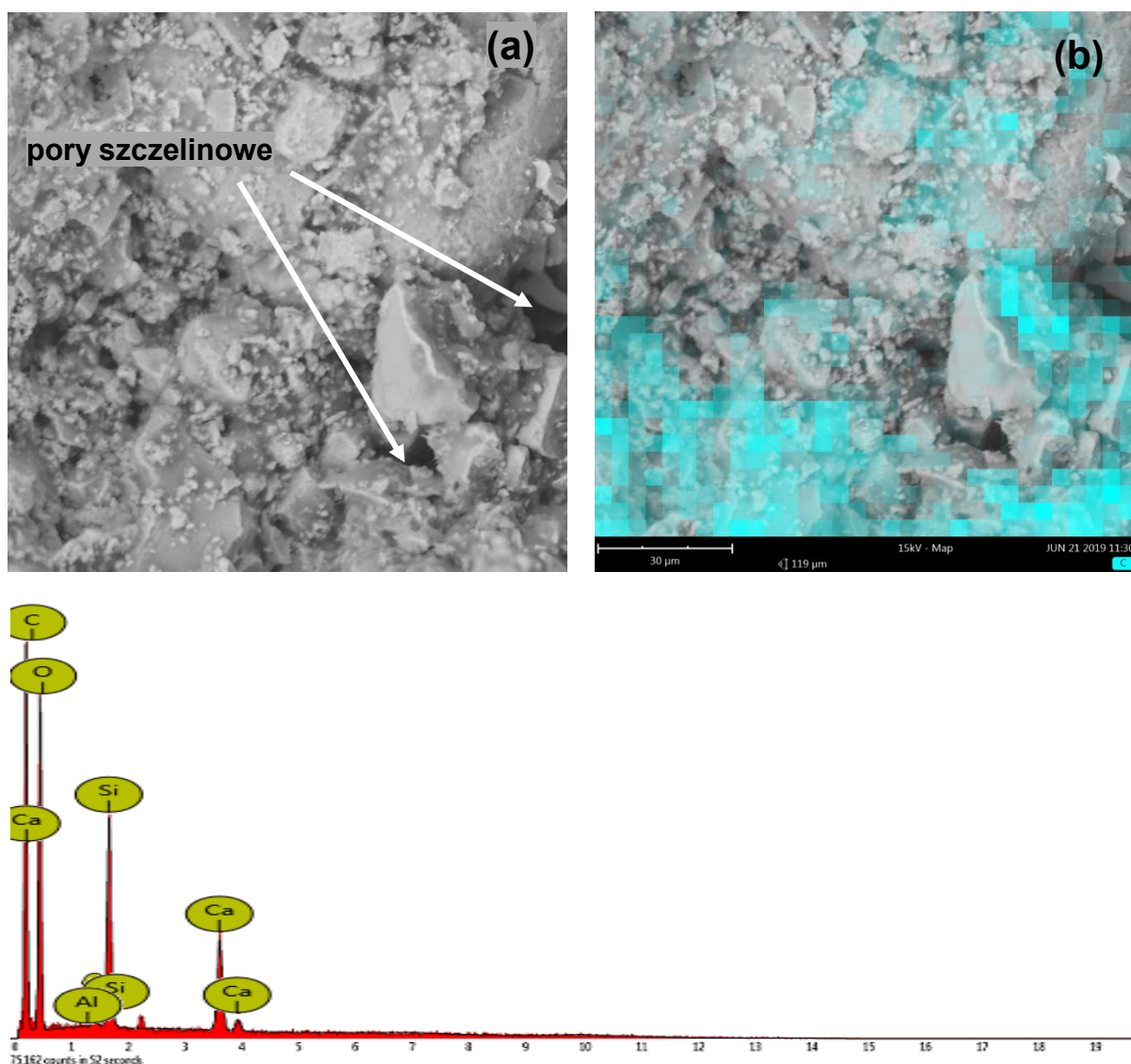
Drugi najniższy wynik odnotowano w przypadku zaprawy modyfikowanej polimerem w postaci płynnej dyspersji ZH2/SA – 1,98 mm.

Zaprawy modyfikowane proszkami redyspergowalnymi wykazywały się lepszą zdolnością do mostkowania rys w porównaniu do zapraw z polimerami w postaci ciekłej. Największą zdolnością do mostkowania rys o rozwarości 2,63 mm charakteryzowała się zaprawa modyfikowana sproszkowanym polimerem ZH3/FC/EVA. W jej przypadku rozwarcie rysy było 3,5-krotnie większe od wielkości wymaganej normowo.

9.1.6 Wpływ modyfikatorów polimerowych na mikrostrukturę zaprawy

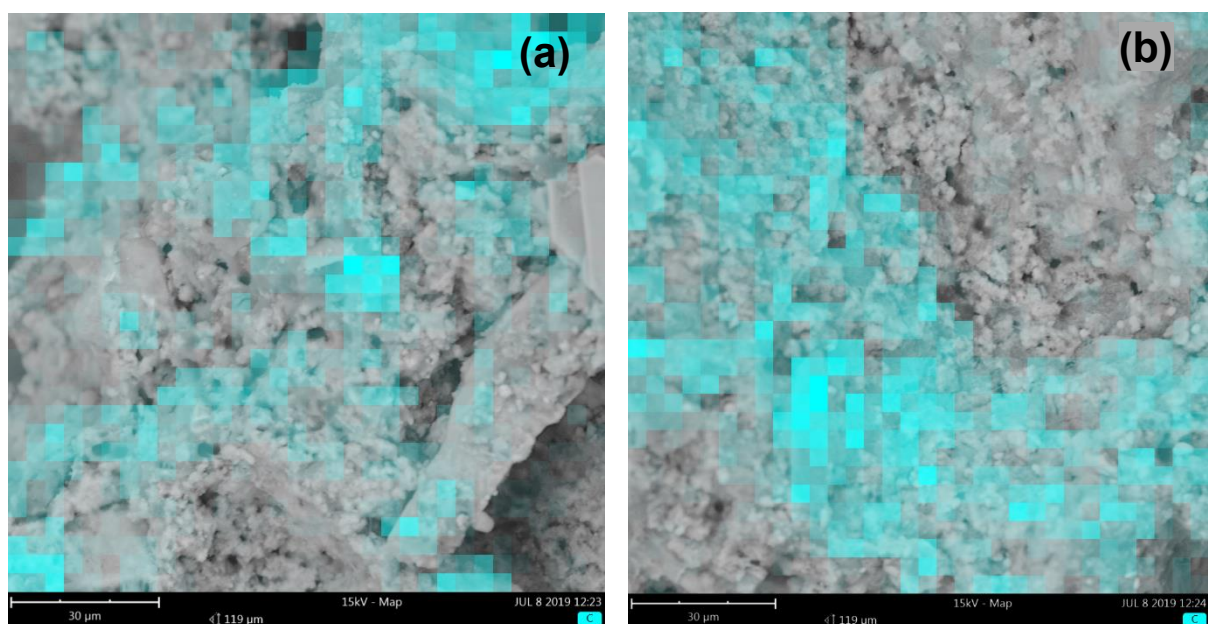
Rozmieszczenie polimeru i hydratów w zaprawie badano poprzez mikroanalizę składu chemicznego powierzchni przełomów próbek z wykorzystaniem mikroanalizatora EDS. Próbkę do badań pobrano z powierzchni stwardniałej zaprawy, z wewnętrznej części zaprawy oraz z obszaru interfazy (warstwy szepnej) zaprawa-podłoże. Analizowano rozmieszczenie atomów Si, C, Ca oraz Al. Obecność pierwiastka węgla C w zaprawie powiązano z rozmieszczeniem modyfikatora polimerowego o charakterze organicznym. Zdjęcia wykonywane były zarówno na powierzchni zaprawy, na ich przełomie, jak i na powierzchni styku zaprawy z podłożem [4].

Mikrostruktury zapraw modyfikowanych polimerami ZH1/ASA, ZH2/SA, ZH3/CF/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc były zbliżone. Na rys. 27(a) przedstawiono widok powierzchni zaprawy, której 15% masy stanowił modyfikator polimerowy ZH1/ASA. Rys. 27(b) przedstawia to samo zdjęcie, na którym kolorem błękitnym zaznaczono miejsca, w których zidentyfikowano obecność modyfikatora polimerowego poprzez mapowanie atomów węgla C, natomiast rys. 27(c) to widmo spektroskopowe analizowanego przełomu [4]. Widoczne piki są charakterystyczne dla zapraw modyfikowanych polimerami.



Rys. 27 Zdjęcie SEM przełomu zaprawy: modyfikowanej ZH1/ASA w ilości 15% masowych a) z zaznaczonymi porami szczelinowymi; b) to samo zdj. z naniesionymi obszarami występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C; c) analiza EDS analizowanego przełomu [badania własne]

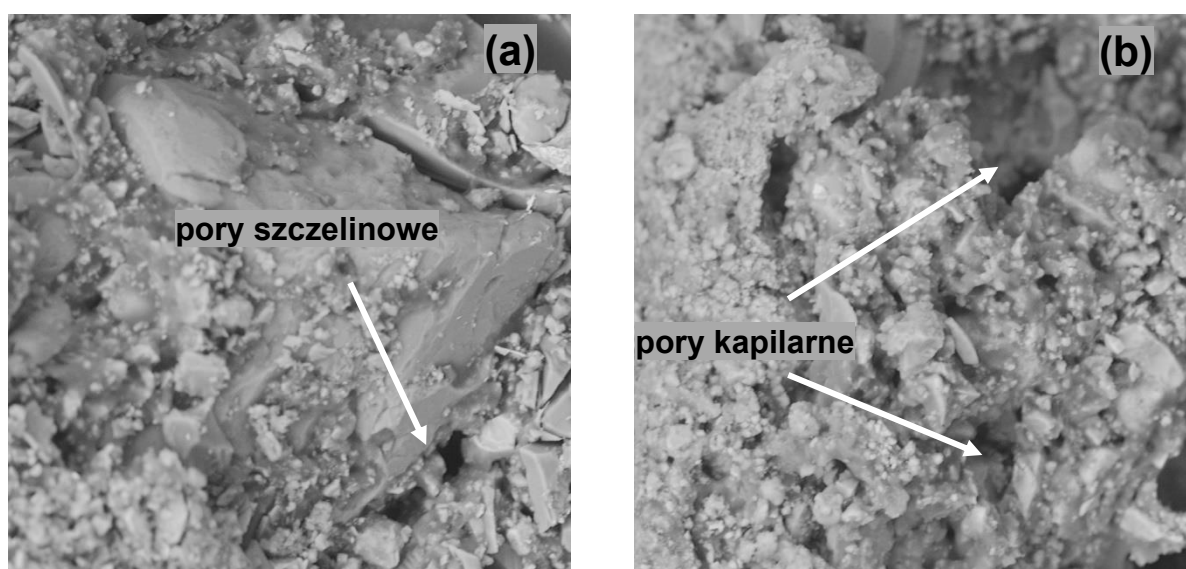
Na rys. 28 zestawiono obraz przełomu zapraw modyfikowanych polimerem ZH4/ORG/VAAc z naniesionymi obszarami występowania modyfikatora polimerowego. Udział masowy polimeru w zaprawie wynosił 15% w przypadku zaprawy na rys. 28 (a) oraz w 20% w zaprawie na rys. 28 (b).



Rys. 28 Zdjęcia SEM przełamów próbek zaprawy z naniesionymi obszarami występowania atomów C otrzymanymi na drodze mapowania atomów węgla zapraw modyfikowanych ZH4/ORG/VAAc zawierających: a) 15% masowych modyfikatora; b) 20% masowych modyfikatora [badania własne]

Zauważyć można bardziej równomierny rozkład modyfikatora w zaprawach o większym udziale polimeru. W zacznym, obok polimeru, wyróżnić można by było równomiernie rozmieszczone produkty hydratacji cementu i drobne ziarna kruszywa. Podobne wyniki uzyskano dla próbek pobranych z wewnętrznej części zaprawy [4].

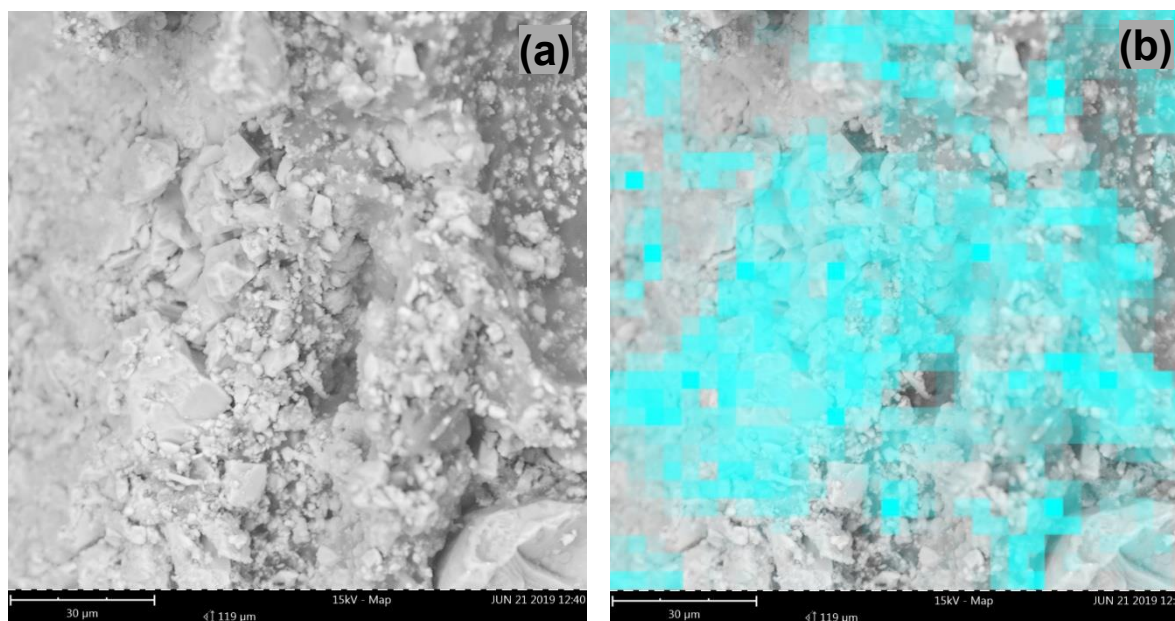
Na rys. 29 przedstawiono widoki przełamów próbek pobranych z wewnętrznej części zaprawy modyfikowanej polimerem ZH1/ASA, który stanowił 20% masy próbki.



Rys. 29 Widok mikrostruktury przełomu zaprawy zawierającej 20% masowych modyfikatora ZH1/ASA a) z zaznaczonymi porami szczelinowymi; b) z zaznaczonymi porami o kolistym kształcie w zaprawie przestrzeni międzyziarnowej [badania własne]

Widoczne na rys. 29 pory można podzielić na szczelinowe oraz kapilarne. Pory szczelinowe występowały głównie na granicy międzyfazowej zaczyn-kruszywo, zaś pory kapilarne widoczne były w stwardniałym zaczynie w przestrzeni międzyziarnowej i miały one średnice od kilku do kilkunastu mikrometrów. Stwierdzono, że przy mniejszym udziale modyfikatora polimerowego w zaprawie ($\leq 15\%$ masowych), pory te były ze sobą wzajemnie połączone, tworząc sieć, umożliwiającą transport roztworów. Podobne mikrostruktury zaobserwowano dla zapraw zawierających modyfikatory polimerowe ZH2/SA, ZH3/CF/EVA oraz ZH4/ORG/VAAc. Ustalono, że wraz ze wzrostem zawartości modyfikatorów w zaprawie, zaczyny w większym stopniu przylegały do kruszyw. Zmniejszała się również średnica porów i ich ilość, co tłumaczy obniżenie wodoprzepuszczalności stwardniałych zapraw [4].

Spośród analizowanych zapraw o różnym udziale polimeru, największą jednorodnością mikrostruktury oraz najmniejszą porowatością charakteryzowały się zaprawy o zawartości modyfikatora wynoszącej 26%. Wśród modyfikatorów w postaci płynnej dyspersji polimerowej największą szczelnością charakteryzowała się zaprawa zawierająca polimer ZH2/SA. Na rys. 30 (a) przedstawiono mikrostrukturę zaprawy zawierającej ten polimer. Rys. 30 (b) przedstawia to samo zdjęcie po naniesieniu na nie obszarów występowania polimeru.



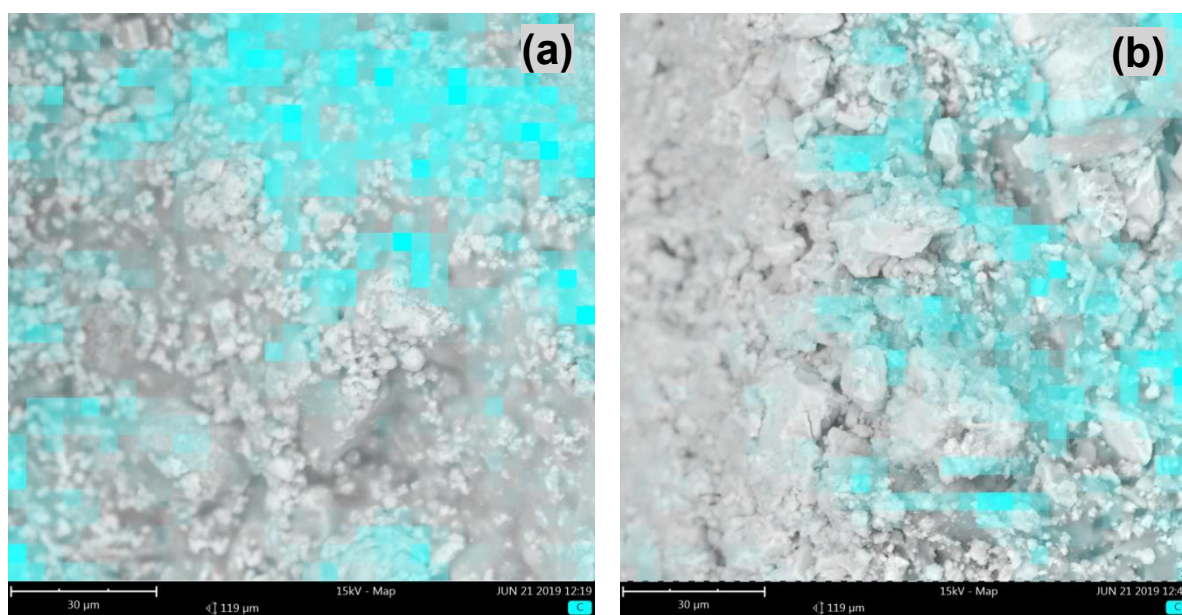
Rys. 30 Zdjęcia SEM powierzchni próbek zaprawy modyfikowanej 26% masowymi polimeru ZH2/SA: a) przed oraz; b) po naniesieniu obszarów występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C [badania własne]

Zaprawa widoczna zdjęciu rys. 30 (a) charakteryzuje się dużym wypełnieniem mikrostruktury, brak jest większych porów. Po naniesieniu na zdjęcie obszarów występowania modyfikatora polimerowego (rys. 30 (b)) wyraźnie dostrzegalne jest, że przestrzeń

międzyziarnowa wypełniona była zaczynem cementowo-polimerowym o homogenicznej mikrostrukturze.

Analizując zmiany mikrostruktury zapraw w kierunku od podłoża w stronę powierzchni zewnętrznej próbek, ustalono, że powierzchnia zewnętrzna była bogatsza w polimer niż w przypadku próbek pochodzących z środkowej części zaprawy. Na rys. 31 (a) przedstawiono zdjęcie SEM powierzchni zaprawy modyfikowanej polimerem ZH3/CF/EVA w ilości 26% masowych. Widoczna na zdjęciu mikrostruktura zaprawy jest jednorodna, charakteryzuje się dużą szczelnością. Występujące drobne pory o średnicy kilku mikrometrów powiązać można głównie z odparowaniem wody podczas wysychania. Pory szczelinowe występowały spontanicznie w różnych miejscach zaprawy. Ich obecność wytłumaczyć można generowaniem naprężeń w trakcie twardnienia zaprawy.

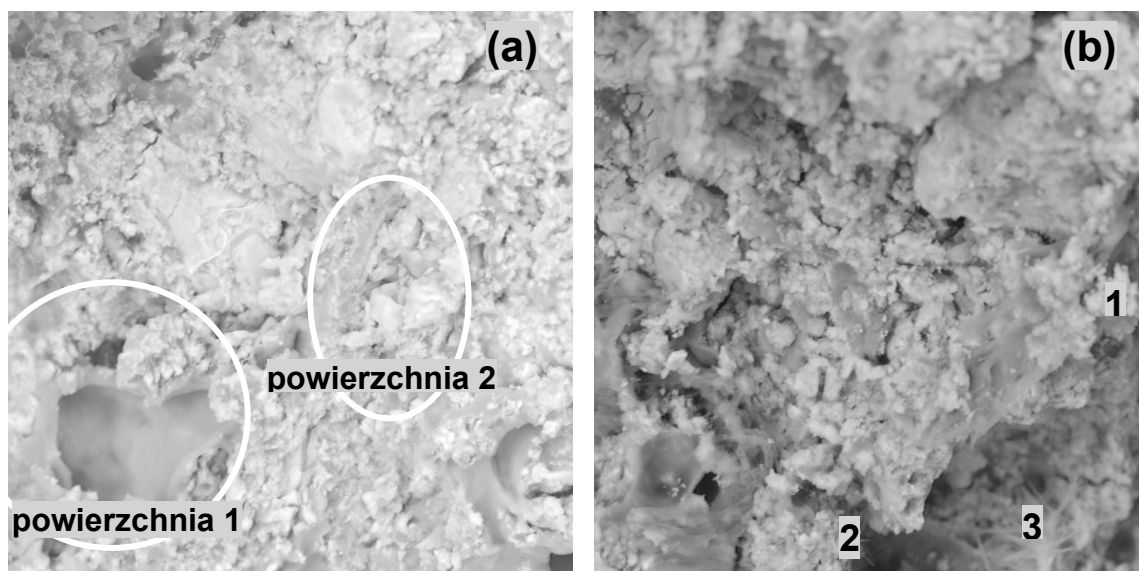
Większe ilości polimeru zaobserwowano również w próbkach pobranych z powierzchni styku zaprawy z podłożem, co przedstawia rys. 31 (b) [4].



Rys. 31 Zdjęcia SEM próbki z naniesionymi obszarami występowania atomów C otrzymanymi na drodze mapowania atomów węgla zaprawy z udziałem masowym modyfikatora ZH3/CF/EVA wynoszącym 26% wykonane: a) na powierzchni zaprawy; b) w interfazie zaprawa-podłoże [badania własne]

Podwyższona zawartość polimeru przy podłożu może świadczyć o tym, że w trakcie wysychania modyfikator polimerowy wraz z zaczynem był transportowany ku powierzchni interfazy zaprawa-podłoże. Zjawisko to przypisać można wpływowi sił kapilarnych i parowania, które indukują strumienie roztworów przepływających w układzie porów wzajemnie ze sobą połączonych [4,103].

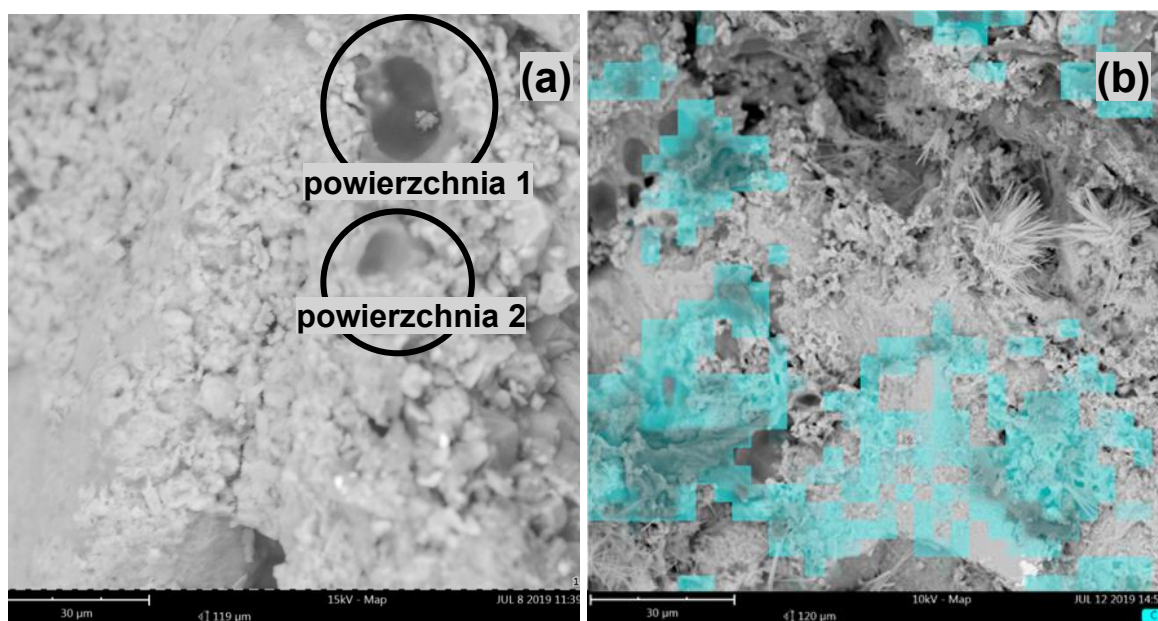
Zaprawy zawierające modyfikator polimerowy ZH5/VA/VeoVa charakteryzowały się niejednorodną mikrostrukturą. Na rys. 32 (a) zamieszczono widok powierzchni stwardniałej zaprawy z udziałem masowym modyfikatora polimerowego ZH5/VA/VeoVa wynoszącym 20%. Natomiast rys. 32 (b) przedstawia widok powierzchni przełomu pochodzącego z wewnętrznej części zaprawy o tej samej ilości tego modyfikatora.



Rys. 32 Widok powierzchni zaprawy modyfikowanej ZH5/VA/VeoVa w ilości 20% masowych, gdzie: a) powierzchnia 1 - miejsce z dobrze uformowanym filmem polimerowym, powierzchnia 2-obszar zawierający spoiwo mineralne; b) widok przełomu zaprawy gdzie 1, 2 – hydraty o nieregularnym kształcie z dużą ilością izometrycznych i spłaszczonych cząstek, 3 – faza C-S-H o włóknistym kształcie [badania własne]

Analizując rys. 32 stwierdzono, że przestrzeń międzyziarnowa wypełniona była słabo przylegającym, niejednorodnym zaczynem polimerowo-cementowym z licznymi porami o średnicy od kilku do kilkunastu mikrometrów. Na powierzchni zewnętrznej próbek, jak i na powierzchni przełomów można było wyróżnić obszary, w których polimer utworzył jednolitą błonę bez wtrąceń hydratów, czy innych nieorganicznych substancji (powierzchnia 1, rys. 30 M5(a)). W innych zaś miejscach widoczne były skupiska hydratów wraz z ziarnami cementu o wielkości kilkudziesięciu mikrometrów (powierzchnia 2, rys. 32 (b)). Hydraty przyjmowały albo włóknisty kształt, stanowiący fazę C-S-H, w innych zaś miejscach widoczne były hydraty o nieregularnym kształcie z dużą ilością izometrycznych i spłaszczonych cząstek (rys. 32 (b)). Na powierzchni styku kruszywa z zaczynem widoczne były głębokie pory w kształcie szczelin. W zaczynie w przestrzeni międzyziarnowej występowały również pory o cylindrycznym kształcie. Mniejszą porowatość zaprawy zaobserwowano w płaszczyźnie interfejsu zaprawa-podłoże i na powierzchni, co można wytłumaczyć transportem polimeru i cementu w trakcie wysychania wraz ze strumieniem wody w tych kierunkach.

Dalszy wzrost zawartości polimeru do 26% sprzyjał zmniejszeniu porowatości. W mikrostrukturze zaprawy zaobserwować można było miejsca, w których dominuje ciągle jednorodny film polimerowy. Utworzone hydraty wraz z pojedynczymi ziarnami cementu występowały obok tego polimeru w postaci skupisk (rys. 33 (b)). Widoczne w mikrostrukturze pory poprzerywane były stwardniałym polimerem, co wywierało wpływ na zmniejszenie drożności tych kapilar i obniżenie przepuszczalności wody. Na rys. 33 (a) przedstawiono widok przełomu zaprawy pobranej z wewnętrznej części próbki zaprawy modyfikowanej polimerem ZH5/VA/VeoVa w ilości 20%, pokazującego pory o przekroju kolistym wypełnione stwardniałym polimerem (powierzchnia 1 i powierzchnia 2).



Rys. 33 Zdjęcia SEM przełomów zaprawy pobranej z wewnętrznej części próbki zaprawy z udziałem masowym modyfikatora polimerowego ZH5/VA/VeoVa wynoszącym 20% a) gdzie powierzchnia 1 i powierzchnia 2 - pory o przekroju kolistym wypełnione stwardniałym polimerem; b) fragment z naniesionymi obszarami występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C [badania własne]

9.2 Ocena wpływu dodatków mineralnych pochodzenia odpadowego na wybrane właściwości cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej

Badania mające na celu sprawdzenie możliwości zastosowania dodatków mineralnych pochodzenia naturalnego i odpadowego w składzie jednokomponentowej cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej podzielono na następujące etapy:

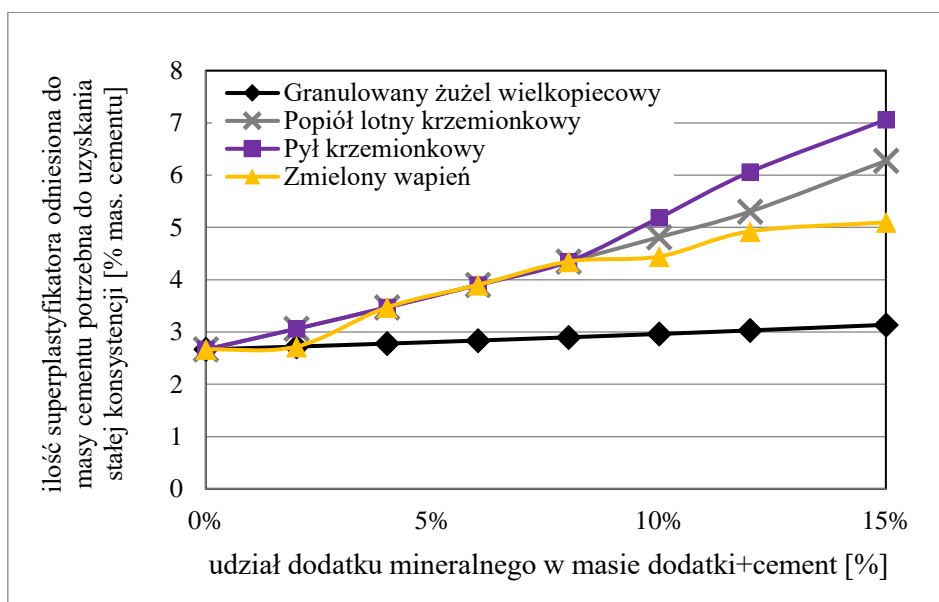
1. wpływu dodatków mineralnych na konsystencję zaprawy – dla każdej zaprawy wyznaczenie udziału superplastyfikatora, celem zachowania stałej konsystencji przy stałym udziale wody zarobowej (stały w/c),
2. wpływu dodatków mineralnych na zdolność zaprawy do mostkowania rys podłoża,

3. wpływu dodatków mineralnych na wodoszczelność zaprawy,
4. wpływu dodatków mineralnych na przyczepności zaprawy do podłoża po różnych cyklach sezonowania,
5. wpływu dodatków mineralnych na porowatość powierzchniową zaprawy,
6. wpływu dodatków mineralnych na trwałość zaprawy określoną jako zmiana porowatości powierzchniowej po dojrzewaniu w komorze starzeniowej,
7. wpływu dodatków mineralnych na elastyczność zaprawy,
8. wpływu dodatków mineralnych na porowatość powierzchniową zaprawy,
9. ocenę jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na wodoszczelność zaprawy,
10. ocenę jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na przyczepności zaprawy do podłoża po różnych cyklach sezonowania.

Do częściowego zastępowania cementu w składzie zapraw wybrano następujące dodatki mineralne: granulowany żużel wielkopiecowy, popiół lotny krzemionkowy, pył krzemionkowy i zmielony wapień. W prowadzonych badaniach zastępowano cement CEM I dodatkami w ilościach 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% i 15% masowych. Badania prowadzono na recepturze bazowej ustalonej na podstawie wyników badań zamieszczonych w rozdziale 9.1 „Dobór odpowiedniego modyfikatora polimerowego”. Jej uogólniony skład zamieszczony został w tabeli 7.

9.2.1 Wpływ dodatków mineralnych na konsystencję zaprawy

Z uwagi na różną wodożądność stosowanych dodatków mineralnych, wystąpiła potrzeba sprawdzenia ich wpływu na konsystencję zaprawy. Celem zachowania stałej konsystencji przy ustalonym, stałym stosunku w/c, konsystencję zaprawy regulowano przy użyciu superplastyfikatora. Na rys. 34 przedstawiono zmianę wymaganej ilości superplastyfikatora w zależności od różnych ilości dodatków mineralnych w celu uzyskania stałej konsystencji w ustalonym zakresie 120÷130 mm, przy stałej ilości wody zarobowej wynoszącej 220 g na 1 kg suchej mieszanki. Ilość superplastyfikatora odniesiona była do masy cementu.



Rys. 34 Ilość superplastyfikatora odniesiona do masy cementu potrzebna do uzyskania stałej konsystencji wraz z dodawaniem dodatków mineralnych

Superplastyfikator zastosowany został także w zaprawie referencyjnej – jego udział wyniósł 2,67% masy cementu. Zgodnie z rys. 34 można stwierdzić, dodatkiem który nie miał wpływu na konsystencję był granulowany żużel wielkopiecowy. Do wszystkich próbek z jego udziałem dozowana była ilość superplastyfikatora identyczna z ilością dozowaną w przypadku zaprawy referencyjnej – niewielkie różnice wynikały z faktu, iż jego stałą ilość odnoszono do zmniejszającej się ilości cementu.

W przypadku pozostałych dodatków, wraz ze zwiększaniem ich udziału wzrastało zapotrzebowanie na superplastyfikator. Przy niewielkiej zamianie cementu na dodatki mineralne nie przekraczającej 8% masy cementu, ilość środka upłynniającego potrzebna do zachowania stałej konsystencji była identyczna dla popiołu lotnego krzemionkowego, pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia. Przy dalszym zwiększaniu udziału dodatków, wyraźnie zwiększyło się zapotrzebowanie na superplastyfikator zwłaszcza w przypadku popiołu lotnego i pyłu krzemionkowego.

Najwyższe zapotrzebowanie na superplastyfikator wystąpiło w przypadku próbki zaprawy, w której 15% cementu CEM I zastąpiono pyłem krzemionkowym – jego udział odniesiony do masy cementu wyniósł 7,06%. Przy tym samym udziale popiołu lotnego krzemionkowego zapotrzebowanie na superplastyfikator wyniosło 6,27% masy cementu, natomiast w przypadku zmielonego wapienia wyniosło ono 5,10%.

Przedstawione na rys. 34 wymagane ilości superplastyfikatora zostały wprowadzone do receptur każdej z próbek tak, by dalsze badania mające na celu określenie wpływu dodatków

mineralnych prowadzono na zaprawach o stałej konsystencji i stałej ilości wody zarobowej. Celem sprawdzenia wpływu zachowania stałej konsystencji, przeprowadzono badanie mostkowania rys przy stałej ilości superplastyfikatora.

9.2.2 Wpływ dodatków mineralnych na zdolność zaprawy do mostkowania rys podłoża

Sprawdzono wpływ analizowanych dodatków mineralnych na zdolność zaprawy uszczelniającej do mostkowania rys podłoża. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania przy stałym udziale superplastyfikatora odpowiednim dla zaprawy referencyjnej. Badania wykonano przy maksymalnym sprawdzanym dozowaniu dodatków pochodzenia odpadowego i naturalnego, które wynosiło 15% masowych cementu CEM I. Wyniki badania zestawiono w tabeli 11.

Tabela 11 Zestawienie wyników badania zdolności do mostkowania rys zapraw z dodatkami mineralnymi przy stałym udziale superplastyfikatora

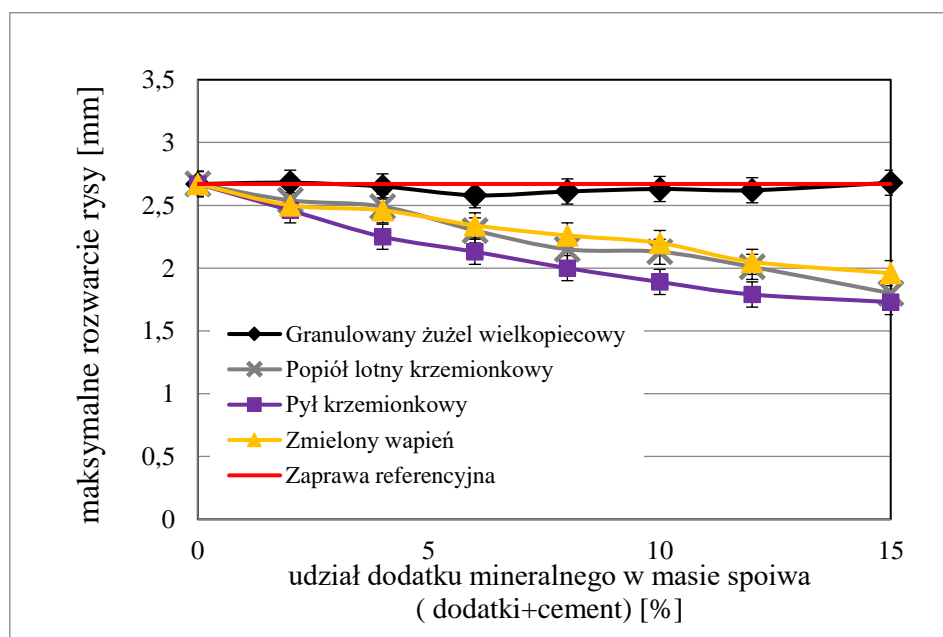
Oznaczenie próbki	Średnia wartość mostkowania rys [mm]	Wymaganie normowe wg PN-EN 14891:2017 [40] [mm]
Zaprawa referencyjna (brak dodatków mineralnych; 0,4% mas. superplast.)	2,63	≥ 0,75
Granulowany żużel wielkopieczowy (15% mas. cem.; 0,4% mas. superplast.)	2,68	
Popiół lotny krzemionkowy (15% mas. cem.; 0,4% mas. superplast.)	1,47	
Pył krzemionkowy (15% mas. cem.; 0,4% mas. superplast.)	1,13	
Zmielony wapień (15% mas. cem.; 0,4% mas. superplast.)	1,40	

Wszystkie badane zapraw spełniły normowe wymaganie dotyczące mostkowania spękań podłoża. Bardzo zbliżone do siebie, najkorzystniejsze wyniki osiągnęły zaprawa referencyjna oraz zaprawy, w której 15% masowych cementu zastąpiono granulowanym żużlem wielkopieczowym. Rozwartości rys, które próbki były w stanie przenieść, wynosiły odpowiednio 2,63 mm i 2,68 mm. Zbliżone wyniki uzyskały zaprawy z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego (1,47 mm) i zmielonego wapienia (1,40 mm). Najmniej korzystny wynik

uzyskała natomiast zaprawa z pyłem krzemionkowym – szerokość rozwarcia rysy 1,13 mm była ponad dwukrotnie mniejsza niż dla próbek które osiągnęły największe rozwarcie.

Uzyskane wyniki należy powiązać przede wszystkim z niedostateczną ilością superplastyfikatora w zaprawach z udziałem popiołu lotnego krzemionkowego, granulowanego żużla wielkopieczowego i pyłu krzemionkowego. Potwierdza to fakt, iż zaprawa z pyłem krzemionkowym, który wymaga największego dozowania superplastyfikatora, wykazała się najmniejszą rozwartością mostkowanej rysy. Zaprawa z żużlem, która nie wymagała zwiększenia udziału superplastyfikatora, charakteryzowała się natomiast najlepszą zdolnością do mostkowania rys. Z uwagi na znacznie pogorszone właściwości robocze zapraw z dodatkiem popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia, nie było możliwości odpowiedniego rozprowadzenia próbki na podłożu.

Wszystkie kolejne badania wpływu dodatków mineralnych na właściwości zaprawy uszczelniającej prowadzone były przy stosowaniu odpowiedniej ilości superplastyfikatora, określonej dla każdej próbki zgodnie z rys. 34. Pierwszym z nich było określenie zdolności zaprawy do mostkowania rys podłoża. Wyniki badania przedstawione zostały w formie graficznej na rys. 35.



Rys. 35 Wyniki badan wpływu dodatków mineralnych na zdolność do mostkowania rys podłoża przy zachowaniu stałej konsystencji zaprawy

Porównanie wyników zestawionych w tabeli 11 i na rys. 35 przedstawia wpływ konsystencji zapraw uszczelniających na właściwości wyrobu po związaniu. Dodatek wymaganej ilości superplastyfikatora pozwolił znacznie zwiększyć zdolność do mostkowania rys podłoża zapraw z udziałem popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia.

W przypadku pyłu krzemionkowego zapewnienie odpowiedniej konsystencji przy użyciu wymaganej, określonej na rys. 34 ilości superplastyfikatora pozwoliło poprawić maksymalną rozwartość mostkowanej rysy o ponad połowę – do 1,73 mm. Pomimo tego, zaprawy z dodatkiem pyłu krzemionkowego charakteryzują się niższą zdolnością do mostkowania rys od zapraw z udziałem pozostałych dodatków mineralnych.

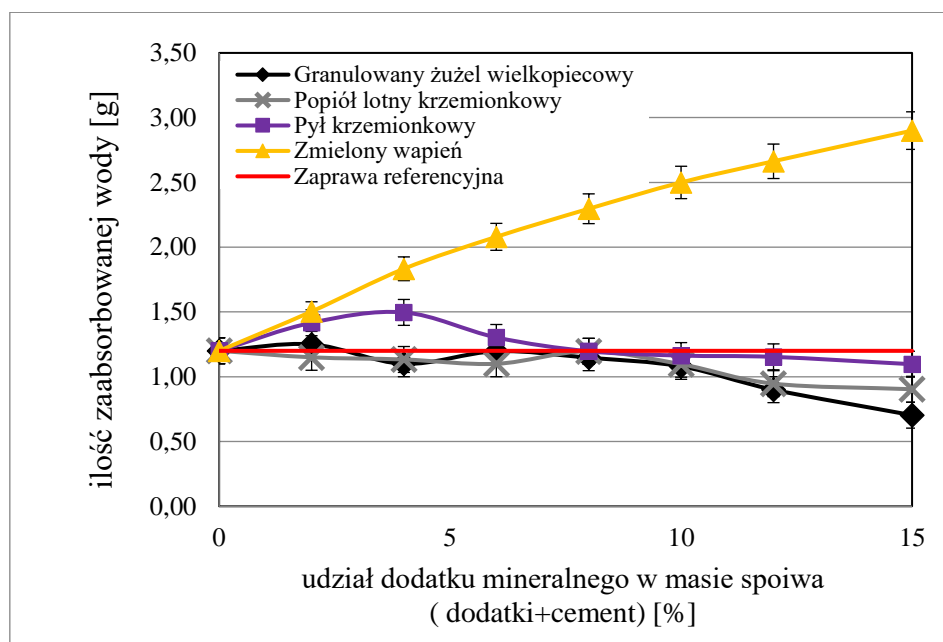
Jak przedstawiono na rys. 34, największą zdolnością do mostkowania rys charakteryzuje się zaprawa, w której część cementu zastąpiono zmielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym. Zaprawy w których cement zastępowany był pozostałymi dodatkami mineralnymi charakteryzują się bardzo podobnymi do siebie zdolnościami do mostkowania rys, które zmniejszają się wraz ze zwiększaniem udziału dodatków.

Reasumując, przy zamianie 15% masowych cementu żużlem wielkopieczowym, udział superplastyfikatora był identyczny z wynikami zestawionymi w tabeli 11, zatem rozwarcie rysy było identyczne i wynosiło 2,68 mm. Było ono o ok. 30% większe od pozostałych. Różnice w wynikach uzyskiwanych przez próbki zapraw z popiołem lotnym krzemionkowym i zmielonym wapieniem były niewielkie. Dla zapraw zawierających popiół lotny krzemionkowy zwiększenie udziału dodatku ponad 10% masy cementu powodowało wyraźne pogorszenie zdolności do mostkowania rys podłoża. W przypadku zapraw zawierających 15% masowych popiołu lotnego i zmielonego wapienia, maksymalne rozwarcia rys wynosiły odpowiednio 1,80 mm i 1,96 mm.

Wszystkie badane zaprawy z dużym zapasem spełniają normowe wymaganie odnośnie rozwartości mostkowanej rysy (rozwartość nie mniejsza niż 0,75 mm).

9.2.3 Wpływ dodatków mineralnych na szczelność zaprawy

Wyniki badania wodoszczelności próbek, wyrażonej jako ilość wody zaabsorbowanej przez zaprawę po 7 dniach właczania wody pod ciśnieniem 1,5 MPa wraz ze zmianą udziału i rodzaju dodatku mineralnego częściowo zastępującego cement przedstawiono na rys. 36.



Rys. 36 Wpływ dodatków mineralnych na szczelność wyrażoną jako ilość zaabsorbowanej wody

Wszystkie zaprawy charakteryzowały się wysoką wodoszczelnością z punktu widzenia wymagań normy PN-EN 14891:2017 [40] – warunek szczelności (max. ilość zaabsorbowanej wody wynosząca 20 g) spełniony był z dużym zapasem. Przyrost masy próbki zaprawy referencyjnej wskutek oddziaływania wodą pod ciśnieniem wyniósł 1,2 g.

Najkorzystniejszy wynik odnotowano w przypadku próbki zaprawy, w której 15% cementu zostało zastąpione zmielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym – wskutek oddziaływania wody pod ciśnieniem przyrost masy próbki wyniósł 0,7 g. Analizując wyniki przedstawione na rys. 36, należy stwierdzić, iż zamiana części cementu na żużel w całym analizowanym zakresie miała korzystny wpływ na wodoszczelność zapraw.

W przypadku pyłu krzemionkowego niewielki udział dodatku spowodował niewielkie zwiększenie przyrostu masy wskutek badania szczelności w porównaniu do zaprawy referencyjnej. Dalsze zwiększanie udziału pyłu krzemionkowego kosztem cementu spowodowało nieznaczną poprawę w stosunku do zaprawy referencyjnej. Najwyższą szczelnością spośród zapraw z pyłem krzemionkowym charakteryzowała się próbka zaprawy, w której 15% masy cementu zastąpiono pyłem. Skutkowało to przyrostem masy próbki wynoszącym 1,1 g.

Najmniejszy wpływ na szczelność zapraw wywierał popiół lotny krzemionkowy – częściowa zamiana cementu na ten dodatek powodowała nieznaczną poprawę szczelności, jednakże przy tak niewielkich różnicach w wynikach w porównaniu do zaprawy referencyjnej, należy stwierdzić, iż oscylowały one w granicach błędu pomiarowego. Najkorzystniejszy

wynik badania zaprawy z popiołem lotnym otrzymano przy zastąpieniu nim 15% masy cementu – ilość zaabsorbowanej przez tę próbkę wody wyniosła 0,9 g.

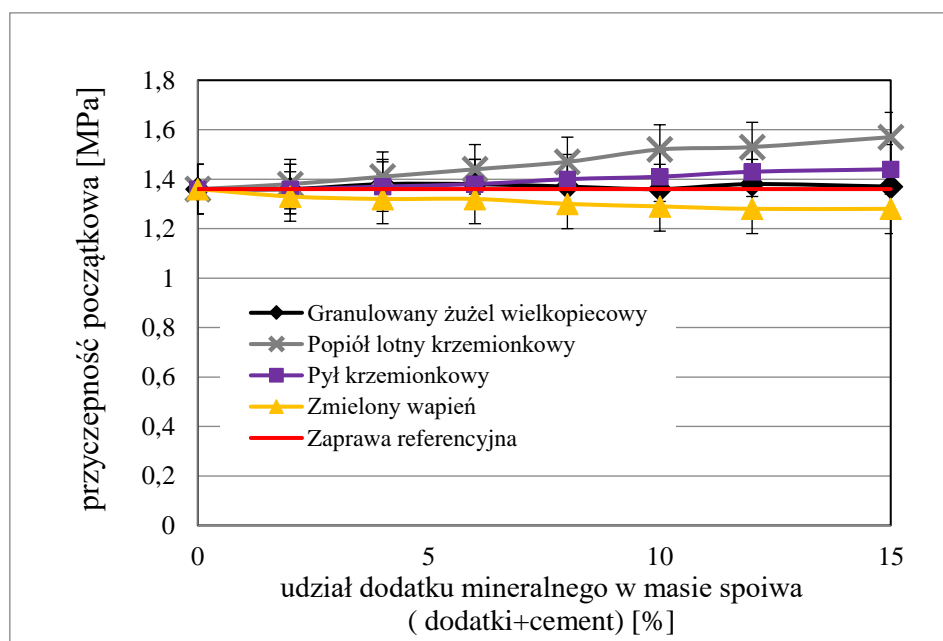
Najniższą wodoszczelnością charakteryzują się próbki zapraw ze zmielonym wapieniem. Zauważalna jest proporcjonalna zależność pomiędzy przyrostem masy próbki wskutek oddziaływania wodą pod ciśnieniem i zawartością zmielonego wapienia (rys. 36).

9.2.4 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy

Zaprawy, w których część cementu CEM I zastąpiono analizowanymi dodatkami mineralnymi poddano normowemu badaniu przyczepności do podłoża zgodnie z normą PN-EN 14891:2017 [40]. Przeprowadzono badania przyczepności początkowej, po zanurzeniu w wodzie, po starzeniu termicznym oraz po cyklach zamrażania-rozmrażania.

9.2.4.1 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność początkową zaprawy

Wyniki badania wpływu częściowej zamiany cementu CEM I na granulowany żużel wielkopieczowy, popiół lotny krzemionkowy, pył krzemionkowy i zmielony wapień na przyczepność początkową cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej do podłoża betonowego przedstawiono na rys. 37.



Rys. 37 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność początkową zaprawy

Zgodnie z wynikami zamieszczonymi na rys. 37, przyczepność zaprawy referencyjnej wynosiła 1,36 MPa. Uzyskany wynik przyrównano do przyczepności tej samej receptury bez dodatku superplastyfikatora przedstawionej na rys. 20 (próbka ZH3/FC/EVA, 20%

modyfikatora) wynoszącej 0,95 MPa. Dodatek superplastyfikatora i redukcja wody zarobowej pozwoliły na poprawę przyczepności o 43%.

Analizując wyniki zestawione na rys. 37, należy stwierdzić, iż zamiana cementu CEM I na popiół lotny miała największy wpływ na przyczepność początkową zaprawy. Proporcjonalnie z ze zwiększaniem jego udziału w recepturze kosztem cementu CEM I zwiększała się przyczepność początkowa zaprawy do podłoża betonowego. Przy jego maksymalnym analizowanym udziale masowym wynoszącym 15% masy cementu, przyczepność wynosiła 1,57 MPa i była o 15% większa niż w przypadku zaprawy referencyjnej.

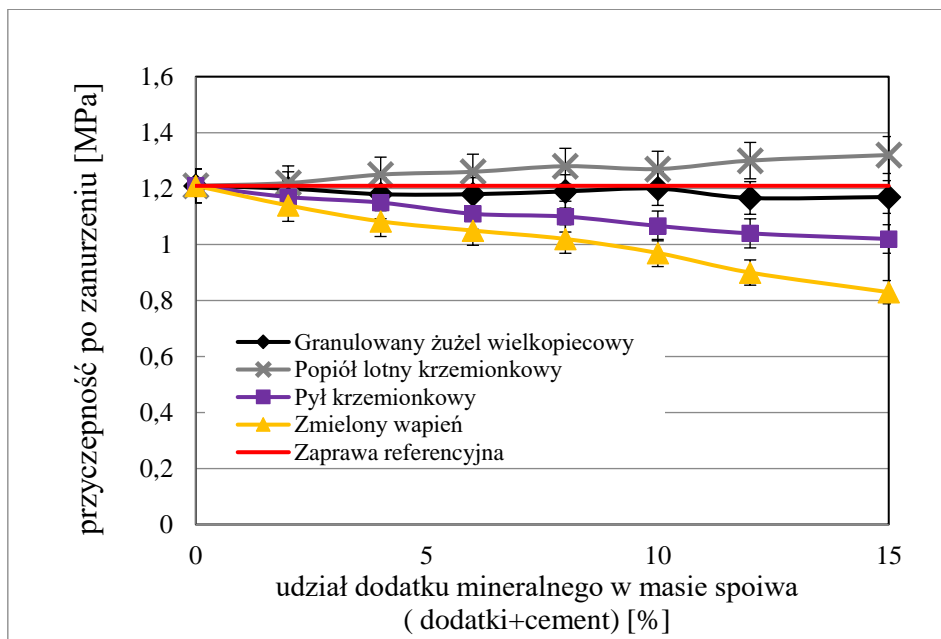
Pozytywny wpływ na przyczepność początkową miał także pył krzemionkowy. Najwyższą przyczepność osiągnęła zaprawa, w której dodatek ten stanowił 15% masy cementu – przyczepność wyniosła 1,44 MPa i była o 5% wyższa od próbki referencyjnej.

Zamiana części cementu na granulowany żużel wielkopiecowy miała neutralny wpływ na przyczepność początkową zapraw do podłoża betonowego. Różnice pomiędzy wynikami mieściły się w granicach błędu pomiarowego i były bardzo zbliżone do przyczepności zaprawy referencyjnej.

Niewielki dodatek zmielonego wapienia (do 8,0%) miał nieznaczny wpływ na przyczepność początkową. Po osiągnięciu 8% masy cementu przyczepność zaczęła spadać i przy maksymalnym sprawdzanym dozowaniu wapienia była o 5% niższa w porównaniu do zaprawy bez dodatków mineralnych.

9.2.4.2 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po zanurzeniu w wodzie

Bardzo istotnym badaniem dla zapraw uszczelniających, mających kontakt z wodą, było określenie wpływu analizowanych dodatków mineralnych na przyczepność po zanurzeniu w wodzie. Wyniki badania przedstawiono w formie wykresu na rys. 38.



Rys. 38 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po zanurzeniu

Jak wynika z rys. 38, przyczepność zaprawy referencyjnej po zanurzeniu wyniosła 1,21MPa. Przyrównując ten wynik do przyczepności początkowej odczytanej z wykresu rys. 37 wynika, iż skutek oddziaływania wody, przyczepność zaprawy do podłoża betonowego pogorszyła się o 11%. W porównaniu do przyczepności po zanurzeniu próbki o tym samym składzie bez dodatku superplastyfikatora i z wyższym stosunkiem wodno-cementowym, odczytanej z wykresu rys. 22 (zaprawa ZH3/FC/EVA, 20% modyfikatora), wynoszącej 0,65 MPa, zaprawa referencyjna charakteryzuje się o ponad 46% wyższą przyczepnością.

Na rys. 38 odnotowano zbliżoną do liniowej zależność wzrostu przyczepności po zanurzeniu wraz ze zwiększaniem udziału popiołu lotnego krzemionkowego. Najwyższą spośród wszystkich zapraw przyczepność po zanurzeniu w wodzie odnotowano w przypadku zamiany 15% masowych cementu na popiół lotny krzemionkowy. Przyczepność ta wyniosła 1,32 MPa i była o blisko 9% wyższa niż w przypadku próbki referencyjnej.

Zamiana części cementu CEM I na pozostałe analizowane dodatki mineralne nie miała korzystnego wpływu na przyczepność po zanurzeniu, a w większości przypadków wiązała się z jej pogorszeniem.

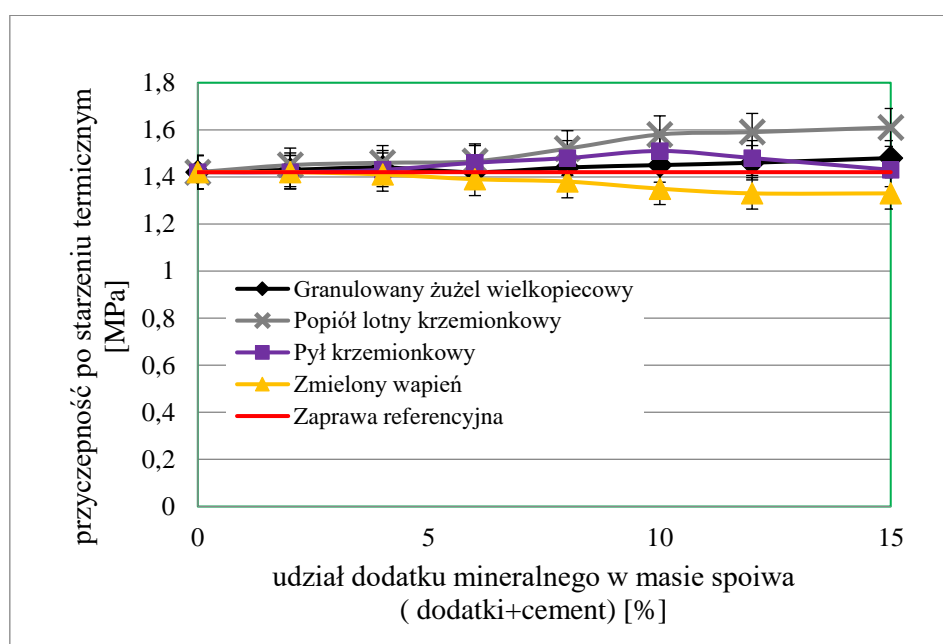
Dodatek zmielonego granulowanego żużla wielkopiecowego miał najmniejszy wpływ na osiągane wartości przyczepności. Na podstawie uzyskanych wyników nie da się określić jednoznacznej tendencji z uwagi na minimalne różnice pomiędzy poszczególnymi wynikami i wynikiem zaprawy referencyjnej.

Częściowa zamiana cementu portlandzkiego CEM I na pył krzemionkowy wiązała się z pogorszeniem przyczepności po zanurzeniu w wodzie. Największy spadek przyczepności w porównaniu do zaprawy bez dodatków mineralnych miał miejsce w przypadku zaprawy zawierającej 15% masowych pyłu krzemionkowego. Przyczepność tej próbki po zanurzeniu wyniosła 1,02 MPa i była o 16% niższa w porównaniu do zaprawy referencyjnej.

Jak przedstawiono na rys. 36, najbardziej negatywny wpływ na przyczepność po zanurzeniu wywierał dodatek zmielonego wapienia. Największe pogorszenie przyczepności nastąpiło wskutek zamiany 15% masowych cementu na ten dodatek – spowodowało to spadek wytrzymałości złącza po zanurzeniu do wartości 0,83 MPa. Była to przyczepność o ponad 30% niższa w stosunku do przyczepności zaprawy referencyjnej.

9.2.4.3 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym

Wyniki badań przyczepności zapraw uszczelniających zawierających dodatki mineralne jako częściowy zamiennik cementu do podłoża betonowego po starzeniu termicznym przedstawiono w formie graficznej na rys. 39.



Rys. 39 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym

Przyczepność po starzeniu termicznym próbki referencyjnej wyniosła 1,42 MPa. W porównaniu z przyczepnością początkową (z rys. 37), nastąpił niewielki przyrost przyczepności (ok. 4,0%) wskutek kondycjonowania w podwyższonej temperaturze. W odniesieniu do wytrzymałości złącza próbki o tej samej recepturze zamieszczonej na rys. 25 (zaprawa ZH3/FC/EVA, 20% modyfikatora) wynoszącej 0,88 MPa, przyczepność zaprawy

referencyjnej wskutek dodatku superplastyfikatora i redukcji wody zarobowej uległa poprawie się o blisko 38%.

Najkorzystniejszy wpływ na przyczepność po starzeniu termicznym miał miejsce w przypadku zamiany 15% cementu portlandzkiego CEM I na popiół lotny krzemionkowy. Wyraźny przyrost przyczepności następował wraz ze zwiększaniem udziału tego dodatku do 10% masy cementu. Dalsze zwiększanie udziału popiołu lotnego krzemionkowego nieznacznie poprawiało wytrzymałość złącza. W przypadku zaprawy, w której 15% masy cementu stanowił popiół lotny krzemionkowy przyczepność po starzeniu termicznym wyniosła 1,62 MPa i była o 13% wyższa niż w przypadku zaprawy referencyjnej.

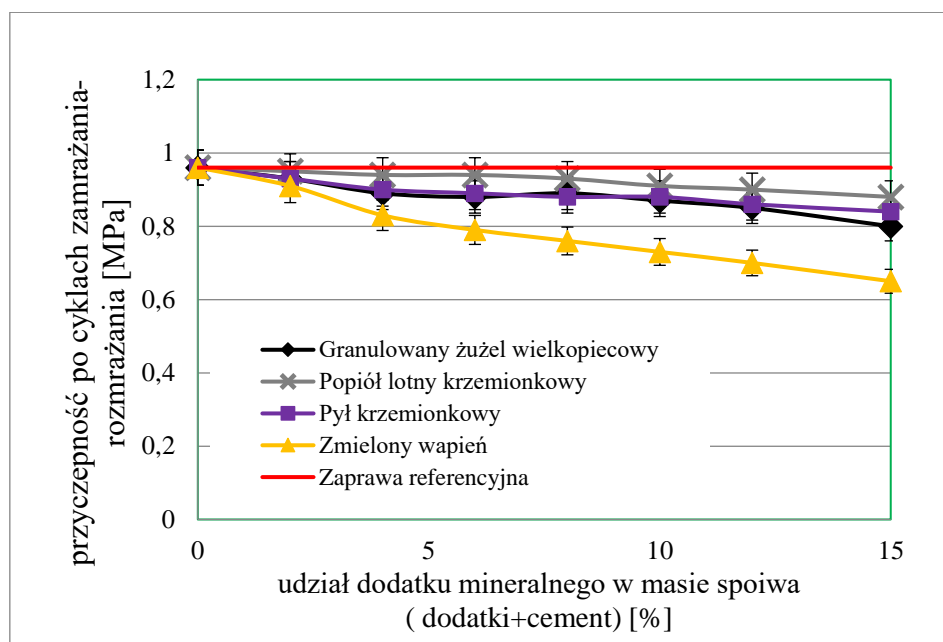
Zależność przyczepności po starzeniu termicznym od zamiany części cementu na pył krzemionkowy nie była proporcjonalna. Przy udziale pyłu krzemionkowego wynoszącym 10% masy cementu osiągnięto optimum przyczepności wynoszące 1,51 MPa – o 6% większą niż dla zaprawy referencyjnej. Dalsze zwiększanie udziału pyłu powodowało spadek przyczepności. Przy zamianie 15% masy cementu na pył krzemionkowy, przyczepność zaprawy była niemal identyczna jak w przypadku zaprawy referencyjnej.

Dodatek granulowanego żużla wielkopieczowego miał nieznacznie pozytywny wpływ na wytrzymałość złącza po starzeniu termicznym. Największą przyczepność osiągnęła zaprawa, w której żużel stanowił 15% masy spoiwa – przyczepność wynosząca 1,48 MPa była ponad 4% wyższa niż dla próbki zaprawy bez dodatków mineralnych.

Wraz z zamianą do 10% masy cementu CEM I na zmielony wapień, odnotowywano niewielki spadek przyczepności po starzeniu termicznym. Dalsze zwiększaniu udziału wapienia do 15% masy cementu nie spowodowało dalszego spadku przyczepności. Przy zamianie 10% oraz 15% masy cementu, przyczepność zaprawy była identyczna i wynosiła 1,33 MPa. Była ona zatem o ponad 6% niższa niż w przypadku zaprawy nie zawierającej dodatków mineralnych.

9.2.4.4 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania

Wyniki badania wpływu częściowej zamiany cementu CEM I na analizowane dodatki mineralne na przyczepność cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej po cyklach zamrażania-rozmrażania zostały przedstawione na rys. 40.



Rys. 40 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania

Przyczepność zaprawy referencyjnej po 25 cyklach zamrażania-rozmrażania wyniosła 0,96 MPa i była o ponad 38% większa od przyczepności zaprawy bez dodatku superplastyfikatora (rys. 26, zaprawa ZH3/FC/EVA, 20% modyfikatora). W porównaniu do przyczepności początkowej pokazanej na rys. 37, poddanie zaprawy cyklom zamrażania-rozmrażania spowodowało spadek przyczepności o niemal 30%.

Jak przedstawiono na rys. 38, wyniki badań przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania były jedynymi, w których częściowa zamiana cementu na dodatki mineralne powodowała spadek przyczepności wszystkich badanych zapraw. Dla każdego stosowanego dodatku, zwiększenie jego udziału wiązało się z dalszym pogarszaniem wytrzymałości złącza.

Najmniejszy spadek odnotowano w przypadku popiołu lotnego krzemionkowego – zaprawa, w której popiół stanowił 15% masy spoiwa, charakteryzowała się wytrzymałością złącza równą 0,88 MPa – o 8% mniejszą niż w przypadku zaprawy referencyjnej.

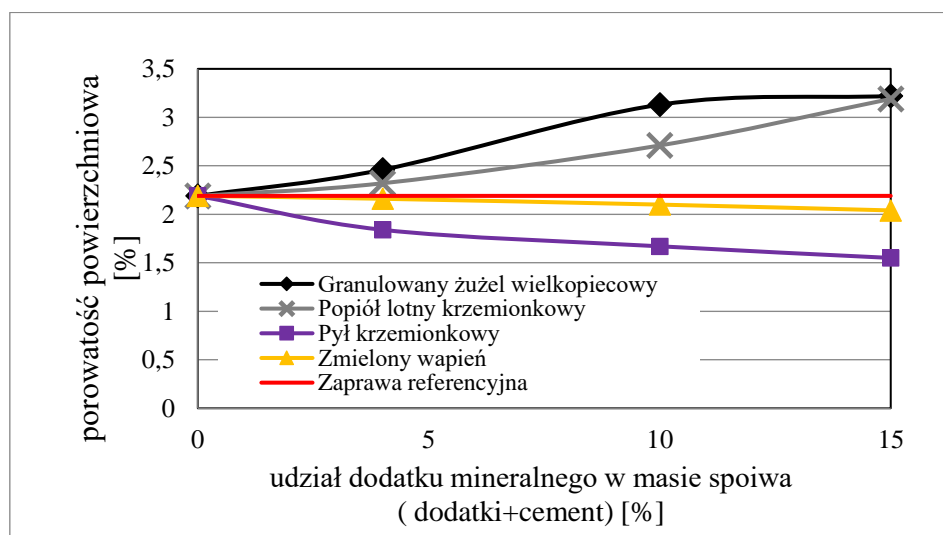
Dla pyłu krzemionkowego, zamiana 15% masy cementu powodowała spadek przyczepności o 12,5% w stosunku do zaprawy referencyjnej i wynosiła 0,84 MPa.

W przypadku próbek zapraw z dodatkiem granulowanego żużla wielkopiecowego wyraźny spadek przyczepności zaczął następować po przekroczeniu ilości 10% zamiany cementu portlandzkiego. Dla zaprawy, w której 15% cementu zastąpiono zmielonym granulowanym żużlem wielkopiecowym, przyczepność spadła do 0,80 MPa – ponad 16% niższej niż w przypadku zaprawy bez dodatków mineralnych.

Największy spadek przyczepności w porównaniu do zaprawy referencyjnej wystąpił w przypadku zapraw z dodatkiem zmielonego wapienia. Najniższą przyczepność odczytano dla próbki zaprawy, w której 15% cementu CEM I zastąpiono zmielonym wapieniem. Pomimo braku pozytywnego wpływu dodatków mineralnych na przyczepność zapraw po cyklach zamrażania-rozmrażania, wszystkie zaprawy będące przedmiotem badań spełniły normowe wymagania zawarte w PN-EN 14891:2017 [40] (przyczepność nie mniejsza niż 0,50 MPa).

9.2.5 Badanie wpływu dodatków mineralnych na porowatość zaprawy

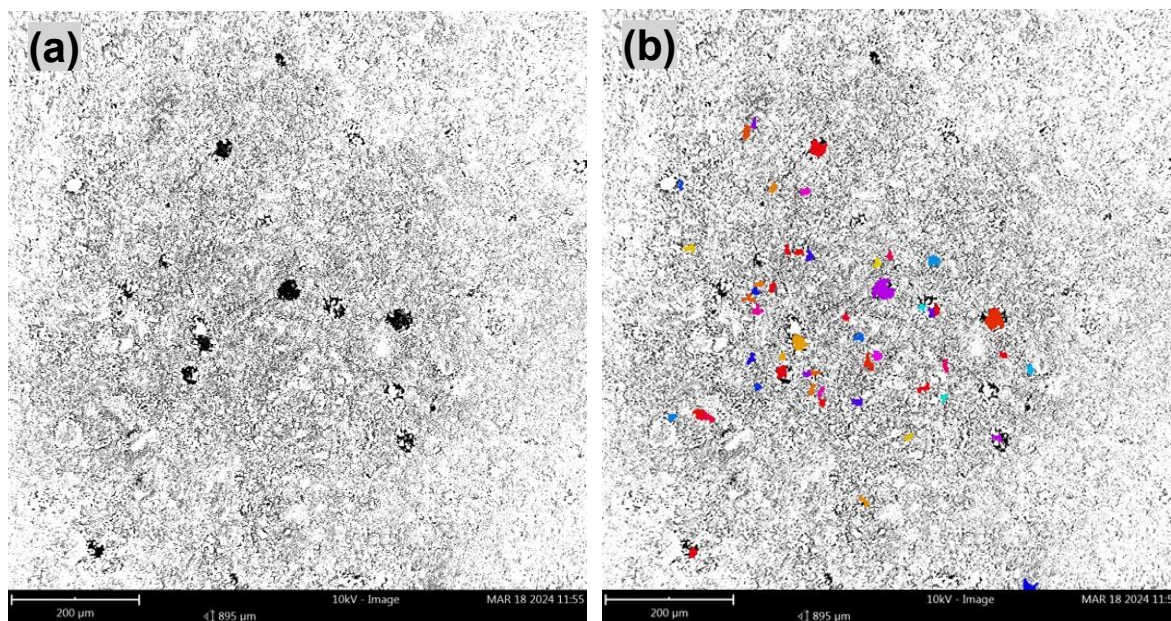
Na próbkach zapraw, w których 4%, 10% i 15% masowych cementu zostało zastąpione dodatkami mineralnymi, wykonano pomiary porowatości na powierzchni zaprawy oznaczanej przy użyciu oprogramowania komputerowego, które analizowało obraz zdjęć mikroskopowych z powierzchni stwardniałych zapraw. Na rys. 41 przedstawiono wyniki badań wpływu częściowej zamiany cementu CEM I na analizowane dodatki mineralne na porowatość powierzchni zapraw.



Rys. 41 Wpływ dodatków mineralnych na porowatość na powierzchni próbki

Porowatość powierzchni próbki referencyjnej bez dodatku superplastyfikatora w publikacji [55] wyniosła 2,66%. Była ona o 21% większa od porowatości próbki referencyjnej zamieszczonej na rys. 41, wynoszącej 2,19%.

Na rys. 42 (a) zamieszczono jedno ze zdjęć mikroskopowych powierzchni zaprawy referencyjnej. Rys. 42 (b) przedstawia to samo zdjęcie po analizie obrazu przy użyciu programu PoroMetric, z zaznaczonymi na kolorowo obszarami poprawnie zinterpretowanymi przez oprogramowanie jako pory.



Rys. 42 a) Zdjęcie mikroskopowe powierzchni próbki referencyjnej; b) to samo zdjęcie z zaznaczonymi kolorami obszarami zidentyfikowanymi jako pory [badania własne]

Jak przedstawiono na rys. 41, zwiększanie dodatku pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia miały wpływ na redukcję porowatości powierzchniowej, natomiast dodatki popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopieczowego powodowały zwiększenie sumarycznej powierzchni porów.

Dodatek pyłu krzemionkowego w największym stopniu zredukował porowatość zaprawy. Zastąpienie nim 15% masy cementu CEM I prowadziło do zmniejszenia porowatości do wartości 1,55%. W przypadku zmielonego wapienia, wraz ze zwiększaniem jego udziału w miejsce cementu CEM I obserwowano liniowy spadek porowatości powierzchniowej, która przy zastąpieniu wynoszącym 15% masy cementu wynosiła 2,04%.

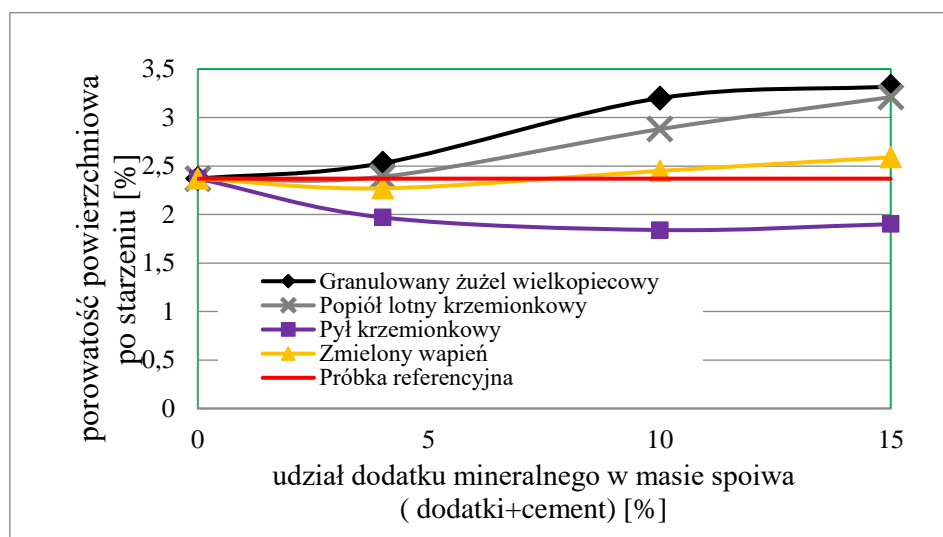
Wraz ze zwiększaniem w zaprawie udziału popiołu lotnego krzemionkowego, następowało zwiększanie porowatości powierzchniowej. Przy zamianie 15% masy cementu na popiół lotny, uległa zwiększeniu do 3,19%. W przypadku granulowanego żużla wielkopieczowego, zastępowanie nim do 10% masy cementu CEM I powodowało wyraźne zwiększenie porowatości do 3,13%. Dalsze zwiększanie udziału dodatku nie miało już znaczącego wpływu na porowatość powierzchniową – przy udziale żużla wielkopieczowego wynoszącym 15% masy cementu, wynosiła ona 3,22%.

Wyniki badania porowatości powierzchniowej nie miały bezpośredniego przełożenia na wodoszczelność próbek, której wyniki zamieszczono na rys. 36.

9.2.6 Analiza wpływu dodatków mineralnych w składzie spoiwa na trwałość zaprawy określoną jako zmiana porowatości powierzchniowej po dojrzewaniu w komorze starzeniowej

Zaprawy, w których 4%, 10% i 15% masowych cementu zostało zastąpione dodatkami mineralnymi, po 7 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych zostały umieszczone w komorze do przyspieszonych badań starzeniowych, trwających 1000 godzin. Obejmowały one 165 cykli, imitujących naprzemienne oddziaływanie gorąca (temperatura 60°C) i deszczu (natrysk).

Po zakończeniu starzenia, na powierzchni badanych zapraw wykonano pomiary porowatości przy użyciu oprogramowania komputerowego, które analizowało obrazy zdjęć mikroskopowych. Na rys. 43 przedstawiono uzyskane wyniki badań.



Rys. 43 Wpływ dodatków mineralnych na trwałość zapraw wyrażoną jako porowatość na powierzchni próbki po starzeniu

Jak widać na rys. 43, porowatość zaprawy referencyjnej wynosiła 2,37%. Wskutek dojrzewania w komorze starzeniowej, sumaryczna powierzchnia porów na jej powierzchni zwiększyła się o 8% w porównaniu do porowatości zaprawy referencyjnej (przedstawionej na rys. 41), która dojrzewała w warunkach laboratoryjnych.

Podobnie jak w przypadku badania porowatości po sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych, największy spadek porowatości odnotowano dla zapraw, w których część cementu CEM I zastąpiono pyłem krzemionkowym i zmielonym wapieniem. Dla pyłu krzemionkowego najniższą porowatość, wynoszącą 1,84%, osiągnęła zaprawa, w której dodatkiem mineralnym zastąpiono 10% masy cementu. Była ona o 10% wyższa niż porowatość

tej samej zaprawy po sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych, co zostało przedstawione na rys 41.

Dla zmielonego wapienia najniższą sumę porów na powierzchni odnotowano w przypadku zaprawy, w której 4% masy cementu zastąpiono tym dodatkiem. Porowatość wynosiła 2,27% i była o 5% wyższa niż porowatość tej samej zaprawy po sezonowaniu w warunkach laboratoryjnych (rys. 41).

W przypadku popiołu lotnego krzemionkowego niewielka ilość dodatku wynosząca 4% masy cementu miała znikomy wpływ na porowatość zaprawy. Wraz ze zwiększaniem ilości popiołu, wyraźnie zwiększała się sumaryczna powierzchnia porów osiągając 3,32% przy udziale dodatku wynoszącym 15% masy cementu. Była ona minimalnie wyższa niż porowatość tej samej zaprawy nie poddana starzeniu (rys. 41).

W przypadku zapraw, w których część cementu zastąpiono granulowanym żużlem wielkopieczowym, zwiększanie udziału dodatku do 10% masy cementu spowodowało wyraźny przyrost porowatości po starzeniu do poziomu 3,20%. Dalsze zwiększanie udziału żużłu miało znacznie mniejszy wpływ na sumę powierzchni porów. Zaprawa, w której 15% masy spoiwa stanowił granulowany żużel wielkopieczowy, porowatość powierzchniowa była najwyższa i wynosiła 3,32%. Wskutek dojrzewania w komorze starzeniowej, jej porowatość wzrosła zatem o 3% w porównaniu do wyniku osiągniętego przez tę samą zaprawę bez procesu starzenia (rys. 41).

9.2.7 Wpływ dodatków mineralnych na elastyczność zaprawy

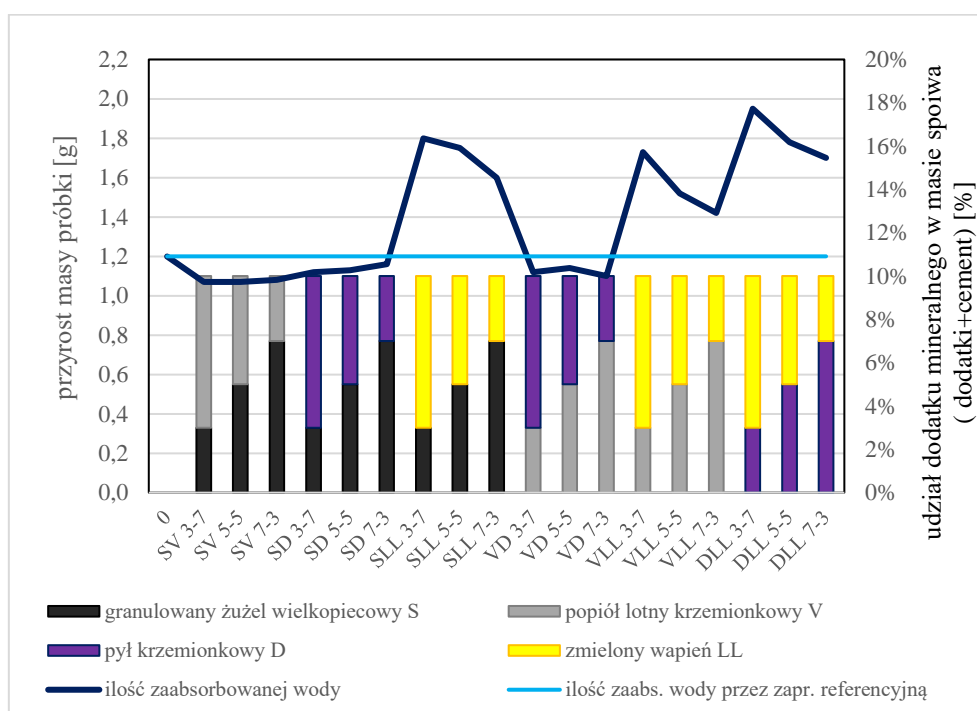
Celem określenia wpływu dodatków mineralnych na elastyczność zaprawy uszczelniającej, przeprowadzono badanie odkształcalności poprzecznej, w którym miarą elastyczności było odkształcenie próbki w momencie zniszczenia jej wskutek trójpunktowego zginania. W próbkach zapraw poddanych badaniu 4%, 10% i 15% masowych cementu CEM I zostało zastąpione analizowanymi dodatkami mineralnymi.

Uzyskane wyniki nie pozwoliły na określenie wpływu dodatków mineralnych na odkształcalność zapraw z uwagi na ograniczony zakres maszyny pomiarowej – dla wszystkich badanych zapraw, przy maksymalnym odkształceniu z zakresu 16,35÷17,00 mm, nie następowało uszkodzenie badanych zapraw.

9.2.8 Ocena jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na szczelność zaprawy uszczelniającej

Zbadano wpływ zamiany części cementu CEM I na jednocześnie dwa spośród analizowanych dodatków mineralnych na szczelność zapraw i przyczepność do podłoża. W tym celu każdorazowo 10% masy cementu zastępowano jednocześnie dwoma składnikami o zmiennych proporcjach, wynoszących 3%-7%, 5%-5% i 7%-3% masy cementu. Wszystkie zaprawy wykonane były przy odpowiedniej ilości superplastyfikatora, którego ilość zapewniła uzyskanie stałej konsystencji (rozplływ 125 ± 5 mm) przy takiej samej ilości wody zarobowej, wynoszącej 220 ml, podobnie jak dla badań wpływu pojedynczego dodatku.

Na rys. 44 przedstawiono wyniki badania wpływu zamiany 10% masy cementu CEM I na dwa dodatki mineralne.



Rys. 44 Wpływ dwóch zmieszanych dodatków mineralnych na szczelność zaprawy uszczelniającej wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody

Ilość wody zaabsorbowanej przez zaprawę referencyjną wyniosła 1,2 g.

Najmniejsze ilości zaabsorbowanej wody miały miejsce w przypadku zapraw, w których 10% masy cementu zastąpiono mieszaniną żużel-popiół krzemionkowy. zaprawy SV3-7 i SV 5-5 zaabsorbowały 1,07 g.

Przy zamianie 10% masy cementu na granulowany żużel wielkopiecowy, ilość zaabsorbowanej wody przez zaprawę wyniosła 1,08 g, zaś w przypadku zastąpienia tej samej ilości cementu popiołem lotnym krzemionkowym przyrost masy wyniósł 1,10 g. W przypadku

kombinacji granulowanego żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego krzemionkowego SV, odnotowano zatem wynik nieznacznie korzystniejszy od najlepszego wyniku uzyskanego przy zastępowaniu tej samej ilości cementu pojedynczym dodatkiem mineralnym.

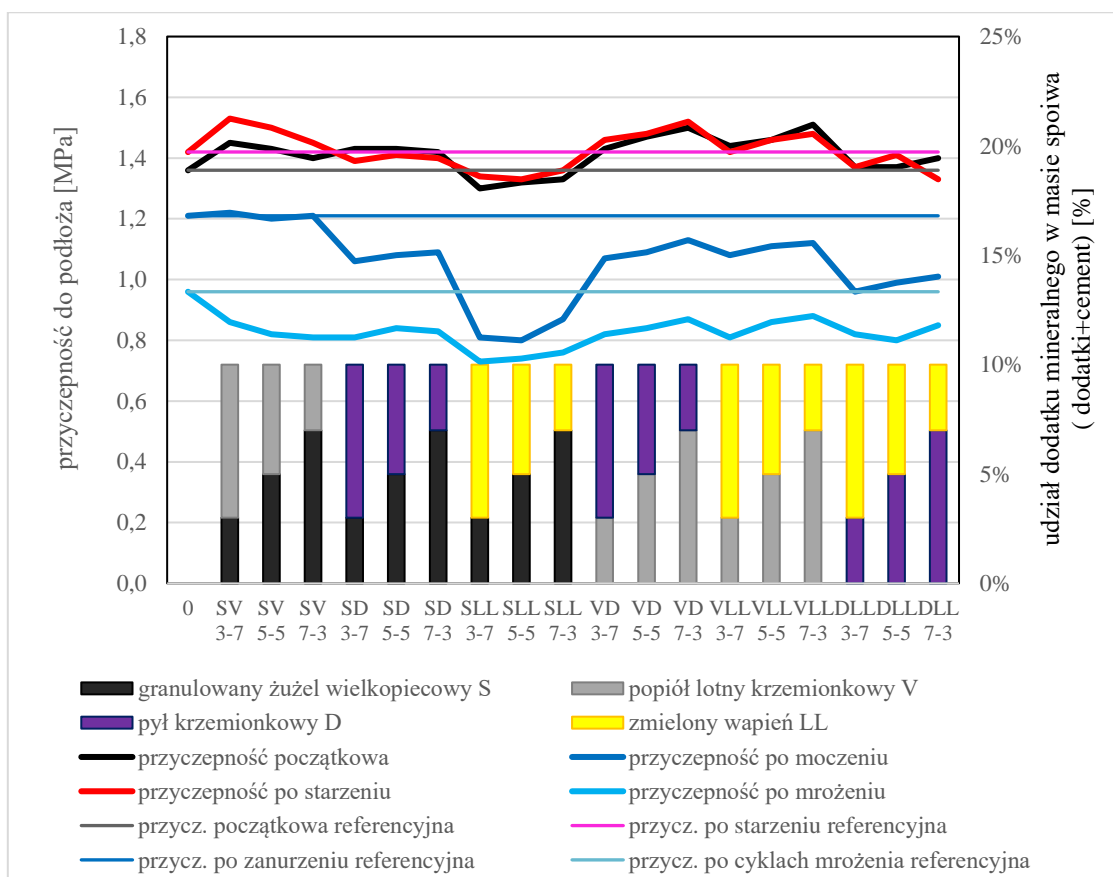
Bardzo zbliżone ilości zaabsorbowanej wody występowały w przypadku próbek zaprawy z serii SV (żużel-popiół krzemionkowy), SD (żużel-pył krzemionkowy) i VD (popiół krzemionkowy-pył krzemionkowy). Szczelność wszystkich tych próbek była wyższa niż zaprawy referencyjnej.

Podobnie jak miało miejsce w przypadku badania wpływu pojedynczych dodatków, największe ilości zaabsorbowanej wody odnotowywano w przypadku zapraw, których jednym z dodatków mineralnych był zmielony wapień. Wszystkie zaprawy z udziałem wapienia charakteryzowały się gorszą szczelnością od zaprawy referencyjnej. Najgorsze wyniki uzyskano dla zapraw z serii DLL – mieszanina pyłu krzemionkowego i wapienia. We wszystkich zaprawach z udziałem zmielonego wapienia przyrost masy próbki wskutek oddziaływania wody był największy w przypadku receptur, w których proporcja wapienia do drugiego dodatku mineralnego wynosiła 7:3. Największy przyrost masy odnotowano dla zaprawy DLL 3-7 i wyniósł on 1,95 g. Drugi najgorszy wynik 1,80 g miał miejsce w przypadku zaprawy SLL 3-7 – kombinacji granulowanego żużli wielkopieczowego i zmielonego wapienia w proporcjach masowych 3-7.

Należy odnotować, że wszystkie zaprawy spełniły normowe wymagania dotyczące wodoszczelności zapraw uszczelniających do podłoża (przyrost masy nie większy niż 20 g).

9.2.9 Ocena jednoczesnego wpływu dwóch dodatków mineralnych na przyczepności zaprawy uszczelniającej

Wyniki badania zamiany 10% masy cementu na jednocześnie dwa spośród czterech analizowanych dodatków mineralnych na przyczepności do podłoża zaprawy uszczelniającej określone po czterech normowych sposobach sezonowania (przyczepność początkowa, po zanurzeniu, po starzeniu termicznym i po cyklach zamrażania-rozmrażania) przedstawiono na rys. 45.



Rys. 45 Wpływ dwóch zmieszanych dodatków mineralnych na przyczepności do podłoża

Podobnie jak w przypadku zamiany części cementu na pojedyncze dodatki, najniższe wytrzymałości złącza przedstawione na rys. 45 osiągały próbki poddawane cyklem zamrażania-rozmrażania. Były to wartości z zakresu $0,73 \div 0,88$ MPa, natomiast przyczepność zaprawy referencyjnej wyniosła 0,96 MPa. Zamiana części cementu CEM I na mieszaninę dwóch dodatków mineralnych każdorazowo wiązała się zatem z pogorszeniem przyczepności zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania w porównaniu do zaprawy nie zawierającej dodatków.

Najwyższą przyczepność spośród zapraw z dodatkami mineralnymi wynoszącą 0,88 MPa osiągnęła próbka zaprawy VLL 7-3, w której proporcje masowe popiołu lotnego krzemionkowego do zmielonego wapienia wynosiły 7:3. Była ona o 8% niższa niż w przypadku próbki referencyjnej. Bardzo zbliżone przyczepności uzyskiwały również zaprawy, w których część cementu zastąpiono mieszaniną pyłu krzemionkowego i popiołu krzemionkowego VD (rys. 45). Najwyższą spośród nich wynoszącą 0,87 MPa uzyskano w przypadku zaprawy VD 7-3 z większym udziałem popiołu lotnego. Najniższe wyniki przyczepności po cyklach zamrażania-rozmrażania odnotowano w przypadku zapraw serii SLL, w której 10% masy cementu zastąpiono kombinacją granulowanego żużla wielkopiecowego i zmielonego

wapienia. Najmniejszą przyczepność 0,73 MPa osiągnęła zaprawa SLL 3-7, w której proporcje masowe żuźła do wapienia wynosiły 3:7. Przyczepność złącza po cyklach zamrażania-rozmrażania była w tym przypadku o 24% niższa niż dla zaprawy referencyjnej.

Wyraźnie wyższe przyczepności osiągnęły zaprawy po zanurzeniu w wodzie. Przyczepność zaprawy referencyjnej wyniosła 1,21 MPa.

Najkorzystniejszy wpływ na wytrzymałość złącza po zanurzeniu miał dodatek popiołu lotnego krzemionkowego – zaprawy z jego udziałem osiągały wyraźnie wyższe przyczepności od pozostałych. Zaprawy z serii SV (kombinacja żuźel-popiół) charakteryzowały się najwyższymi przyczepnościami, bardzo zbliżonymi do zaprawy referencyjnej. Ich przyczepności mieściły się w zakresie 1,20÷1,22 MPa.

Próbki, w których 10% masy cementu CEM I zastąpiono kombinacją popiołu lotnego krzemionkowego i pyłu krzemionkowego (seria VD) osiągały przyczepności z zakresu 1,07÷1,13 MPa – niemal identyczne z wynikami zapraw z kombinacją popiołu lotnego i zmielonego wapienia (seria VLL) wynoszącymi 1,08÷1,12 MPa. W obu przypadkach najwyższe przyczepności w serii uzyskiwała zaprawa z najwyższym udziałem masowym popiołu lotnego krzemionkowego, a najniższe – próbka zaprawy z najniższym jego udziałem.

Nieco niższe przyczepności po oddziaływaniu wody mieszczące się w zakresie 1,06÷1,09 MPa uzyskały próbki zapraw z serii SD – z udziałem mieszaniny granulowanego żuźła wielkopieczowego i pyłu krzemionkowego. Większą przyczepność w serii uzyskała próbka zaprawy z wyższym udziałem żuźła, a mniejszą – próbka z wyższym udziałem pyłu krzemionkowego.

Zaprawy, w których część cementu zastąpiono kombinacją pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia (seria DLL) charakteryzowały się przyczepnością po oddziaływaniu wody mieszczącą się w zakresie 0,96÷1,01 MPa. Przyczepności uległy obniżeniu wraz ze zwiększaniem udziału mączki wapiennej.

Wyraźnie najniższe przyczepności po zanurzeniu uzyskały próbki zapraw z serii SLL – z granulowanym żuźlem wielkopieczowym i zmielonym wapieniem. Mieściły się one w przedziale 0,80÷0,87 MPa.

Zdecydowanie wyższe wyniki uzyskano dla przyczepności początkowej i przyczepności po starzeniu termicznym. Wyniki te były zbliżone do siebie – w przypadku przyczepności początkowej mieściły się w zakresie 1,30÷1,51 MPa, a w przypadku przyczepności po starzeniu termicznym – w zakresie 1,33÷1,53 MPa.

Przyczepność początkowa zaprawy referencyjnej wyniosła 1,36 MPa.

Najlepszymi przyczepnościami początkowymi, mieszczącymi się w zakresie 1,44÷1,51 MPa charakteryzowała się seria VLL (kombinacja popiołu lotnego krzemionkowego i wapienia). Zaprawa VLL 7-3 (proporcje masowe popiołu lotnego do wapienia równe 7:3) charakteryzowała się przyczepnością początkową o 10% wyższą od zaprawy referencyjnej. Odnotowano wzrost przyczepności wraz ze zwiększaniem udziału popiołu lotnego krzemionkowego.

Najniższe przyczepności początkowe zapraw z dwoma dodatkami mineralnymi były bardzo zbliżone do przyczepności początkowej zaprawy referencyjnej. Dotyczyły one serii SLL (granulowany żużel wielkopieczowy i zmielony wapień), dla której przyczepności wynosiły 1,30÷1,33 MPa oraz DLL (pył krzemionkowy i zmielony wapień) z wartościami z zakresu 1,37÷1,40 MPa. W obu przypadkach najniższa przyczepność w serii miała miejsce w przypadku zaprawy z największym udziałem masowym wapienia.

Przyczepność zaprawy referencyjnej po starzeniu termicznym wyniosła 1,42 MPa.

Najwyższe przyczepności osiągały zaprawy z serii SV (żużel z popiołem lotnym), mieszczące się w zakresie 1,45÷1,53 MPa oraz zaprawy z serii VD (popiół lotny z pyłem krzemionkowym) – 1,46÷1,52 MPa. Najwyższa przyczepność, wynosząca 1,53 MPa, osiągnięta przez zaprawę SV 3-7 (proporcje masowe żużel-popiół lotny 3:7) była o 8% wyższa niż przypadku próbki zaprawy referencyjnej. W seriach tych przyczepność rosła wraz ze zwiększaniem udziału popiołu lotnego. Dla serii SV przyczepności po starzeniu termicznym były wyraźnie wyższe od przyczepności początkowych.

Najniższe przyczepności po starzeniu miały miejsce w przypadku zapraw, w których 10% masy cementu CEM I zamieniono na granulowany żużel wielkopieczowy i zmielony wapień (seria SLL). Zaprawy te osiągały wyniki z zakresu 1,33÷1,36 MPa, a zaprawa SLL 5-5 o najniższej przyczepności, charakteryzowała się wytrzymałością złącza o 6% niższą od zaprawy referencyjnej.

Jak przedstawiono na rys. 45, najwyższe lub jedno z najwyższych przyczepności dla każdego sposobu dojrzewania osiągały natomiast zaprawy z serii SV z udziałem granulowanego żużla wielkopieczowego i popiołu lotnego krzemionkowego. Dla każdego sposobu kondycjonowania najkorzystniejsze wyniki osiągała zaprawa SV 3-7, w której proporcje żużla do popiołu lotnego wynosiły 3:7. Najgorsze wyniki przyczepności początkowej, po zanurzeniu, po starzeniu termicznym oraz po cyklach zamrażania-rozmrażania osiągały zaprawy z serii SLL, w których 10% masy cementu zastępowano jednocześnie granulowanym żużlem wielkopieczowym i zmielonym wapieniem.

W przypadku zamiany części cementu na jeden dodatek (rys. 37-40), najlepsze przyczepności osiągały zaprawy z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego. Żaden z wyników zestawionych na rys. 46 nie osiągnął wyższej wartości od przyczepności uzyskiwanych przez sam popiół lotny. Jednakże w porównaniu do najgorszych wyników osiąganych w badaniach z pojedynczym dodatkiem mineralnym przez zaprawy ze zmielonym wapieniem, wszystkie zaprawy z cementem zamienianym na 2 dodatki charakteryzowały się lepszymi lub bardzo zbliżonymi przyczepnościami do podłoża.

Wszystkie analizowane zaprawy spełniły normowe wymagania dotyczące przyczepności zapraw uszczelniających do podłoża zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] (przyczepność nie mniejsza niż 0,50 MPa).

10 PRAKTYCZNE ASPEKTY DOTYCZĄCE ZAPRAW USZCZELNIAJĄCYCH

Na podstawie doświadczenia zdobytego przez autora podczas pracy w laboratorium badań i rozwoju producenta materiałów budowlanych, zwłaszcza w czasie opracowywania receptur cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających, opracowano następujący sposób przeprowadzania zabiegu hydroizolacji przy użyciu cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających:

- wymagane jest podłoże nośne, czyste, wolne od pyłu, mlecza cementowego, słabo związanych części, rdzy, tłuszczu, smaru i innych substancji pogarszających adhezję. W przypadku porażenia biologicznego lub mikrobiologicznego zachodzi konieczność dokładnego usunięcia go poprzez zastosowanie preparatu biobójczego zgodnie z zaleceniami producenta,
- do materiałów, na które dopuszczalna jest aplikacja zapraw zalicza się wysezonowane, związane podłoża takie jak beton, beton lekki, beton komórkowy, tynki cementowe i cementowo-wapienne, płyty gipsowo-kartonowe, gipsowo-włóknowe i cementowe, mur z cegły ceramicznej lub kamienny o równej powierzchni, jastrychy cementowe i anhydrytowe suche (odpowiednio wygrzane – zgodnie z zaleceniami producenta), suche płyty budowlane wiązane cementem, podłoża metalowe, podłogi ogrzewane, stare okładziny ceramiczne, marmur,
- w przypadku nierówności podłoża, zalecane jest wyrównanie go przy użyciu zaprawy tynkarskiej lub szpachlowej. Ostre krawędzie podłoża należy zaokrąglić do promienia nie mniejszego niż 5 cm. W przypadku większych nierówności podłoża zaleca się wyrównanie go przy użyciu lekkiej zaprawy tynkarskiej. W przypadku śliskich podłoży cementowych, które nie wymagają gruntowania, zalecane jest ich lekkie zwilżenie przed aplikacją zaprawy do stanu wilgotno-matowego,
- w przypadku podłoży o wysokiej nasiąkliwości oraz podłoży anhydrytowych, zalecane jest gruntowanie preparatem obniżającym chłonność podłoża, np. drobnocząsteczkowym gruntem głęboko penetrującym. W przypadku śliskich podłoży o niskiej nasiąkliwości jak np. płytki ceramiczne, przed aplikacją hydroizolacji zaleca się ich zmatowienie np. przy użyciu papieru ściernego i zagruntowanie przy użyciu preparatu gruntującego z grubszym kruszywem, który ma za zadanie zwiększenie przyczepności,

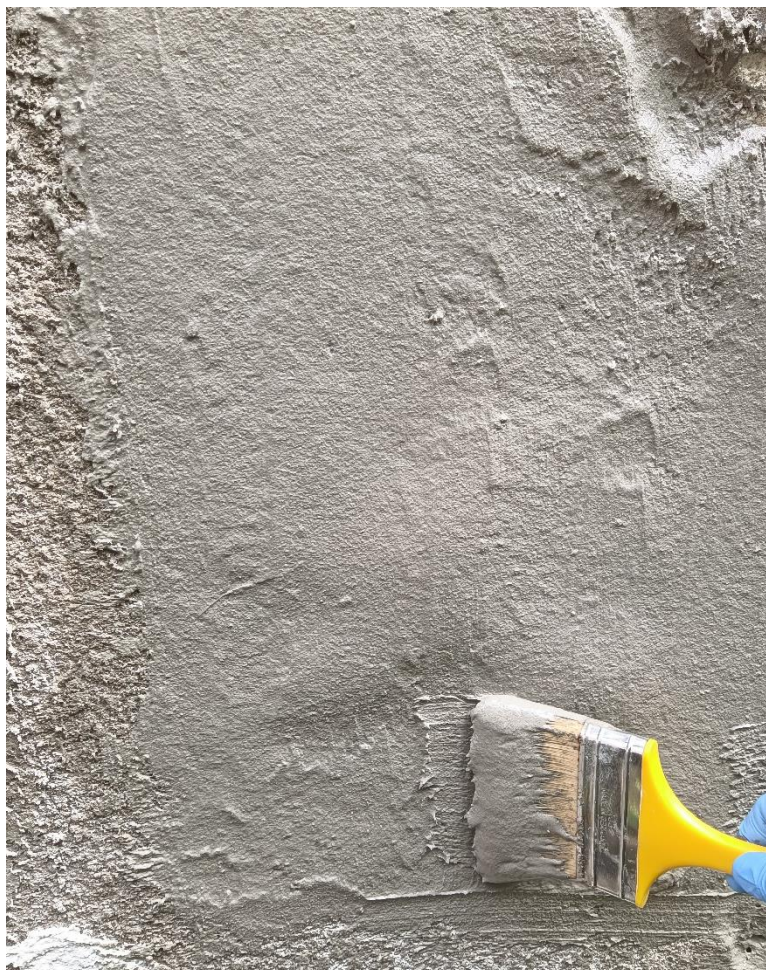
- zalecane jest stosowanie co najmniej 2 warstw mniejszej grubości zamiast jednej grubszej, odpowiadającej przekrojem sumie grubości mniejszych warstw, z uwagi na dowiedzioną w niniejszej pracy zwiększoną koncentrację polimeru we wierzchniej oraz spodniej części zaprawy. Drugą warstwę należy aplikować po osiągnięciu przez pierwszą wymaganej wytrzymałości. Całkowita grubość warstwy hydroizolacji powinna odpowiadać przewidywanemu obciążeniu wilgocią lub wodą, jakiemu poddawana jest przegroda,
- dopuszczalny jest duży zakres zalecanej ilości wody zarobowej – w zależności od jej dozowania, dopuszcza się zarówno aplikację pacą, wałkiem lub pędzlem, jak i metodą natryskową,
- w przypadku równego i gładkiego podłoża, korzystniejsze jest wymieszanie zaprawy z mniejszą ilością wody zarobowej, zbliżoną do dolnej granicy przedziału zalecanego przez producenta i aplikacja materiału przy użyciu pacy zębatej, z uwagi na lepszą możliwość kontroli grubości warstwy. Przykład takiej aplikacji przedstawiono na rys. 46,



Rys. 46 aplikacja zaprawy uszczelniającej na równym podłożu przy użyciu pacy zębatej [zdjęcie własne]

- w przypadku podłoży nieregularnych, o większych nierównościach, zaprawę, a w szczególności pierwszą jej warstwę, należy przygotować poprzez zmieszanie

z większą ilością wody zbliżoną do górnej granicy ilości zalecanej przez producenta. Tak przygotowaną zaprawę należy aplikować przy użyciu pędzla – tak, aby wolne przestrzenie i nierówności zostały lepiej wypełnione przez zaprawę o konsystencji półpłynnej, umożliwiającą lepszą penetrację nierówności podłoża. Celem poprawnego i równomiernego rozprowadzenia zaprawy na powierzchni podłoża, należy wykonywać ruchy krzyżowe – zarówno góra-dół, jak i prawo-lewo. Przykład takiej aplikacji przedstawiono na rys. 47,



Rys. 47 aplikacja zaprawy uszczelniającej na nierównym podłożu przy użyciu pędzla [zdjęcie własne]

- podczas wykonywania hydroizolacji konieczne jest przestrzeganie zasad sztuki budowlanej dotyczących m.in. temperatury powietrza i podłoża w czasie trwania prac budowlanych i w początkowym okresie sezonowania (temperatura dodatnia, nie większa od maksymalnej – zgodnie z zaleceniami producenta), nasłonecznienia (konieczność stosowania siatek ochronnych), zalecanych przez producenta czasookresów oraz proporcji wody zarobowej/komponentu płynnego do części sypkiej,

- zachodzi konieczność stosowania taśm i elementów systemowych na krawędziach, narożach, szczelinach, połączeniach ścian z podłogą i innych zmianach przekrojów elementów, na które aplikowana jest zaprawa oraz manszet i kołnierzy w miejscach przyłączy instalacyjnych. Należy je zatapiać w warstwie zaprawy uszczelniającej z zachowaniem zakładu, celem eliminacji obszaru koncentracji naprężeń,
- na powierzchniach narażonych na uszkodzenia mechaniczne zaleca się wykonanie warstwy ochronnej np. w postaci jastrychu ochronnego lub okładziny ceramicznej,
- korzystniejszym rozwiązaniem jest aplikacja zaprawy uszczelniającej od strony pozytywnej, tzn. umieszczenie jej pomiędzy źródłem wilgoci, a izolowaną przegrodą w taki sposób, aby napór wody dociskał do niej wykonaną hydroizolację. Rozwiązanie to pozwala na wykonanie poziomej przepony przeciwwilgociowej poniżej poziomu gruntu, co przekłada się na osuszenie ściany fundamentowej i tym samym znaczne oddalenie źródła wilgoci od wnętrza pomieszczenia,
- w przypadku izolacji elementów podziemnych, zachodzi konieczność okopania budynku, celem uzyskania dostępu do zewnętrznej powierzchni fundamentu. Bardzo istotnym aspektem takiego rozwiązania jest wykonanie warstwy chroniącej hydroizolację przed niszczącym działaniem napierającego gruntu. Korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie płyt ochronno-drenażowych, płyt XPS, geosiatki. Konieczne jest zachowanie szczególnej ostrożności przy zakopywaniu wykopów. Na krawędzi połączenia ściany fundamentowej ze stopą lub płytą zalecane jest zastosowanie fasety wyoblającej przekrój. W przypadku izolacji fundamentu połączonej z dociepleniem, konieczne jest stosowanie taśm uszczelniających na łączeniu płyt,
- w sytuacji, gdy nie jest możliwe wykonanie izolacji fundamentu od strony zewnętrznej np. z uwagi na przyleganie do budynku ciągów pieszych lub ulicy, bardzo często występujące w zwartej zabudowie miejskiej charakterystycznej dla centrów miast, zachodzi konieczność wykonania izolacji od strony wnętrza. Wiąże się to z zatrzymaniem wilgoci wewnątrz ściany i uniemożliwia wykonanie poziomej przepony przeciwwilgociowej poniżej poziomu gruntu. Przy takim rozwiązaniu bardzo istotne jest odpowiednie przygotowanie podłoża, gdyż woda gruntowa pod ciśnieniem może powodować negatywne parcie na izolację, co w przypadku nieodpowiedniej adhezji może powodować odspajanie hydroizolacji od podłoża,
- hydroizolację należy wykonać zarówno na powierzchni muru, jak i na powierzchni systemu docieplenia. Następnie docieploną powierzchnię pokryć można warstwą

wykończeniową, np. tynkiem o właściwościach hydrofobowych. Zaleca się wyprowadzenie docieplenia ścian fundamentowych na wysokość co najmniej 30 cm powyżej poziomu gruntu lub wyżej, w przypadku obszarów o podwyższonym ryzyku wystąpienia powodzi i podtopień.

Jednokomponentowa cementowo-polimerowa zaprawa uszczelniająca znalazła zastosowanie m.in. podczas prac renowacyjnych tzw. Manufaktury Grossa – XIX-wiecznego kompleksu dawnej fabryki likierów, mieszczącej się przy ul. ks. S. Stojałowskiego 63 w Bielsku-Białej. Ok. 2020 r. rozpoczęto renowację obiektu połączoną ze zmianą sposobu użytkowania – na parterze zlokalizowano lokale usługowe, natomiast na piętrach znajdować się będą lokale mieszkalne. Częściowo wyremontowaną zachodnią elewację obiektu przedstawiono na rys. 48.



Rys. 48 Zachodnia elewacja Manufaktury Grossa (Bielsko-Biała) w 2023 r. [zdjęcie własne]

W 2023 r. zaprawa uszczelniająca została zaaplikowana na odpowiednio przygotowane, oczyszczone i wyrównane podłoże – odkopany do głębokości ok. 1 m kamienny fundament, którego fragment na przykładzie ściany zachodniej widoczny jest na rys. 50.



Rys. 49 Częściowo odsłonięty kamienny fundament zachodniej ściany Manufaktury Grossa, na który aplikowano zaprawę uszczelniającą [zdjęcie własne]

Jednokomponentowa zaprawa uszczelniająca aplikowana była także na strefie cokołowej krótkiej ściany południowej budynku wzdłuż ul. Stojałowskiego. Z uwagi na bezpośrednie przyleganie do ciągów pieszych, nie było możliwości wykonania izolacji pionowej części podziemnej konstrukcji.

11 WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników badań i ich szczegółowej interpretacji wyciągnięto następujące wnioski, które przedstawiono poniżej:

- Cel pracy, jakim było opracowanie receptury uniwersalnej jednokomponentowej cementowo-polimerowej zaprawy uszczelniającej przeznaczonej do wykonywania pionowych i poziomych izolacji przeciwwilgociowych i przeciwwodnych z dodatkami mineralnymi pochodzącymi z recyklingu, został osiągnięty. Uzyskana jednokomponentowa zaprawa z wykorzystaniem proszku redyspergowalnego oraz granulowanego żużla wielkopieczowego, popiołu lotnego krzemionkowego i pyłu krzemionkowego charakteryzowała się korzystniejszymi właściwościami kluczowymi w aspekcie skuteczności hydroizolacji, niż analizowane zaprawy dwukomponentowe niezawierające wymienionych dodatków (spełniona Teza 1 i 2).
- Zmielony granulowany żużel wielkopieczowy nie miał wpływu na konsystencję zaprawy uszczelniającej. Spośród wszystkich analizowanych dodatków mineralnych miał najkorzystniejszy wpływ na wodoszczelność oraz zdolność zapraw do mostkowania rys podłoża. Korzystnie wpływał na przyczepności początkową, po starzeniu termicznym oraz po zanurzeniu oraz na trwałość wyrażoną jako zmiana powierzchniowej porowatości próbek po kondycjonowaniu w komorze starzeniowej (spełniona Teza 1).
- Dodatek popiołu lotnego krzemionkowego pozytywnie wpływał na wodoszczelność, przyczepności początkową, po starzeniu termicznym, po zanurzeniu oraz na trwałość zaprawy uszczelniającej. Zaprawy z jego udziałem charakteryzowały się najkorzystniejszymi przyczepnościami po cyklach zamrażania-rozmrażania. Także w badaniach, w których stosowano jednocześnie dwa dodatki mineralne, wraz ze zwiększaniem udziału popiołu lotnego krzemionkowego następował przyrost przyczepności po najbardziej wymagających sposobach kondycjonowania zapraw: po zanurzeniu w wodzie oraz po cyklach zamrażania-rozmrażania (spełniona Teza 1 i 3).
- Pył krzemionkowy miał pozytywny wpływ na wodoszczelność, przyczepność początkową i po starzeniu termicznym. Przy niewielkim dozowaniu dodatku przyczepności po zanurzeniu i cyklach zamrażania-rozmrażania były zbliżone do przyczepności zaprawy referencyjnej. Spośród analizowanych dodatków pył krzemionkowy miał najkorzystniejszy wpływ na porowatość powierzchniową (spełniona Teza 1).
- Częściowa zamiana zmielonego wapienia pozwalała na uzyskanie korzystnych przyczepności początkowej i po starzeniu termicznym. Dodatek zmielonego wapienia miał

także pozytywny wpływ na redukcję powierzchniowej porowatości zaprawy (spełniona Teza 1).

- Wraz ze zwiększaniem udziału popiołu lotnego krzemionkowego, pyłu krzemionkowego i zmielonego wapienia rosło zapotrzebowanie na środek upłynniający potrzebny do uzyskania stałej konsystencji. Największy wpływ na konsystencję wykazywał pył krzemionkowy, co należy wiązać z jego wysoką miążkością i wodożądnością.
- Konsystencja zaprawy uszczelniającej miała istotny wpływ na właściwości wyrobu po związaniu: przyczepność do podłoża, zdolność do mostkowania pęknięć podłoża oraz wodoszczelność.
- Redukcja wody zarobowej wskutek dodatku superplastyfikatora w znacznym stopniu poprawiła przyczepność zapraw do podłoża po wszystkich analizowanych warunkach kondycjonowania (spełniona Teza 3).
- Wyniki badań porowatości powierzchniowej nie dają wiarygodnych informacji dotyczących wodoszczelności próbki – pył krzemionkowy i zmielony wapień, wpływające na obniżenie porowatości, miały negatywny wpływ na ilość wody zaabsorbowanej w badaniu szczelności. Może mieć to związek z hydrofilowym charakterem tych dodatków.
- Zamiana części cementu na zmieszane dwa dodatki mineralne pozwala uzyskać zaprawę o wodoszczelności i przyczepności do podłoża wyższej niż w przypadku zaprawy referencyjnej wykonanej z cementu portlandzkiego CEM I (spełniona Teza 1).
- Zwiększanie udziału modyfikatorów polimerowych miało istotny wpływ na konsystencję zaprawy. Modyfikatory w postaci płynnych dyspersji polimerowych wywierały mniejszy wpływ na właściwości robocze niż proszki redyspergowalne. W związku z tym w przypadku modyfikatorów proszkowych występowała konieczność stosowania większej ilości superplastyfikatora w celu zachowania wymaganych właściwości roboczych.
- Wodoszczelność zapraw uzależniona była od udziału modyfikatora polimerowego – wraz z jego wzrostem zmniejszała się ilość wody absorbowanej przez próbkę. Spośród analizowanych polimerów najkorzystniejszy wpływ na wodoszczelność wywierały 2 modyfikatory polimerowe: ZH2/SA – kopolimer styrenowo-akrylowy w postaci wodnej dyspersji oraz ZH3/CF/EVA – kopolimer etylenu i octanu winylu w postaci proszkowej. Przy udziale modyfikatora wynoszącym 20% masowych, próbki zapraw z tymi polimerami z dużym zapasem spełniały wymagania normowe w zakresie szczelności. Nieznacznie korzystniejszy wpływ na wodoszczelność wywierał modyfikator ZH3/CF/EVA.

- Dla większości analizowanych polimerów optymalny udział polimeru, przy którym zaprawa osiąga najwyższe przyczepności wynosił 20% masowych. Najbardziej niekorzystnymi warunkami sezonowania było zanurzenie w wodzie i cykle zamrażania-rozmrażania – przy nich zaprawy osiągały zdecydowanie najniższe wyniki badania przyczepności. W najbardziej niekorzystnych warunkach najwyższe przyczepności uzyskiwały polimery: ZH1/ASA kopolimer styrenowo-akrylowy w postaci płynnej i proszek redyspergowalny ZH3/CF/EVA.
- Udział polimeru w zaprawie ma znacznie większy wpływ na wodoszczelność i przyczepność do podłoża niż udział cementu.
- Proszek redyspergowalny ZH3/CF/EVA charakteryzował się najbardziej równomiernym rozmieszczeniem w strukturze zaprawy. Miało to przełożenie m.in. na najwyższą szczelność próbki z jego udziałem.
- Rozmieszczenie polimerów nie było równomierne w całej grubości przekroju – największe ilości znajdowały się na powierzchni styku z podłożem i na wierzchu, co miało związek z siłami kapilarnymi podłoża i parowaniem, które powodowały przepływ roztworów w kierunku obu interfaz.
- Spośród analizowanych modyfikatorów polimerowych, ZH3/CF/EVA miał najkorzystniejszy wpływ na kluczowe właściwości zapraw uszczelniających, na co wpływ miał fakt, iż charakteryzował się on najbardziej równomiernym rozmieszczeniem w strukturze zaprawy. Recepturą bazową do oceny wpływu dodatków mineralnych na właściwości robocze wyznaczono zaprawę, w której 20% masowych stanowił proszek redyspergowalny ZH3/CF/EVA.

12 BIBLIOGRAFIA

- [1] Rokiel M.: „Renowacje obiektów budowlanych. Projektowanie i warunki techniczne wykonania i odbioru robót”, 2014, Warszawa, Wydawnictwo Medium
- [2] Brachaczek W., Chleboś A.: „Materiały i technologie do renowacji zawilgoconych murów”, *Materiały Budowlane*, 2021, nr 12, s. 20-22
- [3] Rokiel M.: „Materiały na izolacje wodochronne nowych budynków”, *Materiały Budowlane*, 2020, nr 3, s. 7-11
- [4] Brachaczek W., Chleboś A., Giergiczny Z.: “Influence of Polymer Modifiers on Selected Properties and Microstructure of Cement Waterproofing Mortars”, *Materials*, 2021, 14(24), 7558
- [5] Żuchowska D.: „Polimery Konstrukcyjne”, 2000, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
- [6] Łukowski P., Jaworska B., Sokołowska J., Kępiak M.: „Beton i konstrukcje z betonu – badania”, 2015, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- [7] Omaha Y.: „Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars - Properties and Process Technology”, 1995, Park Ridge, New Jersey, Noyes Publications
- [8] Rokiel M.: „Izolacje przeciwwilgociowe i przeciwwodne nakładane natryskowo – kryteria doboru”, *Izolacje*, 2021, nr 2(26), s. 78-80
- [9] Środa B.: „Przemysł cementowy na drodze do Zielonego Ładu”, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 2020, nr 7-9, s. 68-74
- [10] Kaprzyk P.: „Optymalizacja składu mieszanek betonowych stosowanych w prefabrykacji w celu zmniejszenia śladu węglowego”, *Materiały Budowlane*, 2023, nr 11, s. 71-72
- [11] Siemieniuk J., Szatyłowicz E.: „Zmniejszenie emisji CO₂ w procesie produkcji cementu”, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 2018, nr 2, t. 9, s. 81-87
- [12] Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H.: „A review on effects of limestone powder on the properties of concrete”, *Construction and building materials*, 2018, nr 192, s. 153-166
- [13] Divsholi B. S., Lim T. Y. D., Teng S.: „Durability properties and microstructure of ground granulated blast furnace slag cement concrete”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2014, vol. 8, s. 157-164

- [14] Brachaczek W., Chleboś A., Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K.: „Influence of the addition of ground granulated blast furnace slag, fly silica ash and limestone on selected properties of cement mortars”, *Materials Proceedings*, 2023, vol. 13, iss. 1, s. 1-9
- [15] Brachaczek W., Chleboś A., Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K.: „Wpływ dodatków materiałów niskoemisyjnych na właściwości zapraw cementowych”, *Potencjał innowacyjny w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją: monografia*, 2023, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, s. 116-126
- [16] PN-EN 197-1:2012 *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*
- [17] Monczyński B.: „Woda i jej obecność w strukturze materiałów budowlanych”. *Izolacje*, 2024, nr 1, s. 140-146
- [18] Monczyński B.: „Szkodliwość soli w zawilgoconych przegrodach”, *Materiały Budowlane*, 2020, nr 3, s. 24-26
- [19] Alsbry A.: „Dynamika podciągania kapilarnego w murach budowlanych”, *Przegląd Budowlany*, 2010, nr 9(81), s. 46–48
- [20] Hoła J.: „Degradacja budynków zabytkowych wskutek nadmiernego zawilgocenia–wybrane problemy” *Budownictwo i Architektura*, 2018, nr 1, vol. 17, s. 133-148
- [21] Brachaczek W., Chleboś A., Kubecka-Pomper K.: „Renowacja budynku zabytkowego i jej wpływ na poprawę izolacyjności termicznej ścian na przykładzie kamienicy w Bielsku-Białej”, *Przegląd Budowlany*, 2021, nr 11-12 (92), s. 154-157
- [22] Brachaczek W., Chleboś A.: „Porównanie wybranych metod pomiaru wilgotności masowej murów”, *Materiały Budowlane*, 2022, nr 12, s. 26-29
- [23] PN-EN ISO 12570:2002 *Cieplno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie wilgotności przez suszenie w podwyższonej temperaturze*
- [24] Brachaczek W.: „Microstructure of renovation plasters and their resistance to salt”, *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 182, s 418-426
- [25] Pytel Z., Małolepszy J.: „Rola redyspergowalnych żywic proszkowych w kształtowaniu właściwości użytkowych wybranych zapraw klejowych”, *Prace Komisji Nauk Ceramicznych, Polski Biuletyn Ceramiczny: Ceramika*, 2002, vol. 71, s. 444-454

- [26] Barnat-Hunek D., Suchorab Z., Sobczuk H.: „Pomiary wilgotności murów z kazimierskiej opoki wapnistej przy zastosowaniu metody TDR”, *Budownictwo i Architektura*, 2008, nr 1, vol. 2, s. 125-140
- [27] Dullien F. A.: „Porous media. Fluid Transport and Pore Structure”, 2012, London, Academic Press INC
- [28] Kaliszuk-Wietecha A. E.: „Przegląd materiałów do wykonywania izolacji wodochronnych”, *Materiały Budowlane*, 2016, nr 3, s. 2-3
- [29] Jura J. „Budowlane materiały izolacyjne”, *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 2015, nr 2 (16), s. 39-44
- [30] Francke B.: „Komentarz do normy PN-EN 14967, „Elastyczne wyroby wodochronne. Wyroby asfaltowe do poziomej izolacji przeciwwilgociowej. Definicje i właściwości wraz z zaleceniami ITB dla wyrobów objętych normą”, ITB, 2010, Warszawa
- [31] PN-EN 15814+A2:2015-02 *Grubowarstwowe powłoki asfaltowe modyfikowane polimerami do izolacji wodochronnej. Definicje i wymagania*
- [32] Czernik S.: „Dyspersyjne wyroby budowlane”, *Izolacje*, 2018, nr 2(23), s. 44-45
- [33] Chłędzyński S., Wójcik A., Bąk Ł.: „Wybrane aspekty roli cementu w kształtowaniu właściwości wyrobów chemii budowlanej”, *Konferencja „Dni Betonu”*, 2014, s. 401-410
- [34] Florjańczyk Z., Penczek S.: „Chemia polimerów”, Tom 1, 2002, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- [35] Czarnecki L., Łukowski P.: „Betony cementowo-polimerowe”, *Cement Wapno Beton*, 2010, nr 5, s. 243-257
- [36] Ohama Y.: „Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes adhesion; binders (materials); bond (paste to aggregate); carbonation; chlorides; curing; diffusion”, *Materials Journal*, 1987, vol. 84, iss. 6, s. 511-518
- [37] Marceau S., Lespinasse F., Bellanger J., Mallet C., Boinski F.: „Microstructure and mechanical properties of polymer-modified mortars”, *European journal of environmental and civil engineering*, 2012, vol. 15, iss.5, s. 571-581
- [38] Jenni A., Holzer L., Zurbriggen R., Herwegh M.: „Influence of polymers on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars”, *Cement and concrete research*, 2005, vol. 35, iss. 1, s. 35-50

- [39] Rokiel M.: „Izolacje w gruncie – podejście wg normy DIN 18533”, *Izolacje*, 2021, nr 7/8, s. 72-75
- [40] PN-EN 14891:2017 *Wyroby nieprzepuszczające wody stosowane w postaci ciekłej pod płytki ceramiczne mocowane klejami. Wymagania, metody badań, ocena i weryfikacja stałości właściwości użytkowych, klasyfikacja i znakowanie*
- [41] DIN 18533-1:2017-07 *Abdichtung von erdberührten Bauteilen, – Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze, – Teil 2: Abdichtung mit bahnenförmigen Abdichtungsmitteln, – Teil 3: Abdichtung mit flüssig zu verarbeitenden Abdichtungsmitteln*
- [42] Rokiel M.: „Izolacje w gruncie – podejście wg normy DIN 18533 (cz.2)”, *Izolacje*, 2021, nr 10, s. 94-100
- [43] Afridi M. U. K., Ohama Y., Demura K., Iqbal M. Z.: „Development of polymer films by the coalescence of polymer particles in powdered and aqueous polymer-modified mortars”, *Cement and Concrete Research*, 2003, vol 33, iss 11, s. 1715-1721.
- [44] Glinicki M.A.: „Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych: wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka”, *Seria S Studia i Materiały*, 2011, zeszyt 66, IBDiM
- [45] Małolepszy J., Kołodziej Ł., Mrozowska K., Trybalski P.: „Wpływ rodzaju cementu CEM I na wybrane właściwości betonu”, *Konferencja „Dni Betonu”*, 2016, Wisła, s. 1-14
- [46] Giergiczny Z.: „Popiół lotny w składzie cementu i betonu”, 2023, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- [47] PN-EN 206:2014-04: *Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*
- [48] Tałaj M., Bakalarz J., Batog B., Batog M., Dziuk D.: „Kształtowanie mrozoodporności betonów niskoemisyjnych wykonanych z nowych rodzajów cementów CEM II/CM i CEM VI”, *Konferencja „Dni Betonu”*, 2023, s. 613-630
- [49] Rusin Z.: „Analiza porowatości i odkształceń objętościowych zamrażanych zapraw z cementów CEM I oraz CEM II/BV”, *Cement Wapno Beton*, 2014, nr 1, s. 23-32
- [50] Czapik P., Wolniewicz M.: „Wpływ dużej zawartości pyłu krzemionkowego na mikrostrukturę zaczynu”, *Konferencja „Dni Betonu”*, 2018, Wisła, s. 571-583
- [51] Kurdowski W.: „Chemia cementu i betonu”, 2010, Kraków, Stowarzyszenie Producentów Cementu

- [52] Gapinski G.M., Scanlon J.: „Silica fume”, *Norchem technical papers and articles*, 2006, link: https://0901.nccdnet/4_2/000/000/076/de9/Silica-fume-technical-papers-articles-gapinski-scanlon.pdf (dostęp 8.04.2024)
- [53] Giergiczny Z.: „Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych”, 2006, Kraków, Wydawnictwo PK
- [54] Giergiczny E., Góralna K.: „Mielony granulowany żużel wielkopiecowy-dodatek do betonu typu II”, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 2008, nr 1-3, s. 56-59
- [55] Brachaczek W., Chleboś A.: „Wpływ dodatku zmielonego wapienia i pyłu krzemionkowego na wybrane właściwości jednokomponentowej zaprawy uszczelniającej”, *Materiały Budowlane*, 2023, nr 3, s. 42-46
- [56] Dąbrowski M., Małolepszy J.: „Właściwości betonu z cementów żużlowo-wapiennych”, *Drogi i Mosty*, 2010, nr 4, s. 5-28
- [57] Stryczek S., Gonet A., Wiśniowski R.: „Wpływ wybranego dodatku mineralnego na własności technologiczne zaczynów cementowych”, *Wiertnictwo, Nafta, Gaz*, 2005, r. 22/1, s. 333-341
- [58] Gil D. M., Golewski G. L.: „Badania odporności na pękanie i wielkości mikrorys w betonie ze zmiennym dodatkiem pyłu krzemionkowego i popiołów lotnych”, *Materiały Budowlane*, 2017, nr 10, s. 12-14
- [59] Giergiczny Z., Garbacik A., Pużak T., Sokołowski M.: „Cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/BM (V-LL) 32, 5R i CEM II/BM (SV) 32, 5 R–właściwości i zastosowanie”, *Konferencja „Dni Betonu”*, Wisła, 2010, s. 155-163
- [60] Ahmad J., Kontoleon K. J., Majdi A., Naqash M. T., Deifalla A. F., Ben Kahla N., Isleem H. F., Qaidi S. M.: „A comprehensive review on the ground granulated blast furnace slag (GGBS) in concrete production”, *Sustainability*, 2022, vol. 14, 8783
- [61] Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T. C., Kumar B. R., Das S. K., Mehrotra S. P.: „Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement”, *Cement and Concrete Composites*, 2008, vol. 30, iss. 8, s. 679-685

- [62] Lothenbach B., Le Saout G., Haha M. B., Figi R., Wieland E.: „Hydration of a low-alkali CEM III/B–SiO₂ cement (LAC)”, *Cement and Concrete Research*, 2012, vol. 42, iss. 2, s. 410-423
- [63] Deja, J.: „Trwałość korozyjna spoiw o różnej zawartości granulowanego żużla wielkopieczowego”, *Cement Wapno Beton*, 2007, nr 6, s. 280-283
- [64] Zhao F., Li H., Liu S., Chen J.: „Preparation and properties of an environment friendly polymer-modified waterproof mortar” *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, iss.5, s. 2635-2638
- [65] Lutze D., vom Berg W.: „Popiół lotny w betonie”, 2010, Warszawa, Polska Unia UPS
- [66] PN-EN 450-1:2012 *Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*
- [67] Giergiczny, Z. „Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu” *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 2007, nr 7-9, s. 44-48
- [68] Richartz W.: “Zusammensetzung und Eigenschaften von flugaschen”, *Zement-Kalk-Gips*, 1984, nr 2, s. 62-71
- [69] Giergiczny Z., Ostrowski M., Baran T.: „Wpływ popiołów lotnych krzemionkowych kategorii S na wybrane właściwości kompozytów cementowych”, *Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki. Zakopane*, 2016, s. 19-21
- [70] Golewski, G. L.: „Uogólniona odporność na pękanie betonu z popiołami lotnymi”, *Materiały Budowlane*, 2017, nr 10, s. 19-21
- [71] Uchikawa H., Uchida S.: „Influence of pozzolana on the hydration of C3A”, *Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Sub-Theme IV, Paris*, 1980, France
- [72] Li D., Chen Y., Shen J., Su J., Wu X.: „The influence of alkalinity on activation and microstructure of fly ash”, *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, iss. 6, s. 881-886
- [73] Katz A. „Microscopic study of alkali-activated fly ash”, *Cement and Concrete Research*, 1998, vol. 28, iss. 2, s. 197-208
- [74] Fraay A. L. A., Bijen J. M., De Haan Y. M.: „The reaction of fly ash in concrete a critical examination”, *Cement and concrete research*, 1989, vol. 19, iss. 2, s. 235-246

- [75] Lee W. K. W., Van Deventer J. S. J.: „The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements”, *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, iss. 4, s. 577-584
- [76] Gorninski J. P., Dal Molin D. C., Kazmierczak C. S.: „Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete”, *Cement and concrete research*, 2004, vol. 34, iss. 11, s. 2091-2095
- [77] Sanjuán M. A., Argiz C., Gálvez J.C., Moragues A.: „Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance”, *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 96, s. 55-64
- [78] Giergiczny Z., Batog M., Dziuk M., Golda A., Synowiec K., Bakalarz J., Gębusia K., Żugaj E.: „Cement Kruszywa Beton w ofercie grupy Górażdże. Rodzaje, właściwości, zastosowanie”, 2022, Centrum Technologiczne Betotech
- [79] Jain A., Pawade P. Y.: „Characteristics of silica fume concrete”, *International Journal of Computer Applications*, 2015, vol. 975, s. 23-26
- [80] Calvo J. L. G., Hidalgo A., Alonso C., Luco L. F.: „Development of low-pH cementitious materials for HLRW repositories: Resistance against ground waters aggression”, *Cement and Concrete Research*, 2010, vol 40, iss. 8, s. 1290-1297
- [81] Koutný O., Snoeck D., Van Der Vurst F., De Belie N.: „Rheological behaviour of ultra-high performance cementitious composites containing high amounts of silica fume”, *Cement and concrete composites*, 2018, vol. 88, s. 29-40
- [82] Kovalenko O. V.: „Effect of the recipe on the properties of polymer-cement waterproofing mixtures” *Land Reclamation and Water Management*, 2021, s. 162-170
- [83] Giergiczny Z., Sokołowski M.: „Cement z dodatkiem kamienia wapiennego CEM II/A, B-LL-właściwości i możliwości stosowania w budownictwie”, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 2008, nr 7-9, s. 54-57
- [84] Król A., Giergiczny Z., Kuterasińska-Warwas J.: „Properties of concrete made with low-emission cements CEM II/CM and CEM VI”, *Materials*, 2020, vol. 13(10)
- [85] Wang Q., Yang J., Chen H.: „Long-term properties of concrete containing limestone powder”, *Materials and Structures*, 2017, vol. 50, s. 1-13

- [86] Chłędzyński S.: „Wpływ obniżonej temperatury na odporność zapraw z cementów z dodatkami mineralnymi na korozję siarczanową”, *Cement Wapno Beton*, 2005, nr 4, s. 204-214
- [87] Marzouki A., Lecomte A., Beddey A., Diliberto C., Ouezdou M. B.: „The effects of grinding on the properties of Portland-limestone cement”, *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 48, s. 1145-1155
- [88] Tsimas S.: „Lime, an irreplaceable mortar constituent”, *Zement-Kalk-Gips*, 1999, nr 6, s. 350–355
- [89] Czarnecki L., Łukowski P.: „Spoiwa wapienne – historia, stan obecny i perspektywy” *Materiały Budowlane*, 2008, nr 10, s. 3-7
- [90] Alvarez, J. I., Veiga R., Martinez-Ramirez S., Secco M., Faria P., Maravelaki P. N., Ramesh M., Papayianni I., Valek J.: „RILEM TC 277-LHS report: a review on the mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems”, *Materials and Structures*, 2021, vol. 54(2), 63
- [91] Chłędzyński S. „Wapno hydratyzowane. historia, właściwości i zastosowanie”, *Izolacje*, 2009, nr 14, s. 68-71
- [92] PN-EN 459-1:2003 *Wapno budowlane. Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*
- [93] Gąsiorowski S.: „Wapno do lamusa?”, *Materiały Budowlane*, 2008, nr 10, s. 8-9
- [94] Osiecka E.: „Rodzaje i właściwości wapna budowlanego”, *Materiały Budowlane*, 2001, nr 8, s. 146–147
- [95] Kaczmarek A.: „Wpływ dodatku wapna do zapraw budowlanych na ich parametry techniczne”, *Materiały Budowlane*, 2017, nr 5, s. 96-97
- [96] Piontek M., Lechów H.: „Deterioracja elewacji zewnętrznych wywołana biofilmem”, *Zeszyty Naukowe. Inżynieria Środowiska/Uniwersytet Zielonogórski*, 2013, nr 31, s. 77-85
- [97] Dybowska-Józefiak M.: „Korozja biologiczna ścian zewnętrznych”, *Budownictwo zrównoważone: wybrane aspekty projektowe i wykonawcze*, 2017, t. 2, s. 51-59
- [98] Lorenc M. W, Mazurek S.: „Wykorzystać kamień”, 2007, Wrocław, Studio JASA

- [99] Gaylarde C. C., Morton L. H. G., Loh K., Shirakawa M. A.: „Biodeterioration of external architectural paint films - A review”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, vol. 65, iss. 8, s. 1189-1198
- [100] Warscheid T., Braams J.: „Biodeterioration of stone: a review”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2000, vol. 46, iss. 4, s. 343-368
- [101] Ohama Y. „Polymer-based admixtures”, *Cement and concrete composites*, 1998, vol. 20, iss. 2-3, s. 189-212.
- [102] Ohama Y.: „Recent progress in concrete-polymer composites”, *Advanced Cement Based Materials*, 1997, vol. 5, iss. 2, s. 31-40
- [103] Bhutta C, M. A. R., Ohama Y.: „Recent status of research and development of concrete-polymer composites in Japan”, *Concrete Research Letters*, 2010, vol 1(4), s. 125-130
- [104] Saija L. M.: „Waterproofing of portland cement mortars with a specially designed polyacrylic latex”, *Cement and concrete research*, 1995, vol. 25, iss. 3, s. 503-509
- [105] Adler K. K.: „The use of redispersible powders in PMC in Europe”, *3rd Southern African Conference on Polymers in Concrete, Johannesburg*, 1997, s. 15-17
- [106] Wang R., Ma D., Wang P., Wang G.: „Study on waterproof mechanism of polymer-modified cement mortar”, *Magazine of Concrete Research*, 2015, vol. 67, iss. 18, s. 972-979
- [107] Zhang X., Du M., Fang H., Shi M., Zhang C., Wang F.: „Polymer-modified cement mortars: Their enhanced properties, applications, prospects, and challenges”, *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 299, 124290
- [108] Michalak J.: „Chemia budowlana. Zaprawy budowlane”, *Przemysł Chemiczny*, 2002, nr 3, t. 81, s. 160-164
- [109] Kulesza M., Dębski D.: „Wpływ redyspergowalnych proszków polimerowych na czas wiązania zapraw cementowych” *Materiały Budowlane*, 2017, nr 11, s. 138-140
- [110] Gołaszewski J.: „Domieszki do betonu. Efekty działania. Ocena i badanie efektywności. Stosowanie”, 2016, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- [111] Gomes C. E. M., Ferreira O. P.: „Analyses of microstructural properties of VA/VeoVA copolymer modified cement pastes”, *Polímeros*, 2005, vol. 15, s. 193-198

- [112] Felton L. A.: „Mechanisms of polymeric film formation”, *International journal of pharmaceutics*, 2013, vol. 457, iss. 2, s. 423-427
- [113] Yamak H. B.: „Emulsion polymerization: effects of polymerization variables on the properties of vinyl acetate based emulsion polymers”, *Polymer science*, 2013, IntechOpen, s. 35-71
- [114] Wolska-Kotańska C.: „Wzrost odporności korozyjnej betonu pod wpływem pyłów krzemionkowych”, *Prace Instytutu Techniki Budowlanej*, 2001, nr 1(30), s. 63-71
- [115] Benachour Y., Davy C. A., Skoczylas F., Houari H.: „Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar”, *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, iss. 6, s. 727-736
- [116] PN-EN 101:1994 *Płytki i płyty ceramiczne. Oznaczanie twardości powierzchni wg skali Mohsa. Płytki i płyty ceramiczne. Oznaczanie twardości powierzchni wg skali Mohsa*
- [117] Santos P. M. D., Julio E. N. B. S.: „Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface”, *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, iss. 8, s. 1688-1695
- [118] Major I., Langier B., Halbiniak J.: „Ocena wybranych właściwości oraz trwałości mrozowej betonów modyfikowanych dodatkiem mączki kwarcowej”, *Materiały Budowlane*, 2023, nr 11, s. 36-40
- [119] Denisiewicz. A. „Betony z proszków reaktywnych i ich zastosowanie w konstrukcjach zespolonych”, *Przegląd Budowlany*, 2014, nr 11 (85), s. 18-23
- [120] Grzeszczyk S., Matuszek-Chmurowska A., Černý R., Vejmelkova E.: „Mikrostruktura betonów z proszków reaktywnych”, *Cement Wapno Beton*, 2018, nr 1, s. 1-15
- [121] Brachaczek W.: „Wpływ czynników materiałowych na skurcz tynków renowacyjnych”, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 2018, nr 32, s. 7-20
- [122] Sybis M., Konował E., Modrzejewska-Sikorska A.: „Bakteriobójcza aktywność koloidów srebra stabilizowanych hydrolizatami skrobiowymi oraz ich wpływ na wytrzymałość zapraw cementowych”, *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 2017, nr 16(4), s. 37-46
- [123] Pourchez J., Peschard A., Grosseau P., Guyonnet R., Guilhot B., Vallée F.: „HPMC and HEMC influence on cement hydration”, *Cement and Concrete Research*, 2006, vol. 36, iss. 2, s. 288-294

- [124] Kasagani H, Rao C. B. K.: „Wpływ dodatku szklanych włókien o jednakowej długości i mieszanych na właściwości betonu. The influence of hybrid glass fibres addition on stress-strain behaviour of concrete”, *Cement Wapno Beton*, 2016, nr 5, s. 361-372
- [125] Garbalińska H., Walkowiak M., Wygocka A.: „Ocena wpływu rodzaju cementu na proces podciągania kapilarnego wody w zaprawach modyfikowanych włóknami polipropylenowymi”, *Konferencja „Dni betonu”*, 2006, Wisła, s. 1-13
- [126] Ponikiewski T.: „Wpływ włókien na właściwości reologiczne zapraw cementowych”, *V Seminarium reologiczne, Gliwice, Zeszyty Naukowe. Budownictwo/Politechnika Śląska*, 2003, z. 101, s. 329-337
- [127] Petri M., Spisak W., Idzik J.: „Ograniczenie spękań w konstrukcjach betonowych”, *Materiały Budowlane*, 1996, nr 4, s. 114
- [128] Wieczorek M., Niziurska M., Nosal K.: „Wpływ włókien celulozowych na właściwości zapraw klejowych do płytek ceramicznych”, *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 2015, nr 22, s. 76-85
- [129] Gołaszewski J., Panikiewicz T., Kostrzanowska A.: „Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych”, 2006, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
- [130] Kurdowski W.: *Chemia cementu i betonu*, 2010, Kraków, Wydawnictwo Polski Cement
- [131] PN-EN 1015-2:2000 *Metody badań zapraw do murów. Pobieranie i przygotowanie*
- [132] PN-EN 1015-3:2000 *Metody badań zapraw do murów. Określenie konsystencji świeżej zaprawy (za pomocą stolika rozplywu)*
- [133] DIN 1048 *Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*
- [134] PN-EN 1323:2008 *Kleje do płytek. Płyty betonowe do badań*
- [135] PN-EN 12004-1:2017-03 *Kleje do płytek ceramicznych. Część 1: Wymagania, ocena i weryfikacja stałości właściwości użytkowych, klasyfikacja i znakowanie*
- [136] EN-12467+A2:2018-06 *Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Właściwości wyrobu i metody badań*
- [137] PN-EN 12004-2:2017-03 *Kleje do płytek ceramicznych. Część 2: Metody badań*

13 SPIS ILUSTRACJI

Rys. 1 Główne źródła zawilgocenia budynku [ilustracja własna].....	17
Rys. 2 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań granulowanego żużla wielkopieczowego [badania własne].....	30
Rys. 3 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań popiołu lotnego krzemionkowego [badania własne]	33
Rys. 4 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań pyłu krzemionkowego [badania własne]....	35
Rys. 5 Zdjęcie mikroskopowe użytego do badań pyłu krzemionkowego [badania własne]....	38
Rys. 6 Krzywe przesiewu kruszyw zastosowanych w badanych zaprawach uszczelniających	49
Rys. 7 Stolik rozplywu używany do badań konsystencji zgodnie z PN-EN 1015-3:2000 [132] [zdjęcie własne].....	55
Rys. 8 Rozkład wielkości ziaren w kruszywie betonu przeznaczonego do badań szczelności, gdzie: oś X: nominalna wielkość oczka w sicie [mm]; oś Y: ilość przechodząca przez sito [% mas.] [40].....	56
Rys. 9 Próbką po zakończonym badaniu wod szczelności [zdjęcie własne]	57
Rys. 10 Schemat badania wod szczelności próbki zaprawy uszczelniającej [40]; 1-woda pod ciśnieniem, 2-pierścień uszczelniający, 3-badana zaprawa uszczelniająca, 4-podkład betonowy	58
Rys. 11 Urządzenie do badania szczelności betonu wg DIN 1048:1991 [133] oraz wod szczelności materiałów uszczelniających wg [40] w trakcie badania analizowanych zapraw [zdjęcie własne]	59
Rys. 12 Próbką zaprawy uszczelniającej przeznaczona do badania przyczepności początkowej zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] [zdjęcie własne].....	60
Rys. 13 Próbką zaprawy uszczelniającej przeznaczona do badania przyczepności po zanurzeniu w wodzie zgodnie z PN-EN 14891:2017 [40] [zdjęcie własne]	61
Rys. 14 Próbką do badania zdolności do mostkowania pęknięć [40]	62
Rys. 15 Schemat uchwytu mocującego do badania zdolności do mostkowania pęknięć [40].	63
Rys. 16 Próbką zaprawy podczas badania zdolności do mostkowania pęknięć na maszynie wytrzymałościowej [zdjęcie własne]	64
Rys. 17 Komora do przyspieszonych badań starzeniowych Q-Lab QUV, przy użyciu której oceniano trwałość zaprawy poprzez określenie zmiany porowatości powierzchniowej próbek po cyklach starzenia [zdjęcie własne].....	67

- Rys. 18 Schemat trójpunktowego zginania próbki celem określenia odkształcalności poprzecznej zaprawy, 1 – cylindryczna podpórka o średnicy $10\pm 0,1$ mm; 2 – próbka o grubości $3,0\pm 0,1$ mm [137]..... 68
- Rys. 19 Ilość superplastyfikatora odniesiona do masy cementu potrzebna do uzyskania stałej konsystencji (120÷130 mm) wraz ze zmianą rodzaju i udziału modyfikatora polimerowego, gdzie: ZH1/ASA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy; ZH2/SA – SA kopolimer styrenowo-akrylowy; ZH3/CF/EVA – EVA kopolimer etylenu i octanu winylu; ZH4/ORG/VAAc – VAAc kopolimer octanu winylu i akrylu; ZH5/VA/VeoVa – VeoVa kopolimer octanu winylu i wersenianu winylu..... 72
- Rys. 20 Zależność szczelności wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody od udziału masowego modyfikatora polimerowego 73
- Rys. 21 Wpływ jednoczesnej zmiany ilości modyfikatora polimerowego i cementu na wodoszczelność zaprawy uszczelniającej wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody na przykładzie polimeru ZH1/ASA 75
- Rys. 22 Zależność przyczepności początkowej zaprawy uszczelniającej do podłoża betonowego od udziału masowego modyfikatora polimerowego 76
- Rys. 23 Wpływ jednoczesnej zmiany ilości modyfikatora polimerowego i cementu na przyczepność początkową zaprawy uszczelniającej na przykładzie polimeru ZH1/ASA 77
- Rys. 24 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po zanurzeniu od udziału masowego modyfikatora polimerowego..... 78
- Rys. 25 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po starzeniu termicznym od udziału masowego modyfikatora polimerowego 79
- Rys. 26 Zależność przyczepności do podłoża betonowego zaprawy uszczelniającej po cyklach zamrażania-rozmrażania od udziału masowego modyfikatora polimerowego..... 80
- Rys. 27 Zdjęcie SEM przełomu zaprawy: modyfikowanej ZH1/ASA w ilości 15% masowych a) z zaznaczonymi porami szczelinowymi; b) to samo zdj. z naniesionymi obszarami występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C; c) analiza EDS analizowanego przełomu [badania własne]..... 83
- Rys. 28 Zdjęcia SEM przełomów próbek zaprawy z naniesionymi obszarami występowania atomów C otrzymanymi na drodze mapowania atomów węgla zapraw modyfikowanych ZH4/ORG/VAAc zawierających: a) 15% masowych modyfikatora; b) 20% masowych modyfikatora [badania własne] 84

- Rys. 29 Widok mikrostruktury przełomu zaprawy zawierającej 20% masowych modyfikatora ZH1/ASA a) z zaznaczonymi porami szczelinowymi; b) z zaznaczonymi porami o kolistym kształcie w zaprawie przestrzeni międzyziarnowej [badania własne] 84
- Rys. 30 Zdjęcia SEM powierzchni próbek zaprawy modyfikowanej 26% masowymi polimeru ZH2/SA: a) przed oraz; b) po naniesieniu obszarów występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C [badania własne] 85
- Rys. 31 Zdjęcia SEM próbki z naniesionymi obszarami występowania atomów C otrzymanymi na drodze mapowania atomów węgla zaprawy z udziałem masowym modyfikatora ZH3/CF/EVA wynoszącym 26% wykonane: a) na powierzchni zaprawy; b) w interfacie zaprawa-podłoże [badania własne] 86
- Rys. 32 Widok powierzchni zaprawy modyfikowanej ZH5/VA/VeoVa w ilości 20% masowych, gdzie: a) powierzchnia 1 - miejsce z dobrze uformowanym filmem polimerowym, powierzchnia 2-obszar zawierający spoiwo mineralne; b) widok przełomu zaprawy gdzie 1, 2 – hydraty o nieregularnym kształcie z dużą ilością izometrycznych i spłaszczonych cząstek, 3 – faza C-S-H o włóknistym kształcie [badania własne].... 87
- Rys. 33 Zdjęcia SEM przełomów zaprawy pobranej z wewnętrznej części próbki zaprawy z udziałem masowym modyfikatora polimerowego ZH5/VA/VeoVa wynoszącym 20% a) gdzie powierzchnia 1 i powierzchnia 2 - pory o przekroju kolistym wypełnione stwardniałym polimerem; b) fragment z naniesionymi obszarami występowania modyfikatora polimerowego otrzymanymi przez mapowanie atomów C [badania własne] 88
- Rys. 34 Ilość superplastyfikatora odniesiona do masy cementu potrzebna do uzyskania stałej konsystencji wraz z dodawaniem dodatków mineralnych 90
- Rys. 35 Wyniki badań wpływu dodatków mineralnych na zdolność do mostkowania rys podłoża przy zachowaniu stałej konsystencji zaprawy 92
- Rys. 36 Wpływ dodatków mineralnych na szczelność wyrażoną jako ilość zaabsorbowanej wody 94
- Rys. 37 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność początkową zaprawy 95
- Rys. 38 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po zanurzeniu 97
- Rys. 39 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po starzeniu termicznym. 98
- Rys. 40 Wpływ dodatków mineralnych na przyczepność zaprawy po cyklach zamrażania-rozmrażania 100
- Rys. 41 Wpływ dodatków mineralnych na porowatość na powierzchni próbki 101

Rys. 42 a) Zdjęcie mikroskopowe powierzchni próbki referencyjnej; b) to samo zdjęcie z zaznaczonymi kolorami obszarami zidentyfikowanymi jako pory [badania własne]	102
Rys. 43 Wpływ dodatków mineralnych na trwałość zapraw wyrażoną jako porowatość na powierzchni próbki po starzeniu	103
Rys. 44 Wpływ dwóch zmieszanych dodatków mineralnych na szczelność zaprawy uszczelniającej wyrażonej jako ilość zaabsorbowanej wody	105
Rys. 45 Wpływ dwóch zmieszanych dodatków mineralnych na przyczepności do podłoża.	107
Rys. 46 aplikacja zaprawy uszczelniającej na równym podłożu przy użyciu pacy zębatej [zdjęcie własne]	112
Rys. 47 aplikacja zaprawy uszczelniającej na nierównym podłożu przy użyciu pędzla [zdjęcie własne]	113
Rys. 48 Zachodnia elewacja Manufaktury Grossa (Bielsko-Biała) w 2023 r. [zdjęcie własne]	115
Rys. 49 Częściowo odsłonięty kamienny fundament zachodniej ściany Manufaktury Grossa, na który aplikowano zaprawę uszczelniającą [zdjęcie własne]	116

14 SPIS TABEL

Tabela 1. Klasyfikacja zawilgocenia murów zgodnie z PN-EN ISO 12570:2002 [23]	16
Tabela 2. Normowe [16] udziały masowe klinkieru oraz nieklinkierowych składników głównych cementów powszechnego użytku.....	27
Tabela 3 Skład chemiczny i mineralny zastosowanego cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R	47
Tabela 4 Właściwości fizyczne i mechaniczne użytego cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R	47
Tabela 5 Składy chemiczne zastosowanych dodatków mineralnych [% masy].....	50
Tabela 6 Skład uogólnionej receptury zaprawy uszczelniającej do badań wpływu modyfikatorów polimerowych na właściwości hydroizolacji	52
Tabela 7. Proporcje mieszania zapraw dwukomponentowych z udziałem płynnych dyspersji polimerowych	53
Tabela 8 Skład uogólnionej receptury zaprawy uszczelniającej do badań wpływu dodatków mineralnych na właściwości zaprawy	54
Tabela 9. Program badania próbek zapraw w komorze do przyspieszonych badań starzeniowych zgodny z normą EN-12467+A2:2018-06 [136].....	66
Tabela 10 Wyniki badania zdolności do mostkowania rys zaprawy modyfikowanej wybranymi	81
Tabela 11 Zestawienie wyników badania zdolności do mostkowania rys zapraw z dodatkami mineralnymi przy stałym udziale superplastyfikatora	91

15 DOROBEK NAUKOWY AUTORA

15.1 Wykaz publikacji naukowych

Autor niniejszej rozprawy mgr inż. Adam Chleboś jest autorem lub współautorem następujących artykułów naukowych oraz rozdziałów w monografiach (za Bibliografią Dorobku Piśmienniczego Pracowników Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego od roku 1969 <http://bibliografia.ath.bielsko.pl/> stan na 2.04.2024):

1. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kusy K.: „Kompatybilność tynków renowacyjnych do renowacji murów opactwa Cystersów w Łądzie”, *Przegląd Budowlany*, 2019, nr 10, s. 90-94,
Punktacja MNiSW: 40.000
2. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Giergiczny Z.: „Influence of polymer modifiers on selected properties and microstructure of cement waterproofing mortars”, *Materials*, 2021, vol. 14,
Punktacja MNiSW: 140.000
3. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Materiały i technologie do renowacji zawilgoconych murów”, *Materiały Budowlane*, 2021, nr 12, s. 20-22,
Punktacja MNiSW: 100.000
4. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kubecka-Pomper K.: „Renowacja budynku zabytkowego i jej wpływ na poprawę izolacyjności termicznej ścian na przykładzie kamienicy w Bielsku-Białej”, *Przegląd Budowlany*, 2021, nr 11-12, s. 154-157,
Punktacja MNiSW: 40.000
5. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Porównanie wybranych metod pomiaru wilgotności masowej murów”, *Materiały Budowlane*, 2022, nr 12, s. 26-29,
Punktacja MNiSW: 100.000
6. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Problemy związane z usunięciem wilgoci z budynków zabytkowych poddawanych renowacji”, *Materiały Budowlane*, 2022, nr 11, s. 184-187,
Punktacja MNiSW: 100.000
7. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Badania nad zastosowaniem włókien odpadowych i z recyklingu w płytach cementowych i gipsowych”, *Materiały Budowlane*, 2022,

nr 3, s. 40-43,

Punktacja MNiSW: 100.000

8. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K.:
„Influence of the addition of ground granulated blast furnace slag, fly silica ash and limestone on selected properties of cement mortars”, *Materials Proceedings*, 2023, vol. 13, iss. 1, s. 1-9,
Punktacja MNiSW: 5.000
9. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Gradek Ł.: „Problemy z powłokami malarskimi i tynkarskimi - przyczyny i sposoby zapobiegania”, *Inżynier Budownictwa*, 2023, nr 3, s. 22-26,
Punktacja MNiSW: 5.000
10. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Testing the properties of cement and gypsum boards reinforced with nonwoven fabrics made of waste and recycled fibres”, *Civil and Environmental Engineering*, 2023, vol. 19, s. 357-363,
Punktacja MNiSW: 20.000
11. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Wpływ dodatku zmielonego wapienia i pyłu krzemionkowego na wybrane właściwości jednokomponentowej zaprawy uszczelniającej”, *Materiały Budowlane*, 2023, nr 3, s. 42-46,
Punktacja MNiSW: 100.000
12. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K.:
„Wpływ dodatków materiałów niskoemisyjnych na właściwości zapraw cementowych”, *Potencjał innowacyjny w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją: monografia*, s. 116-126, 2023, Częstochowa, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej,
Punktacja MNiSW: 20.000
13. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Zabolski R.: „Wpływ biowłókniny z wełny owczej na rozwój roślin na dachach zielonych”, *Przegląd budowlany*, 2024, nr 1-2, s. 81-86,
Punktacja MNiSW: 40.000

15.2 Wykaz udziału w konferencjach naukowych

Autor rozprawy brał udział w następujących konferencjach naukowych w charakterze autora lub współautora referatu (podkreślono osoby referujące w imieniu zespołu):

1. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kusy K.: „Kompatybilność tynków renowacyjnych do renowacji murów Opactwa Cystersów w Łądzie”, *Ekologia a budownictwo*, Bielsko-Biała 11.10.2019
2. Brachaczek W., **Chleboś A.**, **Kubecka-Pomper K.**: „Renowacja budynku zabytkowego i jej wpływ na poprawę izolacyjności termicznej ścian na przykładzie kamienicy przy ul. 11 Listopada 61 w Bielsku-Białej”, *Ekologia a budownictwo*, Bielsko-Biała 14-16.10.2021,
3. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Problemy związane z usunięciem wilgoci z budynków zabytkowych poddawanych renowacji”, *REMO 2022*, Szklarska Poręba 6-9.12.2022,
4. Brachaczek W., **Chleboś A.**: „Testing the properties of cement and gypsum boards reinforced with nonwoven fabrics made of waste and recycled fibres”, *Geosyntetica 2023*, Żylina (Słowacja) 9-10.02.2023,
5. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kupczak M., **Spisak S.**, Stybak M., Żyrek K.: „Influence of the Addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Silica Ash and Limestone on Selected Properties of Cement Mortars”, *MATBUD*, Kraków 19-21.04.2023,
6. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Kupczak M., Spisak S., Stybak M., Żyrek K.: „Wpływ dodatków pochodzących z recyklingu na właściwości zaprawy cementowej”, *Potencjał innowacyjny w inżynierii materiałowej i zarządzaniu produkcją*, Częstochowa 25.05.2023,
7. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Juraszek J.: „Wpływ surowców pochodzenia odpadowego na wybrane właściwości cementowo-polimerowych zapraw uszczelniających”, *VIII Konferencja Solina*, Polańczyk 20-24.06.2023 - poster
8. Brachaczek W., **Chleboś A.**, Zabolski R.: „Wpływ biowłkniny z wełny owczej na rozwój roślin na dachach zielonych”, *Ekologia a budownictwo 2023*, Bielsko-Biała 6-8.11.2023
9. **Chleboś A.**: „Renowacja klasztoru oo. Kamedułów w Bieniszewie”, *XXI Europejski Kongres Informacji Renowacyjnej*, Kraków 20-23.03.2024

Inne wystąpienia i seminaria, w których autor rozprawy występował w charakterze autora referatu (brak statusu konferencji naukowej):

10. „Innowacyjne zastosowania w systemie dociepleń”, *Szkolenie zorganizowane przez PZITB Oddział w Bielsku-Białej oraz dofinansowane przez Śląską Okręgową Izbę Inżynierów Budownictwa w Katowicach w ramach programu doskonalenia zawodowego członków Izby*, Bielsko-Biała 18.05.2023
11. „Tynki renowacyjne, szlachetne tynki zabytkowe, farby do budynków historycznych. Diagnostyka w procesie projektowym. Osuszanie ścian, poziome przepony. Systemy ociepleń”, *Ku Neutralności Klimatycznej - Renowacja energetyczna budynków*, seminarium-wykłady organizowane przez Dolnośląską Agencję Energii i Środowiska, Bielsko-Biała, 25.04.2024

15.3 Wykaz projektów i patentów

Autor rozprawy jest współautorem następujących patentów oraz brał udział w następujących projektach naukowych:

1. Wynalazek „Zestaw tynków renowacyjnych”, 2018, Patent nr 240985
2. Grant NCBiR „Opracowanie innowacyjnej struktury płyt cementowo - włókninowych i cementowo-przędzinowych oraz gipsowo-włókninowych i gipsowo-przędzinowych przy wykorzystaniu włókien wełnianych i wełno-pochodnych pochodzenia odpadowego, jak również włókien niemineralnych będących efektem recyklingu”, 2020, POIR 01.01.01-00-1691/20