



Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polska Akademia Nauk
Pracownia Pól Odkształceń

Mariusz Dąbrowski

**WPLYW DODATKU POPIOŁÓW LOTNYCH WAPIENNYCH
NA MIKROSTRUKTURĘ I MROZODPORNOŚĆ
KOMPOZYTÓW O MATRYCACH CEMENTOWYCH**

Rozprawa doktorska

Promotor: prof. dr hab. inż. Michał A. Glinicki

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Daria Józwiak-Niedźwiedzka

Warszawa, 2016



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego
w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr projektu
POIG.01.01.02-24-005/09

**„INNOWACYJNE SPOIWA CEMENTOWE I BETONY
Z WYKORZYSTANIEM POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO”**

Składam Serdeczne Podziękowania

*Panu prof. dr hab. inż. Michałowi A. Glinickiemu
Pani dr hab. inż. Darii Józwiak-Niedźwiedzkiej
Koleżankom i kolegom z Pracowni Pól Odkształceń
Wszystkim, którzy swoją życzliwością i pomocą
przyczynili się do powstania niniejszej pracy
Rodzicom*

*Najważniejszym osobom w moim życiu:
Joli, Szymonkowi, Pawełkowi i Mikołajkowi,
za wsparcie, cierpliwość i miłość...*

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych pojęć i oznaczeń	9
1. Wstęp.....	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Przedmiot pracy	12
1.3. Cel, tezy i zakres pracy	12
STUDIUM LITERATUROWE	
2. Trwałość betonów w środowisku cyklicznego oddziaływania mrozu	16
2.1. Mechanizm niszczenia betonów	16
2.1.1. Przyczyny występowania zjawiska.....	16
2.1.2. Hipotezy opisujące niszczenie betonów	20
2.2. Zapobieganie niszczeniu betonów	27
3. Efekty stosowania popiołów lotnych wapiennych w betonach	34
3.1. Charakterystyka popiołów lotnych wapiennych.....	34
3.2. Mikrostruktura betonu i transport cieczy	38
3.3. Właściwości mechaniczne	44
3.4. Odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.....	46
3.5. Podsumowanie	50
CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA	
4. Dobór składników i projektowanie składu betonu	51
4.1. Popiół lotny wapienny	51
4.2. Cementy wieloskładnikowe	53
4.3. Pozostałe składniki betonu.....	55
4.4. Projektowanie składu betonu	58
5. Opis użytych metod badawczych	60
5.1 Charakterystyka popiołów lotnych wapiennych.....	60
5.2. Charakterystyka betonów	62
5.2.1. Podstawowe właściwości betonów	62
5.2.2. Mikrostruktura i transport cieczy.....	63
5.2.3. Odporność na cykliczne zmiany temperatury.....	67
6. Wyniki charakterystyki popiołów lotnych wapiennych	72
6.1. Morfologia ziaren	72
6.2. Analiza składu ziarnowego	73
6.3. Skład fazowy.....	74
6.4. Kompatybilność z domieszką napowietrzającą	76
6.5. Podsumowanie wyników badań.....	79
7. Aktywacja popiołów lotnych wapiennych	81
7.1. Wybór sposobów aktywacji.....	81
7.2. Separacja ziarnowa popiołów lotnych wapiennych.....	83
7.2.1. Skład chemiczny, fazowy i morfologia ziaren.....	83
7.2.2. Ocena składu popiołów lotnych wapiennych po separacji ziarnowej	91
7.3. Wyniki charakterystyki aktywowanych popiołów lotnych wapiennych	92
7.3.1. Właściwości fizyczne	92
7.3.2. Kompatybilność z domieszką napowietrzającą	94

7.4. Podsumowanie	96
8. Wpływ popiołu lotnego wapiennego na mikrostrukturę i właściwości betonów	98
8.1. Skład betonów	98
8.2. Wytrzymałość i współczynnik sprężystości	100
8.3. Mikrostruktura i skład fazowy matrycy cementowej	103
8.4. Morfologia produktów hydratacji	105
8.5. Charakterystyka porów powietrznych	108
8.6. Przepuszczalność jonów chlorkowych	111
8.7. Odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie	112
8.8. Podsumowanie	117
9. Wpływ aktywacji popiołów lotnych wapiennych na mikrostrukturę i właściwości betonów	119
9.1. Skład betonów z aktywowanym popiołem lotnym wapiennym	119
9.2. Wytrzymałość na ściskanie	120
9.3. Rozkład wielkości porów na podstawie porozymetrii rtęciowej	122
9.4. Charakterystyka porów powietrznych	124
9.5. Podciąganie kapilarne	126
9.6. Przepuszczalność jonów chlorkowych	128
9.7. Odporność na powierzchniowe złuszczenie	130
9.8. Podsumowanie	132
10. Podsumowanie wyników badań	134
11. Wnioski końcowe	143
Literatura cytowana w pracy	145
Normy i zalecenia techniczne	153
Streszczenie	155
Summary	156
SPIS ZAŁĄCZNIKÓW (zawartość na płycie DVD załączonej do pracy):	
Załącznik I. Krzywe uziarnienia kruszyw	158
Załącznik II. Fotografie popiołu lotnego wapiennego w mikroskopie skaningowym	161
Załącznik III. Wyniki badań granulometrii laserowej	177
Załącznik IV. Termogramy	181
Załącznik V. Dyfraktogramy rentgenowskie	187
Załącznik VI. Wyniki badań wskaźnika piany	197
Załącznik VII. Fotografie zaczynów i betonów z popiołem lotnym wapiennym w mikroskopie skaningowym	201
Załącznik VIII. Wyniki badań charakterystyki porów powietrznych	207
Załącznik IX. Wyniki badań współczynnika migracji jonów chlorkowych	251
Załącznik X. Wyniki badań mrozoodporności i powierzchniowego łuszczenia	253
Załącznik XI. Wyniki badań porozymetrii rtęciowej	258
Załącznik XII. Wyniki badań podciągania kapilarnego	271

Wykaz ważniejszych pojęć i oznaczeń

- α - powierzchnia właściwa porów powietrznych,
- A - całkowita zawartość porów powietrznych,
- AEA - domieszka napowietrzająca (ang. *Air Entraining Admixture*),
- A_{300} - zawartość mikroporów o średnicy poniżej 300 μm ,
- A_s - pole powierzchni eksponowanej na działanie mrozu i roztworu soli,
- c - zawartość cementu w kompozycie cementowych,
- d - charakterystyczna odległość międzypłaszczyznowa kryształów,
- $d(n)$ - wielkość ziarna, poniżej której występuje $n\%$ objętości popiołu (granulometria laserowa),
- D_{nssm} - współczynnik migracji w stanie nieustalonym,
- DTA - termiczna analiza różnicowa (ang. *Differential Thermal Analysis*),
- E - moduł Younga,
- E_d - rezonansowy moduł sprężystości,
- EDS - rentgenowska spektroskopia energodispersyjna (ang. *Energy Dispersive Spectroscopy*),
- f_c - wytrzymałość na ściskanie,
- f_{ft} - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu,
- H_{CC} - ubytek masy na krzywej termogravimetrycznej w zakresie temperatury 500-1000°C,
- H_{CH} - ubytek masy na krzywej termogravimetrycznej w zakresie temperatury 400-500°C,
- H_{CSH} - ubytek masy na krzywej termogravimetrycznej w zakresie temperatury 20-400°C,
- ITZ - strefa przejściowa (ang. *Interface Transition Zone*),
- k - współczynnik uwzględniający popiół w składzie spoiwa, wg PN-EN 206,
- \bar{L} - wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych,
- MIP - porozymetria rtęciowa (ang. *Mercury Intrusion Porosimetry*),
- m_{pk} - całkowita masa zaabsorbowanej wody w badaniu podciągania kapilarnego,
- m_{56} - całkowita masa złuszczeń przypadająca na jednostkę powierzchni,
- N - liczba zarejestrowanych cięciw,
- P - zawartość popiołu w mieszance betonowej,
- PLW - popiół lotny wapienny (o dużej zawartości związków wapnia),
- R - stosunek zaczyn/powietrze,
- r_{ave} - średnia średnica porów, mierzony metodą porozymetrii rtęciowej,
- RDM_n - względny dynamiczny współczynnik sprężystości po n cyklach zamrażania-rozmrażania,
- r_k - krytyczny średnica porów, mierzony metodą porozymetrii rtęciowej,
- RH - wilgotność względna powietrza (ang. *Relative Humidity*),
- SEM - mikroskop skaningowy (ang. *Scanning Electron Microscope*),
- SP - strata prażenia,
- SPL - superplastyfikator,
- S_{pk} - początkowa szybkość absorpcji w badaniu podciągania kapilarnego,
- T_a - całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez pory powietrzne,
- TG - analiza termogravimetryczna (ang. *Thermogravimetry*),
- T_m - temperatura maksimum efektu egzotermicznego spalania resztek węgla w popiele,
- T_{pk} - czas zmiany szybkości nasycania porów kapilarnych w badaniu podciągania

kapilarnego,

- T_{tot} - całkowita długość linii trawersowej,
- V - zawartość powietrza w mieszance betonowej,
- V_t - całkowita objętość porów, mierzona metodą porozymetrii rtęciowej,
- w/c - współczynnik wodno-cementowy,
- w/s - współczynnik wodno-spoiwowy,
- w_2 - części nierozpuszczalne w HCl ,
- w_3 - części nierozpuszczalne w HCl i KOH ,
- W_{pk} - wtórna szybkość absorpcji w badaniu podciągania kapilarnego,
- w_{sz} - zawartość szkliva w próbce popiołu,
- XRD - rentgenowska analiza dyfrakcyjna (ang. *X-Ray Diffraction Analysis*),
- XRF - rentgenowska analiza fluorescencyjna (ang. *X-Ray Fluorescence Analysis*),

Skróty wzorów chemicznych stosowanych w odniesieniu do chemii cementu:

- A - Al_2O_3 ,
- C - CaO ,
- H - H_2O ,
- S - SiO_2 ,
- \bar{S} - SO_3 ,
- CC - $CaCO_3$, kalcyt,
- CH - $Ca(OH)_2$, portlandyt,
- C_3A - glinian trójwapniowy,
- C_4AF - glinożelazian czterowapniowy,
- C_3S - alit,
- C_2S - belit,
- $C-S-H$ - uwodnione krzemiany wapnia.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Kompozyty o matrycach cementowych z wypełniaczem w postaci kruszyw mineralnych, nazywane betonami, stanowią jeden z podstawowych materiałów konstrukcyjnych. Wykorzystanie odpadowych dodatków mineralnych w składzie cementu i betonu stanowi obecnie jeden z podstawowych kierunków rozwoju technologii materiałów budowlanych. Dąży się do jak największego wykorzystywania dodatków mineralnych w betonach, głównie ze względów finansowych i ekologicznych. Dodatkowo modyfikacja składu spoiw dodatkiem mineralnym stwarza interesujące możliwości kształtowania właściwości materiałowych, zwłaszcza w zakresie trwałości betonu w środowiskach agresywnych chemicznie.

Użycie dodatków mineralnych w betonach konstrukcyjnych regulują wytyczne zawarte w normach i zaleceniach technicznych. Europejskie dokumenty normalizacyjne ograniczają użycie w betonach szeregu materiałów o niedostatecznie rozpoznanych właściwościach. Takim materiałem jest popiół lotny o dużej zawartości związków wapnia pochodzący ze spalania węgla brunatnego w elektrowniach o paleniskach konwencjonalnych, w skrócie nazywany popiołem lotnym wapiennym (*PLW*). Zważywszy na fakt, że produkcja energii w Polsce oparta jest w 30% na spalaniu węgla brunatnego generując *PLW* w ilości ponad 4 milionów ton rocznie, a obecnie jego wykorzystanie sięga zaledwie kilku procent, przede wszystkim jako materiał do wykonywania podbudów dróg oraz nasypów drogowych. Jednakże przykłady krajów takich jak Stany Zjednoczone Ameryki czy Kanada, w których odpady tego typu wykorzystuje się z powodzeniem, także jako dodatki mineralne do wykonania betonowych konstrukcji inżynierskich, stanowią silny bodziec do użycia krajowych *PLW* w betonach konstrukcyjnych.

Do najbardziej charakterystycznych zagrożeń eksploatacyjnych, wynikających z użytkowania konstrukcji budowlanych w klimacie umiarkowanym, należy oddziaływanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Oddziaływanie mrozu dodatkowo mogą potęgować inne czynniki środowiskowe, zwłaszcza woda opadowa i sole odladzające (głównie *NaCl*), stosowane w drogownictwie do zapewnienia odlodzenia nawierzchni jezdni. Oddziaływania klimatyczne wywołują szereg rygorystycznych wymagań technicznych, mających na celu zapewnienie projektowanej trwałości konstrukcji. Zastosowanie dodatków mineralnych w betonach narażonych na oddziaływanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania od lat budzi wiele kontrowersji i wątpliwości, co do ich wpływu na właściwości użytkowe.

Zagospodarowanie krajowych *PLW* w kontekście potencjalnego zastosowania w betonach było celem projektu badawczego zatytułowanego „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego” realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2009-2013. Uzyskane rezultaty wykazały, że popiół ten może stanowić potencjalny dodatek w składzie kompozytów cementowych, zapewniając korzystne właściwości użytkowe.

Fragment powyższego projektu badawczego stanowiła ocena trwałości kompozytów cementowych z *PLW* w odniesieniu do odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających. Zagadnienie to zostało przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej w odniesieniu do konstrukcji inżynierskich stosowanych w budownictwie drogowym.

1.2. Przedmiot pracy

Przedmiotem rozprawy jest analiza wpływu *PLW* stosowanego jako składnik kompozytów o matrycach cementowych (betonów) przeznaczonych na konstrukcje eksploatowane w środowisku charakteryzującym się cyklicznymi zmianami temperatury, wysoką wilgotnością, a także oddziaływaniem roztworów soli stosowanych do odładzania dróg.

Stosowanie betonów z dodatkami mineralnymi w konstrukcjach narażonych na cykliczne oddziaływanie mrozu, tj. zamrażanie i rozmrażanie, nie jest zagadnieniem nowym. Jednakże dostępne publikacje odnoszą się przede wszystkim do popiołów lotnych krzemionkowych lub wapiennych uzyskiwanych w ostatnich dekadach poprzedniego wieku. Zmiany technologiczne w procesie spalania węgla brunatnego w czasach współczesnych spowodowały uzyskiwanie *PLW* o lepszej jakości, tzn. mniejszej zawartości niespalonego węgla i mniejszym wahanii składu chemicznego. Jednakże w dalszym ciągu zmienność właściwości odgrywa decydującą rolę w kontekście wykorzystania *PLW* w technologii kompozytów cementowych i przemyśle cementowym. Wpływ dodatku *PLW* na mrozoodporność nie jest jednoznacznie rozpoznany przez badaczy. Głównym czynnikiem wywołującym rozbieżność stawianych wniosków jest zróżnicowanie składu chemicznego i właściwości fizycznych między badanymi popiołami pochodzącymi z różnych źródeł. Stąd uzasadnione jest określenie wpływu zmienności składu *PLW* pochodzących z elektrowni Bełchatów, obecnie niestosowanych w betonach, na odporność w środowisku cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Popioły lotne wapienne charakteryzują się występowaniem pewnych właściwości hydraulicznych oraz typowych w dodatkach popiołowych właściwości pucolanowych. Zmienność składu chemicznego *PLW* przyczynia się do zmian mikrostrukturalnych kompozytów cementowych w zakresie składu fazowego i w konsekwencji porowatości kapilarnej. Charakterystyka wpływu *PLW* na mikrostrukturę stanowi integralną część oceny odporności na działanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania, gdyż obecność porowatości otwartej, umożliwiającej transport cieczy do wnętrza kompozytu stanowi czynnik determinujący ryzyko pojawienia się zniszczeń matrycy. Zatem zasadne jest określenie wpływu dodatku *PLW* na zmiany mikrostrukturalne oraz określenie wpływu powyższych zmian na transport cieczy w betonie.

Zmienność składu *PLW* stanowi podstawowy czynnik ograniczający użycie go w konstrukcjach inżynierskich, takich jak mosty i inne konstrukcje drogowe. Ograniczenie zmienności składu chemicznego i właściwości fizycznych *PLW* jest warunkiem koniecznym do opanowania technologii wytwarzania oraz ustabilizowania właściwości użytkowych betonów z jego udziałem. Stąd zidentyfikowanie we właściwościach fizykochemicznych *PLW* czynników szkodliwych w kontekście zastosowania w kompozytach mrozoodpornych oraz rozwiązanie problemu ich usunięcia stanowi integralny fragment przeprowadzonych prac doświadczalnych. Omówiony w Rozdziałach 2 i 3 stan wiedzy na temat odporności kompozytów cementowych na cykliczne działanie ujemnych temperatur i soli odładzających uzasadnia podjęcie tematu.

1.3. Cel, tezy i zakres pracy

Przedmiotem badań jest określenie wpływu popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego w kotłach konwencjonalnych na mikrostrukturę i fizyczne właściwości betonów, ze

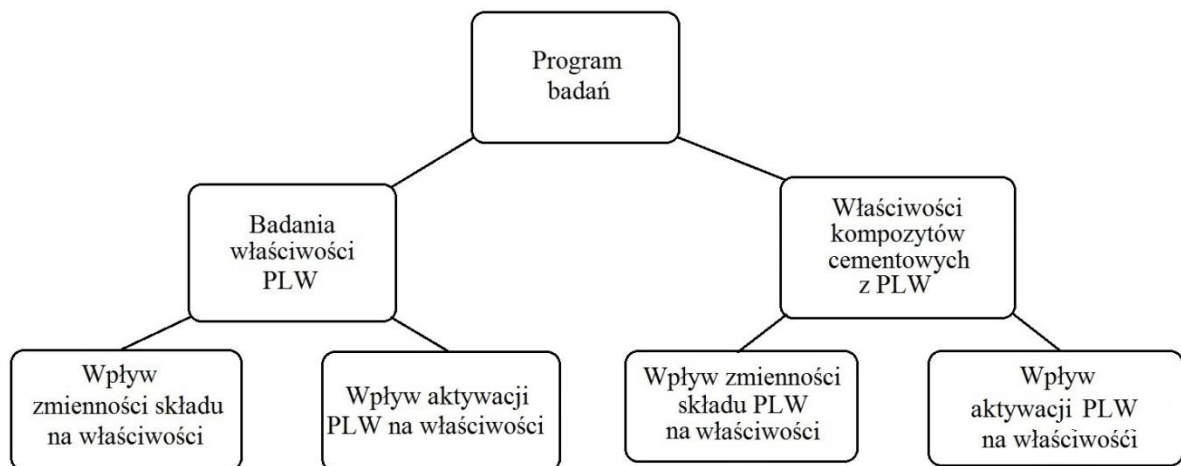
szczególnym uwzględnieniem trwałości w środowisku oddziaływań cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności środków odladzających.

Tezy rozprawy:

- 1) Wykorzystanie przetworzonych popiołów lotnych wapiennych poprawi mikrostrukturę porów powietrznych w napowietrzonych betonach.
- 2) Przetwarzanie popiołów lotnych wapiennych poprawi odporność kompozytów cementowych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności środków odladzających.

Rozprawa składa się z części literaturowej oraz badań doświadczalnych. W studium literatury przeanalizowano problematykę oddziaływania cyklicznego zamrażania i rozmrażania na proces niszczenia betonów oraz omówiono wpływ dodatku *PLW* na uzyskiwane wyniki mrozoodporności. Dokonano także przeglądu sposobów zapobiegania skutkom cyklicznego zamrażania i rozmrażania w betonach.

Badania doświadczalne zostały podzielona na dwa zasadnicze etapy (Rys. 1.1). Pierwszy etap zawierał badania związane z wyznaczeniem właściwości *PLW*. Charakterystyka *PLW* w postaci nieprzetworzonej została przeprowadzona z podkreśleniem tych właściwości, które mogą mieć wpływ na uzyskanie właściwej mikrostruktury betonów. Następnie na podstawie uzyskanych rezultatów wybrano sposoby aktywacji popiołów, aby ograniczyć ich niepożądane właściwości, i przeprowadzono ich charakterystykę. Drugi etap dedykowany był wyznaczeniu właściwości betonów z dodatkiem *PLW*. W pierwszej kolejności określono wpływ nieprzetworzonych *PLW* na właściwości betonów. Następnie na podstawie wyników przeprowadzonych badań dokonano korekty programu badań i selekcji metod badawczych. Wprowadzone zmiany wykorzystano podczas badań betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW*.



Rys. 1.1. Schemat programu badawczego

Realizacja celu pracy wymagała przeprowadzenia szeregu prac doświadczalnych, które obejmowały swoim zakresem kolejno:

- badania właściwości fizyko-chemicznych *PLW* w postaci nieprzetworzonej i po aktywacji,

- podstawowe właściwości mechaniczne betonów z *PLW*, tj. wytrzymałość na ściskanie, dynamiczny moduł sprężystości,
- badania strukturalne i mikrostrukturalne powstającej matrycy cementowej,
- badania szczelności betonu,
- badania mrozoodporności i odporności na łuszczenie betonów zawierających dodatek *PLW*.

Badanie właściwości fizykochemicznych *PLW* stanowiły podstawę do oceny zmienności składu popiołów pobranych w pięciu różnych terminach z elektrofiltra elektrowni w Bełchatowie. Oprócz podstawowych badań właściwości fizycznych proponowanych przez dokumenty normalizacyjne definiujące dodatki popiołowe do betonu (gęstość, powierzchnię właściwą wg Blaine'a, miałkość, wodożądność) określono skład ziarnowy *PLW* za pomocą granulometrii laserowej. Dodatkowo ocena właściwości fizycznych obejmowała analizę morfologii ziaren w obserwacjach w mikroskopie skaningowym (*SEM*). Wybór metod badawczych oceny właściwości chemicznych *PLW* obejmował wyznaczenie składu tlenkowego metodą *XRF*, oznaczenie udział najbardziej interesujących, z punktu widzenia zastosowania *PLW* w betonach, związków chemicznych (alkalia, SO_3 , strata prażenia, węgiel organiczny, niezwiązany *CaO*). Dodatkowo określono skład chemiczny charakterystycznych ziaren popiołu za pomocą spektrometru dyspersji elektronów (*EDS*) dostępnego w *SEM*. Oznaczenie kompatybilności z domieszkami zostało wykonane na podstawie badania wskaźnika piany. Celem oznaczenia było określenie kompatybilności *PLW* z domieszkami napowietrzającymi oraz dokonanie wyboru najwłaściwszych domieszek do dalszych etapów badań.

Na podstawie wyników badań zmienności właściwości *PLW* zaproponowano trzy sposoby aktywacji popiołów. Badania właściwości aktywowanych *PLW* obejmowały ocenę składu chemicznego, uziarnienia oraz kompatybilności z wyselekcjonowanymi domieszkami.

Badania betonów z dodatkiem nieprzetworzonych *PLW* miało na celu ocenę wpływu zmienności składu *PLW* na rezultaty badań właściwości mechanicznych, szczelność matrycy i mrozoodporność kompozytów. Program badań uwzględniał weryfikację dodatkowych czynników wpływających na mikrostrukturę i mrozoodporność betonów, tj. zmienny skład fazowy cementu, wynikający głównie z zawartości C_3A . Podstawę badań właściwości mechanicznych stanowiła wytrzymałość na ściskanie oraz dynamiczny moduł sprężystości betonów z *PLW*. Analizę składu fazowego zaczynów cementowo-popiołowych przeprowadzono za pomocą metod termicznych (*DTA*, *TG*) oraz rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej (*XRD*). Określenie mikrostruktury porów powietrznych w stwardniałych kompozytach wykonano metodą cyfrowej analizy obrazów. Ocenę szczelności matrycy cementowej z *PLW* stanowiło badanie szybkości migracji jonów chlorkowych. Ocenę odporności betonów z *PLW* na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie wykonano na podstawie zmian rezonansowego modułu sprężystości. Natomiast odporność na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzającej na podstawie masy złuszczonego materiału. Najwięcej uwagi zostało poświęcone badaniu powierzchniowego łuszczenia, którego zakres został rozszerzony o analizę rodzaju badanej powierzchni betonu oraz czasu dojrzewania.

Wpływ aktywacji *PLW* na właściwości betonów obejmował badania mikrostruktury porowatości kapilarnej, oznaczonej metoda porozymetrii rtęciowej (*MIP*), oraz charakterystyki porów powietrznych. Badanie szczelności betonu zostało rozszerzone

o metodę określającą szybkość absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego. Dodatkowo wprowadzono zróżnicowane warunki dojrzewania, gdzie oprócz dojrzewania w wodzie analizowano wpływ dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych.

Każdy z etapów części doświadczalnej stanowi oddzielny rozdział rozprawy, który każdorazowo podsumowano i wzbogacono o komentarz sugerujący postępowanie w kolejnym etapie badań. Analiza wpływu właściwości *PLW* na mikrostrukturę i mrozoodporność betonów oraz wzajemne ich korelacje została przedstawiona w Rozdziale 10. Rozdział 11 stanowi wnioski końcowe w odniesieniu do postawionych tez badawczych rozprawy.

STUDIUM LITERATUROWE

2. Trwałość betonów w środowisku cyklicznego oddziaływania mrozu

2.1. Mechanizm niszczenia betonów

2.1.1. Przyczyny występowania zjawiska

Podstawowym czynnikiem eksploatacyjnym w warunkach umiarkowanego klimatu Polski i innych krajów Europy, Ameryki Północnej i Azji jest występowanie cyklicznych zmian temperatury w okresie jesienno-zimowym. Zakres zmian temperatury dotyczy przedziału, w którym następuje zamarzanie wody (temperatura $<0^{\circ}\text{C}$). Jednakże dopiero oscylowanie temperatury poniżej i powyżej granicznej wartości przemiany fazowej wywołuje szereg mechanizmów wpływających na trwałość betonu.

Czynniki sprzyjające wystąpieniu destrukcji mrozowej można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa, zwana czynnikami wewnętrznymi, uwzględnia mikrostrukturę materiału (porowatość kruszywa, strefa *ITZ*, udział porowatości otwartej, pory powietrzne, itp.). Druga natomiast charakteryzuje wpływ środowiska oddziałującego na beton i określa się ją mianem czynników zewnętrznych (wilgotność, opady, temperatura, wiatr, czynniki chemiczne i mechaniczne) [108]. Należy podkreślić, że obydwie grupy czynników są i zmienne w czasie, co dodatkowo komplikuje przebieg cyklicznego zamrażania i rozmrażania [129]. Do najważniejszych czynników mikrostrukturalnych zaliczyć należy występowanie porowatości otwartej w betonach, która umożliwia penetrację wody do wnętrza materiału. Obecność wody niezwiązanej chemicznie w betonie umożliwia destrukcję materiału wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania.

Pory betonu mogą być nasycone wodą w sposób całkowity. Dotyczy to przede wszystkim budowli hydrotechnicznych i mostowych, gdzie obecność wody wywierającej ciśnienie na konstrukcje ma miejsce nieustannie. Całkowite nasycenie wodą wywołuje największe zagrożenie zniszczeniem mrozowym. Natomiast brak nasycenia betonu wodą, jak chociażby w konstrukcjach eksploatowanych w powietrzu, gdzie możliwa jest tylko absorpcja wilgoci z otaczającego powietrza, są warunkami łagodnymi w odniesieniu do mrozoodporności. Nie jest wtedy możliwe osiągnięcie wysokiego stopnia nasycenia wodą, przekraczającego krytyczny stopień nasycenia, związany z wystąpieniem destrukcji mrozowej [39]. Możliwa jest także sytuacja pośrednia pomiędzy wymienionymi wyżej – materiał może być poddany okresowemu nawilżaniu i osuszaniu. Jest to sytuacja najbardziej charakterystyczna w przypadku mostów, wiaduktów, nawierzchni dróg, budowli hydrotechnicznych i innych konstrukcji inżynierskich eksploatowanych w umiarkowanym klimacie.

Stosowanie soli odladzających na powierzchni betonów wykorzystywanych w infrastrukturze drogowej stało się podstawą walki z oblodzeniem chodników i jezdni. Najczęściej stosowanymi solami w tym celu są: NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , HCOONH_4 , mocznik itp. Obecność środków odladzających powoduje znacznie większe zagrożenie wystąpienia zniszczeń wywołanych cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem. Wynika to z mechanizmów zniszczeń pochodzących od zamrażania i rozmrażania wewnątrz betonu oraz powierzchniowego łuszczenia, w przypadku gdy sól odladzająca obecna jest na powierzchni betonu. Natomiast chemiczne oddziaływanie korozyjne jonów chlorkowych z matrycą cementową występuje rzadko, głównie w konstrukcjach pozostających w kontakcie z wodą

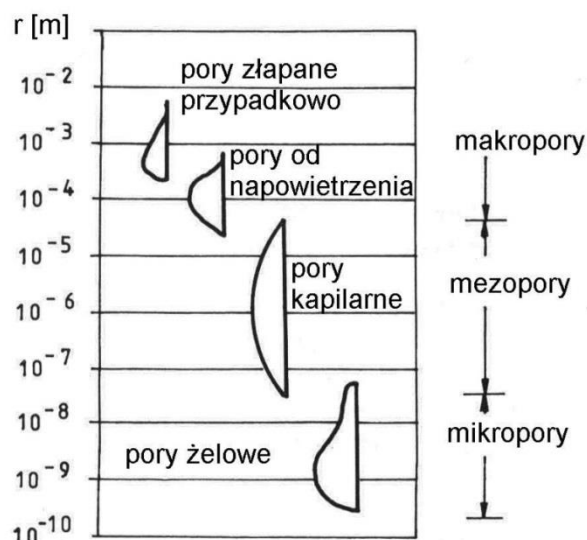
morską [53]. Mechanizm destrukcji następuje w wyniku wylugowywania portlandytu, odwapniania fazy *C-S-H*, reakcją kationów towarzyszących roztworowi soli z fazą *C-S-H* powodując powstawanie związków ekspansywnych [121]. Powyższe mechanizmy zwiększają przepuszczalność matrycy cementowej, bądź jej pękanie, w skrajnych przypadkach aż do całkowitej destrukcji [127]. Sód towarzyszący jonom chlorkowym w roztworach NaCl, najczęściej stosowany w środkach odladzających, wykazuje najmniejszą aktywność chemiczną w stosunku do matrycy cementowej w porównaniu z pozostałymi kationami [116].

Skutki działania cyklicznego zamrażania i odmrażania powodują powstawanie uszkodzeń betonów. Ilość uszkodzeń jest zależna od różnorodności występujących warunków klimatycznych, kształtu konstrukcji oraz wewnętrznej budowy betonu. Zniszczenia powstałe wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania można podzielić na pięć typów zniszczeń [108]:

- pęknięcia powierzchniowe (rysy o wzorze nieregularnej siatki) wynikające z niszczenia wnętrza betonu,
- odpryski powierzchniowe (małe kraterki na powierzchni) wynikające z występowania porowatych kruszyw w sąsiedztwie powierzchni betonu,
- łuszczenie powierzchniowe (delaminacja cienkiej warstwy na powierzchni) charakterystyczne dla miejsc, w których stosuje się środki odladzające,
- głębokie równoległe rysy skracające w narożach płyt (ang. *D-line cracking*),
- całkowite lub częściowe zniszczenie wynikające z braku mrozoodporności, której główną przyczyną jest niewłaściwa mikrostruktura porowatości.

Powstawanie zniszczeń wskutek zamrażania i rozmrażania wynika z obecności w matrycy cementowej porów kapilarnych powstających w wyniku wiązania i twardnienia zaczynu cementowego. W matrycy występują także pustki powietrzne powstałe wskutek niepełnego zagęszczenia mieszanki podczas jej wbudowywania, które stanowią od 1,5% do 2,5% [41]. Tradycyjny podział porowatości ze względu na ich średnicę przedstawiono na Rys. 2.1, gdzie wyróżnione są trzy podstawowe grupy porów: mikropory, mezopory i makropory. Aby dokładniej określić charakterystykę grup porów należy zapoznać się z przyczyną ich powstania [1]:

- pory żelowe, o wymiarach mniejszych od 2,5 nm występujące w zaczynie cementowym w objętości około 26%,
- pory kapilarne, powstałe z nadmiaru wody w betonie niezużytej w procesie hydratacji cementu; decydują one o przepuszczalności matrycy cementowej, a ich wielkość wynosi od 2,5 nm do 10 μm ; niektórzy autorzy stosują w tej grupie dodatkowy podział, np. mezopory (od 2,5 nm do 50 nm) oraz makropory (>50 nm) (Rys. 2.1),
- pory powietrzne, powstałe w wyniku uwięzienia powietrza w mieszance betonu podczas procesu homogenizacji składników, bądź stosowania domieszek napowietrzających; wymiary tych porów zawarte są w przedziale od kilku mikrometrów do kilku milimetrów, a ich udział objętościowy może wynosić od 1 do 8 %,
- pory w kruszywie wynikające z procesów towarzyszących powstawaniu skał.



Rys. 2.1. Zakres średnic porów w betonach z cementem portlandzkim [N4]

Najistotniejszą grupę porów w betonach w kontekście wykorzystania w środowisku cykliczne zamrażania i rozmrażania stanowią pory kapilarne, występujące tak w matrycy cementowej jak i w kruszywie użytym do ich wykonania. Pory kapilarne o średnicach od 10 nm do 200 nm tworzą sieć połączonych ze sobą kanalików zdolnych do transportu cieczy w wyniku podciągania kapilarnego [108]. Dodatkowo, zdaniem wielu autorów [23],[73],[113] znaczny wpływ na właściwości betonów wywiera struktura powstającej matrycy w bezpośrednim sąsiedztwie kruszywa. Strefa kontaktowa *ITZ* stanowi obszar o odmiennej mikrostrukturze znajdujący się w odległości od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów od granicy kruszywa. Zbudowana jest głównie z portlandytu krystalizującego na powierzchni kruszywa oraz fazy *C-S-H* i ettringitu [113]. Powstająca bardziej porowata mikrostruktura *ITZ* najczęściej wyjaśniana jest lokalnym obniżeniem stosunku *w/c* wynikającym z tzw. „efektu ściany”, związanym z różnicami wielkości ziaren cementu i kruszywa. Budowa i właściwości strefy *ITZ* uzależniona jest od rodzaju kruszywa, na którym powstaje (gładkość, porowatość, czystość powierzchni, wilgotność, powinowactwo chemiczne) [129]. Strefa kontaktowa stanowi miejsce, gdzie najczęściej występują defekty wynikające z sedymentacji ziaren z wydzieleniem wody, która gromadząc się pod kruszywem może powodować lokalne obniżenie *w/c* lub w skrajnym przypadku powstawanie szczelin równoległych do powierzchni ziarna [123]. Defekty te są najczęściej spowodowane błędami technologicznymi w zakresie projektowania i wykonania mieszanki betonu.

Wpływ strefy *ITZ* betonu na odporność na działanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania jest związany głównie ze zwiększoną porowatością, której przypisywano główny udział w transporcie cieczy i roztworów soli odladzających do wnętrza betonu. Jednakże autorzy [33],[135] stwierdzili, że udział *ITZ* w objętości betonu jest na tyle mały, że o przepuszczalności matrycy cementowej w większym stopniu decyduje porowatość całej objętości matrycy cementowej, niż samej strefy *ITZ*. Leemann i inni [74] doszli do takich samych wniosków określając wpływ porowatości *ITZ* na współczynnik migracji jonów chlorkowych.

Zważywszy na różnorodność średnic porów woda w betonie może występować w nich stale, bądź okresowo. Stała obecność wody w porach jest zjawiskiem charakterystycznym

w przypadku porów żelowych, gdzie ich rozmiary są tak małe, że woda zaadsorbowana na ściankach takiej kapilary wypełnia ją całkowicie, niezależnie od warunków środowiska naturalnego. Pozostałe rodzaje porów mogą być wypełnione wodą całkowicie lub częściowo, w zależności od warunków, w jakich znajduje się beton cementowy. Transport wody z zewnątrz spowodowany jest szeregiem mechanizmów wymuszających jej przemieszczanie się do wnętrza mikrostruktury. Najbardziej charakterystyczne zjawiska powodujące transport cieczy do wnętrza betonu wynikają z występowania ciśnienia zewnętrznego oraz ciśnienia kapilarnego [108]. Ciśnienie zewnętrzne wody występuje przede wszystkim w konstrukcjach zbiorników wodnych i konstrukcjach zanurzonych. Zjawisko absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego stanowi główny mechanizm nasączenia materiałów cieczą w konstrukcjach narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności środków odladzających. Transport cieczy do wnętrza betonu wynika z napięcia powierzchniowego wody oraz zdolności do jej adhezji. Kontakt cieczy z porami kapilarnymi powoduje powstanie menisku wklęsłego, a wypadkowa sił adhezji i kohezji powoduje generowanie ciśnienia kapilarnego wywołującego ruch cieczy, który jest odwrotnie proporcjonalny do promienia poru kapilarnego:

$$P_c = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r}, \quad (1)$$

gdzie:

P_c – ciśnienie kapilarne;

σ – napięcie powierzchniowe wody;

θ – kąt zwilżania ścianki poru;

r – promień kapilary.

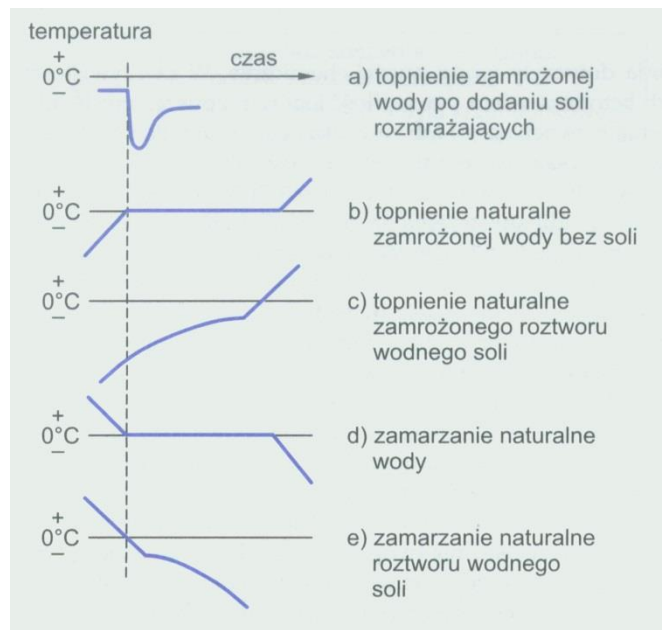
Woda wewnątrz betonu może zostać zaadsorbowana w wyniku występowania sił elektrostatycznych Van der Waalsa powodujących przyciąganie molekuł wody. Taka woda znajdująca się w betonie nazywana jest adsorpcyjną. Pozostała część wody niezwiązana w żaden sposób z matrycą cementową nazywana jest wodą swobodną. Odgrywa ona największą rolę w destrukcji wynikającej z zamrażania i rozmrażania betonów.

Najistotniejszym zjawiskiem występującym podczas działania cyklicznego zamrażania i rozmrażania jest zamarzanie wody w porach betonu. Przemiana fazowa wody swobodnej jest zjawiskiem szczegółowo opisanym. Zagadnieniem bardziej złożonym jest natomiast przebieg przemiany fazowej wody w lód w materiale porowatym, gdyż podczas przemiany ograniczenia przestrzeni wywierane przez ścianki porów wpływają na jego przebieg. Dodatkowo obecność szeregu zmiennych czynników takich jak: szeroki przedział średnic porów kapilarnych, działanie mechanizmów transportu cieczy oraz obecność różnych postaci wody (adsorpcyjna i swobodna) sprawiają, że tworzenie się lodu w porach betonu nie zachodzi w całej objętości równomiernie. W małych porach o średnicach poniżej 5 nm, gdzie występuje jedynie woda adsorpcyjna praktycznie nigdy nie zamarza w warunkach eksploatacyjnych, za jakie się przyjmuje temperaturę do -20°C . W przypadku porów o średnicach większych od 5 nm zamarzanie następuje od wody znajdującej się w największych porach i wraz z obniżaniem temperatury następuje nukleacja i wzrost lodu w porach o coraz mniejszych średnicach. Z powyższych rozważań wynika, że w betonach zamarza jedynie część wody zdolnej do przemiany fazowej. Objętość zamarzającej wody

uzależniona jest od średnic porów kapilarnych w matrycy i np. w przypadku betonów o w/c od 0,25 do 0,45 udział zamarzającej wody w temperaturze -20°C wynosi od 3% do 22% i zwiększa się ze zwiększeniem w/c [82].

Obecność czystej wody w porach matrycy cementowej jest zjawiskiem niewystępującym w rzeczywistości. Właściwości wody sprawiają, że stanowi ona bardzo dobry rozpuszczalnik, co sprzyja rozpuszczaniu minerałów z matrycy cementowej, bądź substancji chemicznych ze źródeł znajdujących się poza betonem. Najpoważniejszym źródłem soli w przypadku betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i odmrażanie stanowią związki chemiczne służące do odladzania powierzchni. Ich transport do wnętrza betonu wynika z procesów dyfuzyjnych zachodzących między roztworem soli na powierzchni, a cieczą znajdującą się wewnątrz matrycy. Szybkość dyfuzji jonów soli odladzających w głąb betonu uzależniona jest od wymiarów porów kapilarnych i stopnia ich wypełnienia cieczą [85].

Pojawienie się soli w roztworach wodnych zaburza równowagę fazową zamarzającej cieczy. Skutkiem zmian jest zmniejszenie temperatury zamarzania, która zmniejsza się wraz ze zwiększaniem stężenia soli [97]. Przebieg przemiany fazowej wody zależy od momentu, w których sól pojawiła się w układzie (Rys. 2.2). Inny przebieg przemiany fazowej obserwowany jest w przypadku dodatku soli na lód, a inny przy naturalnym zamarzaniu. Jony soli nie tworzą kryształów lodu podczas przemiany fazowej roztworu, dlatego w zamarzającej cieczy przemianie fazowej ulega jedynie woda. Zmniejszanie się objętości wody w roztworze powoduje, że zwiększa się stężenie soli, które prowadzi do zwiększenia gęstości cieczy oraz dalszego zmniejszania temperatury krzepnięcia.



Rys. 2.2. Przebieg przemiany fazowej układów woda-sól odladzająca [21]

2.1.2. Hipotezy opisujące niszczenie betonów

Hipotezy destrukcji betonów w wyniku oddziaływania cyklicznego zamrażania i rozmrażania można podzielić na opisujące mechanizmy niszczenia wnętrza betonu oraz powierzchniowego łuszczenia w obecności soli odladzających.

Hipotezy niszczenia wewnętrznego wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania ewoluowały wraz z czasem postępu w pracach badawczych. Modele destrukcji przedstawiono w sposób chronologiczny.

1) Hipoteza ciśnienia hydraulicznego Powersa [100]

Powers założył, że woda w wyniku oddziaływania ujemnych temperatur zamarza stopniowo pozostawiając roztwór o coraz większym stężeniu soli. Zamarzająca woda w porach kapilarnych betonu zwiększając swoją objętość o 9% wypycha jej nadmiar poza objętość poru. Zwiększenie objętości jest przyczyną powstania ciśnienia w porach kapilarnych i wymusza ruch cieczy w kierunku pustek znajdujących się w matrycy cementowej, zgodnie z prawem Darcy'ego (równanie 2). Generowane ciśnienie zwiększa się wraz ze zwiększeniem szybkości chłodzenia oraz stopniem wypełnienia mikrostruktury wodą. Destrukcja betonów następuje wtedy, gdy ciśnienie w porach kapilarnych jest większe od wytrzymałości na rozciąganie betonu.

$$J = -\frac{k}{\eta_L} \cdot \nabla p = -\frac{k}{\eta_L} \cdot \left(\frac{P_L - P_e}{L} \right), \quad (2)$$

gdzie:

J – przepływ cieczy [m/s];

k – przepuszczalność [m²];

η_L – lepkość cieczy [Pa·s];

P_L – ciśnienie płynu w porach kapilarnych [Pa];

P_e – ciśnienie otoczenia [Pa];

L – odległość, w jakiej występuje gradient ciśnienia ∇p [m].

2) Hipoteza ciśnienia osmotycznego Powersa i Helmutha [101]

Dalsze prace Powersa i Helmutha pozwoliły dokonać obserwacji zachodzących w betonach podczas przemiany fazowej cieczy w lód. Wiedząc, że w wyniku zmniejszania się porów kapilarnych wzrasta napięcie powierzchniowe cieczy, stwierdzono, że woda zamarza najpierw w dużych porach kapilarnych. Zamarzanie w dużej kapilarze wywołuje zwiększenie stężenia cieczy pozostającej w równowadze z tworzącym się lodem. Konsekwencją zmiany stężenia jest powstanie ciśnienia osmotycznego pomiędzy cieczami w małych i dużych porach kapilarnych. Proces ten wywołuje transport wody z małych do dużych porów kapilarnych, gdzie z powodu braku miejsca ciśnienie zaczyna się zwiększać.

3) Hipoteza termodynamiczna Litvana [76]

Teoria Litvana opiera się o stwierdzenie, że prężność pary nad wodą przechłodzoną jest większa, niż nad lodem. W wyniku występowania napięcia powierzchniowego lód zaczyna powstawać w pierwszej kolejności na powierzchni dużych porów powietrznych. Nad lodem prężność pary będzie mniejsza niż w porach kapilarnych, dlatego nastąpi transport cieczy z porów kapilarnych o większych średnicach, a w miarę spadku temperatury z porów o mniejszych średnicach (równanie 3) [110]. Przepływ wody w kierunku zamarzania wywołuje zwiększenie ciśnienia, który jest przyczyną destrukcji matrycy cementowej. Litvan w swoich badaniach [76] określił teoretyczną wartość ciśnienia, jaka zostaje wygenerowana podczas ochładzania cieczy w modelowym

ośrodka porowatym i jego wyliczenia zgodziły się z doświadczeniami praktycznymi, które wykonali Vichit-Vadakan i Scherer [140].

$$(P_L - P_E) = -\Delta S_{fL} \cdot (T_m - T) = \gamma_{LV} \cdot \kappa_{LV}, \quad (3)$$

gdzie:

P_L – ciśnienie cieczy [Pa];

P_E – równowagowe ciśnienie lodu [Pa];

∇S_{fL} – entropia topnienia na jednostkę objętości cieczy [$\text{J}/\text{cm}^3 \cdot \text{K}$];

$T_m - T$ – przechłodzenie [K];

T_m – temperatura topnienia [K];

γ_{LV} – napięcie powierzchniowe na granicy międzyfazowej ciecz/para wodna;

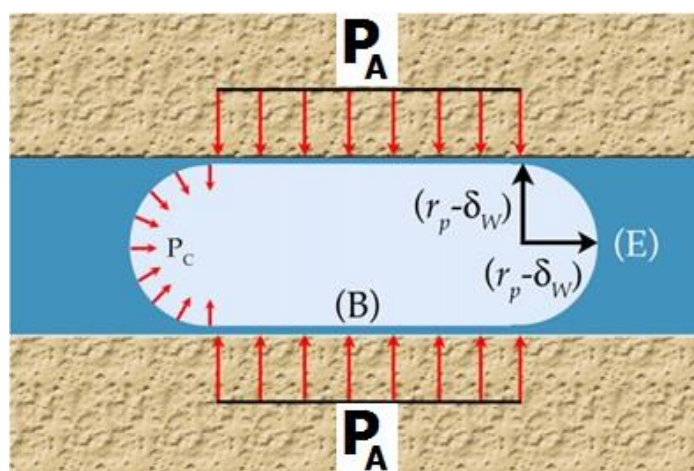
κ_{LV} – krzywizna granicy międzyfazowej ciecz/para wodna.

4) Hipoteza krytycznego stopnia nasycenia Fagerlunda [39]

W swoich badaniach Fagerlund zauważył, że betony o różnym stopniu nasycenia wodą wykazują odmienną odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie. Określił on zatem taki stopień zawilgocenia, powyżej którego następuje destrukcja w wyniku oddziaływania mrozu. Założył, że destrukcja następuje w wyniku ograniczenia przepuszczalności spowodowanej formowaniem się lodu wewnątrz porów kapilarnych. Określił on doświadczalnie krytyczny stopień nasycenia betonu wodą, który wynosił od 80% do 90%, stanowiący stosunek całkowitej zawartości wody w betonie do jego całkowitej porowatości. Zaobserwował także, że osiągnięcie krytycznego stopnia nasycenia staje się trudniejsze w przypadku napowietrzonych betonów – pory powietrzne wypełniają się cieczą z dużą trudnością.

5) Hipoteza ciśnienia krystalizacji

Późniejsze badania określiły jednak, że w przypadku rzeczywistych materiałów porowatych, takich jak betony, zmiana ciśnienia cieczy w porach podczas przemiany fazowej pomiędzy obliczeniami teoretycznymi, a rzeczywistymi pomiarami sięga 45% [27]. Hipoteza ciśnienia krystalizacji bazuje na założeniu, że przyczyną destrukcji jest ciśnienie wywierane przez lód na ścianki porów kapilarnych (Rys. 2.3) [14].



Rys. 2.3. Schemat cylindrycznego kryształu lodu formującego się w porze kapilarnym o promieniu r_p . Lód przyjmuje cylindryczny kształt (B) o promieniu $r_p - \delta_w$ i półkolistego końca (E) o takim samym promieniu [139].

Ciśnienie powstaje w wyniku różnicy krzywizn pomiędzy miejscem, gdzie kryształ styka się ze ścianą (B), a półkolistym końcem (E) opisuje równanie 4:

$$P_A = \gamma_{CL} \cdot (\kappa_{CL}^E - \kappa_{CL}^B) = \frac{\gamma_{CL}}{(r_p^B - \delta_w)} \quad (4)$$

gdzie:

P_A – ciśnienie krystalizacji;

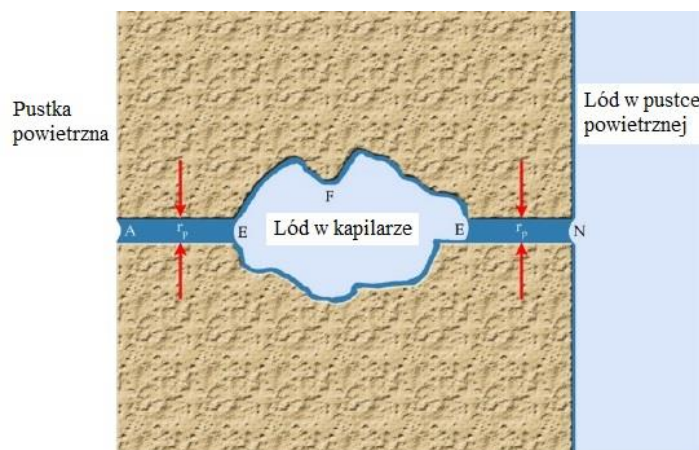
γ_{CL} – energia międzyfazowa kryształ/ciecz;

κ_{CL} – krzywizna międzyfazowa kryształ/ciecz;

$r_p - \delta_w$ – promień półkolistego końca kryształu lodu oraz cylindrycznego korpusu.

W wyniku uniemożliwienia swobodnego rozrostu kryształu lodu przez ściany poru kapilarnego zaburzona zostaje równowaga mechaniczna w kryształach, której skutkiem jest powstawanie sił wywierających nacisk na ograniczającą rozrost strukturę. Skutkiem powstającego ciśnienia są rozciągające naprężenia obwodowe działające na ścianki porów, które są znacznie większe niż wytrzymałość matrycy cementowej.

Lód może jednocześnie tworzyć się w porach kapilarnych i porach powietrznych. Takie zachowanie jest możliwe dzięki występowaniu zjawiska zasysania cieczy przez pory kapilarne (Rys. 2.4).

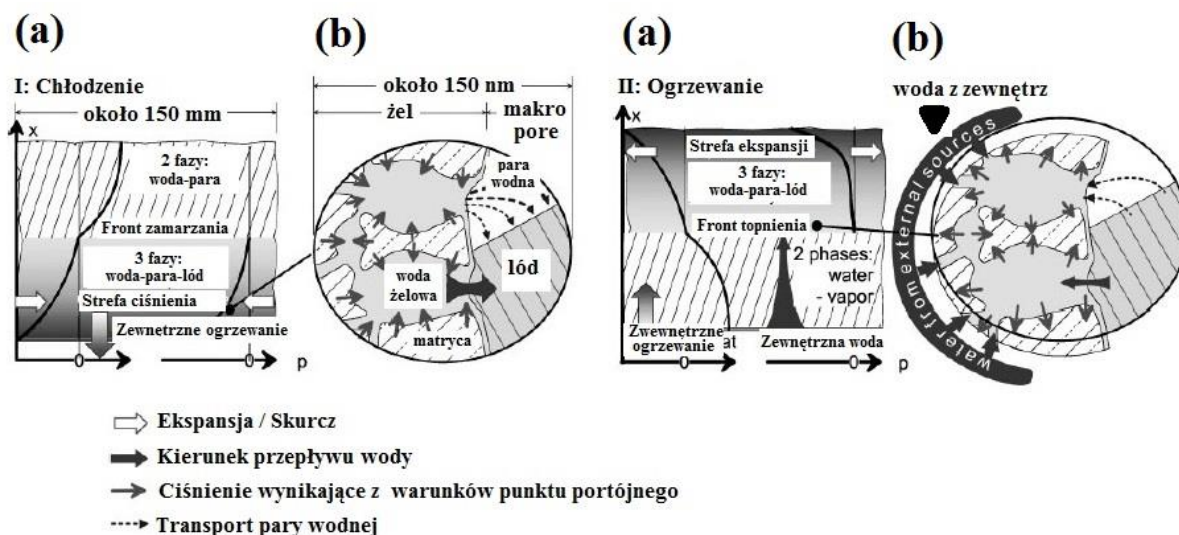


Rys. 2.4. Schemat formowania się lodu w jamie poru kapilarnego i pustce powietrznej (temperatura jest taka, aby lód nie uzyskał wymaganej krzywizny do penetracji kanalikiem pomiędzy pustką powietrzną, a jamą w porze kapilarnym) [139]

Gdy jeszcze nie ustalila się równowaga ciśnienia cieczy, powstający lód może penetrować w kierunku porów wywołując ciśnienie krystalizacji objawiające się ekspansją matrycy cementowej. W przypadku betonu nie zawierającego pustek powietrznych następuje dalsze rozszerzanie matrycy cementowej wraz ze spadkiem temperatury. Natomiast w przypadku, gdy w matrycy cementowej występują pustki powietrzne, to mechanizm powoduje, że formowanie się w nich lodu skutkuje zasysaniem cieczy z porów kapilarnych, wywołując kurczenie matrycy cementowej. Sytuacja ta ma miejsce do momentu osiągnięcia równowagi ciśnienia w układzie, a czas jej osiągnięcia jest uzależniony od zdolności transportu cieczy w matrycy [139].

6) Hipoteza „micro-ice-lence pump” [115]

Mechanizm zakładający generowanie podciśnienia przez niezamrożoną wodę żelową podczas działania temperatury dużo mniejszej od temperatury krzepnięcia. Takie zjawisko powoduje skurcz matrycy cementowej oraz transport nadmiernej objętości wody w kierunku lodu (Rys. 2.5). Zwiększa się wtedy stopień nasycenia porów większych, natomiast pory o mniejszych średnicach wysychają. Proces trwa do momentu pojawienia się lodu w porach żelowych. Taki układ, gdzie lód w dużych porach występuje w stanie równowagi z niezamrożoną wodą żelową powoduje generowanie wysokiego podciśnienia. Dlatego w przypadku przemiany fazowej lodu w ciecz ogrzewanego betonu następuje rozszerzanie struktury żelu oraz transport cieczy w kierunku wody żelowej. Mechanizmy transportu cieczy z lodu (odparowanie -sublimacja, topnienie na powierzchni lodu) sprawiają, że jest on mało wydajny, dlatego szybciej następuje wyrównanie ciśnienia w układzie dzięki zasysaniu wody zewnętrznej, której mechanizm transportu jest szybszy (lepkie płyny). Takie zachowanie powoduje, że podczas naprzemiennego zamrażania i rozmrażania występuje zwiększenie stopnia nasycenia betonu. Przekroczenie wartości krytycznego stopnia nasycenia uruchamia destrukcyjne oddziaływanie mrozu.



Rys. 2.5. Schemat działania „micro-ice-lence pump”: (a) makroskopowy niestacjonarny system podczas chłodzenia (I) i ogrzewania (II); (b) powiększony około 1 miliona razy [115]

Powierzchniowe łuszczenie betonu w obecności soli odladzającej objawia się odspojeniem małych fragmentów matrycy cementowej, bądź matrycy z małymi kawałkami kruszywa. Mechanizm niszczenia betonów w wyniku zamrażania i rozmrażania w obecności środków odladzających jest procesem złożonym, gdzie nakładają się procesy fizyczne i chemiczne. Dlatego nie ma jednoznacznego modelu opisującego to zjawisko w całości. Jednakże większość badaczy uważa, że przeważają w nim zjawiska fizyczne [138]. Powszechnie łączono mechanizmy odpowiedzialne za powierzchniowe łuszczenie oraz destrukcję w wyniku wewnętrznego niszczenia betonów. Jednakże w przypadku gdy roztwór soli odladzającej nie występował na powierzchni betonu łuszczenie powierzchniowe nie miało miejsca [97],[109]. Dodatkowo Lindmark [75] stwierdził, że łuszczenie powierzchniowe w obecności środków odladzających nie powoduje znaczącej utraty

wytrzymałości wnętrza betonu. Stąd badania mrozoodporności wewnętrznej nie dostarczają informacji na temat odporności na powierzchniowe łuszczenie. Dlatego obecnie uważa się, że te dwa rodzaje oddziaływań różnią się od siebie i w celu ich wyjaśnienia należy każdy z nich rozpatrywać oddzielnie [138].

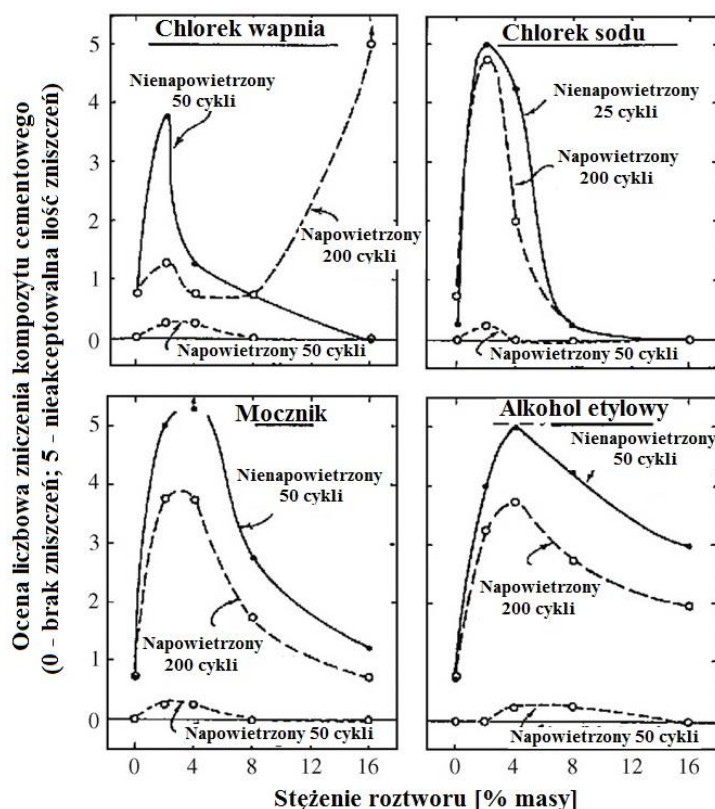
W badaniach prowadzonych od dekad postawiono wiele hipotez określających przyczyny występowania powierzchniowego łuszczenia w obecności soli odladzających. Badania laboratoryjne nie zawsze jednak weryfikowały w sposób jednoznaczny proponowany mechanizm, co prowadziło do stawiania kolejnych hipotez rozszerzających podejście do poprzedniej teorii [139]. Najważniejsze teorie opisujące zjawisko powierzchniowego łuszczenia to:

1) Hipoteza wstrząsu termicznego

Zjawisko polega na oddziaływaniu soli odladzających na zamrożony lód obecny na powierzchni betonu. W wyniku pojawienia się soli na powierzchni lodu, w temperaturach mniejszych od temperatury krzepnięcia, ciepło do roztopienia warstewki lodu na powierzchni musi zostać dostarczone z warstewki powierzchniowej betonu znajdującego się pod lodem [61]. Gradient temperatury uzyskany na niewielkiej głębokości betonu prowadzi do powstawania naprężenia termicznego mogącego wywołać pojawienie się uszkodzeń powierzchni. Jednakże badania [107] wykazały, że uzyskanie wstrząsu termicznego w betonach w rzeczywistych warunkach środowiskowych (do -20°C) nigdy nie występuje. Uznaje się, że wstrząs termiczny nie ma znaczącego wpływu na niszczenie w wyniku powierzchniowego łuszczenia, gdyż bardziej groźna jest obecność soli odladzających w zamrażającym roztworze, niż umieszczana na powierzchni lodu [137].

2) Hipoteza wzrostu stopnia nasycenia

W wyniku zamrażania roztworu soli odladzającej następuje stopniowe zateżnienie roztworu soli wraz ze wzrostem objętości powstającego lodu, gdyż jony soli nie są wbudowywane do sieci krystalicznej lodu [130]. Wynika stąd, że wraz ze zmniejszaniem temperatury następuje zmniejszanie objętości roztworu oraz zwiększanie jego stężenia. Obecność roztworu soli odladzającej na powierzchni betonu prowadzi do transportu wilgoci i roztworu soli do wnętrza mikrostruktury. Zwiększenie stężenia soli w cieczy występującej w porach pod powierzchnią betonu powoduje zmniejszenie prężności pary wodnej nad roztworem. Zjawisko to przyczynia się do szybszego transportu cieczy zwiększając stopień nasycenia powierzchni betonu [82]. Jednakże zauważono, że masa złuszczonego materiału na powierzchni betonu nie jest wprost proporcjonalna do zwiększenia stężenia roztworu soli [137]. Określono, że najbardziej niekorzystny wpływ soli odladzających występuje w przypadku ich stosowania w zakresie średnich stężeń, które określono mianem „pesymistycznych” (Rys. 2.6) [137]. „Pesymistyczne” stężenie zależy przede wszystkim od rodzaju soli odladzającej [6] oraz w mniejszym stopniu od zawartości porów powietrznych w matrycy cementowej. W przypadku betonów o zawartości powietrza od 2-6% wartość pesymistyczna stężenia roztworu NaCl wynosi około 3% [137].



Rys. 2.6. Wpływ stężenia roztworu odladzającego na odporność na powierzchniowe łuszczenie [137]

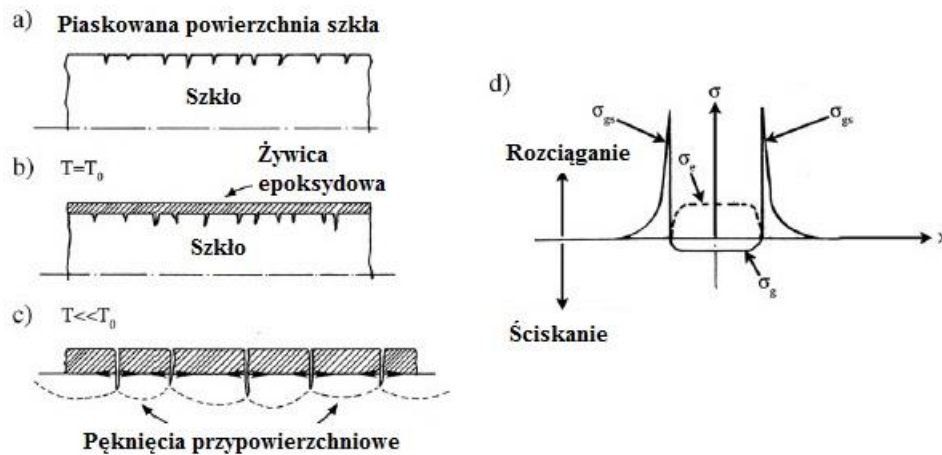
3) Hipoteza ciśnienia osmotycznego

Formowanie się lodu na powierzchni betonu prowadzi do występowania ciśnienia osmotycznego [89]. Związane jest ono ze zmianą stężenia soli w roztworze w wyniku postępującego zamarzania wody. W sąsiedztwie tworzonych lodu stężenie zwiększa się i wymusza ruch wody w jego kierunku, gdyż w innych miejscach jest ono mniejsze. Ten ruch cieczy powoduje zwiększenie ciśnienia w pobliżu strefy zamarzającego lodu. Jednakże z obliczeń wynika, że zmiana stężeń nigdy nie osiągnie takiej wartości, aby ciśnienie osmotyczne dokonało zniszczenia matrycy cementowej [138]. Dodatkowo zjawisko relaksacji hydrodynamicznej ogranicza występowanie mechanizmu ciśnienia osmotycznego w wyniku rozpraszania gradientu ciśnienia procesami dyfuzyjnymi, które działają szybciej, niż powstające ciśnienie [139].

4) Hipoteza „glue spalling” [136]

Teoria swoją genezę zaczęła od mechanizmu dekoracji szkła poprzez odpryskiwanie niewielkich fragmentów materiału przy jego powierzchni z utworzeniem charakterystycznych płytkich zagłębień [57]. Cała procedura składa się z piaskowania szkła, rozłożenia warstwy żywicy epoksydowej na powierzchni szkła w wysokiej temperaturze oraz ochłodzeniu powstałego betonu (Rys. 2.7). Kiedy następuje zmniejszenie temperatury żywica epoksydowa przejawia skłonność do kurczenia się znacznie bardziej, niż znajdująca się bezpośrednio pod nią warstwa szkła, co wywołuje powstawanie naprężeń. Skutkiem pojawienia się naprężeń jest pęknięcie żywicy epoksydowej z utworzeniem wielu małych wysp. Wzdłuż obwodu tych wysp w przyległym szkłe pojawiają się naprężenia rozciągające. Te właśnie siły powodują

powstawanie wad na powierzchni szkła, które zaczynają się rozprzestrzeniać by w konsekwencji odsłonić cienką warstwę szkła.



Rys. 2.7. Schemat działania mechanizmu „glue spalling”: a) piaskowana powierzchnia szkła; b) beton żywica epoksydowa/szkło w podwyższonej temperaturze początkowej T_0 ; c) Powierzchnia betonu powstała w wyniku ochłodzenia betonu do temperatury dużo mniejszej niż T_0 (widoczne są wyspy żywicy epoksydowej z cienkimi odpryskami szkła); d) schemat naprężenia, jakie pojawia się w kompozycie żywica epoksydowa/szkło: σ_g – naprężenie na powierzchni szkła pod powierzchnią żywicy epoksydowej; σ_e – naprężenie w żywicy epoksydowej; σ_{gs} – naprężenie „glue spall” w pobliżu połączenia z żywicą epoksydową

Valenza [136] zakłada, że podobny mechanizm ma miejsce na powierzchni betonu, na którym znajduje się warstewka lodu. W takim przypadku na powierzchni betonu tworzy się warstewka betonowa lód/matryca cementowa. Jeśli temperatura zostanie zmniejszona poniżej punktu krzepnięcia roztworu warstewka lodu przejawia tendencję do kurczenia się 5 razy bardziej niż znajdująca się poniżej matryca cementowa, wywołując mechanizm opisany powyżej [112].

Cały proces powierzchniowego łuszczenia można wyjaśnić za pomocą mechaniki pękania. Lód na powierzchni matrycy cementowej powoduje powstawanie naprężenia w wyniku różnicy rozszerzalności cieplej w stosunku do sztywnego betonu. Jeżeli naprężenia przekroczą wartość wytrzymałości na rozciąganie to powierzchnia lodu pęka. Powstałe pęknięcia powodują propagację szczeliny do przyległej jej matrycy cementowej, a następnie ich propagację równoległe do powierzchni betonu. Skutkuje to odspajaniem cienkiej warstwy powierzchni betonu [136].

Mechanizm ten wyjaśnia występowanie „pesymistycznego” stężenia soli, które powodują największe zniszczenia w wyniku powierzchniowego łuszczenia. Wynika to z faktu, że czysta woda zamarzając nie powoduje pękania, a w przypadku wysokich stężeń w stosowanym przedziale temperatur występujących w testach na powierzchniowe łuszczenie nie występuje wystarczający przyrost siły, aby dokonać zniszczenia [139].

2.2. Zapobieganie niszczeniu betonów

Zapewnienie mrozoodporności betonów odbywa się na etapie projektowania i wykonywania betonów. Metody bazują na dwóch założeniach. Pierwsze założenie zakłada wykonanie

betonów o szczelności uniemożliwiającej wnikanie wody do wnętrza mikrostruktury oraz wytrzymałości uniemożliwiającej niszczenie powierzchniowe. Drugi sposób zakłada kształtowanie mikrostruktury tak, aby ograniczyć stopień nasycenia betonu wodą, zapewniając zmniejszenie naprężenia podczas zamarzania wody.

W praktyce zapobieganie destrukcji betonów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie odbywa się stosunkowo rzadko za pomocą zwiększenia szczelności matrycy cementowej, gdyż jest ono niekorzystne ekonomicznie. Zwiększenie szczelności odbywa się przez zmniejszenie stosunek w/c betonów i uzyskanie betonów o wysokich wytrzymałościach. Mniejszy wskaźnik w/c powodują ograniczenie zjawiska segregacji mieszanki betonu zwanej „*bleedingiem*” [89],[124] oraz powoduje zwiększenie wytrzymałości betonu. Brak segregacji przy niskim w/c przyczynia się do równomiernego rozłożenia składników betonowu bez lokalnego zmniejszenia wytrzymałości betonu, co prowadzi do poprawy odporności na powierzchniowe łuszczenie [59],[131]. Betony o $w/c \leq 0,3$ uznaje się za odporne na powierzchniowe łuszczenie [108]. Spowodowane jest to zamknięciem połączeń pomiędzy porami kapilarnymi w betonie odpowiedzialnymi za transport wody. W przypadku wewnętrznego niszczenia betonów wskutek działania mrozu wartość stosunku w/c nie powinna przekraczać 0,35-0,37 [108].

Kolejnym sposobem poprawy mrozoodporności betonów, który jednak nie znalazł szerszego zastosowania, było podejście przedstawione przez Scherera i innych [111], którzy zaproponowali wprowadzenie środka zarodkującego krystalizację do pustek powietrznych. Koncepcja wynikała z rozważań opierających się na założeniach modelu niszczenia matrycy cementowej wskutek ciśnienia krystalizacji. Na jego podstawie stwierdzono, że wspomaganie początkowej nukleacji lodu w porach powietrznych przy małym przechłodzeniu jest korzystne, ponieważ zapobiega penetracji lodu do sieci porów kapilarnych aż do bardzo niskich zakresów temperatury [139]. W ten sposób w pierwszej kolejności następuje tworzenie lodu w porach powietrznych, co powoduje odessanie wody z przyległych porów powietrznemu kapilary, nim zostaną w niej zapoczątkowane procesy krystalizacji lodu.

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem zapobiegania niszczeniu betonu wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania jest wprowadzenie do wykonywanej mieszanki pęcherzyków powietrza, bądź sferycznych cząstek innych materiałów o wymiarach od 10 do 60 μm . Ponadto, istotna jest prawidłowa przestrzenna dystrybucja pustek powietrznych w betonie. Do tego celu najczęściej używane są:

- domieszki chemiczne,
- dodatki mikrosfer o wymiarach od 10 do 60 μm wykonanych z tworzyw sztucznych, bądź pozyskanych z popiołów lotnych,
- zastosowanie superabsorbentów polimerowych (SAP) w betonach o matrycach betonów wysokowytrzymałościowych.

Celem wprowadzenia pęcherzyków powietrza do betonu jest stworzenie mikrostruktury pozwalającej na ograniczenie skutków działania cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Uzyskanie takiego efektu przy zastosowaniu domieszek napowietrzających jest możliwe głównie w wyniku występowania dwóch mechanizmów:

- ograniczenia segregacji, tzw. „*bleedingu*” [25],
- zasysania przez pustki powietrzne cieczy z otaczającej je matrycy cementowej [102].

Wraz ze wzrostem udziału objętościowego pęcherzyków powietrza maleje tendencja mieszanki betonu do segregacji, tzn. opadania gęstszych składników na dno. Segregacja prowadzi do wydzielenia się fragmentów betonu o większej i mniejszej wytrzymałości odpowiednio na dole i na górze układanego elementu. W wyniku „bleedingu” górna warstwa betonu posiada mniejszą odporność na działanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania, niż warstwa dolna. Tłumaczy się to większą porowatością warstwy górnej. Natomiast zastosowanie środka napowietrzającego powoduje, że pęcherzyki powietrza przylegają do ziaren cementu i uniemożliwiają im opadanie i tworzenie aglomeratów przyczyniając się do uzyskania jednorodnej mieszanki betonowej [25],[135]. W swojej pracy Powers [103] dokonał porównania „bleedingu” betonów napowietrzonych i nienapowietrzonych różniących się stosunkiem w/c . Z badań wynikało, że bardzo niewielka segregacja występuje w betonach nienapowietrzonych przy $w/c = 0,3$, natomiast napowietrzenie pozwala zwiększyć ten wskaźnik nawet do 0,45 zachowując minimalną skłonność do segregacji.

W stwardniałym betonie pory powietrzne pełnią rolę przestrzeni, w których następuje nukleacja kryształów lodu oraz zasysanie cieczy z połączonych z porem powietrznym porów kapilarnych [101]. Aby spełniały one swoją funkcję konieczne jest, aby mały odpowiednią wielkość, równomierne rozproszenie w matrycy oraz żeby ich udział był odpowiedni do zapewnienia właściwej odległości pomiędzy sąsiadującymi pustkami. Obecność równomiernie rozmieszczonych pęcherzyków powietrza o niewielkich średnicach w betonach powoduje zmniejszenie odległości przepływu wody, ograniczając możliwość generowania dużego ciśnienia hydraulicznego. Dzięki takiemu działaniu napowietrzenie zapobiega lokalnej utracie wytrzymałości powodowanej przez wewnętrzne niszczenie betonu podczas cyklicznych zmian temperatury [60].

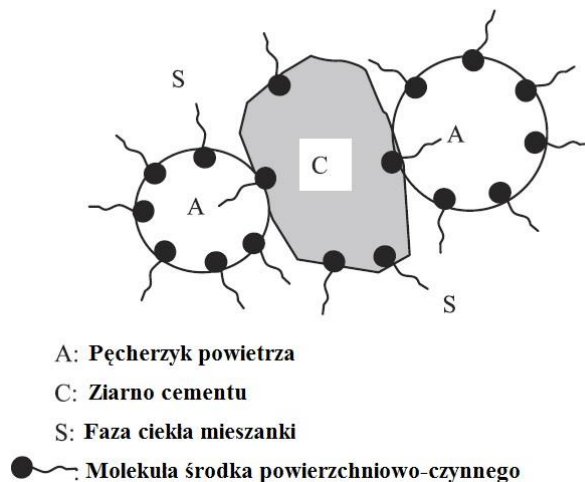
Najczęściej stosowanym sposobem zapewnienia w betonach właściwej dystrybucji porów powietrznych jest stosowanie domieszek chemicznych, które w technologii betonów nazywane są napowietrzającymi. Obecnie stosowane domieszki napowietrzające można podzielić na następujące grupy [106]:

- tłuszcze, oleje i odpady pochodzenia zwierzęcego [65] lub roślinnego oraz kwasy tłuszczowe,
- naturalne żywice, które dają z wapnem sole kwasów żywicznych, rozpuszczalne w wodzie lub, z dodatkiem $NaOH$, mydła kwasu żywicznego (np. abietynian sodu – produkt rozkładu naturalnej żywicy sosnowej),
- sole sodowe lub potasowe kwasów sulfonowych lub alkilosiarkowych (np. alkiloarylosulfoniany i alkilosiarczany),
- etoksyłany fenoli.

Z doświadczeń Atahan i innych [7] wynika, że najbardziej stabilne pęcherzyki powietrza tworzą domieszki żywiczne, jednakże stanowią one mały udział na rynku domieszek chemicznych. Natomiast największy udział wśród domieszek napowietrzających stanowią związki o działaniu powierzchniowo czynnym. Są one związkami organicznymi o złożonej budowie chemicznej i działaniu. Zbudowane są z:

- grup hydrofobowych: niepolarne łańcuchy węglowodorowe,
- grup hydrofilowych: $-COO^-$; $-SO_3^-$; NH_4^+ .

Wprowadzenie tak zbudowanych domieszek napowietrzających do wykonywanego betonu powoduje, że grupy polarne łączą się z powierzchnią fazy stałej na granicy ciało stałe/ciecz, natomiast grupy niepolarne są skierowane w stronę cieczy. Druga część łańcucha skierowana w kierunku fazy ciekłej posiada grupy hydrofilowe odpowiedzialne za obniżanie napięcia powierzchniowego cieczy oraz zmniejszanie ciśnienia w banieczkach powietrza. W wyniku czego ta część łańcucha powoduje powstawanie banieczek o małych średnicach niewykazujących tendencji do łączenia się w większe aglomeraty. Takie działanie sprzyja przyczepianiu się banieczek powietrza do hydrofobowych ziaren cementu i umożliwia równomierne rozmieszczenie ich w mieszance betonu (Rys. 2.8.). W przypadku dobrego napowietrzenia uzyskuje się rozmiar banieczki powietrza od 2 do 500 μm [35].



Rys. 2.8. Schematyczne działanie domieszki napowietrzającej [35]

Podstawowy problem podczas napowietrzania betonu stanowi stabilność powstałych pęcherzyków w mieszance betonowej. Wiadomo, że ilość powietrza w stwardniałym betonie jest niższa od tej uzyskanej zaraz po wymieszaniu od 1% (w przypadku betonów o konsystencjach zwartych) do 1,5% i więcej (w przypadku betonów o wysokiej urabialności i podawanych pompą) [89]. Fagerlund [40] wyróżnił 3 mechanizmy odpowiedzialne za niestabilność mieszanki:

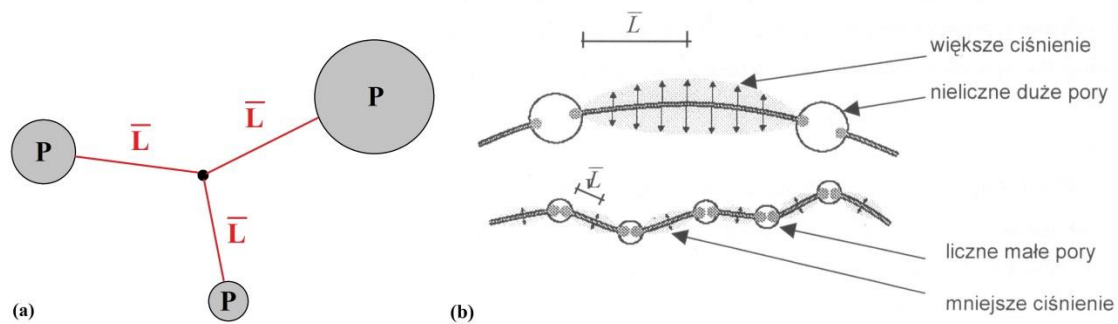
- wypór hydrostatyczny dużych pęcherzy powietrza poza beton (usuwane są pustki powietrzne zbyt duże by wpływać na poprawę odporności na cykliczne zamrażanie i odmrażanie, a powodujące obniżenie wytrzymałości na ściskanie),
- anihilacja drobnych pęcherzy powietrza skutkiem wysokich ciśnień panujących w ich wnętrzu,
- łączenie się małych pęcherzyków w większe ze zwiększeniem całkowitej objętości porów (powoduje zwiększenie rozstawu porów i ogólnej zawartości powietrza).

W przypadku domieszek napowietrzających o charakterze powierzchniowo czynnym w celu zapewnienia stabilnego napowietrzenia konieczne jest ich dozowanie w ilości, która zapewni uzyskanie równowagi termodynamicznej w mieszance na granicy ciecz/gaz (odpowiedzialną za tworzenie pęcherzyków powietrza) i ciecz/ciało stałe (związaną z adsorpcją domieszki na powierzchni ciał stałych, np. cementu, popiołu, itp.). Dodatkowo należy zapewnić odpowiedni nadmiar domieszki w roztworze, aby zapewnić stabilność formujących się pęcherzyków powietrza związaną z efektem Gibbs-Marangoni (szybka

dyfuzja molekuł domieszki w celu obniżenia napięcia powierzchniowego powstających pęcherzy powietrza) [35].

Czynniki wpływające na ilość i jakość wprowadzanego powietrza można podzielić na technologiczne (mieszanie, temperatura, transport, układanie, zagęszczenie) oraz materiałowe (skład mieszanki, rodzaj cementu, dodatki mineralne) [108]. Wpływ cementu związany jest głównie z jego rozdrobnieniem, zawartością alkaliów, siarczanów i C_3A . Rozdrobnienie cementu oraz zwiększenie udziału C_3A w cemencie zwiększa ilość domieszki napowietrzającej niezbędnej do wprowadzenia zbliżonej objętości powietrza, natomiast zwiększenie udziału alkaliów i siarczanów zmniejsza ilość domieszki napowietrzającej [61].

Opisanie przestrzennej dystrybucji porów powietrznych stało się niezbędne do określania jakości napowietrzania betonów oraz pośrednio mrozoodporności. Pierwszy model opisu rozmieszczenia pęcherzyków powietrznych w matrycy cementowej zaproponował w latach 50-tych XX wieku Powers [100],[101],[102] będąc jednocześnie prekursorem stosowania napowietrzania w betonach. Zaproponował on wyidealizowany model równomiernego rozmieszczenia pustek powietrznych o takich samych wymiarach, który był opisany przez wskaźnik dystrybucji przestrzennej porów \bar{L} (ang. *spacing factor*). Wielkość ta określała największą możliwą odległość z dowolnego miejsca w zaczynie cementowym do krawędzi najbliższego poru powietrznego (Rys. 2.9a).

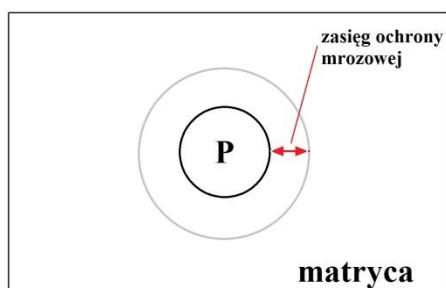


Rys. 2.9. Idea wskaźnika rozmieszczenia porów (P – por powietrzny): (a) interpretacja fizyczna; (b) [24] wpływ wielkości \bar{L} na naprężenia w matrycy cementowej

Ideę wskaźnika rozmieszczenia porów dobrze oddaje schemat przedstawiony na Rysunku 2.9b. Wynika stąd, że w przypadku dwóch betonów o tej samej zawartości powietrza większą odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie będzie miał ten, który posiada pory o mniejszych średnicach znajdujące się bliżej siebie. W latach 80-tych XX wieku swój model opisujący rozmieszczenie porów powietrznych w matrycy zaproponował Philleo [96]. Głównym parametrem opisującym mikrostrukturę stał się wskaźnik Philleo – S , który określał zasięg ochrony mrozowej matrycy cementowej przez pustkę powietrzną (Rys 2.10).

W latach 90. XX wieku kolejną koncepcję charakteryzowania mikrostruktury betonów przedstawił Attiogbe [9]. Bazując na modelu Powersa wyznaczył on wskaźnik F określający, jaka objętość zaczynu cementowego pozostaje w zasięgu chronionym przez pęcherzyki powietrzne, względem całkowitej zawartości zaczynu ($F = 1$ w przypadku, gdy całość zaczynu pozostawała w zasięgu chronionym przez pory powietrzne). Zaproponowany przez Pleau i Pigeona [99] model charakteryzowania rozmieszczenia porów w betonie zakładał określanie liczby porów przypadających na elementarną jednostkę objętości wraz z ich

rozkładem w celu numerycznego wyznaczenia parametru nazwanego „długością przepływu” (ang. *flow length*). Opisywał on drogę, jaką musi pokonać ciecz w matrycy cementowej, aby dotrzeć do brzegu najbliższego poru powietrznego. W swoich badaniach porównawczych wymienionych wyżej modeli Snyder [117] wykazał, że wskaźnik rozmieszczenia porów Powersa uzyskuje zawsze wartości wyższe w porównaniu z rzeczywistością. Natomiast w przypadku pozostałych modeli dokładność wyznaczonych wskaźników zależała od charakterystyki rozkładu średnic porów lub zawartości powietrza. Spośród wymienionych koncepcji w praktyce laboratoryjnej i w zakresie dokumentów normalizacyjnych powszechnie stosuje się charakteryzowanie przestrzennej dystrybucji porów powietrznych używając wskaźnika rozmieszczenia porów zaproponowanego przez Powersa.



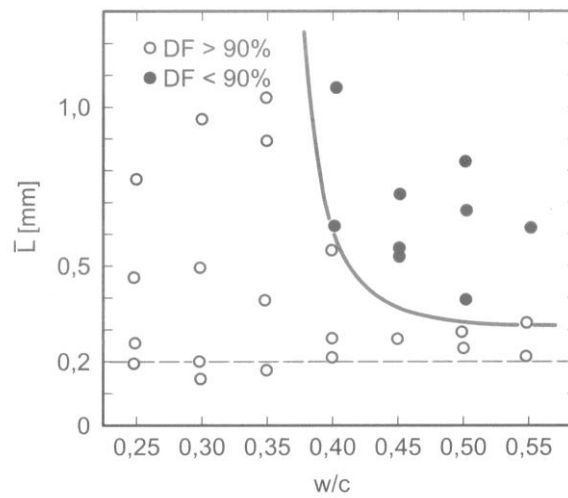
Rys. 2.10. Schemat opisujący ideę wskaźnika Philleo (P – por powietrzny)

Uważa się, że wystarczy jedynie 4-5% powietrza w mieszance betonowej, aby zapewnić właściwe odległości między porami powietrznymi w betonie. Na podstawie badań Powersa [102] wykazano, że odległość od dowolnego miejsca w zaczynie cementowych do najbliższego pora nie powinna być większa niż 300 μm [80],[100]. Jednakże właściwa odległość między porami powietrznymi jest uzależniona od warunków zamrażania i rozmrażania (szybkości chłodzenia) oraz obecności soli odladzających [61]. Zauważono, że w przypadku zamrażania i rozmrażania w wodzie morskiej, aby zapewnić mrozoodporność, niezbędna była dwa razy większa objętość wprowadzonego powietrza [92]. W przypadku stosowania dodatków mineralnych w betonach udział powietrza powinna stanowić większą objętość. Deja w badaniach [31] stwierdził, że stosowanie 5-6% powietrza w mieszance betonu z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego zapewnia właściwą odporność na powierzchniowe łuszczenie.

Wykazano, że istnieje istotny związek pomiędzy stosunkiem w/c , a współczynnikiem rozmieszczenia porów w przypadku betonów wykazujących odporność na działanie mrozu badanych metodą ASTM C666 (Rys. 2.11) [95]. Z badań wynikało, że przy stosunku $w/c < 0,4$ napowietrzanie betonu jest zbędne, natomiast w przypadku stosunku $w/c > 0,45$ konieczne jest uzyskanie $\bar{L} < 0,3$ mm.

Ustalenie granicznych wartości \bar{L} było przedmiotem badań licznych prac badawczych. Jednakże nie uzyskano jednoznacznych wskazań projektowych, gdyż różnice we właściwościach składników miały wpływ na uzyskiwane rezultaty. W swojej pracy Laroche i inni [72] wykazali, że wytrzymałość powyżej 40 MPa oraz wskaźnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) mniejszy od 0,2 mm zapewniają dobrą odporność na wewnętrzne zniszczenia mrozowe betonu, natomiast taka mikrostruktura nie daje gwarancji, że beton będzie odporny na powierzchniowe łuszczenie. Stwierdzono, że wskaźnik rozmieszczenia porów znacznie mniejszy od wartości granicznej zapewnia satysfakcjonującą odporność na powierzchniowe

łuszczenie niezależne od typu użytego cementu [118]. Stąd uzasadnione jest podjęcie w rozprawie tematu wpływu mikrostruktury napowietrzenia na mrozoodporność betonów z dodatkami mineralnymi.

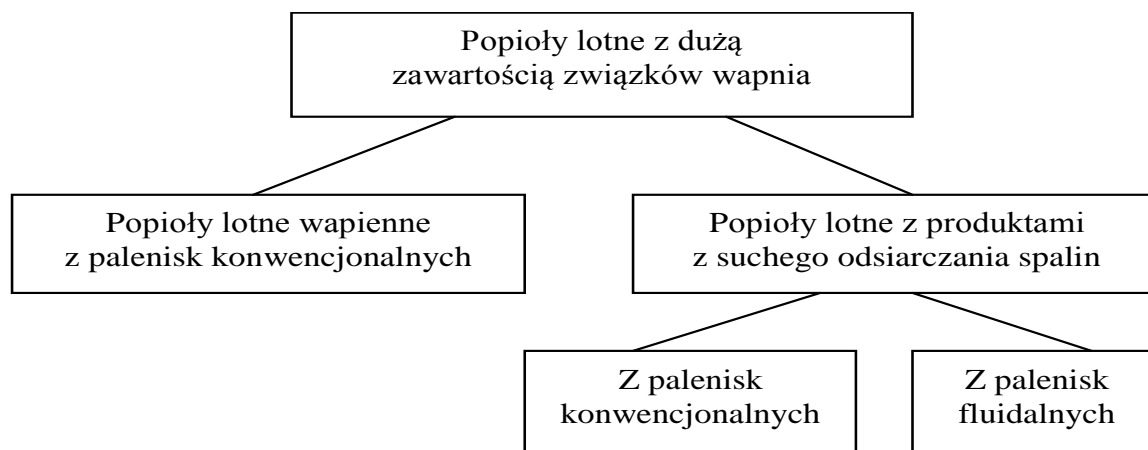


Rys. 2.11. Zależność między mrozoodpornością, wg ASTM C666 A, a współczynnikiem \bar{L} i stosunkiem w/c [95]

3. Efekty stosowania popiołów lotnych wapiennych w betonach

3.1. Charakterystyka popiołów lotnych wapiennych

W technologii cementu i betonów oprócz już stosowanych i znormalizowanych dodatków mineralnych podejmuje się próby użycia niezagospodarowanych odpadów przemysłowych. Kolejną grupę potencjalnych dodatków mineralnych stanowią uboczne produkty z przemysłu energetycznego określane jako popioły lotne o dużej zawartości wapnia. Ze względu na technologię ich powstawania można je podzielić zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Podział popiołów lotnych o dużej zawartości wapnia [51]

Przedmiotem zainteresowania rozprawy są popioły lotne o dużej zawartości wapnia (powyżej 10%) otrzymywane w wyniku spalania węgla brunatnego i będą w skrócie nazywane popiołami lotnymi wapiennymi (*PLW*).

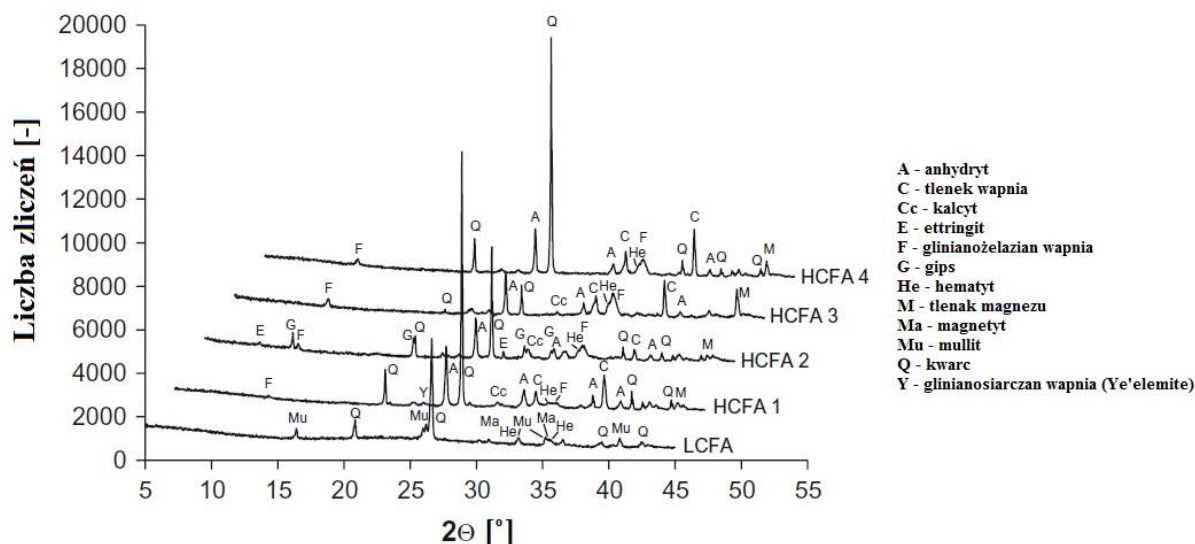
Popioły lotne wapienne charakteryzują się bardziej złożonym składem niż popioły lotne krzemionkowe. Różnice dotyczą, tak składników krystalicznych, jak i fazy szklistej. Faza szklista *PLW* jest bogata w krzemionkę i glin, oraz może występować szkło z układu *C-F-S* ($\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$). Natomiast szkła o dużej zawartości wapnia są zbliżone w budowie do melilitów i posiadają dobre właściwości hydrauliczne [78]. Dlatego niektórzy autorzy sugerują, że *PLW* posiadają właściwości pucolanowo-hydrauliczne [51]. Oprócz składników wymienionych wyżej, w składzie *PLW* pojawiają się ziarna niespalonego węgla, stanowiące część grubszej frakcji [49].

Głównymi składnikami krystalicznej *PLW* są: anortyt, ghelenit, anhydryt, glinian trójwapniowy, kwarc, siarczanogliniany wapniowe, niezwiązany tlenek wapnia (CaO_w) [51]. Duża zawartość związków wapnia wpływa także na skład fazy krystalicznej, w której mogą się pojawić związki charakterystyczne w przypadku cementu glinowego i portlandzkiego [49]. Przykładowy skład niemieckich *PLW* w odniesieniu do popiołu krzemionkowego został przedstawiony na Rys. 3.2 i Tablicy 3.1 [133]. Widać wyraźnie większy udział krystalicznych składników *PLW* w porównaniu do popiołu z węgla kamiennego.

Zawartość CaO w *PLW* może się wahać w bardzo dużym przedziale, podobnie jak zawartość SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SO_3 . Widoczne jest to na zestawieniu składu chemicznego popiołów pochodzących z węgla brunatnego z krajów europejskich (Tablica 3.2).

Tablica 3.1. Skład chemiczny *PLW* [133]

Material	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	<i>SO₃</i>	<i>TiO₂</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>CaO_w</i>	<i>SP</i>
LCFA	1,9	3,1	56	25	8,7	3,30	0,20	0,45	1,00	0,29	0,05	2,19
HCFA 1	29	4,1	44	7,3	3,8	0,70	1,1	10	0,46	0,02	8,9	2,24
HCFA 2	34	5,3	24	3,4	16	0,83	0,76	14	0,30	<0,01	4,0	15,80
HCFA 3	36	14	10	5,6	16	1,10	3,1	12	0,50	0,03	6,7	6,10
HCFA 4	27	6,7	44	3,7	9,3	0,51	0,84	6	0,39	<0,01	7,3	1,47



Rys. 3.2. Dyfraktogram rentgenowski *PLW* o składzie podanym w Tablicy 3.1 [133]

Tablica 3.2. Zakres składu chemicznego popiołów lotnych z węgla brunatnych w wybranych krajach europejskich [16]

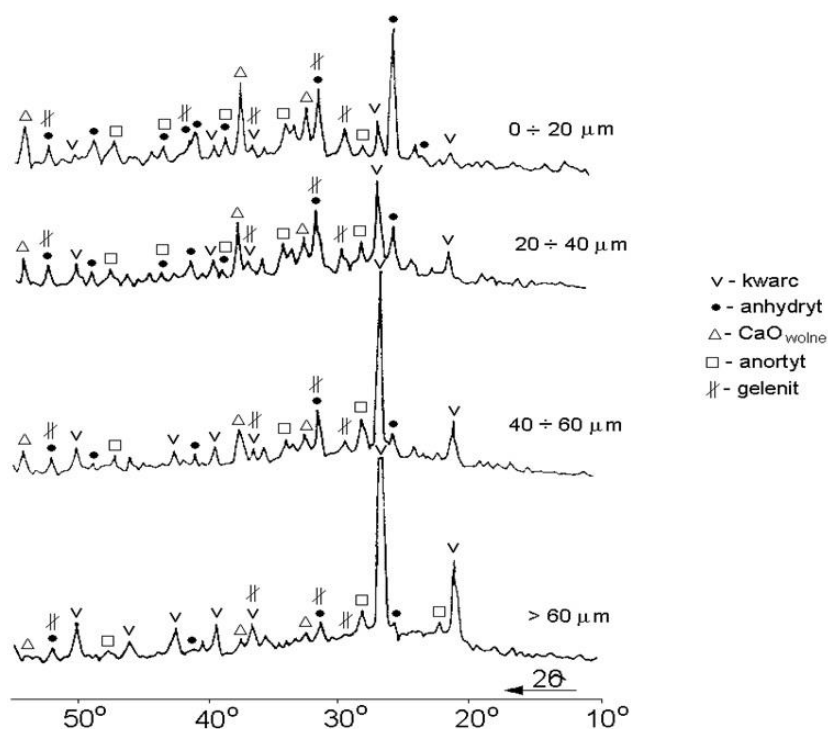
Składnik	Polska	Grecja	Niemcy
	% masy popiołu		
<i>SiO₂</i>	20-88	21-35	20-80
<i>Al₂O₃</i>	0,6-9	10-14	1-19
<i>Fe₂O₃</i>	1,5-7	4,5-6,5	1-22
<i>CaO</i>	3-49	30-45	2-52
<i>CaO_w</i>	0,1-15	≈10	0,1-25
<i>MgO</i>	0,5-7	1,5-3	0,5-11
<i>K₂O</i>	0,1-1	0,4-0,9	0-2
<i>Na₂O</i>	0,1-1	0,5-1	0,01-2
<i>SO₃</i>	0,4-12,5	4-8	1-15
<i>SP</i>	1,6-2,2	3-7	0,5-5

Udział *CaO* w *PLW* wpływa na jakościowe zmiany w składzie mineralnym ziaren popiołu. Wpływ został określony w pracy [37], gdzie przy założeniach autora ustalono możliwy skład fazowy *PLW* w przypadku zmiennej zawartości *CaO*. Z teoretycznych

rozważań wynikało, że zawartość CaO przekraczająca 25% stwarza warunki do obecności w popiele głównie anortytu lub szkła anortytowego. Jeżeli zawartość CaO jest jeszcze większa (około 40%), to w fazie szklistej może pojawić się szkło ghelenitowe nadając PLW właściwości hydrauliczne. Dodatkowo różnice w składzie występują także we wyszczególnionych frakcjach ziarnowych (Tablica 3.3) [51]. Ziarna drobne ($<40 \mu m$) zawierają większy udział związków wapnia (anhydryt, niezwiązane wapno, anortyt), natomiast w ziarnach grubszych ($>40 \mu m$) dominującym składnikiem chemicznym jest SiO_2 w postaci krystalicznego kwarcu (Rys. 3.3) [51].

Tablica 3.3. Skład chemiczny frakcji ziarnowych popiołu lotnego wapniowego [51]

Średnica ziaren [μm]	Zawartość [% masy]									
	SP	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	CaO_w	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O
Próbka pierwotna	3,9	44,4	16,4	6,6	22,1	2,4	4,6	1,0	0,1	0,5
0÷20	3,7	19,2	11,5	6,6	43,0	7,2	12,8	0,8	0,2	0,6
20÷40	4,2	35,2	16,1	7,4	31,2	5,6	4,9	1,4	0,1	0,4
40÷60	2,6	45,4	17,7	7,6	22,6	3,4	2,3	1,5	0,1	0,4
> 60	3,3	59,2	19,7	5,3	9,6	0,8	1,0	0,4	0,1	0,4



Rys. 3.3. Dyfraktogramy wyszczególnionych frakcji ziarnowych PLW [51]

Cechą charakterystyczną PLW jest duża zmienność właściwości w czasie utrudniająca wykorzystanie go w składzie cementów i betonów. Znaczny udział SO_3 , spieczonego peryklazu i niezwiązanego tlenku wapnia może powodować niekorzystną ekspansję matrycy w stwardniałym betonie [51].

Charakterystyka popiołów lotnych w kontekście wykorzystania w technologii cementu i betonów jest przedmiotem wielu dokumentów normalizacyjnych, między innymi spoiw hydraulicznych stosowanych w drogownictwie. Norma [N20] umożliwia użycie *PLW*, jako składnika głównego w cementach portlandzkich (6-36% dodatku) i pucolanowych (11-55% dodatku). Popioły lotne wapienne w normie [N20] definiuje się zawartością *CaO*, która nie powinna być mniejsza niż 10% masy. Popiół lotny wapienny zawierający między 10% a 15% masy reaktywnego *CaO* powinien zawierać nie mniej, niż 25% masy reaktywnego *SiO₂*. Popiół lotny wapienny zawierający powyżej 15% masy reaktywnego *CaO*, odpowiednio zmielony, powinien osiągać wytrzymałość na ściskanie co najmniej 10 MPa po 28 dniach dojrzewania.

Stosowanie *PLW* jako dodatku mineralnego w betonach w świetle europejskich norm nie jest możliwe, gdyż nie spełniają one wszystkich wymagań zawartych w normie dedykowanej tego typu dodatkom (Tablica 3.4) [N21].

Tablica 3.4. Klasyfikacja popiołów lotnych według norm amerykańskich ASTM, kanadyjskich CAN/CSA, oraz europejskich PN-EN jako składnika aktywnego w betonach

Właściwość	ASTM C618		CAN/CSA –A23.5-98			PN-EN 450-1 ^{*)}		
	Klasa F	Klasa C	Klasa F	Klasa CI	Klasa CII	Klasa A	Klasa B	Klasa C
Zawartość reaktywnego <i>CaO</i> [%]	≤10	>10	<8	8-20	>20	≤10		
Strata prażenia [%]	≤6		≤8	≤6		≤5	2-7	4-9
Miałkość - pozostałość na sicie 45 μm [%]	≤34		≤34			N ≤ 40 S ≤ 12		
Zawartość <i>SO₃</i> [%]	≤5		≤5			≤3		
Zawartość sumy tlenków, [%] (<i>SiO₂</i> , <i>Al₂O₃</i> , <i>Fe₂O₃</i>)	≥70	≥50	-			≥70		
Całkowita zawartość alkaliów jako <i>Na₂O_{eq}</i>	≤4,5		-			-		
Alkalia rozpuszczalne w wodzie (czynne) jako <i>Na₂O</i>	≤0,5		-			-		
Indeks aktywności pucolanowej [%]	Po 28 dniach ≥75		Po 28 dniach ≥75			Po 28 dniach ≥75; Po 90 dniach ≥85		
Staość objętości w autoklawie [%]	≤0,8		≤0,8			-		

^{*)} popiół lotny otrzymany wyłącznie przez spalanie węgla kamiennego

Głównym oponentem tak sformułowanych zaleceń stają się kraje, gdzie elektrownie wykorzystują przeważnie węgiel brunatny do produkcji energii. Przykładem takiego kraju jest Grecja, która wykorzystuje największe ilości tego surowca ze wszystkich krajów europejskich. Na potrzeby własnego kraju stworzyli oni projekt normy, który zakłada wykorzystanie *PLW*. Norma grecka zakłada dwie kategorie betonów, w których stosuje się odmienne kryteria oceniające popiół lotny (Tablica 3.5):

- EIT 1: betony o niskiej wytrzymałości;

- EIT 2: betony klasyfikowane zgodnie z normą PN-EN 206 [N25] jako betony zwykle i wysokiej wytrzymałości.

W normach amerykańskich i kanadyjskich *PLW* są uwzględniane jako dodatki do betonów pod warunkiem spełnienia wymogów przedstawionych w Tablicy 3.4. Norma ASTM C618 [N2] określa je mianem popiołów lotnych klasy C, natomiast w normie kanadyjskiej są one dodatkowo podzielone na dwie podgrupy, uzależnione od zawartości tlenu wapnia w składzie chemicznym.

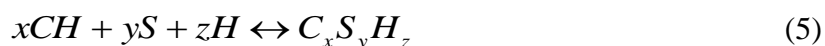
Tablica 3.5. Wymagania stawiane popiołom lotnym wapiennym w Grecji [16]

Kategoria	Zawartość SO_3 [%]	Zawartość CaO_w [%]
EIT 1	$\leq 7,0$	Brak wymagania
EIT 2	$\leq 5,0$	$\leq 3,0$

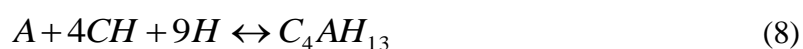
3.2. Mikrostruktura betonu i transport cieczy

Obecność w składzie *PLW* znacznego udziału CaO powoduje, że oprócz charakterystycznej w przypadku popiołów lotnych reakcji pucolanowej może wystąpić także reakcja hydraulicznego wiązania [52]. Przyczyna takiego zachowania wynika z tworzenia wodorotlenku wapnia wskutek reakcji gaszenia wolnego tlenu wapnia, bądź hydratacji C_2S lub szkła aktywnego w kontakcie z wodą [89].

Hydratacja cementu portlandzkiego razem z *PLW* jest reakcją bardziej skomplikowaną niż układu z popiołem lotnym krzemionkowym, gdyż oprócz reakcji pucolanowej występują reakcje z wodą C_2S lub szkła anortytowego [89]. Na proces hydratacji cementu z *PLW* wpływa głównie reakcja pucolanowa krzemionki występującej w szklach glinokrzemianowych i glinokrzemianowo wapniowych z wodorotlenkiem wapnia, w wyniku której powstaje faza *C-S-H* (reakcja 5).



Na przebieg hydratacji w początkowym okresie twardnienia duży wpływ mają reakcje zachodzące między reaktywnym glinianami pochodzącym z fazy szklistej, bądź C_3A , a siarczanami pochodzącymi z anhydrytu lub siarczanoglinianu wapnia. W wyniku tych reakcji tworzą się uwodnione formy siarczanoglinianów wapniowych, ostatecznie przekształcając się w postać trwałych monosiarczanów i uwodnionych glinianów wapniowych w postaci C_4AH_{13} [45],[89].



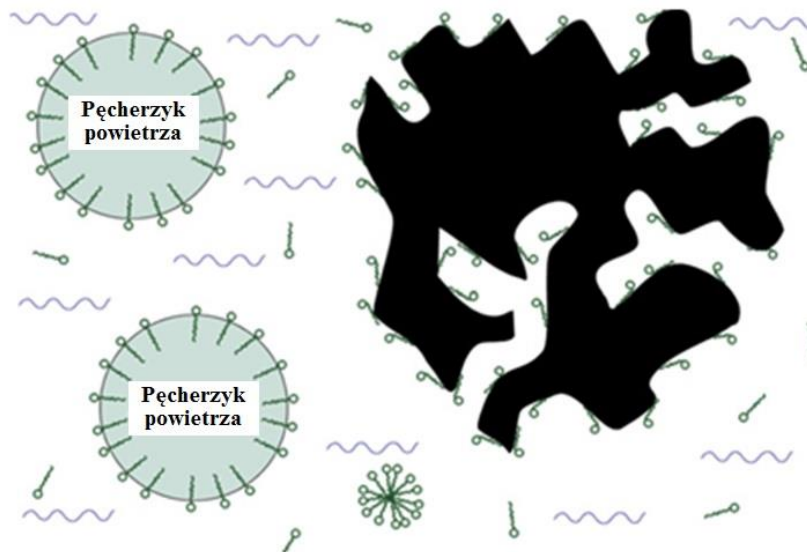
Produkty reakcji (8) tworzą się szybciej niż faza *C-S-H*, wpływając na poprawę wczesnych wytrzymałości betonów z *PLW* względem popiołów lotnych krzemionkowych. Powstające podczas wiązania i twardnienia uwodnione gliny wapnia oraz monosiarczan

wraz z fazą *C-S-H* tworzą matrycę cementową o bardziej zwartej budowie, niż betony bez dodatków [89]. Dzieje się tak, ponieważ w matrycy cementowej zmniejsza się udział portlandytu (czasami nawet zanika) oraz zwiększa się udział fazy *C-S-H* o bardziej zwartej budowie niż w typowej reakcji hydratacji cementu portlandzkiego [51],[71].

Antiohos i Tsimas [2] stwierdzili, że większa zawartość aktywnej krzemionki w *PLW* stosowanym w betonach wpływa na aktywność dodatku w późniejszych okresach twardnienia (po 28 dniach). Skutkiem wzrostu aktywności jest zmniejszenie udziału kryształów portlandytu w matrycy cementowej oraz zwiększenie szybkości narastania wytrzymałości.

W przypadku stosowania *PLW* w betonach niezbędna jest wydłużona pielęgnacja wilgotnościowa, aby uzyskać jak największy postęp reakcji pucolanowej oraz ograniczyć powstawanie uszkodzeń w wyniku skurczu hydratacyjnego [89]. Wynika to z większej objętości wody związanej w wyniku hydratacji betonu z *PLW*, niż betonów bez dodatków mineralnych [89].

W przypadku napowietrzania mieszanek betonów z dodatkiem popiołów może nastąpić interakcja między nim, a domieszką napowietrzającą [69],[70], [93],[94]. Główną przyczyną oddziaływania domieszki z popiołem są pozostałości niespalonego węgla, które adsorbują na swojej powierzchni hydrofobową część domieszki (Rys. 3.4).



Rys. 3.4. Miejsca adsorpcji domieszki napowietrzającej oddziaływującej z niespalonym węglem z popiołu [58]

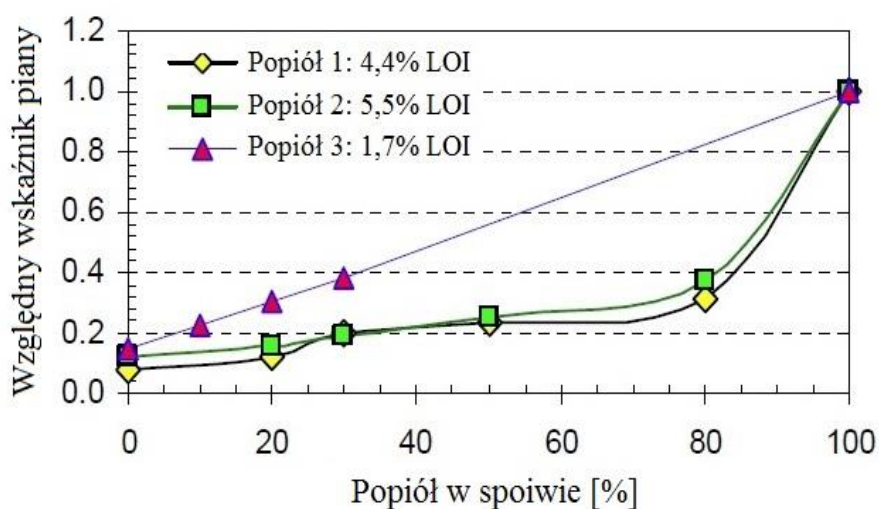
O ilości zaadsorbowanej domieszki decyduje kilka właściwości występującego w popiele węgla. Najważniejsze z nich to [70]:

- zawartość węgla w popiele,
- rozwinięcie powierzchni ziaren,
- chemiczna natura powierzchni ziaren.

Zwiększenie zawartości węgla i jego rozwinięcia powierzchni zwiększa adsorpcje domieszki napowietrzającej [93]. Rozwinięcie powierzchni ziarna węgla może osiągać wartości rzędu kilkuset m^2/g . W badaniach Kulaotsa i innych [69] powierzchnia ta wynosiła od 45 do 400 m^2/g mierzona metodą *BET*.

Na efektywność środka napowietrzającego wpływ mają także jonów Ca^{2+} i Mg^{2+} występujące w układzie cement-*PLW*-woda. Baltrus i inni [11] zajmowali się badaniem wpływu jonów alkalicznych na działanie domieszki napowietrzającej. Stwierdzili, że ich obecność powoduje wytrącanie się nierozpuszczalnych związków ze środkiem powierzchniowo czynnym z domieszki napowietrzającej. Natomiast dzięki występowaniu w mieszance związków siarki i alkaliów (Na_2O , K_2O) powoduje zmniejszenie zawartości stosowanej domieszki w celu uzyskania tego samego napowietrzenia [46].

Najprostszą metodą, za pomocą której można określić jak domieszka napowietrzająca wprowadzająca pęcherzyki powietrza zachowuje się podczas stosowania jej ze spoiwem jest test wskaźnika piany (ang. *foam index*). Jest to prosta metoda doświadczalna stworzona przez Donsona [34] pozwalająca przy niewielkich ilościach poszczególnych składników określić jak będzie się zmieniać ilość domieszki napowietrzającej wraz ze zmianą ilości zastępowanego przez popiół cementu. Na Rysunku 3.5 widoczna jest zależność wskaźnika piany od ilości zastąpionego cementu przez popiół lotny o różnych stratach prażenia. Względny wskaźnik piany przedstawia stosunek ilości domieszki napowietrzającej potrzebnej do wytworzenia stabilnej piany w przypadku 100% popiołu do zawartości domieszki w przypadku odpowiednio mniejszej jego ilości. Uzyskane wyniki uwiadcniają odmienne zachowanie się domieszki między popiołem 3, a popiołem 1 i 2. Świadczy to o różnych skutkach oddziaływań między tymi popiołami, a domieszką napowietrzającą. Zjawisko związane jest głównie z udziałem niespalonego węgla w składzie popiołu.



Rys. 3.5. Zmiana wartości względnego wskaźnika piany w zależności od składu spoiwa (LOI – strata prażenia) [120]

Zhang i inni [146] przedstawili metodę pomiaru wskaźnika piany polegającą na określeniu zmian widma adsorpcyjnego roztworu popiołu i barwnika. Adsorpcja barwnika przez popiół powoduje zmniejszenie intensywności pików w przypadku określonej długości fali, dzięki czemu można określić, jaka zawartość domieszki zostanie zaadsorbowana przez badany popiół podczas napowietrzania.

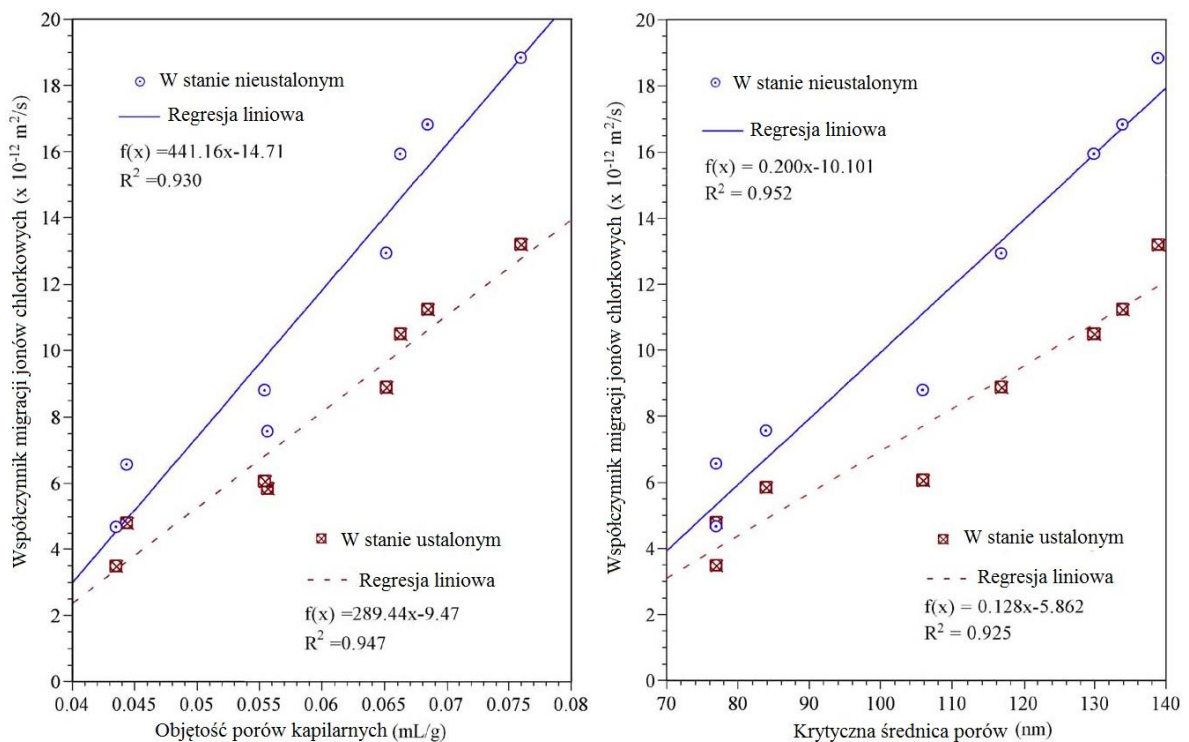
Uzyskanie tych samych skutków napowietrzenia w układzie cement-*PLW* wymaga użycia mniejszej ilości domieszki napowietrzającej niż w przypadku popiołu lotnego krzemionkowego [46]. W tożsamym przypadku porównywanego układu cement-*PLW*

względem układu bez popiołu wpływ zawartości popiołu został zauważony dopiero po przekroczeniu 25% dodatku i był coraz większy ze zwiększaniem zawartości *PLW* [46].

Wpływ powstającej mikrostruktury na właściwości matrycy cementowej w betonach jest obiektem zainteresowań wielu autorów [28],[32],[62]. Stwierdzono, że pory powietrzne pochodzące od napowietrzenia są traktowane w procesie transportu mediów ciekłych w betonach jako inertne inkluzje podobne do ziaren kruszywa nie wpływając w istotny sposób na mechanizm oraz szybkość przepływów mediów ciekłych i gazowych [134]. W analizowanej literaturze brak jest prac charakteryzujących mikrostrukturę porów kapilarnych w napowietrzonych betonach z *PLW*. Wynika to z faktu, że zazwyczaj w badaniach porowatości metodą *MIP* autorzy starają się nie wprowadzać dodatkowych nieciągłości matrycy cementowej w postaci pustek pochodzących od napowietrzenia [134].

Z badań *MIP* betonów (nienapowietrzonych) zawierających *PLW* w ilości 20-40% wynika, że zastosowanie dodatku popiołowego zwiększa całkowitą objętość porów kapilarnych do 28 dnia dojrzewania. Natomiast po dłuższych okresach dojrzewania objętość porów kapilarnych osiąga wartości zbliżone, bądź mniejsze od betonu referencyjnego [5],[143].

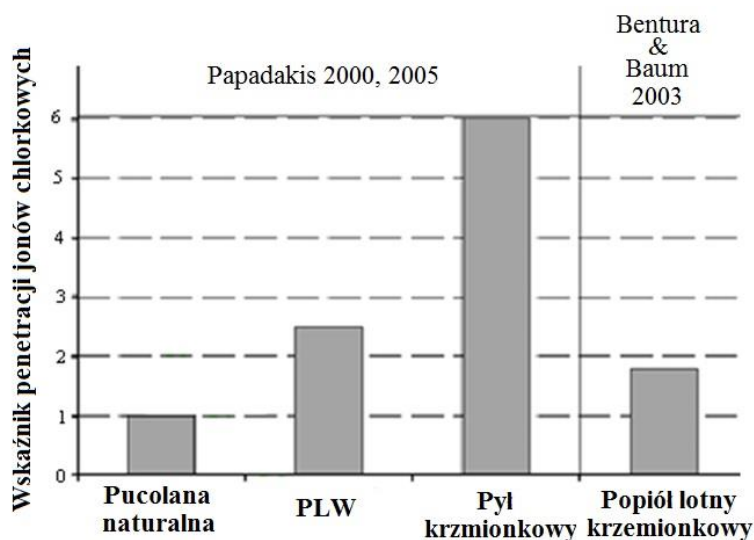
Zależność pomiędzy mikrostrukturą porów, a transportem jonów chlorkowych w betonach wyznaczył w swojej pracy Yang [141]. Stwierdził, że objętość porów kapilarnych i krytyczna średnica porów wyznaczone za pomocą *MIP* jest w sposób liniowy skorelowana ze współczynnikiem migracji jonów chlorowych uzyskanym w stanie ustalonym i nieustalonym (Rys. 3.6). Głównym wnioskiem płynącym z powyżej pracy jest stwierdzenie, że wraz ze zmniejszeniem objętości porów kapilarnych, bądź krytycznej średnicy porów, następuje ograniczenie szybkości penetracji jonów chlorkowych do wnętrza matrycy cementowej.



Rys. 3.6. Zależność współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie ustalonym oraz współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym od objętości porów kapilarnych (po lewej) oraz krytycznej średnicy porów (po prawej) od [141]

Z prac [5],[47] wynika, że dodatek *PLW* do matrycy cementowej (w ilości do 43%) wpływa pozytywnie na zwiększenie szczelności betonu w środowisku oddziaływania jonów chlorkowych, zwłaszcza w dłuższych okresach dojrzewania próbek (90 dni). Te obserwacje potwierdzają badania przedstawione w pracy [140], które określają głębokość wniknięcia jonów chlorkowych w wyniku podciągania kapilarnego 10% roztworu *NaCl* w betonach z *PLW* wykonanych w technologii mieszanek samozagęszczalnych. Z obserwacji wynika, że zastąpienie cementu 30-50% dodatkiem popiołowym wywołuje zmniejszenie głębokości penetracji jonów chlorkowych o około 30%. Takie zachowanie betonów z *PLW* tłumaczy się zagęszczeniem mikrostruktury wynikającym ze zmniejszenia udziału portlandytu w matrycy cementowej z jednoczesnym wzrostem zawartości żelowej fazy *C-S-H*, która zmniejsza całkowitą objętość porów kapilarnych w kompozycie oraz zmniejsza przekrój poprzeczny porów kapilarnych [61],[84].

W badaniach [86],[87] porównano wpływ dodatku *PLW* z betonami bez dodatków oraz zawierającymi popiół lotny krzemionkowy. Wykazano bardzo dobrą odporność na wnikanie jonów chlorkowych na podstawie badania według ASTM C-1202 betonów z *PLW* [N3] w porównaniu do pozostałych betonów. W swoich przeglądowych badaniach Bentour [15] określił wskaźnik penetracji w odniesieniu do penetracji jonów chlorkowych przez beton (Rys. 3.7). Według koncepcji Bentoura dodatki o największym wskaźniku penetracji jonów chlorkowych zapewniają największą szczelność betonów.

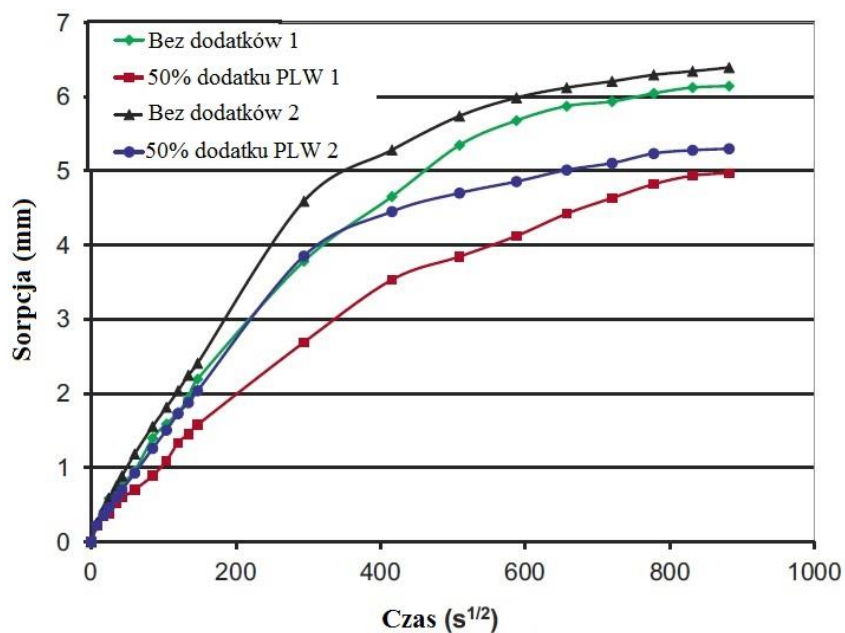


Rys. 3.7. Wskaźnik penetracji *PLW*, popiołu lotnego krzemionkowego i pyłu krzemionkowego w odniesieniu do penetracji jonów chlorkowych przez beton (zastąpienie cementu popiołem 20-30%) [15]

Największą szczelność uzyskał beton z pyłem krzemionkowym, natomiast kolejnym dodatkiem był *PLW*, który odznaczył się większą skutecznością niż popiół o niskiej zawartości wapnia i pucolana naturalna. Aponte i inni [5] wyznaczyli w swoich badaniach współczynniki efektywności k_d betonów z dodatkami *PLW* i popiołu lotnego krzemionkowego względem betonów referencyjnych. Wyniki świadczą o większej odporności na penetrację jonów chlorkowych w betonach z *PLW* (do 43% zastąpienia cementu) po 28 i 90 dniach dojrzewania względem betonu referencyjnego. Widoczna jest także wyraźnie wyższa wartość współczynnika k_d w przypadku współczynników migracji jonów chlorkowych betonów z dodatkiem *PLW* względem adekwatnych kompozycji

z popiołem lotnym krzemionkowym badanych po 28 dniach, zwłaszcza w przypadku wyższych wartości wskaźnika w/c . Analizując dostępną literaturę nie odnotowano badań, które w swoim zakresie uwzględniały wyznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych napowietrzonych betonów z dodatkami mineralnymi, a tym bardziej z *PLW*.

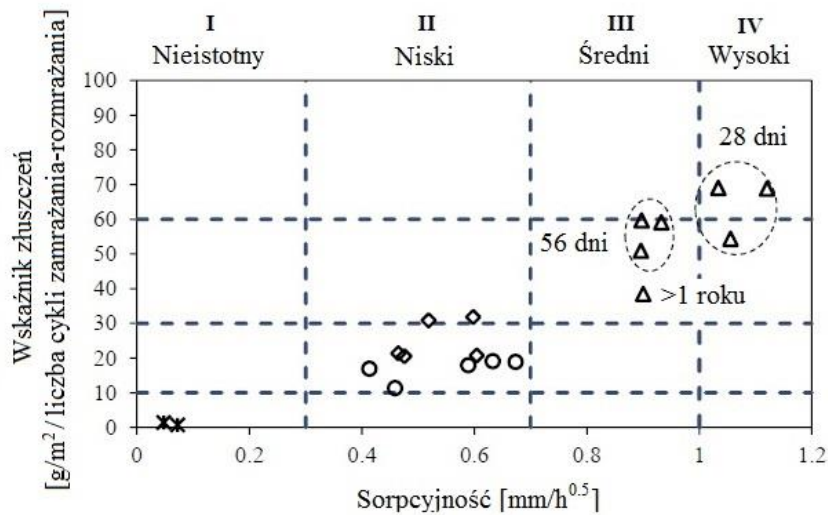
Wpływ dodatków mineralnych na szybkość podciągania kapilarnego betonu został prezentowany przez Nassara i inni [88]. Stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem udziału *PLW* w spoiwie następuje zmniejszenie szybkości wnikania wody do wnętrza betonu, badanego za pomocą pomiaru podciągania kapilarnego. Jednakże zauważono, że zwiększenie zawartości popiołu powodują zmianę charakterystyki nasączania próbki (Rys. 3.8). Ograniczenie szybkości podciągania kapilarnego wody głównie w pierwszym etapie badania spowodowane było zmniejszeniem przekrojów kapilar najdrobniejszych porów matrycy cementowej w wyniku zagęszczenia matrycy cementowej z dodatkiem *PLW*.



Rys. 3.8. Wyniki pomiaru sorpcji odwiertów pobranych z betonów z eksperymentalnych nawierzchni [88]

Liu i Hansen [77] przedstawili zależność łączącą szybkość absorpcji wody z odpornością na powierzchniowe łuszczenie betonów napowietrzonych. Autorzy wykazali, że zmniejszenie objętości zaabsorbowanej wody w betonach z dodatkami mineralnymi w badaniu podciągania kapilarnego ma bezpośredni wpływ na zwiększenie odporności na powierzchniowe łuszczenie (Rys. 3.9).

Bardzo istotny wpływ na szybkość nasączania nienapowietrzonych betonów z *PLW* ma pielęgnacja oraz występowanie zjawiska karbonatyzacji [10]. Pielęgnacja betonów z *PLW* w warunkach powietrzno-suchych zwiększa szybkość absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego. Natomiast występowanie karbonatyzacji nieznacznie zmniejsza szybkość podciągania kapilarnego wody przez beton. Efekt zmiany szybkości podciągania kapilarnego widoczny był zwłaszcza w próbkach dojrzewających w powietrzu przez okres powyżej 3 miesięcy. Wywołany jest zmniejszeniem średnic kapilar przez produkty korozji węglanowej.

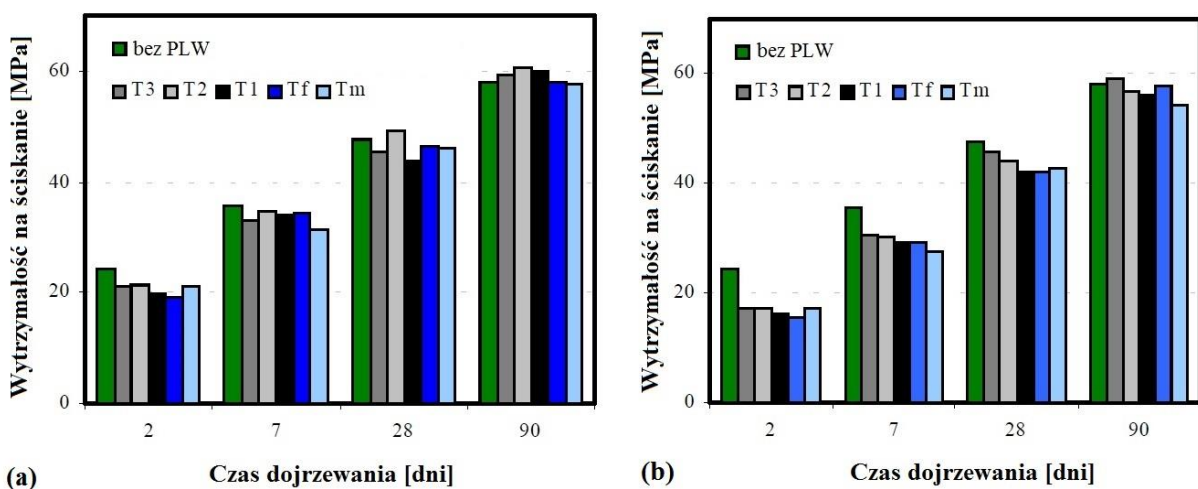


Rys. 3.9. Zależność powierzchniowego łuszczenia od sorpcyjności napowietrzonych betonów [77]

3.3. Właściwości mechaniczne

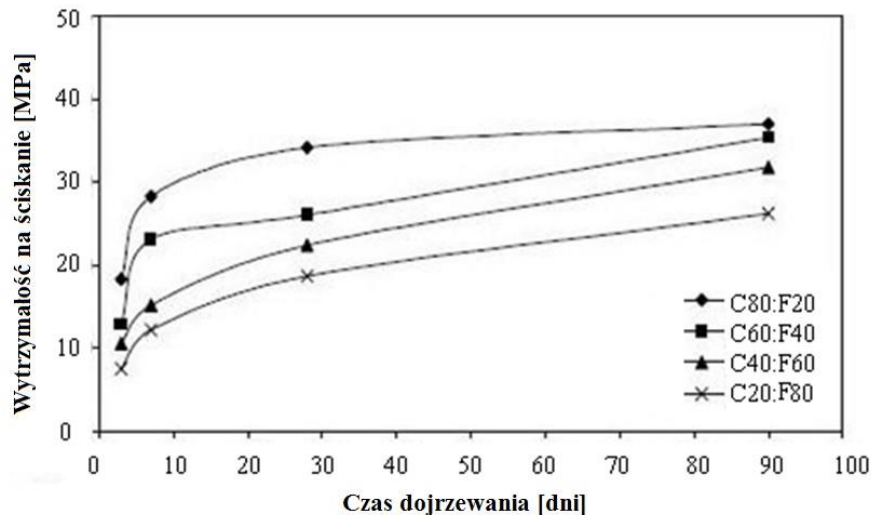
Zagadnienie wytrzymałości mechanicznej betonów modyfikowanych *PLW* zostało przedstawione w licznych pracach [8],[51],[114],[126],[140]. Rodzaj wpływu, jaki wynika z użycia *PLW* jest uzależniony przede wszystkim od właściwościami popiołu. Podstawowymi czynnikami determinującymi właściwości *PLW* jest skład chemiczny i mineralny, udział fazy szklistej, uziarnienie popiołu oraz rozwinięcie powierzchni ziaren. Dobór składników betonów uzależnia właściwości powstałego betonu od udziału *PLW* w jego składzie, rodzaju użytego cementu, obecności innych dodatków mineralnych oraz od warunków dojrzewania (temperatura i pielęgnacja).

Dodatek *PLW* w betonie przeważnie powoduje obniżenie wczesnych wytrzymałości na ściskanie (<7 dni). Natomiast wytrzymałość na ściskanie uzyskiwana po dłuższych okresach dojrzewania (>90 dni) może być nawet większa niż betonu bez popiołu (Rys. 3.10) [3],[8],[51],[114],[126],[140].



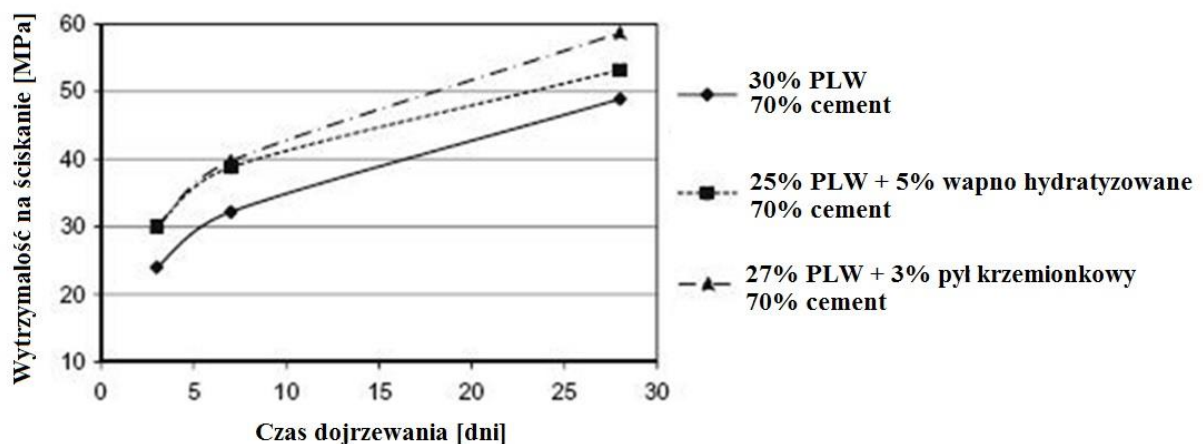
Rys. 3.10. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych (a) z 20% dodatkiem *PLW*; (b) z 30% dodatkiem *PLW* [3]

Zmniejszenie wczesnych wytrzymałości na ściskanie nasila się wraz ze zwiększeniem zawartości popiołu w betonie (Rys. 3.11) [17]. W przypadku popiołów z różnych elektrowni, w których występują znaczne zmiany składu chemicznego i właściwości fizycznych, uzyskiwane wytrzymałości na ściskanie przy tej samej ilości dodatku były zróżnicowane [126]. Wpływ zmienności składu chemicznego został dostrzeżony w pracy [4], gdzie zauważono, że większa zawartość CaO w *PLW* powoduje uzyskiwanie wytrzymałości na ściskanie o kilka procent wyższych niż w popiołach o niższych zawartościach. Wspomniany wpływ został potwierdzony w pracy [126] z zaznaczeniem, że jest on widoczny w okresie do 28 dni dojrzewania.



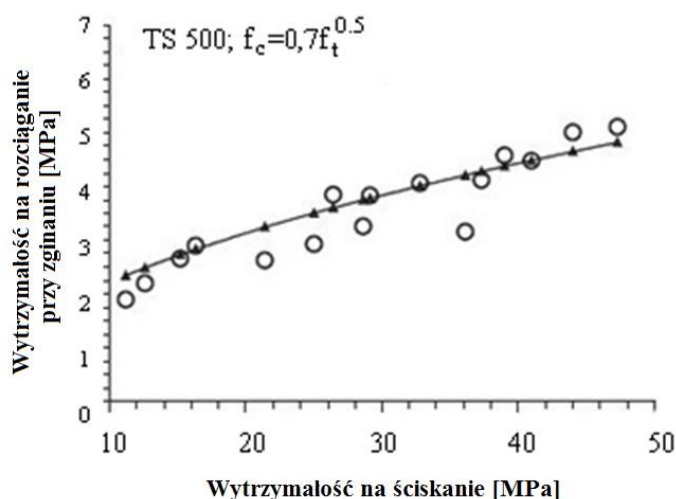
Rys. 3.11. Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem różnych zawartości *PLW* (C-cement; F – popiół lotny wapienny; 20%, 40%, 60%, 80% - udział spoiwie) [17]

Stosowanie *PLW* z innymi dodatkami mineralnymi powoduje zjawisko synergii właściwości. W pracy [13] przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie betonów z jednoczesnym udziałem dodatków *PLW* z wapnem hydratyzowanym oraz popiołu z mikrokrzemionką (Rys. 3.12). Widoczne jest zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonu wynikające z obecności drugiego dodatku.



Rys. 3.12. Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem *PLW*, *PLW* z hydratyzowanym wapnem i *PLW* z pyłem krzemionkowym [13]

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu jest tożsama z tendencjami występującymi podczas prób ściskania [8],[140]. Na podstawie badań [8] została wyznaczona zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a zginanie betonów z dodatkiem *PLW* ukazująca relację przedstawioną na Rysunku 3.13. Na podstawie badań [140] stwierdzono, że moduł sprężystości betonów zmniejsza się wraz ze zwiększeniem udziału dodatku *PLW* powyżej 30%, podczas gdy zmniejszenie modułu sprężystości betonów z dodatkiem 10% mikrokrzemionki i *PLW* zaczyna być znaczące dopiero w przypadku jego udziału powyżej 50%.



Rys. 3.13. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a wytrzymałością na zginanie betonów z zapraw *PLW* [8]

3.4. Odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie

Wśród analizowanej literatury niewiele prac dotyczyło wykorzystania *PLW* w napowietrzonych betonach. Znane są różne sprzeczne wyniki badań wielu autorów przedstawione w pracy [36], gdzie stosowano popioły lotne. Wynika to ze zbyt wielu zmiennych czynników wpływających na odporność w warunkach cyklicznego zamrażania i rozmrażania [108]. Do najważniejszych czynników należą:

1) Jednorodność betonów

Problemy wynikające ze stosowania dodatków mineralnych mają swoje podłoże w początkowym okresie hydratacji, gdzie występuje znacznie mniejsze zapotrzebowanie na wodę niż wynika to z całkowitej ilości obecnego spoiwa. Zmniejszenie ilości cementu przez zastąpienie dodatkiem mineralnym powoduje, że realny stosunek w/c (nie mylić z $w/(c+s)$, gdzie s ilość dodatku mineralnego) w początkowym okresie hydratacji jest znacznie wyższy niż zakładany, ponieważ dodatek mineralny pełni w tym momencie tylko rolę wypełniacza. Sprzyja to występowaniu zjawiska segregacji i osłabianiu powierzchniowych fragmentów betonu, prowadząc do obniżenia odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających. Spostrzeżenie jest szczególnie istotne w przypadku dojrzewania w niskich temperaturach.

2) Szybkość narastania wytrzymałości

Niektórzy autorzy [138] sugerują, że odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie betonów z dodatkami mineralnymi można zdefiniować jako zdolność materiału do

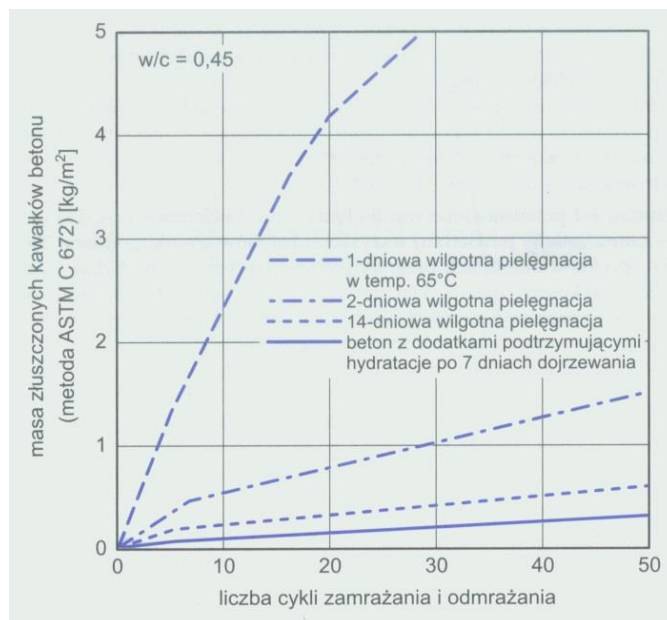
osiągnięcia pewnej minimalnej wytrzymałości na ściskanie, jednorodnej w całej objętości betonu, uzależnionej od rodzaju użytego dodatku. Autorzy tłumaczą taką definicję długoletnimi doświadczeniami badawczymi w zakresie zjawiska powierzchniowego łuszczenia, gdzie uzyskane wyniki były satysfakcjonujące, jeżeli w chwili badania mrozoodporności betonu osiągnęły wytrzymałość na ściskanie przekraczającą 40 MPa po 28 dniach dojrzewania [19]. Stąd przy określaniu mrozoodporności betonów z popiołami lotnymi krzemionkowymi często pojawia się problem związany ze stopniem hydratacji dodatku po 28 dniach dojrzewania. Dlatego jakość mikrostruktury, a tym samym mrozoodporność zależy od czasu dojrzewania betonów z popiołem, a wartości określające rzeczywiste właściwości materiałowe powinny być oznaczane po minimum 90 dniach dojrzewania [17].

3) Zmiany mikrostrukturalne

Stosowanie dodatków mineralnych powoduje szybszą ucieczkę powietrza z mieszanki betonowej podczas zagęszczenia i wbudowywania. Powoduje to zmniejszenie udziału powietrza w betonie, co może prowadzić do większych zniszczeń wywołanych działaniem cyklicznego zamrażania i rozmrażania, niż w betonach bez dodatków.

4) Pielęgnacja wilgotnościowa

Właściwie przeprowadzony etap pielęgnacji betonów z dodatkami popiołowymi sprzyja zwiększeniu właściwości mechanicznych, co poprawia odporność na powierzchniowe łuszczenie (Rys. 3.14) [97],[138]. Niewłaściwa pielęgnacja może doprowadzić do powstawania mikrorys i pęknięć na powierzchni betonów, które w sposób negatywny wpływają na odporność na powierzchniowe łuszczenie [42],[145].

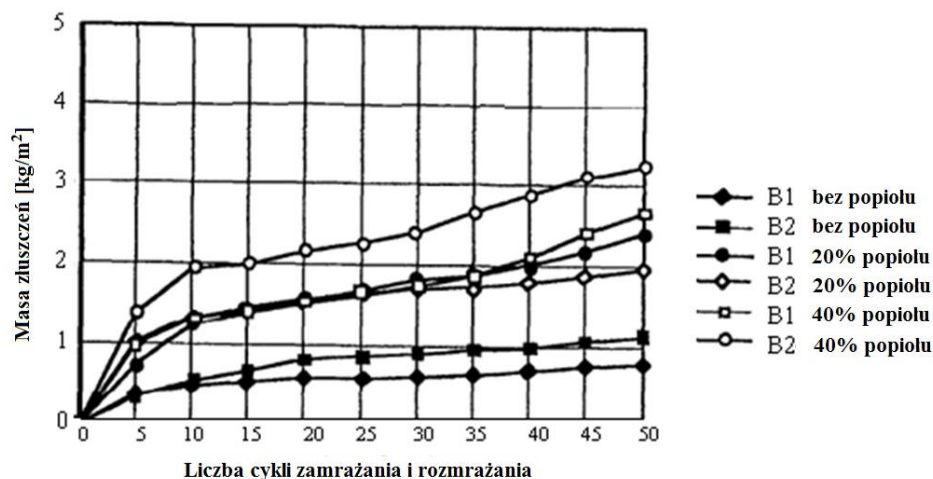


Rys. 3.14. Wpływ metody pielęgnacji na mrozoodporność betonu [108]

5) Wykonanie badanej powierzchni

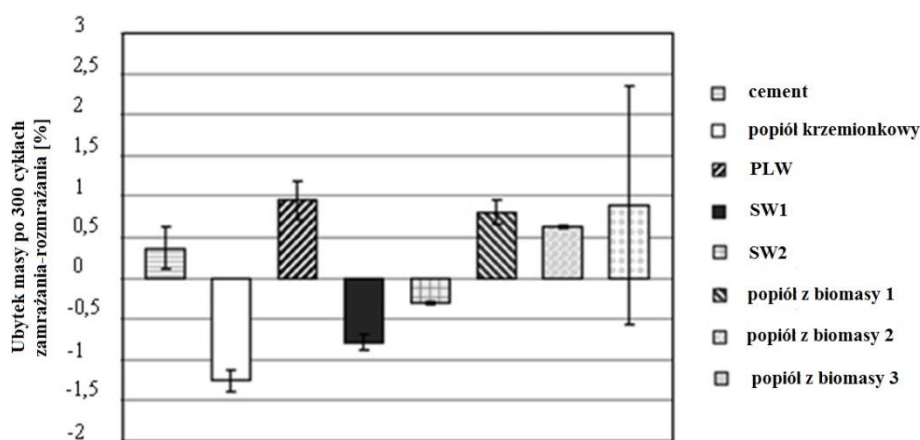
W badaniach Pigeon i inni [98] przedstawiają wpływ obróbki mechanicznej powierzchni układanego betonu na powierzchniowe łuszczenie. Obróbka polegała na zacieraniu

powierzchni na dwa sposoby. Pierwszy sposób zakładał wygładzenie powierzchni niezwłocznie po ułożeniu betonu, natomiast drugi po pojawieniu się na powierzchni ułożonego betonu mlecza cementowego. Z badań wynika, że czas, po którym dokonywano obróbki powierzchni betonu miał wpływ na odporność na powierzchniowe łuszczenie. Dodatkowo wpływ obróbki powierzchni by uzależniony od udziału dodatku popiołu w betonie (Rys. 3.15).



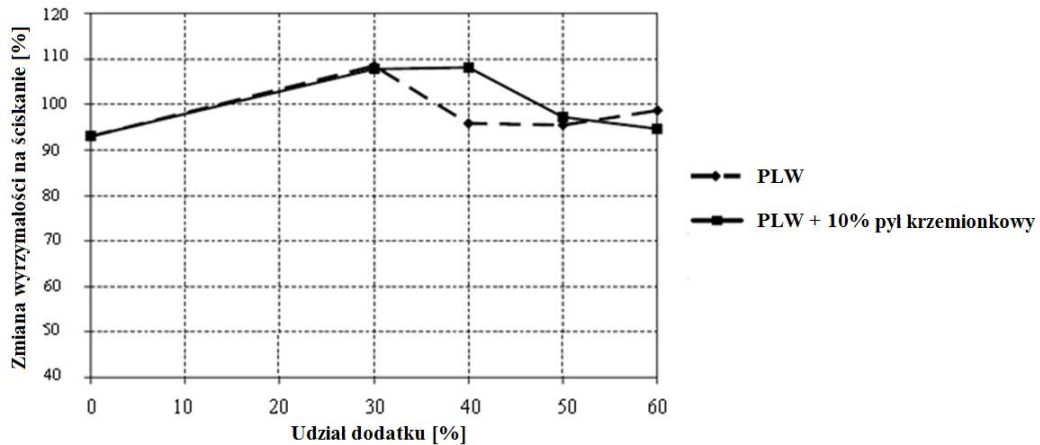
Rys. 3.15. Wpływ dodatku popiołu i wykonania powierzchni na odporność na powierzchniowe łuszczenie betonów zgodnie z normą ASTM C 672 (B1 – beton wygładzony po zaformowaniu; B2 – beton wygładzony po „bleedingu”: od 2 do 4 godzin po zaformowaniu) [98]

Stosowanie *PLW* jako dodatku do betonu powoduje poprawę mrozoodporności wewnętrznej w przypadku zastosowania napowietrzenia. Badania przeprowadzone przez Wanga i innych [128] zgodnie z normą ASTM C 666 wykazali, że napowietrzony (4-6%) beton z 25% dodatkiem *PLW* (klasy C) o stosunku $w/s = 0,5$ po 300 cyklach zamrażania i rozmrażania nie zmniejszył masy (Rys. 3.16). Naik i inni [87] stwierdzili, że chcąc uzyskać zbliżoną odporność na powierzchniowe łuszczenie wysokowytrzymałych betonów należy nie przekraczać 40% dodatku *PLW* i stosować napowietrzenie.



Rys. 3.16. Ubytek masy powstały w wyniku cyklicznego zamrażania i rozmrażania betonów z różnymi rodzajami popiołów lotnych, zgodnie z ASTM C 666 [128]

W pracy [142] Yazici określił wpływ *PLW* na mrozoodporność wewnętrzną betonów samozagęszczalnych. Doświadczenie polegało na zamrażaniu próbek walcowych ($\varnothing = 100$, $h = 200$ mm) przez 24 godziny w temperaturze -25°C i rozmrażaniu w roztworze 10% *NaCl* przez 4 godziny w 20°C po 28 dniach dojrzewania. Z przebiegu krzywej na wykresie (Rys. 3.17) wynika, że pogorszenie właściwości mrozowych betonu z *PLW* nastąpiło dopiero po przekroczeniu 30% jego udziału w spoiwie.



Rys. 3.17. Wpływ zawartości *PLW* na względną wytrzymałość na ściskanie po 90 cyklach zamrażania i rozmrażania [142]

Papayianni [92] przedstawiła badania kompatybilności *PLW* (klasa C) z domieszką napowietrzającą i odporności betonu na cykliczne zamrażanie i odmrażanie w okresie 14 i 28 dni oraz 1 roku, przy $w/s = 0,55$ i $0,65$. Użyto wysoko- i niskowapniowe popioły. Wyniki oceniano na podstawie redukcji wytrzymałości na ściskanie, utraty masy oraz łuszczenia. Badania wykazały, że zastąpienie cementu *PLW* doprowadziło do zmniejszenia odporności betonu na cykle zamrażania w wodzie morskiej. Zmniejszenie odporności zależało od udziału powietrza w betonie. Zwiększeniu udziału powietrza w betonie towarzyszyło zwiększenie mrozoodporności. Gebler i inni [46] badali wpływ popiołów krzemionkowych (klasa F) i *PLW* (klasa C) na odporność betonów na powierzchniowe łuszczenie. Stosowali zastępowanie 20% i 45% cementu *PLW*, przy całkowitej zawartości spoiwa 307 i 282 kg/m^3 . Oba rodzaje popiołu wykazały identyczny wpływ na odporność na łuszczenie: betony bez popiołu wykazały lepszą odporność.

Według Johnstona [66], zastąpienie cementu przez popiół C nie powinno przekraczać 45%, jeżeli beton może być narażony na powierzchniowe łuszczenie, nawet jeśli wskaźnik rozmieszczenia porów \bar{L} spełnia wymagania. Wniosek ten dotyczy jedynie odporności na łuszczenie powierzchni w obecności środków odladzających. Badając jedynie odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie osiągnięto współczynnik trwałości równy 85%. Klieger i Gebler [68] badali stabilność napowietrzenia w mieszance w zależności od zawartości popiołów: obecność popiołów krzemionkowych (klasa F) wpływa silniej na redukcję napowietrzenia niż obecność popiołów *PLW* (klasa C). Popioły krzemionkowe (klasa F) powodują zatem większe obniżenie odporności na cykle zamrażania betonów niż betony z popiołem *PLW* (klasa C). Natomiast oba rodzaje popiołów wpływają negatywnie na odporność na łuszczenie w obecności środków odladzających względem betonu bez dodatków.

3.5. Podsumowanie

Stosowanie *PLW* w betonach jest utrudnione z powodu zmienności właściwości tego surowca odpadowego. Właściwości *PLW* uzależnione są także od złoża spalanego węgla i warunków spalania. Charakteryzują się podwyższoną zawartością związków wapnia, siarki, oraz strat prażenia względem popiołów lotnych krzemionkowych, z czego wynikają ograniczenia ich użycia w betonach. Można je scharakteryzować jako pucolany z niewielkimi właściwościami hydraulicznymi. Morfologia ziaren *PLW* jest zróżnicowana. Oprócz ziaren kulistych występują liczne aglomeraty ziaren o nieregularnych kształtach i znacznej porowatości, wpływające na podwyższenie wodożądności spoiwa.

Skład chemiczny i właściwości fizyczne *PLW* nie pozwalają na ich stosowanie w betonach w świetle dokumentów normalizacyjnych. Możliwe jest ich wykorzystanie jedynie jako składnika głównego w cementach portlandzkich wieloskładnikowych i pucolanowych. Doświadczenia w stosowaniu *PLW* w betonach opierają się głównie na badaniach wykonywanych w krajach, gdzie są one stosowane już od kilkadziesiąt lat (np. USA, Kanada). W Europie próbę wykorzystania *PLW* w betonach podejmują kraje produkujące znaczne ilości tego rodzaju odpadu przemysłu energetycznego (np. Grecja).

Wpływ *PLW* na podstawowe właściwości betonów został dokładnie scharakteryzowany w licznych pracach badawczych. Główną zaletą stosowania *PLW* w betonach jest większa wytrzymałość na ściskanie w początkowym okresie dojrzewania (do 28 dni) względem betonów z popiołami lotnymi krzemionkowymi. W wyniku ich użycia powstaje zwarta mikrostruktura zwiększająca szczelność matrycy cementowej.

Podczas napowietrzania mieszanek betonów z dodatkiem *PLW* mogą wystąpić trudności wynikające z adsorpcji domieszki napowietrzającej na ziarnach niespalonego węgla. Z badań wynika, że domieszki o działaniu powierzchniowo czynnym wykazują większą niestabilność w przypadku użycia popiołów lotnych krzemionkowy niż popiołów o wysokiej zawartości wapnia.

Wpływ dodatku *PLW* na mrozoodporność betonów, tak na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, jak i powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających nie jest gruntownie zbadany. W analizowanej literaturze nie stwierdzono prac badawczych charakteryzujących mikrostrukturę oraz procesy transportu cieczy w napowietrzonych betonach z *PLW*. Na podstawie dostępnej literatury można wnioskować, że zastąpienie części cementu przez wysokowapniowe popioły wpływa negatywnie na mrozoodporność betonów względem betonów bez dodatków mineralnych. Natomiast w przypadku stosowania napowietrzania mrozoodporność wewnętrzna pozostaje na poziomie betonu bez dodatków. Stosowanie napowietrzania w betonach z *PLW* narażonych na powierzchniowe łuszczenie nie gwarantuje uzyskania odporności zbliżonej do betonu bez dodatków. Powyższe rozważania odnoszą się do betonów dojrzewających 28 dni. Jednakże betony z dodatkiem *PLW* powinny zostać badane dopiero po 90 dniach dojrzewania, gdy stopień hydratacji matrycy cementowej jest zbliżony do betonu bez dodatków mineralnych.

Reasumując, celowe wydaje się przeprowadzenie badań określających przydatność krajowego *PLW* w odniesieniu do technologii wytwarzania napowietrzonych betonów oraz ich właściwości użytkowych, a w szczególności na odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

4. Dobór składników i projektowanie składu betonu

4.1. Popiół lotny wapienny

Popiół lotny wapienny, wychwytywany przez elektrofiltry z gazów odlotowych przy spalaniu węgla brunatnego w Elektrowni Bełchatów, został pobrany z silosów w okresie około 1,5 roku (Tablica 4.1). Umożliwiło to obserwacje wpływu zmienności wydobywanego węgla. W dalszym opisie prac badawczych przyjęto oznaczenia badanego materiału przedstawione w Tablicy 4.1.

Tablica 4.1. Oznaczenia *PLW* stosowane w pracy

Numer pobrania	1	2	3	4	5
Czas od pierwszego pobrania [dni]	0	34	73	343	442
Oznaczenie stosowane w pracy	P1	P2	P3	P4	P5

Badania rozpoznawcze właściwości fizycznych i chemicznych przeprowadzono zgodnie ze szczegółowymi procedurami zawartymi w normach. Oznaczono następujące właściwości:

- skład chemiczny metodą fluorescencji rentgenowskiej (*XRF*) [N17],
- oznaczenie strat prażenia [N17],
- oznaczenie zawartości SO_3 [N17],
- oznaczenie zawartości wolnego CaO [N23],
- zawartość alkaliów [N19],
- zawartość węgla organicznego (metoda kulometryczna),
- miąłkość [N24],
- wodoządnosc [N24],
- powierzchnia właściwa wg Blaine'a [N18],
- aktywność [N21].

Skład chemiczny *PLW* oznaczony w ICiMB w oddziale OSiMB w Krakowie [12] przedstawia Tablica 4.2. Wyniki badań uzyskane za pomocą metody *XRF* wskazują znaczne zmiany zawartości najbardziej charakterystycznych tlenków, w szczególności CaO i SiO_2 (Tablica 4.2). Zawartość tlenu wapnia i dwutlenku krzemu mieści się odpowiednio w przedziałach od 19,1% do 31,3% i od 33,6% do 47,4%, co stanowi znaczną zmienność w odniesieniu do pozostałych charakterystycznych tlenków obecnych w składzie *PLW*. Niewielkie zmiany Al_2O_3 (do 5%) są już na poziomie akceptowalnym w kontekście zmienności właściwości popiołów lotnych.

Zawartość niezwiązanego tlenu wapnia (CaO_w) w przypadku popiołu oznaczonego P1 przekracza wartość graniczną stosowaną w normie dotyczącej popiołów lotnych w betonie

[N21] wynosząca 2,5%. Zawartość CaO_w w pozostałych partiach popiołu wymaga sprawdzenia stałości objętości, gdyż udział masowy mieści się w przedziale od 1,0% do 1,5%.

Tablica 4.2. Skład chemiczny *PLW* pobranych w pięciu różnych terminach (*XRF* i analizy chemiczne)

Właściwość	Zawartość [% masy]				
	P1	P2	P3	P4	P5
CaO	31,3	25,6	22,4	26,0	19,1
SiO_2	33,6	35,4	40,2	40,9	47,4
Al_2O_3	19,3	21,9	24,0	19,0	20,5
Fe_2O_3	5,4	6,1	5,9	4,3	4,5
MgO	1,9	1,5	1,3	1,7	1,5
K_2O	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2
Na_2O	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
$SP^{*)}$	2,6	3,4	1,9	2,1	2,7
$SO_3^{**)}$	4,5	4,2	3,1	3,9	2,3
$CaO_w^{***)}$	2,9	1,2	1,5	1,1	1,0

*) – strata prażenia do 1000°C

**) – metoda wagowa

***) – metoda glikolowa

Bardzo istotna jest niewielka zawartość strat prażenia (*SP*) nieprzekraczająca 4%, ważna z uwagi na kryteria normy [N21], gdzie w przypadku kategorii A zawartość *SP* nie powinna przekraczać 5% masy suchego popiołu lotnego. Obecność niewielkiej zawartości *SP* zapewnia przydatność *PLW* stosowanego w betonach napowietrzonych, gdyż świadczy między innymi o małym udziale ziaren niespalonego węgla, powodujących absorpcję substancji powierzchniowo czynnych domieszek napowietrzających.

Oprócz popiołu P5 zawartość jonów siarczanowych przeliczonych na SO_3 przekracza wartość graniczną wynoszącą w normie [N21] 3%, Istotne jest, że zawartość SO_3 podlega niewielkim wahaniom pomiędzy partiami *PLW*. Podwyższona zawartość siarczanu (SO_3) pozwala na redukcję zawartości siarczanu wapnia w produkcji cementów zawierających *PLW*.

Porównując uzyskane wyniki z dostępnymi w literaturze z rezultatami oznaczeń składu chemicznego metodą *XRF* widoczna jest relatywnie nieznaczna zmienność udział SiO_2 oraz CaO w porównaniu do popiołów niemieckich i greckich [16]. Dużo mniejsze są starty prażenia, zawartość niezwiązanego tlenu wapnia oraz SO_3 .

Podstawowe właściwości fizyczne *PLW* przedstawiono w Tablicy 4.3 [12]. Największa zmienność właściwości *PLW* między pobraniami można zaobserwować w rozwinięciu powierzchni właściwej wg Blaine'a ziaren popiołu, która wahała się od 2200 do 4400 cm^2/g . Miałkość popiołów wahała się od 35% do 59%. Miałkość stanowi procentowy udział w masie popiołu pozostałości na sicie o boku oczka 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro, zgodnie z normą [N24]. Popioły P1, P2 i P4 uzyskały Kategorię N zgodnie z normą [N21]. Natomiast w przypadku popiołów P3 i P5 uzyskano miałkość wynoszącą odpowiednio 56% i 59%,

klasyfikując popiół poza kategorią. Badane popioły wykazały większą wodożądność, niż dopuszcza to norma ASTM C618 [N2] (105%).

Tablica 4.3. Właściwości fizyczne popiołów P1-P5 [12]

Właściwość	Zawartość [% masy]				
	P1	P2	P3	P4	P5
Gęstość [g/cm ³]	2,62	2,58	2,64	2,60	2,41
Miałkość [%]	38	35	56	46	59
Wodożądność [%]	106	120	110	110	116
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	2900	4400	1900	2400	2200

Wskaźniki aktywności *PLW* przedstawiono w Tablicy 4.4. Dane uzyskano w ICI MB w oddziale OSiMB w Krakowie [48] zgodnie z normą PN-EN 450-1 [N21] oraz PN-EN 197-1 [N20]. Wytrzymałość na ściskanie beleczek wynosiła od 1,4 MPa do 5,0 MPa i była najprawdopodobniej uzależniona od obecności aktywnych chemicznie składników *PLW*. Wskaźniki aktywności popiołów P1-P4 przekraczają wartość 100%, tak po 28, jak i 90 dniach dojrzewania. Wyjątek stanowi popiół P5, którego wskaźniki aktywności osiągają wartości 92% i 97%, odpowiednio po 28 i 90 dniach dojrzewania. Wysokie wskaźniki aktywności świadczą o przydatności *PLW* jako dodatku do matryc cementowych.

Tablica 4.4. Wskaźniki aktywności *PLW* [48]

Właściwość		P1	P2	P3	P4	P5
Wytrzymałość na ściskanie zaprawy popiołowej [MPa]		5,0	1,8	2,0	1,4	4,3
Wskaźnik aktywności [%]	K28	107	105	102	100	92
	K90	115	102	106	102	97

4.2. Cementy wieloskładnikowe

Opracowanie cementów wieloskładnikowych (Tablica 4.5) było uzasadnione koncepcją wspólnego mielenia *PLW* z wstępnie rozdrobnionym klinkierem portlandzkim (powierzchnia właściwa wg Blaine'a 2400 cm²/g). Cement odniesienia stanowił klinkier portlandzki zmielony razem z regulatorem czasu wiązania w postaci gipsu do powierzchni właściwej wg Blaine'a wynoszącej 3900 cm²/g (Tablica 4.6). Na podstawie analizy właściwości *PLW* przedstawionej w Rozdziale 7.4 wybrano popiół P4 do wykonania cementów wieloskładnikowych. Jako pozostałe dodatki mineralne użyto popiołu lotnego krzemionkowego oraz granulowanego żużla wielkopieczowego, które posiadają typowy skład tlenkowy w przypadku tego typu dodatków mineralnych (Tablica 4.7).

Cementy z dodatkiem *PLW* wykonano w ICI MB w oddziale OSiMB w Krakowie. Mielenie wykonano zastępując klinkier portlandzki *PLW* lub mieszaniną *PLW* i innego z powyższych dodatków mineralnych. Ilość regulatora czasu wiązania była określona na podstawie zawartości związków siarki wprowadzonych przez zastosowane dodatki mineralne

(SO_3 poniżej 3,5%). Mielenie prowadzono do momentu uzyskania zbliżonej powierzchni właściwej do cementu referencyjnego CEM I. Oznaczenia cementów były zgodne z zaleceniami normy PN-EN 197-1 [N20], z wyjątkiem cementu oznaczonego „CEM V/A (S-W)”, gdyż norma nie uwzględnia dodatku *PLW* w tej grupie cementów. Stąd oznaczenie tego cementu zostało ujęte cudzysłowem.

Tablica 4.5. Proporcje składników cementów z *PLW* [%]

Rodzaj cementu	Klinkier portlandzki	<i>PLW</i>	Popiół lotny krzemionkowy	Granulowany żużel wielkopiecowy	Gips naturalny
CEM I	94,5	-	-	-	5,5
CEM II/B-W	67,4	28,9	-	-	3,7
CEM II/B-M (V-W)	66,6	14,3	14,3	-	4,8
„CEM V/A (S-W)”	47,9	23,9	-	23,9	4,2

Tablica 4.6. Właściwości fizyczne cementów z *PLW*

Rodzaj cementu	Gęstość [g/cm ³]	Powierzchnia wg Blaine'a [cm ² /g]	Zawartość SO_3 [% masy]
CEM I	3,10	3850	3,48
CEM II/B-W	2,98	3750	3,13
CEM II/B-M (V-W)	2,93	3750	3,13
"CEM V/A (S-W)"	2,97	3800	3,33

Tablica 4.7. Skład chemiczny składników cementów wieloskładnikowych [%]
(badania wykonane w ICiMB w oddziale OSiMB w Krakowie)

	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>Na₂O</i>	węgiel org.	<i>SP</i>
Klinkier portlandzki	66,7	22,7	4,9	2,4	1,0	0,4	0,39	0,42	-	0,4
Popiół lotny wapienny	26,0	40,9	19,0	4,3	1,7	3,9	0,14	0,13	1,4	2,1
Popiół lotny krzemionkowy	3,4	52,3	27,5	6,2	2,7	0,4	1,2	3,30	-	1,9
Granulowany żużel wielkopiecowy	45,6	37,0	6,8	1,6	5,5	1,2	0,1	0,50	-	0,7

Normowa wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych wynosiła od 40,3 MPa do 50,2 MPa po 28 dniach dojrzewania. Dane w Tablicy 4.8 przedstawiają szybkość przyrostu wytrzymałości na ściskanie wraz z czasem dojrzewania. Widoczne jest zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie wraz ze zwiększeniem udziału w cemencie pozaklinkierowych składników głównych w początkowym okresie dojrzewania (do 7 dni) oraz zbliżone z cementem referencyjnym wyniki wytrzymałości 28-dniowej. Cement „CEM V/A (S-W)” wykazał wytrzymałość o 20% mniejszą niż cement referencyjny. Po 90 dniach dojrzewania cement CEM II/B-W osiągnął wytrzymałość o 10% większą niż cement

referencyjny. Natomiast portlandzki wieloskładnikowy z dwoma rodzajami popiołów wykazał wytrzymałość zbliżoną do cementu referencyjnego.

Tablica 4.8. Wpływ czasu dojrzewania w warunkach normowych na wytrzymałość na ściskanie cementów wieloskładnikowych

Rodzaj cementu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	2 dni	7 dni	28 dni	90 dni
CEM I	25,2	41,3	50,2	58,1
CEM II/B-W	19,8	35,8	49,6	64,6
CEM II/B-M (V-W)	17,5	31,7	47,6	59,8
"CEM V/A (S-W)"	11,7	25,4	40,3	55,6

4.3. Pozostałe składniki betonu

Cementy

Do wykonania zaczynów i kompozytów cementowych użyto trzech rodzajów cementów portlandzkich CEM I różniących się przede wszystkim udziałem C_3A (Tablica 4.9). Uzasadnieniem wyboru cementów było spostrzeżenie o większym stopniu przereagowania popiołu przy większym udziale faz glinianych w cemencie [89]. Do badań właściwości kompozytów cementowych używano cementu portlandzkiego CEM I 42,5R z Cementowni Góraźdze oraz cementu portlandzkiego CEM I 42,5N-SR3/NA z Cementowni Chełm. Do badań kompatybilności domieszek chemicznych, służących do napowietrzania kompozytów cementowych, użyto dodatkowo cementu CEM I 42,5N-SR5/NA pochodzącego z cementowni Warta. W dalszym opisie prac badawczych przyjęto oznaczenia cementów przedstawione w Tablicy 4.9, gdzie wielkość liczbowa określa udział C_3A w składzie cementu.

Domieszki

Zakres badań obejmował sześć domieszek napowietrzających. Stanowiły one grupę substancji chemicznych o charakterze powierzchniowo czynnym, których rola przy stabilizacji pęcherzyków powietrza wynika z obniżenia napięcia powierzchniowego między gazem, a cieczą podczas homogenizacji składników kompozytu cementowego. Użyto następujących domieszek napowietrzających i uplastyczniająco-napowietrzających:

- MISCHÖL LP 70 – domieszka napowietrzająca o działaniu powierzchniowo czynnym na bazie mydeł żywic naturalnych o zakresie stosowalności 1,6% masy cementu,
- MISCHÖL LP 75 – domieszka napowietrzająca o działaniu powierzchniowo czynnym na bazie surowców syntetycznych, stosowana w ilości do 0,3% masy cementu,
- MICRO AIR 301-2 – domieszka napowietrzająca o działaniu powierzchniowo czynnym na bazie zmydlonych żywic płynnych terpentynowych, stosowana w ilości do 0,3% masy cementu,

- AIR A10 – domieszka napowietrzająca o działaniu powierzchniowo czynnym, stosowana w ilości do 1,5% masy cementu,
- BETOSTAT – domieszka uplastyczniająco – napowietrzająca o działaniu opóźniającym wiązanie cementu na bazie roztworów soli amin alifatycznych i detergentów, stosowana w ilości do 0,5% masy cementu,
- NK-3 – domieszka uplastyczniająco – napowietrzająca na bazie środków powierzchniowo czynnych, stosowana w ilości do 0,4% masy cementu.

Tablica 4.9. Skład i właściwości fizyczne cementów (dane producentów)

Składniki i właściwości	CM-9	CM-4	CM-2
	CEM I 42,5R z cementowni Górażdże	CEM I 42,5N -SR5/NA z cementowni Warta	CEM I 42,5N -SR3/NA z cementowni Chelm
	Zawartość składnika [%]		
<i>CaO</i>	66,1	65,7	66,3
<i>SiO₂</i>	22,4	21,6	20,7
<i>Al₂O₃</i>	4,8	3,7	3,9
<i>Fe₂O₃</i>	2,5	3,5	4,2
<i>MgO</i>	1,3	0,7	0,7
<i>Na₂O_{eq}</i>	0,63	0,34	0,46
<i>SO₃</i>	2,52	2,55	2,78
<i>SP</i>	3,56	1,56	3,17
<hr/>			
<i>C₃S</i>	58,5	59,9	58,5
<i>C₂S</i>	19,8	23,9	23,3
<i>C₃A</i>	9,0	4,1	1,8
<i>C₄AF</i>	9,1	10,5	13,3
Gęstość [g/cm ³]	3,10	3,18	3,21
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm ² /g]	3700	3300	2900
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
2 dni	26,4	24,2	23,1
7 dni	41,9	37,2	36,6
28 dni	51,9	56,0	52,5
90 dni	61,0	60,2	58,3

Do obniżenia zawartości wody w mieszankach użyto domieszki o działaniu upłynniającym GLENIUM SKY 591, kompatybilną z domieszką napowietrzającą wybraną na podstawie badań przedstawionych w Rozdziale 6.4. Bazę domieszki stanowi eter polikarboksylanowy, zapewniający skuteczną dyspersję ziaren cementu przy dozowaniu do

3% masy cementu. W dalszym opisie prac badawczych przyjęto oznaczenia domieszek przedstawione w Tabelicy 4.10.

Tablica 4.10. Oznaczenia domieszek stosowanych w pracy

Nazwa domieszki	Oznaczenie stosowane w pracy
NK-3	NK3
MISCHÖL LP 70	LP70
MISCHÖL LP 75	LP75
MICRO AIR 301-2	AIR301
AIR A 10	A10
BETOSTAT	BT
GLENium SKY 591	S591

Kruszywa

Do wykonania betonów użyto następujących kruszyw (Tablica 4.11):

- naturalny piasek kwarcowy, frakcji 0-2 mm,
- grys amfibolitowy, frakcji 2-8 mm oraz 8-16 mm,
- grys granodiorytowy, frakcji 2-8 mm oraz 8-16 mm.

Amfibolit jest skałą metamorficzną o zwartej budowie, wysokiej wytrzymałości i mrozoodporności. Zbliżone właściwości posiada grys granodiorytowy będący skałą magmową. Zastosowanie dwóch rodzajów kruszyw mineralnych było związane z wyczerpaniem się złoża amfibolitu w trakcie realizacji badań.

Tablica 4.11. Właściwości fizyczne kruszyw łamanych (dane dostarczone przez producenta)

	Grys amfibolitowy	Grys granodiorytowy
Gęstość rzeczywista [g/cm^3]	2,91	2,69
Porowatość [%]	0,5	1,1
Nasiąkliwość [%]	0,30	0,32
Wytrzymałość na ścislenie [MPa]	195	186
Ścieralność na tarczy Boehme'go [mm]	1,22	2,85
Mrozoodporność (25 cykli)	F1 ^{*)}	F1 ^{*)}

^{*)} – kruszywo mrozoodporne

W dalszym opisie prac badawczych przyjęto oznaczenia kruszyw przedstawione w Tabelicy 4.12. Uziarnienie kruszyw mieściło się w normowych krzywych granicznych (Załącznik I).

Tablica 4.12. Oznaczenia kruszyw stosowane w pracy

Rodzaj kruszywa	Oznaczenie stosowane w pracy
Piasek naturalny, frakcji 0-2 mm	S(0-2)
Grys amfibolitowy, frakcji 2-8 mm	A(2-8)
Grys amfibolitowy, frakcji 8-16 mm	A(8-16)
Grys granodiorytowy, frakcji 2-8 mm	G(2-8)
Grys granodiorytowy, frakcji 8-16 mm	G(8-16)

Woda

Wykonanie zaczynów i kompozytów cementowych odbywało się z użyciem wody wodociągowej. Kompatybilność domieszek chemicznych z układem mineralnym spoiw określano używając wody destylowanej.

4.4. Projektowanie składu betonu

Badania wpływu *PLW* na mikrostrukturę i mrozoodporność kompozytów cementowych przeprowadzono na próbkach materiałów zaprojektowanych i wykonanych przez autora. Przyjęto następujące założenia do projektowania składu betonów:

- 1) Przyjęto uproszczony model betonu złożonego z matrycy cementowej oraz inkluzji ziarnistych (ziaren kruszyw mineralnych) i pustek powietrznych. Matryca cementowa jest ośrodkiem porowatym powstałym w wyniku hydratacji cementu w obecności aktywnych dodatków mineralnych.
- 2) Składniki mieszanki, ich zawartość oraz docelowe właściwości betonu powinny spełniać wymagania przydatności do budowy konstrukcji inżynierskich, zwłaszcza obiektów narażonych na agresję środowiskową klasy *XF4*. Wymaga to zastosowania technologii napowietrzania mieszanki przy wykorzystaniu domieszek napowietrzających.
- 3) Projektowanie składu betonu polega na wykorzystaniu *PLW* jako aktywnego składnika spoiwa, przy zastosowaniu wyselekcjonowanych domieszek redukujących zawartość wody i napowietrzających.
- 4) Popiół lotny wapienny w formie dodatku do mieszanki stosowano jako częściowy zamiennik masy cementu przy zachowaniu niezmiennej zawartości wody. Niezmienną zawartość wody w mieszance przyjęto również w przypadku zastosowania *PLW* jako składnika głównego cementów wieloskładnikowych.

Zawartość domieszek w mieszankach wyznaczono doświadczalnie kierując się kryteriami projektowanej zawartości powietrza i jednakowej konsystencji. Nienapowietrzone mieszanki betonowe wykonano przy jednakowej konsystencji. Szczegółowy skład betonów z dodatkiem *PLW* przedstawiono w Rozdziałach 8 i 9. Wytworzone w laboratorium mieszanki posłużyły do wykonania próbek o następujących kształtach:

- sześcienne o boku 100 mm i 150 mm,

- belki o wymiarach 500x100x100 mm,
- walce o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm.

Próbki przeznaczono do badań mikrostruktury i właściwości betonów po określonym czasie twardnienia spoiwa. Próbki dojrzewały w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ w wodzie przez minimum 28 dni. Program badań zawierał także określenie wpływu pielęgnacji w warunkach powietrzno-suchych na właściwości kompozytów. Harmonogram pielęgnacji zakładał trzydniowe przechowywanie próbek (od momentu zaformowania) w warunkach wilgotności $RH \approx 95\pm 5\%$ i temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Następnie próbki dojrzewały minimum 28 dni w warunkach powietrzno-suchych $RH \approx 40-60\%$ i temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

5. Opis użytych metod badawczych

5.1 Charakterystyka popiołów lotnych wapiennych

Rozkład wielkości ziaren – metoda laserowa

Analizę dystrybucji składu ziarnowego cząstek proszków przeprowadzono za pomocą analizatora Mastersizer 2000 firmy Malvern Instruments, z przystawką dyspergującą w pomiarach na mokro Hydro 2000S, wykorzystując w tym celu metodę dyfrakcji laserowej. Oznaczenie wykonano w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pomiar prowadzono w zakresie średnic ekwiwalentnych cząstek od 0,02 do 2000 μm . Jako cieczy dyspergującej użyto alkoholu etylowego. Skład granulometryczny badanych próbek przedstawiono w następującej postaci:

- histogram procentowego udziału poszczególnych frakcji *PLW* w stosunku do całkowitej objętości próbki,
- parametry charakterystyczne rozkładu ziarnowego, zwłaszcza średnice cząstek $d(0,5)$ oraz $d(0,9)$, odpowiadające 50% i 90% objętości zbioru wszystkich cząstek.

Morfologia ziaren w mikroskopie skaningowym

Analizę mikroskopową ziaren wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym typu Zeiss-SUPRA z możliwością analizy *EDS*, produkcji niemieckiej firmy Zeiss. Badania wykonano w Instytucie Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk.

Z *PLW* wykonano preparaty proszkowe, które pokryto warstwą węgla o grubości około 10 nm w urządzeniu Baltec SCD 005. Powierzchnia preparatów poddana obserwacjom w *SEM* wynosiła nie mniej niż 1,0 cm^2 . Zakres stosowanych powiększeń od 400x do 10000x, sporadycznie: 25, 50 i 100 tysięcy razy. Analiza w *SEM* próbek popiołowych miała na celu określenie:

- morfologii ziaren,
- rodzaju i wielkości ziaren dominujących,
- składu chemicznego wybranych ziaren popiołowych.

Kompatybilność z domieszkami napowietrzającymi

Ocenę kompatybilności domieszki ze składnikami spoiwa przeprowadzono stosując metodę wskaźnika piany. Badanie polega na określeniu adsorpcji domieszki napowietrzającej na ziarnach spoiwa w mieszaninie wodnej. Pomiar adsorpcji domieszki odbywa się przez obserwację mieszaniny cementu, popiołu oraz wody podczas miareczkowania 10% roztworem domieszki napowietrzającej. Za punkt końcowy miareczkowania uznaje się wytworzenie stabilnej warstwy piany na powierzchni zawiesiny. Jako wielkość mierzona przyjmuje się sumaryczną objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej, która została dodana do badanej mieszaniny do momentu osiągnięcia punktu końcowego badania; a wielkość jest nazywana „wskaźnikiem piany”.

Sposób badania wskaźnika piany został zaczerpnięty z pracy Kūlaots'a [69]. Badanie dotyczyło mieszaniny składającej się z 10 g spoiwa i 25 ml wody destylowanej. Składniki mieszano przez 60-sekundowe wstrząsanie szklanego, szczelnie zamkniętego pojemnika o średnicy 80 mm. Następnie miareczkowano mieszaninę dodając 10% wodnego roztworu

domieszki napowietrzającej w ilości 0,04 ml i ponownie wstrząsano szklaną menzurką przez 60 sekund. Po mieszaniu obserwowano powierzchnię roztworu w celu oceny stabilności powstałej piany. Za punkt końcowy badania przyjęto moment, gdy piana powstała na powierzchni mieszaniny utrzymywała się minimum przez 60 sekund. Miareczkowanie wykonywano do momentu uzyskania stabilnej piany na powierzchni roztworu. Wielkością mierzoną w badaniu była sumaryczna objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej, która zapewniła uzyskanie stabilnej piany na powierzchni badanego roztworu wody i spoiwa.

Metody termiczne

Badania próbek popiołów wykonano w urządzeniu do termicznej analizy różnicowej typu SDT Q600 w Instytucie Techniki Budowlanej, przy następujących warunkach pomiaru:

- atmosfera w piecu: powietrze,
- naważka: 750 mg,
- czułość DTG, DTA i TG dostosowywana do składu próbek,
- szybkość nagrzewu: 10°/min.,
- rodzaj tygli: platynowe,
- zakres temperatury: 20-1000°C.

Popiół lotny wapienny w postaci sypkiej był suszony w 35°C, a następnie z uśrednionej próbki została pobrana naważka do badań termicznej analizy różnicowej. Do oceny składu mineralnego *PLW* oznaczono stratę masy związaną z:

- utratą wilgoci (straty masy do 400°C),
- spalaniem resztek zawartego w popiołach węgla wraz z temperaturą maksimum efektu egzotermicznego (T_m),
- stratę masy związaną z dekarbonizacją kalcytu i obliczoną na jej podstawie zawartością kalcytu w popiele,
- całkowita strata prażenia do 1000°C.

Rentgenowska analiza dyfrakcyjna

Badania metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej wykonano w celu oznaczenia jakościowego składu fazowego badanych próbek. Badania wykonano w Instytucie Techniki Budowlanej. Metodą tą można oznaczyć obecność faz krystalicznych. Podniesienie tła w zakresie kątowym 20-40° świadczy o obecności faz amorficznych w badanym materiale.

Rentgenowską analizę dyfrakcyjną próbek cementu oraz *PLW* wykonano w dyfraktometrze TUR-M62 oraz Bruker D8 DISCOVER, przy następujących warunkach pomiaru:

- rodzaj promieniowania i filtru: CuK α /monochromator,
- napięcie i natężenie prądu lampy *RTG*: 40kV/20 mA,
- rodzaj licznika: BDS-7,

- stała czasowa: 5 s,
- krok: $0,05^\circ 2\theta$,
- zakres kątowy: $6-66^\circ 2\theta$.

Przed wykonaniem preparatów proszkowych próbki zostały wysuszone w 35°C , następnie zostały przesiane przez sito $0,045$ mm. Pozostałości na sicie poddano mieleniu tak, aby całość ich uzyskała uziarnienie mniejsze od $0,045$ mm. Przy identyfikacji składników w badanych próbkach korzystano ze zbioru kart JCPDS (ang. *Joint Committee for Powder. Diffraction Standards*). Oznaczenia składu badanych próbek miały charakter jakościowy.

5.2. Charakterystyka betonów

5.2.1. Podstawowe właściwości betonów

Określenie podstawowych właściwości mieszanek betonowych obejmowało:

- konsystencję – metodą opadu stożka [N12],
- gęstość [N13],
- zawartość powietrza – metodą ciśnieniową [N14].

Zawartość powietrza w mieszance wyznaczono metodą ciśnieniową. Stanowił podstawową informację odnośnie do poprawności napowietrzenia mieszanki betonowej. Badania właściwości mechanicznych betonów obejmowały:

- wytrzymałość na ściskanie (f_c) [N15],
- rezonansowy moduł sprężystości – E_d (opis w następnym akapicie).

Badania wytrzymałości na ściskanie betonów przeprowadzono na kostkach sześciennych o boku 100 mm. Wynik pomiaru stanowił średnią arytmetyczną z 3 pomiarów każdej serii kompozytów. Badanie zrealizowano za pomocą prasy hydraulicznej klasy I typu Dr MB-300.

Rezonansowy moduł sprężystości (E_d)

Badanie rezonansowego E_d betonów przeprowadzono przy użyciu urządzenia GrindoSonic MK5 wyposażonego w piezoelektryczny czujnik drgań. Rezonansowy moduł sprężystości wyznaczono na podstawie pomiarów częstości drgań własnych badanego elementu. Próbki do badania stanowiły belki o wymiarach $100 \times 100 \times 500$ mm. Wilgotne próbki były powierzchniowo osuszane ręcznikiem, a następnie określono wymiary próbki z dokładnością do $0,1$ mm oraz masę próbki z dokładnością do 1 g. Pomiar rezonansowego współczynnika sprężystości powtarzano co najmniej trzykrotnie, aby upewnić się, że częstość drgań własnych jest właściwa (odchyłki kolejnych pomiarów nie powinny być większe niż 100 Hz). Wynik stanowił średnią arytmetyczną z pomiarów przeprowadzonych na trzech próbkach o tym samym składzie. Rezonansowy moduł sprężystości określono na podstawie następującej zależności (wzór 9):

$$E_d = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_f^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L^3}{t^3} \right) \cdot T_1, \quad (9)$$

gdzie:

E_d – rezonansowy moduł sprężystości [MPa];

m – masa belki [g];

f_f – częstotliwość rezonansowa belki [Hz];

b – szerokość belki [mm];

L – długość belki [mm];

t – grubość belki [mm];

T_I – współczynnik korekcyjny uzależniony od kształtu i wymiarów próbki.

5.2.2. Mikrostruktura i transport cieczy

Charakterystyka porów powietrznych

Pomiary charakterystyki mikrostruktury porów powietrznych w betonach wykonano na stanowisku do automatycznej analizy obrazu, składającej się z: oprogramowania Image Pro Plus 4.5 z dodatkowym modulem Scope Pro, mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ800, kamery Sony DXC950P i stolika skaningowego Marzhauser SCAN 150x150. Kamera 3CCD zamontowana na mikroskopie umożliwiła uchwycenie obrazu kolorowego 24 bitowego o rozdzielczości 768x576 pikseli w siatce prostokątnej. Przy stosowanym nastawie powiększenia 30x oznaczało to, że każdy punkt obrazu reprezentuje rzeczywisty wymiar około 2,76 μm .

Przeprowadzenie pomiarów wymagało wygładzenia badanej powierzchni próbki. Na wygładzoną powierzchnię naniesiono tusz o wybranym kolorze, stanowiący tło do analizy obrazu, oraz wypełniono pustki powietrzne pastą cynkową. Szczegółowe aspekty automatycznej analizy obrazu zgładów betonowych zostały przedstawione w pracy [30],[144]. Badanie przeprowadzono na 2 próbkach każdego z badanych betonów, tak aby łączna długość linii trawersowej osiągnęła długość 2400 mm.

Pomiar w przypadku metody trawersowej polega na określeniu rozkładu wielkości porów na podstawie analizy rozkładu cięciw porów powietrznych przeciętych linią trawersy. Na tej podstawie poszczególne cięciwy zaklasyfikowane zostają do odpowiednich klas długości. Strukturę porów powietrznych określają metodami stereologicznymi zgodnie z wprowadzonymi w normie ASTM C457 [N1] i PN-EN 480-11 [N22] oznaczeniami, opisuje się przez podanie następujących parametrów:

- całkowita zawartość powietrza (A) [%],
- powierzchnia właściwa porów powietrznych (α) [1/mm] – rozumiana jako stosunek powierzchni porów do ich objętości,
- wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych (\bar{L}) [mm],
- zawartość mikroporów o średnicy poniżej 300 μm (A_{300}) [%].

Wartość wskaźnika rozmieszczenia porów obliczono za pomocą wzorów 11 i 12:

- przypadek pierwszy, gdy $R \leq 4,342$, to:

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N}, \quad (10)$$

- przypadek drugi, gdy $R \geq 4,342$, to:

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} [1,4 (1 + R)^{1/3} - 1]. \quad (11)$$

Pozostałe wartości zostały wyliczone za pomocą wzorów 13-15:

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a}, \quad (12)$$

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}}, \quad (13)$$

$$R = \frac{P}{A}, \quad (14)$$

gdzie:

R – stosunek zaczyn/powietrze;

P – procentowa zawartość zaczynu cementowego w kompozycie cementowym [%];

T_{tot} – całkowita długość linii trawersowej [mm];

T_a – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez pory powietrzne [mm];

A – całkowita zawartość powietrza [%];

N – liczba zarejestrowanych cięciw.

Rozkład porowatości kapilarnej oznaczony metodą porozymetrii rtęciowej

Metoda porozymetrii rtęciowej służy do oceny porowatości kapilarnej materiałów w oparciu o zależność Washburna [129] (wzór 1 str. 20). Do wnikanania rtęci do układu porów potrzebne jest ciśnienie hydrostatyczne p_1 , większe niż ciśnienie par w porach (nad meniskiem) p_0 . Różnica ciśnień $\Delta p = p_1 - p_0$ potrzebna do wtłoczenia rtęci do porów jest odwrotnie proporcjonalna do promienia porów r .

Badania wykonano w Politechnice Krakowskiej w porozymetrze firmy Quantachrome POREMASTER w zakresie generowanego ciśnienia od próżni do 60 kPa, umożliwiając ocenę dystrybucji wielkości porów w zakresie średnic ekwiwalentnych od 3 nm do 950 μm .

Badanie zostało wykonane na próbkach odwierconych z formowanych próbek sześciennych po uprzednim odcięciu powierzchni zacieranej. Wymiary próbek: średnica 14 mm, wysokość 25 mm. Na podstawie MIP wyznaczono następujące charakterystyki układu porów w materiale:

- całkowita objętość porów (V_t) stanowiąca łączną objętość wtłoczonej rtęci podczas badania w przeliczeniu na jednostkę masy próbki [cm^3/g],
- udział procentowy porów w wybranych przedziałach średnic: 0-10 nm; 10-100 nm; 100-1000 nm; 1-10 μm ; 10-100 μm ; 100-1000 μm ,
- krytyczna średnica porów (r_k) stanowiący najliczniejszą grupę porów kapilarnych, która zapewnia największy transport rtęci w sieci połączonych porów [1],
- średnia średnica poru (r_{ave}) stanowiący średnicę poru odpowiadającą połowie całkowitej porowatości.

Badania TG i DTA

Badania zaczynów cementowych wykonano w urządzeniu do analizy termicznej przedstawionym w Rozdziale 5.1 stosując te same ustawienia. Badania przeprowadzono w Instytucie Techniki Budowlanej.

Do przygotowania próbek wykorzystano zalecenia zawarte w instrukcji ITB 357/98 [N7]. Próbki stwardniałych zaczynów cementowych po 180 dniach dojrzewania były suszone w temperaturze 35°C, a następnie kruszone w moździerzu do uziarnienia poniżej 45 µm. Z uśrednionej próbki została pobrana naważka do badań termicznych.

Zastosowanie metody analizy termicznej pozwoliło na ilościowe oszacowanie zawartości wody związanej w produktach hydratacji oraz węgla wapnia. Uzyskanie informacji o zawartości powyższych składników związane było z wyznaczeniem umownych granic występowania poszczególnych efektów termicznych. Dlatego przyjęto następujące kryteria ich identyfikacji:

- Ubytek masy w zakresie temperatury 20-400°C stanowiła woda związana w produktach hydratacji, takich jak faza C-S-H, uwodnione glinosiarczany, glinianożelaziany wapnia. Efekty termiczne pochodzą głównie z rozkładu żelowych produktów hydratacji takich jak uwodnione krzemiany wapnia stąd przyjęto oznaczenie H_{CSH} .
- Ubytek masy w zakresie temperatury 400-500°C stanowi głównie woda związana w wodorotlenku wapnia, natomiast pozostałą część ubytku masy stanowi woda związana w uwodnionych krzemianach i glinianach wapnia. W przybliżeniu utratę masy w omawianym zakresie temperatury będzie traktowany jako ubytek związany jedynie z rozkładem wodorotlenku wapnia, oznaczonym H_{CH} . Oznaczenie zawartości wodorotlenku wapnia w zaczynie oparte było na założeniu, że cały $Ca(OH)_2$ ulega rozkładowi w zakresie temperatur 400-500°C, zgodnie z reakcją (15):



Na podstawie stechiometrii reakcji chemicznej obliczono zawartość wodorotlenku wapnia w badanej próbce zaczynu cementowego.

- Ubytek masy w zakresie temperatury 500-1000°C stanowi głównie rozkład węgla wapnia, natomiast niewielką część ubytku masy stanowi woda związana w uwodnionych krzemianach i glinianach wapnia. W przybliżeniu utrata masy w omawianym zakresie temperatury będzie traktowana jako ubytek związany jedynie z rozkładem węgla wapnia, oznaczonym H_{CC} , zgodnie z reakcją (16):



Na podstawie stechiometrii reakcji rozkładu obliczono zawartość występującego węgla wapnia w badanej próbce zaczynu cementowego.

Rentgenowska analiza dyfrakcyjna (XRD)

Badania metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej wykonano zgodnie z opisem w Rozdziale 5.1 stosując te same ustawienia urządzenia pomiarowego. Próbki stwardniałych zaczynów cementowych po 180 dniach dojrzewania były suszone w temperaturze 35°C, a następnie kruszone w moździerzu do uziarnienia poniżej 45 µm. Z uśrednionej próbki

została pobrana próbka proszkowa do badań XRD. Badanie wykonano w Instytucie Techniki Budowlanej.

Morfologia produktów hydratacji

Analizę wykonano w mikroskopie skaningowym Zeiss-SUPRA, opisanym w Rozdziale 5.1, stosując takie same ustawienia urządzenia. Badane próbki stanowiły przełamy kompozytów uzyskane w wyniku rozłupywania uformowanych kostek. Przełam o wymiarach powierzchni 30x30 mm został pokryty warstwą węgla o grubości około 10 nm w urządzeniu Baltec SCD 005. Badania przeprowadzono w Instytucie Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk. Za pomocą metody badawczej określano:

- występowanie porów powietrznych oraz ich wypełnienia produktami hydratacji,
- defekty strefy kontaktowej kruszywo-zaczyn w postaci spękań,
- obecność nieprzereagowanych lub częściowo przereagowanych ziaren *PLW*.

Szybkość podciągania kapilarnego wody

Pomiar podciągania kapilarnego wody został przeprowadzony na próbkach-odwiertach o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm. Powierzchnia boczna próbek walcowych została zaizolowana przed wnikaniem wilgoci za pomocą żywicy epoksydowej. Następnie zaizolowane walce zostały wysuszone w temperaturze 35°C przez okres 10 dni. Po suszeniu walce zostały zanurzone jedną z niezaizolowanych powierzchni w wodę na około 3 mm. Pomiar ilości zaabsorbowanej wody odbywały się przez pomiar zmian masy próbek z dokładnością do 0,01 g w okresie 7 dni od początku badania. Badanie przeprowadzono w temperaturze 22-24°C. Harmonogram pomiarów zakładał pomiary co 1 godzinę przez pierwsze 8 godzin badania. Następnie pomiary odbywały się w odstępach 24 godzinnych od początku badania do 4 doby badania. Ostatni pomiar został wykonany po 7 dniach podciągania kapilarnego. Warunki przeprowadzenia badania, suszenia próbek oraz częstotliwości pomiarów zostały założone przez autora rozprawy. Na podstawie badania podciągania kapilarnego wyznaczono współczynnik absorpcji wody za pomocą wzoru (17):

$$I = \frac{m_k}{a \cdot d}, \quad (17)$$

gdzie:

I – współczynnik absorpcji [mm];

m_k – zmiana masy próbki w czasie t [g];

a – powierzchnia zanurzona w wodzie [mm²];

d – gęstość wody [g/mm³].

Na podstawie zależności współczynnika absorpcji wody od czasu podciągania kapilarnego określono:

- całkowitą masę zaabsorbowanej wody (m_{pk}),
- początkowa szybkość absorpcji wody (S_{pk}), stanowiąca współczynnik kierunkowy przybliżenia liniowego początkowego okresu podciągania kapilarnego (do 8 godzin),

- czas zmiany szybkości nasycania porów kapilarnych (T_{pk}) stanowiący początek odstępstwa od proporcjonalnego przyrostu współczynnika absorpcji w funkcji pierwiastka z czasu,
- wtórna szybkość absorpcji wody (W_{pk}) stanowiąca współczynnik kierunkowy przybliżenia liniowego okresu podciągania kapilarnego po czasie T_{pk} do końca badania.

Wyznaczone parametry stanowiły średnią arytmetyczną z pomiarów przeprowadzonych na trzech próbkach każdej serii.

Szybkość migracji jonów chlorkowych

Do określenia odporności betonów na wnikanie jonów chlorków zastosowano przyspieszoną metodę migracji jonów chlorkowych, opisaną w normie NT Build 492 [N8]. Współczynnik migracji jonów chlorkowych (D_{nssm}) określony został przy nieustalonym przepływie strumienia chlorków, wywołanym zewnętrznym polem elektrycznym. Do badań zastosowano próbki o średnicy 100 mm i wysokości ok. 50 mm. Każdorazowo badanie wykonano na trzech próbkach danej serii betonów.

Kryteria oceny współczynnika migracji jonów chlorkowych w betonach nie są jeszcze ujęte w normach. Tang [122] zaproponował kryteria oceny odporności betonu na przenikanie jonów chlorkowych przedstawione w Tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Ocena odporności betonu na wnikanie jonów chlorkowych [122]

Współczynnik migracji	Odporność na wnikanie jonów chlorkowych
$<2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Bardzo dobra
$2-8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Dobra
$8-16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Dopuszczalna
$>16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Niedopuszczalna

5.2.3. Odporność na cykliczne zmiany temperatury

Mrozoodporność wewnętrzna

Badania mrozoodporności wewnętrznej wykonano na podstawie metody opisanej w Raporcie Technicznym CEN/TR 15177 [N5], opracowanym na podstawie normy austriackiej ÖNORM B 3303 [N9] oraz rekomendacji RILEM TC 176 IDC [104]. Jako miarę degradacji właściwości betonów przyjęto względną zmianę rezonansowego współczynnika sprężystości (E_d). Badanie wykonano na próbkach o wymiarach 100x100x500 mm, które były naprzemiennie zamrażane w powietrzu i rozmrażane w wodzie. Do wykonania badania zastosowano komorę klimatyczną sterowaną mikroprocesorowo. Badania przeprowadzono zgodnie z założeniami normy PN-88/B-06250 [N11] odnośnie do badania mrozoodporności zwykłej (Tablica 5.2). Definiowane przez normę [N11] warunki cyklicznego zamrażania i rozmrażania są bardzo ogólne, stąd na Rysunku 5.1 przedstawiono rzeczywiste zmiany temperatury w czasie komorze.

Po określonej liczbie cykli zamrażania-rozmrażania próbki były wyjmowane z komory klimatycznej. Następnie w sposób nieniszczący określono E_d poprzez pomiar częstości drgań rezonansowych belki przy użyciu urządzenia GrindoSonic MK5. Zakładając, że zmiana E_d jest proporcjonalna do uszkodzeń wewnętrznych kompozytu. Wyznaczono stosunek E_d po

określonej liczbie cykli zamrażania i rozmrażania w odniesieniu do wartości początkowej (przed zamrażaniem). Na podstawie CEN/TR 15177 [N5] definiuje się względny dynamiczny współczynnik sprężystości RDM_n (ang. *Relative Dynamic Modulus of Elasticity*) w sposób następujący (wzór 18):

$$RDM_n = \frac{E_d(n)}{E_d(0)}, \quad (18)$$

gdzie:

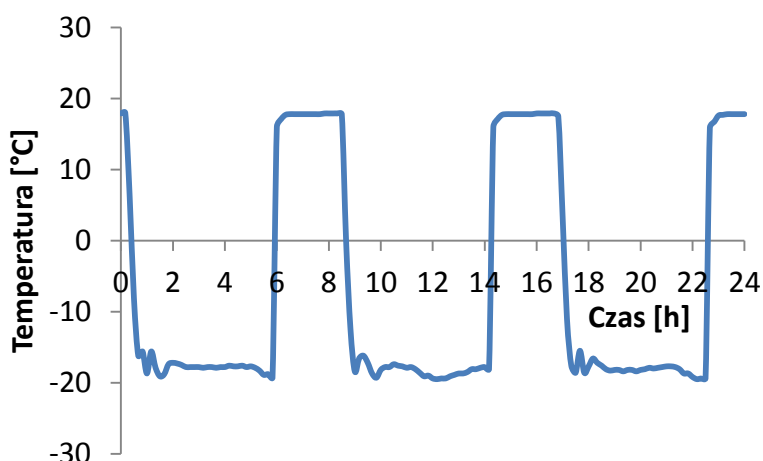
n – oznacza pomiar po n cyklach zamrażania i rozmrażania;

0 – oznacza pomiar wyjściowy (przed zamrażaniem).

Pomiary dynamicznego współczynnika sprężystości wykonano przed włożeniem próbek do komory, a następnie po 100 i 150 cyklach zamrażania i rozmrażania.

Tablica 5.2. Warunki cyklicznego zamrażania i rozmrażania betonów w badaniu mrozoodporności zwykłej [N11]

Środowisko	Etap cyklu	Temperatura [°C]	Czas [h]
Powietrze	Zamrażanie	-18±2	minimum 4
Woda	Rozmrażanie	18±2	2-4

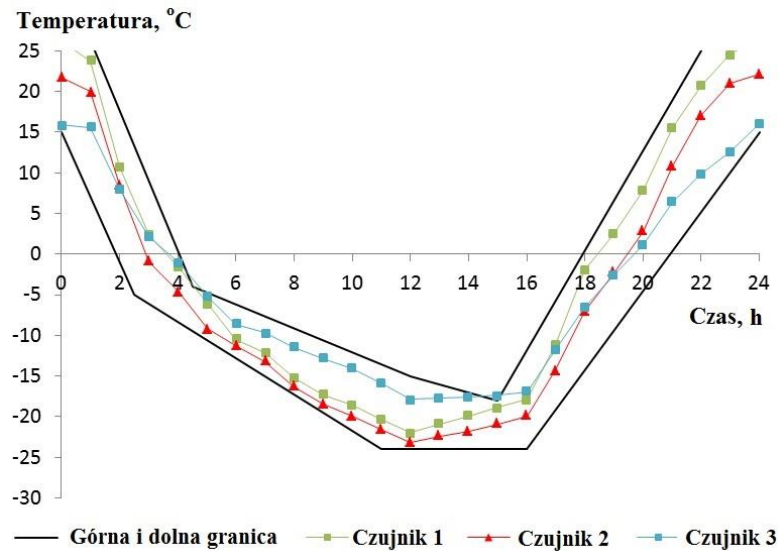


Rys. 5.1. Przykład cyklicznych zmian temperatury w komorze klimatycznej (czujnik umieszczony na powierzchni próbki)

Odporność na powierzchniowe łuszczenie w obecności środków odładzających

Spośród znanych metod badawczych (Tablica 5.3.) wybrano „*slab test*”. Badanie polega na cyklicznym zamrażaniu i odmrażaniu próbek narażonych na powierzchniowe oddziaływanie roztworu soli odładzających zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9-*slab test* [N10] w komorze klimatycznej VT 3050 firmy Vötsch.

Pomiar temperatury roztworu $NaCl$ przeprowadzono za pomocą termopar, niezależnie od pomiaru temperatury w komorze klimatycznej. Przykładowy wykres przebiegu temperatury w czasie jednego wybranego cyklu przedstawiono na Rysunku 5.2. Stwierdzono, że we wszystkich przypadkach spełnione zostały wymagania normowe i nie przekroczono granicznej temperatury.



Rys. 5.2. Przykład zmian temperatury w komorze klimatycznej do badań powierzchniowego złuszczenia (czujniki umieszczone w 3% roztworze NaCl na powierzchni próbki)

Badanie wykonano w dwóch terminach: standardowo po 28 dniach dojrzewania oraz po 90 dniach dojrzewania. W przypadku badania próbek określanych w pracy jako dojrzewające 28 dni – po 7 dniach dojrzewania próbka zostaje wyjęta z wody i umieszczona w komorze. Natomiast w przypadku próbek określanych w pracy jako dojrzewające 90 dni wyjęcie z wody następowało po 69 dniach dojrzewania. Następnie cykl przygotowania przebiegał w sposób opisany w normie, a próbka przebywała w komorze klimatycznej do 90 dnia dojrzewania.

Jako badaną powierzchnię próbki stosowano powierzchnię ciętą zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9-*slab test* oraz powierzchnię boczną próbki (od strony ściany formy) nazywaną w rozprawie „formowaną”. Określanie masy złuszczonego materiału odbywało się z dokładnością do 0,1 g po 7, 14, 28, 42 i 56 cyklach zamrażania i rozmrażania. Masę złuszczeń przypadającą na jednostkę powierzchni próbki wyznaczono według wzoru (19):

$$S_n = \frac{m_n}{A_s}, \quad (19)$$

gdzie:

S_n – masa złuszczeń przypadająca na jednostkę powierzchni [g/mm^2];

m_n – łączna masa złuszczeń po n cyklach [g];

A_s – pole powierzchni ekspozycyjnej na działanie mrozu i roztworu soli [mm^2].

Pomiar masy złuszczonego materiału w funkcji liczby cykli temperaturowych służy do wyznaczenia szybkości ubytku masy. Jako wynik miarodajny na ogół podaje się masę złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania i odmrażania w kilogramach odniesioną do powierzchni próbki (kg/m^2). Na tej podstawie klasyfikuje się odporność kompozytu do jednej z czterech kategorii podanej poniżej:

- odporność bardzo dobra: $m_{56} \leq 0,10 \text{ kg}/\text{m}^2$,
- odporność dobra: $m_{56} \leq 0,20 \text{ kg}/\text{m}^2$
lub $m_{56} < 0,50 \text{ kg}/\text{m}^2$ i $m_{56}/m_{28} \leq 2$,

Tablica 5.3. Zestawienie najczęściej stosowanych metod badania powierzchniowej odporności betonu na działanie ujemnej temperatury oraz polska metoda przyspieszona, na podstawie [67]

Parametry	ASTM C 672	SS 137244 metoda Borås	PKN-CEN/TS 12390-9 „Slab test”	PKN-CEN/TS 12390-9 “CF/CDF-test”	PKN-CEN/TS 12390-9 „Cube test”**
Prędkość zamrażania	const. -17,8 (±2,8)°C przez 16÷18 h	+20°C do -4°C 5,3°C/h -4°C do -18°C 1,9°C/h	+20°C do -4°C 8°C/h -4°C do -20°C 1,2°C/h	+20°C do -20°C tj. 10°C/h przez 4h -20°C przez 4h	+20°C do 0°C 10°C/h 0°C do -15°C 1,25°C/h
Prędkość rozmrażania	const. +23 (±1,7)°C przez 6÷8 h	-18°C do +20°C 4,8°C/h	-20°C do 20°C 8°C/h	-20°C do +20°C tj. 10°C/h przez 4h	-15°C do +20°C 20°C/h
Temperatura maksymalna	+23 (±1,7)°C	+20 (±4)°C	+20 (±4)°C	+20 (±0,5)°C	+20 (±2)°C
Temperatura minimalna	-17,8 (±2,8)°C	-18 (±2)°C	-20 (±2)°C	-20 (±0,5)°C	-15 (±2)°C
Punkt pomiaru temperatury	-	środek cieczy na pow. próbki	środek cieczy na pow. próbki	temp. cieczy w wannie	środek "próbki świadka"
Ekspozycja	jedna płaszczyzna (od góry)	jedna płaszczyzna (od góry)	jedna płaszczyzna (od góry)	jedna płaszczyzna (od dołu)	cała próbka
Ciecz badawcza	6 mm warstwa 4% roztworu CaCl ₂	3 mm warstwa 3% roztworu NaCl	3 mm warstwa 3% roztworu NaCl	10 mm warstwa 3% roztworu NaCl	10 mm warstwa wody lub 3% roztworu NaCl
Liczba cykli zamr.-rozmr.	50	56 lub 112	56	56/28***	56
Czas trwania jednego cyklu (godz.)	24	24	24	12	24
Częstotliwość badań	po 5, 10, 15, 25, 50 cyklach	po 7, 14, 28, 42, 56 cyklach	po 7, 14, 28, 42, 56 cyklach	po 14,28,42,56/4,6,14,28 *** cyklach	po 7, 14, 28, 42, 56 cyklach
Badane parametry	ocena wizualna ¹⁾	ubytek masy	ubytek masy	ubytek masy	ubytek masy
Liczba próbek	≥2	≥5	≥4	≥5	≥4
Wymiary próbek	badana powierzchnia > 460 cm ² głębokość próbki > 75 mm np.150x150x75 mm	badana powierzchnia >500cm ² np. 150x150x75 mm lub 150x150x150 mm	150x150x50 mm	150x150x75 mm	100x100x100 mm
Czas przechowywania w formie (dni)	1	1	1	1	1
Czas przechowywania w wodzie (dni)	13	6	6	6	6
Czas przechowywania w powietrzu (dni)	14	14	21	21	20
Liczba dni do rozpoczęcia badania	28	21	31	28	28
Całkowity czas badania (dni)	78	77÷133	87	35	76

¹⁾wizualna ocena od 0 do 5: 0 – brak łuszczenia; 1 – nieznaczne łuszczenie, (max. 3,2 mm głębokości, niewidoczne kruszywo grube); 2 – łuszczenie przechodzące od nieznacznego do średniego; 3 – średnie łuszczenie (zaczyna być widoczne kruszywo grube); 4 – łuszczenie przechodzące od średniego do poważnego; 5 – poważne łuszczenie (kruszywo grube jest widoczne na całej powierzchni)

** Metoda dotyczy zarówno badania odporności na powierzchniowe łuszczenie jak i badania wewnętrznej mrozoodporności

***odpowiednio dla testu CF i CDF

- odporność dopuszczalna: $m_{56} \leq 1,00 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} \leq 2$,
- odporność niedopuszczalna: $m_{56} > 1,00 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} > 2$.

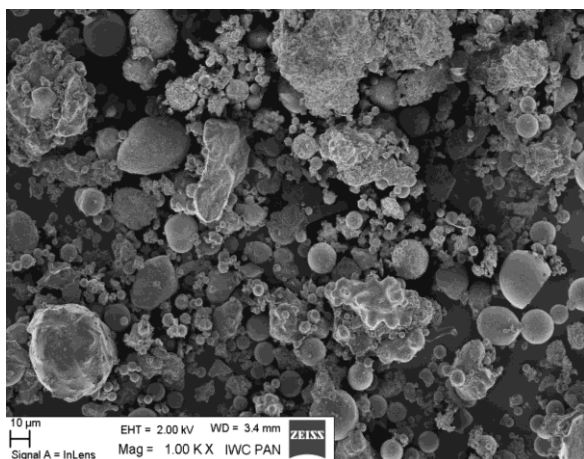
Kategorie klasyfikacji pochodzą z normy szwedzkiej [N26]. Dotyczą zarówno szybkości narastania ubytku masy, jak też granicznego ubytku masy z powierzchni próbki.

6. Wyniki charakterystyki popiołów lotnych wapiennych

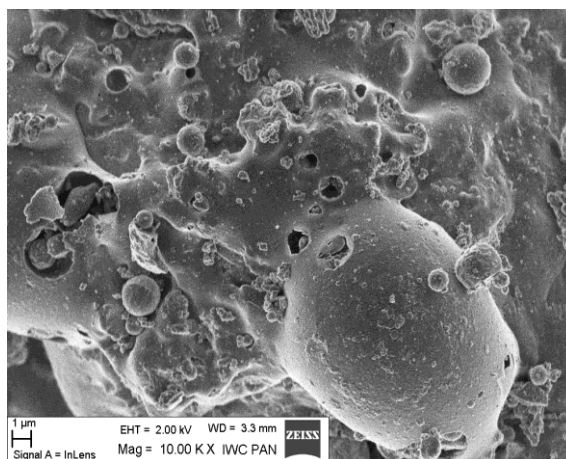
6.1. Morfologia ziaren

Obserwacjom w mikroskopie skaningowym poddano próbki *PLW* oznaczone P1, P2, P3 (Rys. 6.1-6.6). Obserwując próbki popiołów zwrócono szczególną uwagę na morfologię wyróżnionych składników i ich wielkość. Wszystkie obrazy badanych popiołów zostały zamieszczone w Załączniku II.

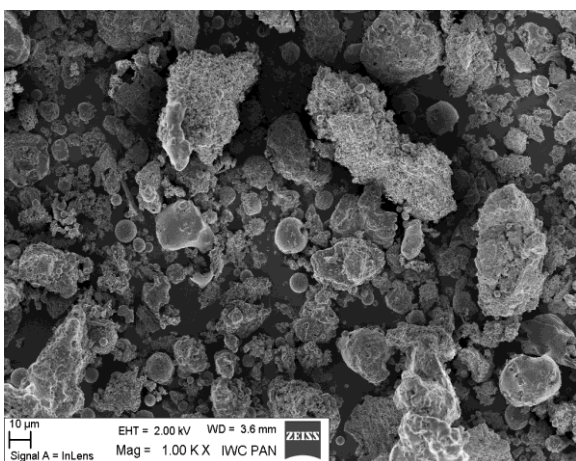
Próbka popiołu P1 zawiera ziarna o kształcie kulistym o dominującej średnicy 1-20 μm . Występują aglomeraty ziaren kulistych i nieregularnym kształcie, przeważnie większe od cząstek kulistych, o wielkości w granicach od 60 do 100 μm (Rys. 6.1 i 6.2).



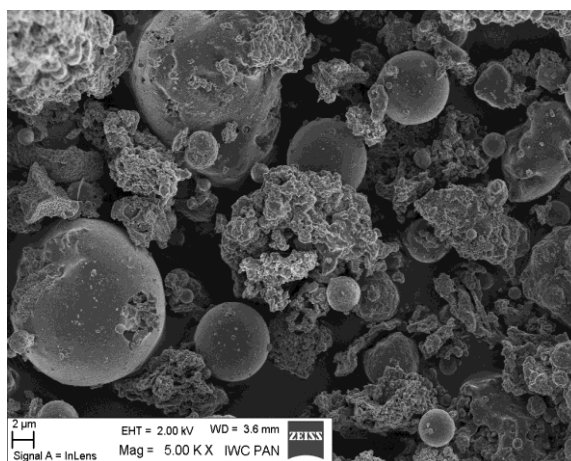
Rys. 6.1. Zdjęcie z SEM popiołu P1 – ziarna kuliste i aglomeraty drobnych cząstek o kształcie nieregularnym i średnicy do 100 μm



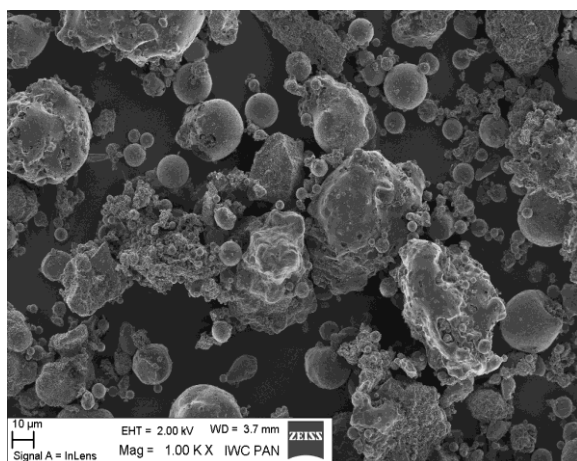
Rys. 6.2. Zdjęcie z SEM popiołu P1 – powierzchnia aglomeratów ziaren kulistych o nieregularnych kształtach (widoczne 1-3 μm ziarna kuliste)



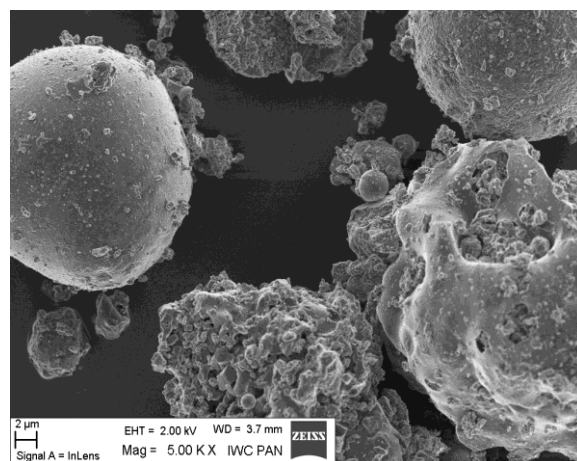
Rys. 6.3. Zdjęcie z SEM popiołu P2 – ziarna kuliste i aglomeraty drobnych cząstek o kształcie nieregularnym i średnicy do 70 μm



Rys. 6.4. Zdjęcie z SEM popiołu P2 – gładka powierzchnia cząstek kulistych w porównaniu z agregatami



Rys. 6.5. Zdjęcie z *SEM* popiołu P3
– cząstki kuliste i aglomeraty nieregularnych
ziaren



Rys. 6.6. Zdjęcie z *SEM* popiołu P3
– ziarna kuliste o gładkiej powierzchni
i nieregularne aglomeraty ziaren

Próbka popiołu P2 zawiera głównie ziarna o kształcie kulistym i dominującej średnicy 1-30 μm , oraz aglomeraty ziaren kulistych i o nieregularnym kształcie, przeważnie większe od cząstek kulistych, o średnicy w granicach od 40 do 60 μm (Rys. 6.3 i 6.4). Wzajemne proporcje rodzajów ziaren zbliżone do popiołu P1. Próbka popiołu z węgla brunatnego P3 zawiera ziarna o kształcie kulistym i dominującej średnicy 10-60 μm . Występują aglomeraty ziaren kulistych i o nieregularnym kształcie, przeważnie większe od ziaren kulistych, o średnicy w granicach do 40-80 μm (Rys. 6.5 i 6.6). Porównując popiół P3 z popiołami P1 i P2 widoczna jest większa ilość ziaren kulistych, niż ziaren o nieregularnym kształcie.

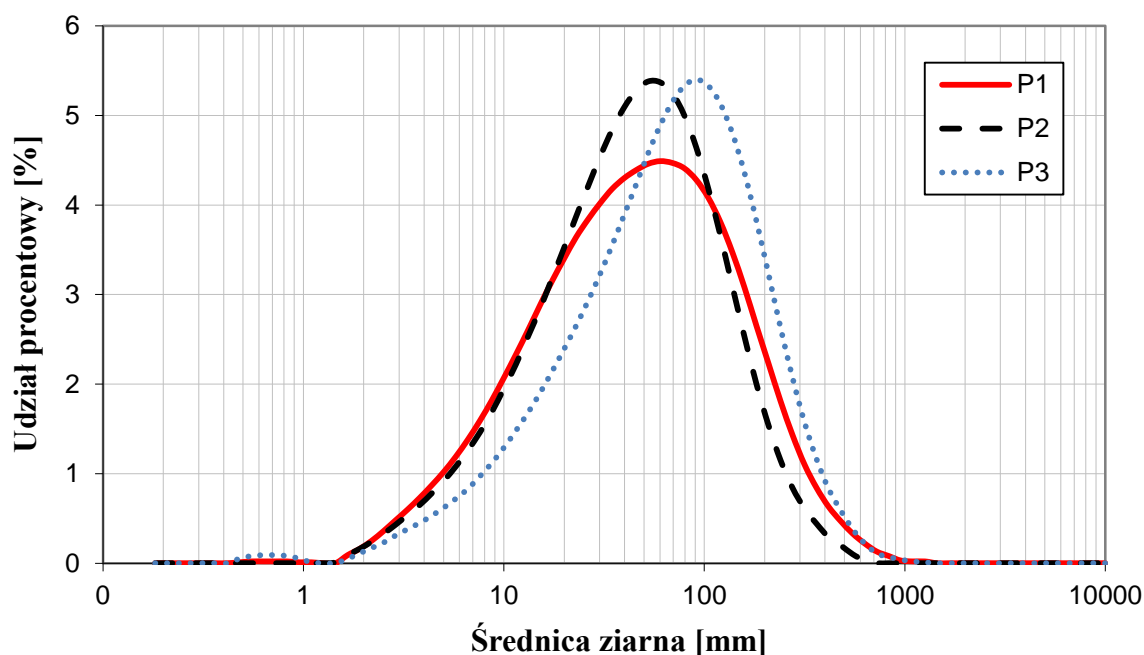
Z obserwacji w *SEM* wynika, że badane próbki *PLW* składają się głównie z ziaren o nieregularnych kształtach, natomiast ziarna kuliste stanowią mniejszość we wszystkich badanych popiołach. Wzajemne proporcje zawartości ziaren o nieregularnych kształtach i ziaren kulistych różnią się pomiędzy badanymi *PLW* (Tablica 6.1).

Tablica 6.1. Podsumowanie wyników obserwacji ziaren *PLW* w *SEM*

Badana cecha	Oznaczenie popiołu		
	P1	P2	P3
Morfologia ziaren	Ziarna kuliste o gładkiej powierzchni. Ziarna o nieregularnych kształtach i rozwiniętej powierzchni. Aglomeraty ziaren – przeważnie o nieregularnych kształtach.		
Zakres średnic ziaren kulistych [μm]	1-20	1-30	10-60
Zakres średnic ziaren nieregularnych [μm]	60-100	40-60	40-80
Zakres średnic aglomeratów ziaren [μm]	30-80	20-50	60-80

6.2. Analiza składu ziarnowego

Pobrane popioły charakteryzowały się zróżnicowanym uziarnieniem (Rys. 6.7).

Rys. 6.7. Rozkład wielkości ziaren *PLW* oznaczonego P1, P2, P3

Na podstawie badania granulometrii laserowej stwierdzono, że średnica ziaren zawierała się w przedziale od 0,5 μm do ponad 1 mm (w przypadku popiołu P3). Najliczniejszą grupę ziaren stanowiły ziarna o średnicach z przedziału od 5 μm do 400 μm . Średnica dominujących ziaren była zbliżona w przypadku popiołów P1 i P2, a średnica najliczniejszych ziaren wynosiła 60 μm . Jednakże ich udział względny wynosił odpowiednio 4,5% i 5,4% w przypadku popiołu P1 i P2. Rozkład ziarnowy popiołu P3 różnił się od popiołów P1 i P2 średnicą ziaren dominujących, która wynosi około 90 μm . Charakterystyczne średnice ziaren $d(0,5)$ i $d(0,9)$ opisujące rozkład granulometryczny w przypadku popiołu P3 są większe o 10-30% od pozostałych popiołów (Tablica 6.2). Szczegółowe wyniki badań granulometrii laserowej zostały zamieszczone w Załączniku III.

Tablica 6.2. Charakterystyka wielkości ziaren popiołów P1, P2, P3

Charakterystyczna średnica ziaren [μm]	Oznaczenie popiołu		
	P1	P2	P3
$d(0,5)$ *)	50	48	80
$d(0,9)$ **)	201	156	237

*) – oznaczenia: średnica ziarna, poniżej której występuje 50% objętości popiołu

**) – oznaczenia: średnica ziarna, poniżej której występuje 90% objętości popiołu

6.3. Skład fazowy

Do badań składu fazowego popiołów lotnych zastosowano analizę termiczną i rentgenowską analizę dyfrakcyjną. Badania zostały wykonane na próbkach popiołów oznaczonych P1, P2, P3.

Strata masy oznaczona za pomocą analizy termicznej w atmosferze powietrznej do 1000°C próbek *PLW* mieści się w granicach od 1,2 do 3,4% (Tablica 6.3). Strata masy do 400°C, zwykle przypisywana wodzie zaabsorbowanej na ziarnach popiołu, jest niewielka i wynosi od 0,2% do 0,7%. Zmiana masy związana z utlenianiem się pozostałości

niespalonego węgla wynosi od 0,9% do 2,4%, czemu towarzyszy odpowiedni efekt egzotermiczny o temperaturze T_m w granicach od 479°C do 498°C. Udział węglanu wapnia jest nieznaczny. W próbkach P1 i P3 - zawiera się w granicach do 0,6%, natomiast ponad dwukrotnie większy udział obserwowany jest w przypadku popiołu P2. W przypadku popiołu P3 zmiana masy związana z utlenianiem się pozostałości niespalonego węgla zmniejsza się o kilkadziesiąt procent w porównaniu od pozostałych *PLW*. Prażeniu niespalonego węgla w popiele P3 towarzyszą aż dwa efekty egzotermiczne o temperaturze T_m : 493°C i 593°C. Należy zauważyć, że całkowita strata prażenia (do 1000°C) w badanych *PLW* nie przekracza 3,4%. Natomiast strata masy wynikająca ze spalania węgla stanowi około 50% całkowitych strat prażenia.

Tablica 6.3. Wyniki analizy termicznej próbek popiołów P1, P2 i P3

Cecha badana	Atmosfera w piecu		
	Powietrze		
	P1	P2	P3
Strata masy do 400°C [%]	0,3	0,7	0,2
Strata masy do 1000°C [%]	2,1	3,4	1,2
Strata masy związana ze spalaniem pozostałości węgla [%]	1,5	1,9	0,9
Temperatura maksimum efektu egzotermicznego na krzywej DTA, związanego ze spalaniem pozostałości węgla [°C]	498	493	493, 593
Udział węglanu wapnia [%]	0,6	1,5	0,1

Badania *XRD* zostały przeprowadzone na próbkach popiołu P1, P2, P3. Dyfraktogramy zostały przedstawione w Załączniku V (Plansza 1). W próbkach badanych metodą *XRD* wyznaczono następujące składniki krystaliczne: kwarc, anhydryt, magnetyt, hematyt, mullit, portlandyt, *CaO*, peryklaz oraz kalcyt (Tablica 6.4). Dominującymi składnikami krystalicznymi są kwarc, anhydryt i mullit. Obecność kryształów mullitu pozwala stwierdzić, że temperatura spalania pyłu z węgla brunatnego w kotle elektrowni przekroczyła 1100°C.

Tablica 6.6. Jakościowy skład fazowy próbek popiołów P1, P2, P3

Wyróżniony pik charakterystyczny składnika i nr karty wzorca JCPDS	Intensywność pików charakterystycznych I odległości międzypłaszczyznowych d					
	P1		P2		P3	
	d [Å]	I	d [Å]	I	d [Å]	I
Kwarc (5-0490)						
4,26/35	4,28343	241	4,2835	310	4,2684	382
3,343/100	3,35710	731	3,3535	734	3,3498	1478
1,817/17	1,82069	181	1,8214	178	1,8249	240
1,541/15	1,54365	146	1,5446	132	1,5427	216
Mullit (15-776)						
5,39/50	5,396	183	5,4279	229	5,4181	227
3,428/95	3,456	220	3,4231	280	3,4000	427
3,390/100	3,406	435	3,3974	324	3,3873	487
2,694/40	2,710	293	2,7000	302	2,6937	299
2,206/60	2,215	172	2,2205	168	2,2111	192
Anhydryt (6-0226)						
3,49/100	3,516	381	3,5093	379	3,5052	339
2,849/15	2,849k	442	2,8595	537	2,8568	425
2,328/30	2,3370	129	2,3394	125	2,3406	123
2,208/20	2,2157	172	2,2205	168	2,2111	192
Portlandyt (4-0733)						
4,90/74	-	-	4,9470	182	4,9252	182
2,628/100	2,653k	173	2,6270	123	2,6626	192
CaO (4-0777)						
2,788/34	2,7865	290	2,7816	274	2,7832	245
2,406/100	2,4107	405	2,4088	356	2,4038	292
Peryklaz MgO (4-0829)						
2,106/100	2,109	111	2,1090	124	2,0960	126
1,489/52	1,494	116	1,4790	99	1,4879	88
Magnetyt (19-629)						
2,552/100	2,546	146	2,5335	172	2,5488	198
2,0993/20	2,109	111	2,1090	124	2,0960	126
1,6158/30	1,613	83	1,6161	90	1,6153	82
Hematyt (24-72)						
3,686/33	3,655	162	3,7185	234	3,6761	195
2,703/100	2,710	293	2,7000	302	2,6937	299
2,519/70	2,527	133	2,5335	172	2,5245	183
Kalcyt (5-0586)						
3,035/100	3,0444	140	3,0400	170	3,0727	214

6.4. Kompatybilność z domieszką napowietrzającą

Badanie wskaźnika piany przeprowadzono, aby wyselekcjonować spośród badanych domieszek napowietrzających najbardziej efektywną w spoiwie składającym się z cementu portlandzkiego z dodatkiem *PLW*. Oznaczenie przeprowadzono z użyciem trzech rodzajów cementów portlandzkich (Tablica 4.9) różniących się głównie zawartością C_3A . Spoiwo wykonano zastępując popiołami P1, P2, P3 cement portlandzki w ilości 15%, 30% i 50% masy. Użyto sześciu domieszek o działaniu powierzchniowo czynnym (Tablica 4.10).

Na podstawie uzyskanych wyników wykreślono zależności łączące rodzaj domieszki ze składem spoiwa (Rys. 6.8).

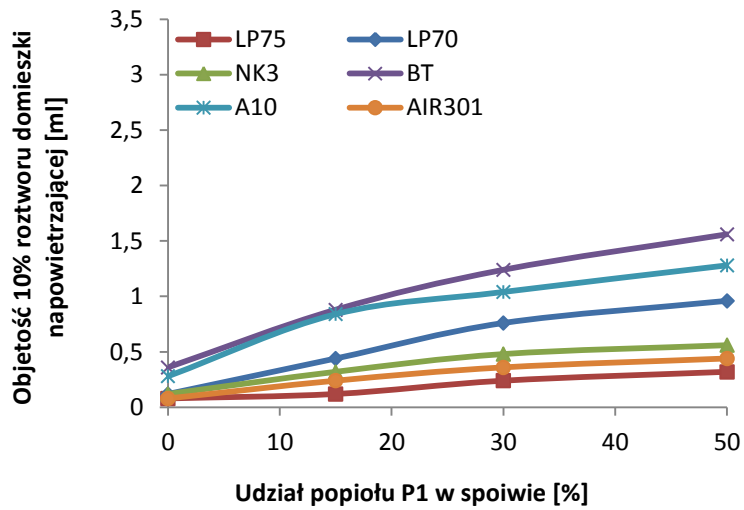
Zwiększeniu udziału *PLW* w spoiwie towarzyszy zwiększenie zawartości domieszki napowietrzającej, niezbędnej do uzyskania stabilnej piany na powierzchni naczynia pomiarowego. Zaobserwowana zależność wskaźnika piany od zawartości *PLW* miała podobny przebieg w przypadku popiołu P1 i P3. Natomiast w przypadku popiołu P2 wymagana zawartość domieszki była ponad dwukrotnie większa, niż w przypadku popiołów P1 i P3. Wynika to najprawdopodobniej z większej zawartości ziaren niespalonego węgla oraz ziaren o dużym rozwinięciu, które adsorbują większą objętość domieszki napowietrzającej. Nie zaobserwowano istotnego wpływu rodzaju cementu na objętość dozowanej domieszki napowietrzającej we wszystkich przypadkach domieszek napowietrzających.

Do oceny efektywności domieszek napowietrzających przyjęto kryterium stanowiące sumę zawartości badanych domieszek potrzebnych do uzyskania stabilnej piany we wszystkich badanych mieszankach cementowo-popiołowych. Stabilne napowietrzenie wszystkich mieszanek cement-*PLW* najmniejszą objętością domieszki napowietrzającej osiągnięto w przypadku roztworu domieszki AIR301 (Tablica 6.5).

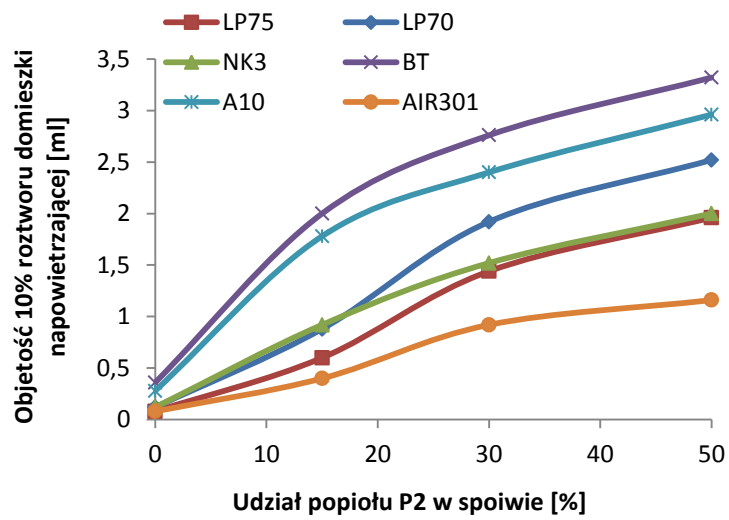
Tablica 6.5. Sumaryczna objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml] niezbędnej do utworzenia stabilnej piany we wszystkich mieszankach z popiołami P1, P2, P3

Rodzaj popiołu	Rodzaj domieszki					
	LP70	LP75	NK3	BT	A10	AIR301
P1	7,7	2,4	5,0	14,5	11,4	3,4
P2	16,5	12,8	13,3	27,2	23,5	7,2
P3	7,0	2,7	4,6	12,8	10,1	3,2
Suma	31,2	17,9	22,9	54,5	45,0	13,8

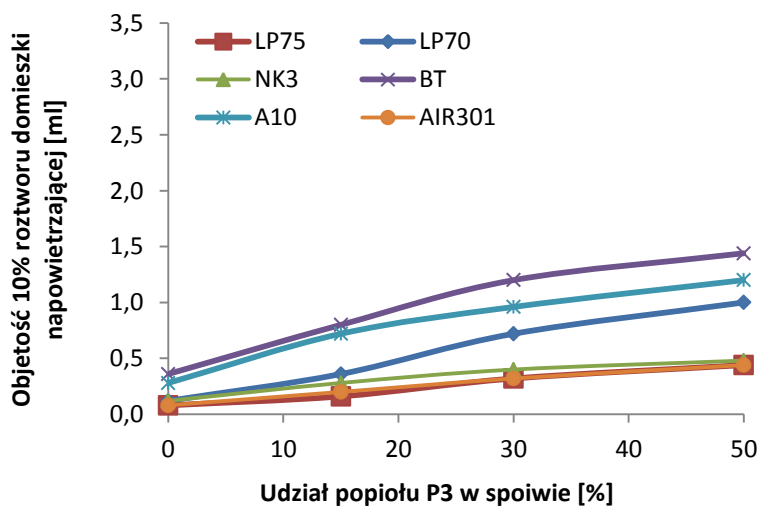
Zaobserwowano liniową zależność między udziałem *PLW* w spoiwie i objętością domieszki AIR301, niezbędną do uzyskania stabilnej piany. Udział domieszki napowietrzającej zwiększa się proporcjonalnie do zawartości *PLW* w spoiwie. Zależność jest charakterystyczna w przypadku wybranej domieszki napowietrzającej AIR 301 (Rys. 6.9). Szczegółowe wyniki wskaźnika piany podano w Załączniku VI.



(a)

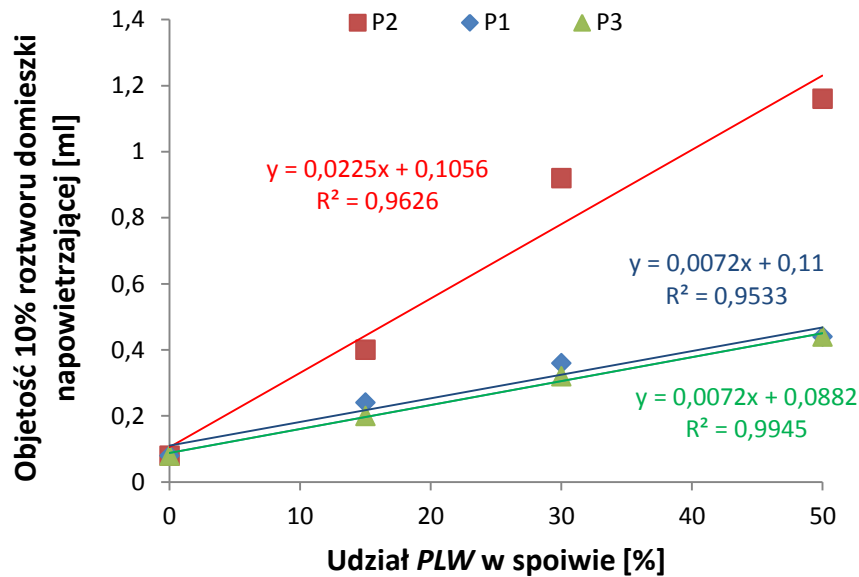


(b)



(c)

Rys. 6.8. Wpływ rodzaju domieszki chemicznej na uzyskanie stabilnej piany w spoiwie zawierającym cement CM-2 oraz PLW: (a) popiół P1; (b) popiół P2; (c) popiół P3



Rys. 6.9. Wpływ rodzaju *PLW* na uzyskanie stabilnej piany w spoiwie zawierającym cement CM-9 oraz domieszkę napowietrzającą AIR301

6.5. Podsumowanie wyników badań

Charakterystyka badanych popiołów wykazała znaczną zmienność składu chemicznego *PLW* pobranych w pięciu różnych terminach. Najistotniejsze zmiany zostały zaobserwowane w przypadku zawartości SiO_2 i CaO w składzie *PLW*, sięgające odpowiednio 15% i 12% pomiędzy skrajnymi ich wartościami. Zawartość siarczanów, wolnego wapnia przekraczała wartości dopuszczalne przez normy, jednakże nie występowały znaczące wahania ich udziału pomiędzy popiołami pobranymi w różnych terminach. Należy podkreślić niewielki udział strat prażenia nie przekraczający 3,4% masy popiołu, z których około 50% stanowi niespalony węgiel.

Skład ziarnowy popiołu stanowią głównie ziarna o nieregularnych kształcie i aglomeraty ziaren o średnicach od 40-100 μm . Ziarna kuliste o gładkiej powierzchni stanowią nieznaczną część wszystkich ziaren *PLW*, a ich średnice zawierają się w przedziale od 1-60 μm . Popioły pobrane w różnych terminach wykazują zróżnicowaną średnicę ziaren. Wzrost miałości z kategorii N do udziału przekraczającego 50% koreluje ze wzrostem średnic obserwowanych ziaren popiołu w mikroskopie skaningowym. Badanie granulometrii laserowej potwierdza różnorodność uziarnienia między terminami pobrania *PLW*. Średnice ziaren badanych *PLW* zawierają się w przedziale od 1 μm do 800 μm . Największy udział ziaren wykazuje frakcja o wymiarach od 50 μm do 90 μm .

Skład fazowy badanych *PLW* pobranych w różnych terminach był zbliżony. Zidentyfikowano piki diagnostyczne pochodzące od kwarcu, anhydrytu, magnetytu, hematytu, mullitu, portlandytu, wolnego wapnia, peryklazu oraz kalcytu. Największą zawartość stanowił kwarc, anhydryt i mullit, natomiast intensywność refleksów diagnostyczne portlandytu, magnetytu, kalcytu i peryklazu była na granicy detekcji metody *XRD*. Na podstawie badań termicznych (*TG*, *DTA*) potwierdzono nieznaczący udział węgla do 1,5%.

Zwiększenie udziału *PLW* w spoiwie w badaniu wskaźnika piany było proporcjonalne ze zwiększeniem objętości domieszki napowietrzającej, niezbędną do stabilnego

napowietrzenia. W przypadku domieszki AIR301, która została wybrana jako najefektywniejsza, powyższa zależność była funkcją liniową do 50% zastąpienia cementu portlandzkiego *PLW*. Liniową zależność wykazali Stencel i inni [120] jednakże w odniesieniu do popiołów lotnych krzemionkowych. Autorzy stwierdzili, że liniowa zależność występuje tylko w przypadku popiołu krzemionkowego o niewielkiej stracie prażenia wynoszącej 1,7%.

W *PLW* występują niewielkie zawartości niespalonego węgla, które są porównywalne w badanych partiach popiołów. Stąd, aby określić przyczyny adsorpcji domieszki skupiono się na czynnikach wyróżnionych przez Donsona [34], które wpływają na stabilność napowietrzania. Analiza wykazała, że zawartość siarczanów, wolnego tlenu wapnia oraz alkaliów pomiędzy badanymi partiami popiołu była porównywalna i nie powinna wpływać na zmiany zawartości domieszki napowietrzającej w badaniu wskaźnika piany. Na tej podstawie stwierdzono, że głównym czynnikiem wpływającym na zawartość domieszki napowietrzającej w badaniu wskaźnika piany jest morfologia ziaren *PLW*. Ziarna o dużym rozwinięciu powierzchni decydowały o niekorzystnym wpływie na napowietrzanie mieszanki. Popiół o dużym rozwinięciu powierzchni wg Blaine'a (P2) wymagał ponad trzykrotnego zwiększenia objętości domieszki napowietrzającej w porównaniu z pozostałymi popiołami P1 i P3.

Celem powyższych badań było określenie właściwości *PLW* w różnych terminach poboru, tak aby ocenić jego zmienność i wytypować właściwości, które należy skorygować w kontekście wykorzystania *PLW* w betonach. Podstawowe różnice wynikają głównie ze zmiennego udziału tlenków SiO_2 i CaO oraz zmiennego kształtu i wielkości ziaren. Na podstawie powyższych badań stwierdzono, że usunięcie bądź rozkruszenie ziaren o nieregularnych kształtach przyniesie korzyści w odniesieniu do zastosowania *PLW* w napowietrzonych betonach mrozoodpornych.

7. Aktywacja popiołów lotnych wapiennych

7.1. Wybór sposobów aktywacji

Metody aktywacji

W normie PN-EN 450-1 [N21] wyróżnione są sposoby kształtowania właściwości popiołów lotnych krzemionkowych przez separację, sortowanie, przesiewanie, suszenie, mieszanie, mielenie oraz zmniejszanie zawartości węgla. Poprawa właściwości popiołów lotnych jest zazwyczaj wykonywana w przypadku niespełniania wymagań normowych, które dyskwalifikują popiół jako składnik cementów i betonów.

Najczęstszymi problemami w uzyskaniu pożądaných właściwości popiołów lotnych krzemionkowych jest duży udział strat prażenia oraz brak osiągnięcia wymaganych przez normy wskaźników aktywności. Ograniczenie udziału strat prażenia odbywa się najczęściej przez separację ziarnową popiołu. Natomiast w celu zwiększenia wskaźnika aktywności popiołów lotnych wykonuje się mielenie w młynie kulowym. Należy podkreślić, że wspomniane procesy obróbki popiołów lotnych wiążą się z dużymi wydatkami energetycznymi. Rzadszym sposobem uzdatniania popiołów lotnych jest chemiczne wzbogacanie o domieszki chemiczne pozwalające przyspieszyć proces wiązania betonu [44].

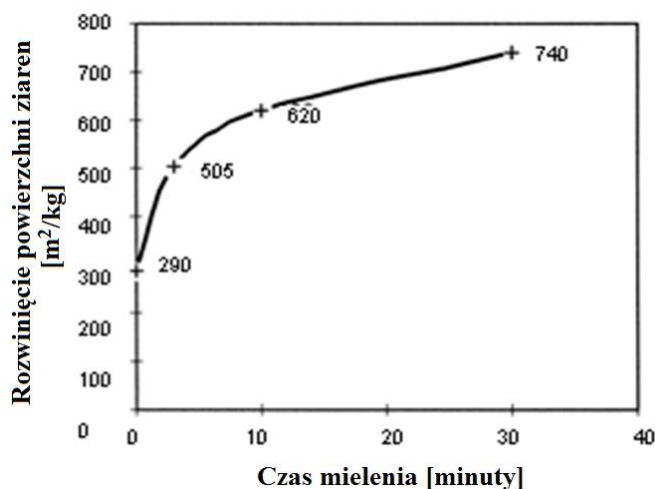
W wyniku przetwarzania popiołów lotnych można uzyskać korzystne właściwości betonów. Przykład stanowi wykorzystanie najdrobniejszych frakcji amorficznych popiołu lotnego krzemionkowego (miałkość kategoria S zgodnie z [N21]) w betonach wysokich wytrzymałości w celu poprawy właściwości reologicznych. W wyniku wprowadzenia do kompozytu cementowego drobnych amorficznych ziaren o wielkości rzędu kilku mikrometrów następuje ułatwienie pompowania mieszanki betonowej na duże wysokości. Rozwiązanie stosuje się z powodzeniem przy wznoszeniu wysokościowych konstrukcji inżynierskich. Dodatkowo drobne ziarna popiołu lotnego powodują zwiększoną szybkość narastania wytrzymałości w porównaniu do typowego popiołu lotnego krzemionkowego [114].

Efekty separacji ziarnowej popiołów lotnych krzemionkowych badali Tkaczewska i Małolepszy [125] wykorzystując selektywny pobór popiołu z różnych sekcji elektrofiltra. Uzyskany materiał wykazywał nie tylko różnorodne uziarnienie, ale także różnice w składzie chemicznym między poszczególnymi miejscami pobrań. Giergiczny [51] w swoich badaniach separował popioły lotne krzemionkowe i wapienne na kilka frakcji, a następnie badał właściwości poszczególnych frakcji ziarnowych. Stwierdził, że wraz ze zmianą uziarnienia *PLW* zmieniają się jego właściwości chemiczne i fizyczne. Daje to podstawę do szczegółowych badań uzdatniania *PLW* przez separację ziarnową.

Aktywacja przez mielenie ma na celu zwiększenie powierzchni reakcji chemicznej w wyniku uwolnienia drobnych ziaren szkła uwięzionych z większych sferach popiołowych oraz rozdrobnienia większych ziaren popiołu. Optymalny proces mielenia powinien być prowadzony do osiągnięcia najkorzystniejszych właściwości popiołu lub cementu przy jak najkrótszym czasie mielenia. Po przekroczeniu najkorzystniejszego czasu mielenia następuje niewielki wzrost rozwinięcia powierzchni (Rys. 7.1) [114].

Z analizy literatury wynika, że najkorzystniejsze jest uzyskanie uziarnienia popiołu lotnego o średnicach ziaren mniejszych od uziarnienia cementu. Skutkuje to poprawą właściwości reologicznych podczas wykonywania i wbudowywania mieszanki [56].

Dodatkowo zwiększa się szczelność matrycy cementowej powodując ograniczenie wnikania jonów chlorkowych [26].



Rys. 7.1. Powierzchnia właściwa cementu portlandzkiego z dodatkiem popiołów lotnych krzemionkowym (20% wag.) przed i po aktywacji mechanicznej [114]

Pozytywne skutki współmielenia klinkieru portlandzkiego z *PLW* zostały przedstawione przez Giergiczego [51]. Aktywowanie cementów z *PLW* przez krótkie mielenie powodowało zdecydowany wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonów względem betonów ze spoiwem powstałym przez mieszanie klinkieru i *PLW* (Tablica 7.1).

Tabela 7.1. Wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych z *PLW* [51]

Skład spoiwa	Wytrzymałość na zginanie [MPa]			Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
	2 dni	7 dni	28 dni	2 dni	7 dni	28 dni
Cement portlandzki o powierzchni właściwej 2920 cm ² /g	5,9	6,9	8,5	30,4	39,8	51,7
Nieaktywowany cement z dodatkiem 20% popiołu lotnego (wagowo) o powierzchni właściwej 2900 cm ² /g	2,5	4,1	7,3	11,2	19,8	33,8
Aktywowany cement poprzez 3 min. mielenia z dodatkiem 20% popiołu lotnego (wagowo) o powierzchni właściwej 5050 cm ² /g	5,5	6,3	8,3	24,5	33,9	53,4

Metody wybrane

Aby zredukować efekty naturalnej zmienności składu *PLW* wykorzystano trzy sposoby poprawy właściwości popiołów:

- separację ziarnową,
- aktywacja przez mielenie,
- aktywacja przez współmielenie z klinkierem portlandzkim.

Koncepcję separacji ziarnowej oparto na rozdzielaniu *PLW* na cztery frakcje: 0-20 μm , 20-32 μm , 32-125 μm oraz większych od 125 μm . Rozdzielenie frakcji przeprowadzono metodą separacji ziarnowej na sucho. Rozdzielone frakcje *PLW* zostały poddane szczegółowym badaniom składu chemicznego, na podstawie których dokonano selekcji materiału. Zaproponowane przez autora podział na cztery frakcje ziarnowe miał na celu określenie właściwości ziaren o najmniejszych średnicach ($< 32 \mu\text{m}$) oraz największych średnicach ($> 125 \mu\text{m}$) w odniesieniu do frakcji dominującej (32-125 μm). Na podstawie oceny składu chemicznego i morfologii ziaren popiołu w wymienionych wyżej frakcjach, dokonano selektywnej separacji ziarnowej pozwalającej poprawić jakość *PLW* w odniesieniu do wykorzystania go jako dodatku w betonach napowietrzonych.

Rozdrobnienie mechaniczne *PLW* zostało wykonane przez mielenie popiołu w młynku kulowym w czasie od 10 do 28 minut. Czas mielenia był uzależniony od zakładanego rozwinięcia powierzchni wg Blaine'a i był on wyznaczony doświadczalnie. Współmielenie *PLW* z klinkierem portlandzkim (wstępnie zmielonym) i innymi dodatkami mineralnymi doprowadziło do uzyskania cementów wieloskładnikowych (Rozdział 4.2).

Wybrane popioły lotne wapienne

Popiołami lotnymi wapiennymi wybranymi do oceny efektywności metod aktywacji były popioły oznaczone P4 i P5. Wybór popiołów został wymuszony wykorzystaniem popiołów oznaczonych P1, P2 i P3 do badań właściwości betonów przedstawionych w Rozdziale 8.

7.2. Separacja ziarnowa popiołów lotnych wapiennych

7.2.1. Skład chemiczny, fazowy i morfologia ziaren

Zakres badań obejmował wyznaczenie składu tlenkowego metodą XRF, określenie udziału strat prażenia, SO_3 , wolnego wapna oraz węgla organicznego w *PLW* po separacji ziarnowej na 4 frakcję. Wykonano obserwację ziaren popiołu w mikroskopie skaningowych z analizą *EDS* w mikroobszarach.

Najliczniejsza frakcja o wielkości ziaren 32-125 μm , stanowi 44% i 46% masy, odpowiednio w przypadku popiołu P4 i P5. Następnie frakcja 20-32 μm , stanowi 22-25% masy popiołu. Frakcje najdrobniejsza - do 20 μm oraz najgrubsza - powyżej 125 μm , mają stosunkowo niewielki udział całkowitej masy ziaren, łącznie stanowią około 30% masy wszystkich ziaren popiołów P4 i P5.

Tablica 7.2. Udział wyróżnionych frakcji *PLW* po separacji ziarnowej

Oznaczenie popiołu	Zawartość [% masy]			
	Fracje			
	I	II	III	IV
	0-20 μm	20-32 μm	32-125 μm	>125 μm
P4	16	25	44	15
P5	11	22	46	21

Zmiany składu chemicznego powstałe w wyniku rozseparowania ziaren zostały przedstawione Tablicy 7.3. Popioły P4 i P5 wykazuje zmniejszenie udziału takich tlenków jak

CaO , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , wraz ze zwiększeniem średnic ziaren. Natomiast udział tlenków takich jak SiO_2 , Al_2O_3 zwiększa się ze zwiększeniem średnicy ziaren. Udział strat prażenia we frakcji powyżej 125 μm jest około sześciokrotnie większy niż w pozostałych frakcjach ziarnowych w przypadku obydwu badanych partii *PLW*. Zawartość węgla wykazuje podobną zależność. Udział masowy SO_3 w popiołach P4 i P5 jest zdecydowanie największy w ziarnach poniżej 32 μm oraz zmniejsza się ze wzrostem wielkości ziaren *PLW*. Najbardziej zbliżone właściwości do *PLW* przed separacją ziarnową wykazuje frakcja 32-125 μm , co wynika z największego przedziału średnic ziaren. Należy zauważyć, że tendencje zmian udziału poszczególnych składników między frakcjami ziarnowymi są zbliżone w obu partiach popiołów P4 i P5.

Tablica 7.3. Skład chemiczny *PLW* po separacji ziarnowej – metoda *XRF*

Składnik	Udział [% masy]									
	P4	P4-I ^{#)}	P4-II	P4-III	P4-IV	P5	P5-I	P5-II	P5-III	P5-IV
CaO	26,0	34,8	32,9	22,8	10,6	19,1	30,0	27,4	17,9	9,03
SiO_2	40,9	31,1	33,7	44,9	54,6	47,4	34,2	38,5	50,2	57,8
Al_2O_3	19,0	17,1	17,9	21,4	21,7	20,5	19,6	19,7	21,7	20,5
Fe_2O_3	4,3	5,5	5,2	4,1	2,9	4,5	6,7	5,9	4,2	3,0
MgO	1,7	1,8	1,8	1,3	0,9	1,5	1,5	1,5	1,2	0,9
K_2O	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1
Na_2O	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
^{*)} Strata prażenia	2,1	0,9	0,9	1,1	6,2	2,7	1,0	1,1	1,0	5,8
^{**)Węgiel organiczny}	1,4	0,6	0,5	0,6	2,6	1,6	0,5	0,5	0,6	2,5
^{***)SO₃}	3,9	6,1	5,1	2,0	0,9	2,3	4,5	3,5	1,4	0,7
^{****)CaO_{wolny}}	1,1	-	-	-	-	1,0	-	-	-	-

^{#)} I, II, III, IV – frakcja ziarnowa zgodnie z oznaczeniami z Tablicy 7.2

^{*)} – straty prażenia do 1000 °C

^{**)} – metoda miareczkowania kulometrycznego

^{***)} – metoda masowa

^{****)} – metoda glikolowa

Analiza wyseparowanych ziaren *PLW* w *SEM* składała się z dwóch etapów. Na podstawie obserwacji przy różnych powiększeniach próbek *PLW* została określona morfologia ziaren oraz wzajemne proporcje wyróżnionych rodzajów ziaren (wszystkie istotne zdjęcia zamieszczono w Załączniku II. Plansze 1-8). Następnie została przeprowadzona analiza składu chemicznego w mikroobszarach charakterystycznych ziaren *PLW* frakcji o najmniejszych ziarnach (0-20 μm) i największych ziarnach (>125 μm).

Na podstawie obserwacji *SEM* stwierdzono, że we frakcjach ziarnowych mniejszych od 32 μm dominują dwa typy ziaren: aglomeraty ziaren o nieregularnych kształtach oraz ziarna kuliste (Tablica 7.5). Aglomeraty ziaren i ziarna o nieregularnych kształtach stanowią najmniejszy udział wszystkich ziaren (Rys. 7.2.a). Charakteryzują się większą średnicą od ziaren kulistych. Aglomeraty ziaren składają się z połączonych ze sobą drobnych ziaren (1-5 μm). We frakcji dominującej 32-125 μm występują zbliżona do siebie udziały ziaren

kulistych i aglomeratów ziaren, jednakże część ziaren kulistych jest porowata i chropowata (Rys. 7.2.b). Większy udział ziaren chropowatych w tej frakcji widoczny był w popiele P5. We frakcji ziarnowej powyżej 125 μm badanych *PLW* występowały głównie aglomeraty ziaren i sporadycznie ziarna ostrokrawędziste. Ziarna ostrokrawędziste w większej ilości występowały w popiele P5 (Rys. 7.3.b). Występowały porowate ziarna niespalonego węgla z obecnymi wewnątrz kulistymi ziarnami popiołu o niewielkich średnicach (Rys. 7.3.a).

Tablica 7.5. Podsumowanie obserwacji w *SEM* popiołów P4 i P5 po separacji ziarnowej

		Udział [% masy]							
		#) P4-I	P4-II	P4-III	P4-IV	P5-I	P5-II	P5-III	P5-IV
Morfologia ziaren	Kuliste gładkie	+++	+++	++	+	+++	++	+	+
	Kuliste szorstkie	+	++	++	+	+	++	++	+
	Agglomeraty ziaren	+	++	++	+++	+	++	++	+++
	Kanciaste	-	-	+	++	-	-	+	+
	Niespalony węgiel	-	-	-	+	-	-	-	+
Zakres wielkości ziaren kulistych [μm]	Min.	1	0,5	30	5	2	8	30	5
	Max.	18	30	60	20	25	30	60	50
Zakres wielkości aglomeratów ziaren [μm]	Min.	5	1	40	100	5	1	40	100
	Max.	20	40	80	200	30	30	120	250
Zakres wielkości ziaren kanciastych [μm]	Min.	-	-	50	130	-	-	80	150
	Max.	-	-	80	170	-	-	100	200

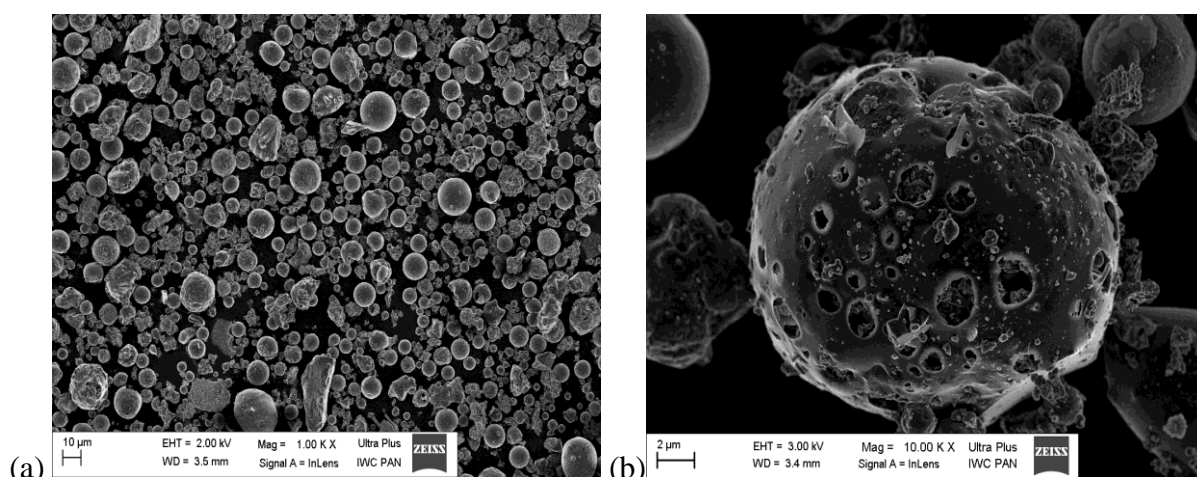
#) I, II, III, IV – frakcja ziarnowa zgodnie z oznaczeniami z Tablicy 7.2

(-) nie występują

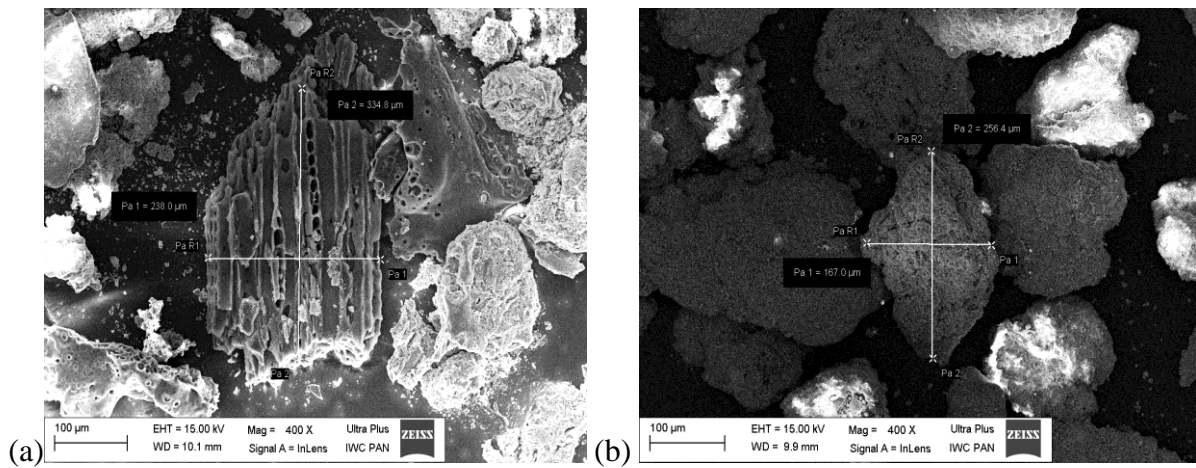
(+) mały udział

(++) większy udział

(+++) bardzo duży udział

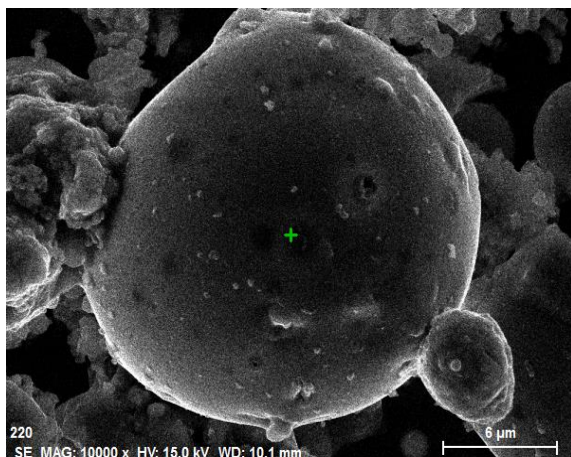


Rys. 7.2. Przykład morfologii ziaren *PLW* frakcji 0-20 μm : (a) ziarna kuliste oraz ziarna o nieregularnych kształtach; (b) ziarna kuliste o porowatej powierzchni

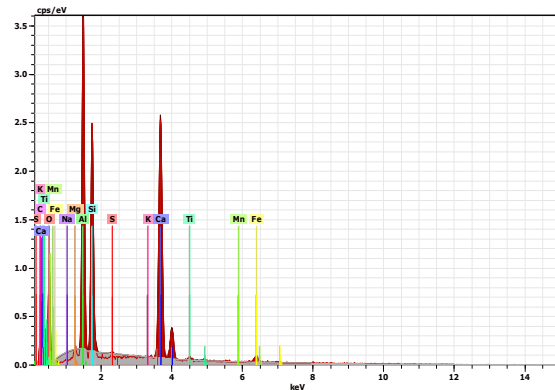


Rys. 7.3. Przykład morfologii ziaren *PLW* frakcji $>125 \mu\text{m}$ (a) ziarno niespalonego węgla; (b) ziarno ostrokrawędziste o nieregularnych kształtach

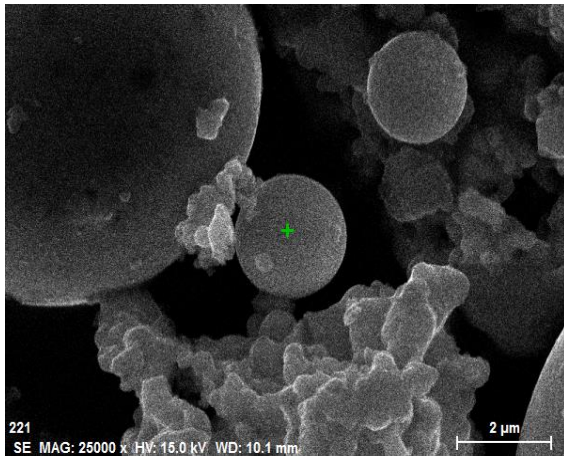
Na podstawie analizy *EDS* w mikroobszarach stwierdzono, że drobne ziarna kuliste stanowiły szkło krzemowo-wapniowo-glinowe. Skład w poszczególnych frakcjach ziarnowych był zbliżony między badanymi popiołami P4 i P5 (Rys. 7.4-7.27). Obecność związków siarki świadczy o występowaniu anhydrytu, którego udział zmniejsza się ze zwiększaniem średnicy ziaren (sposzczenie na podstawie składu chemicznego w Tabelicy 7.3). Obecność ziaren niespalonego węgla została potwierdzona przez analizę *EDS*.



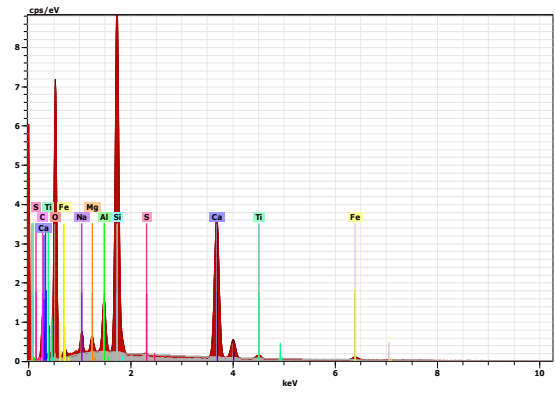
Rys. 7.4. Popiół P4 frakcji $0-20 \mu\text{m}$, ziarno kuliste o $\text{Ø} = 21,4 \mu\text{m}$ – powiększenie 10000x



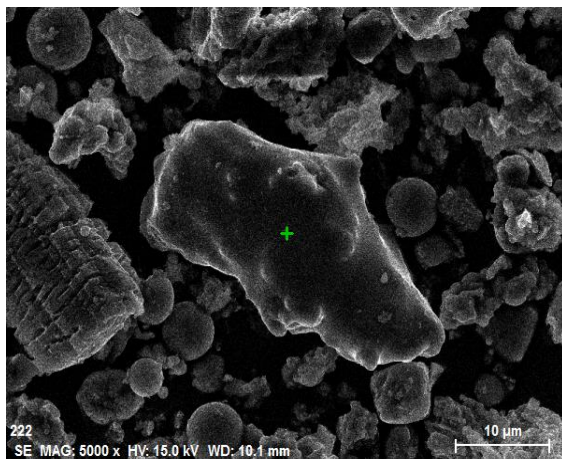
Rys. 7.5. Popiół P4 frakcji $0-20 \mu\text{m}$, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



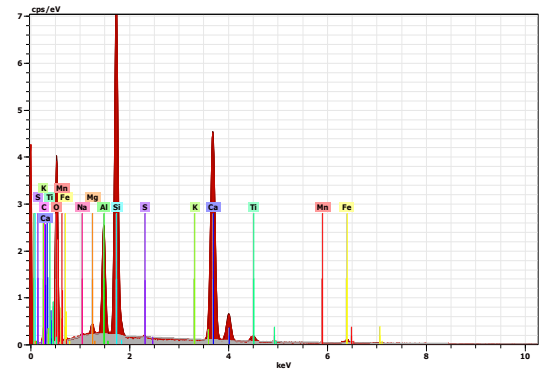
Rys. 7.6. Popiół P4 frakcji 0-20 μm, cząstka kulista o $\varnothing = 2,4 \mu\text{m}$ – powiększenie 25000x



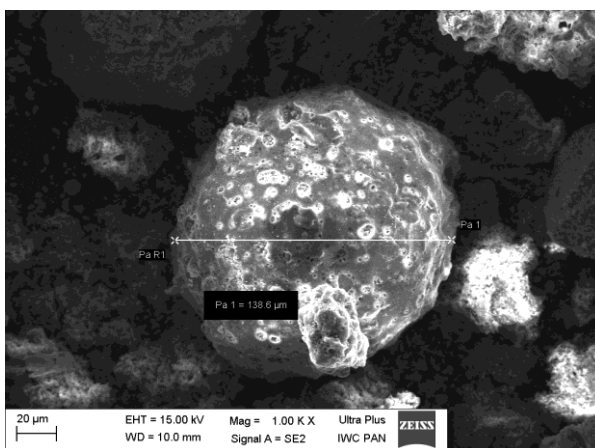
Rys. 7.7. Popiół P4 frakcji 0-20 μm, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



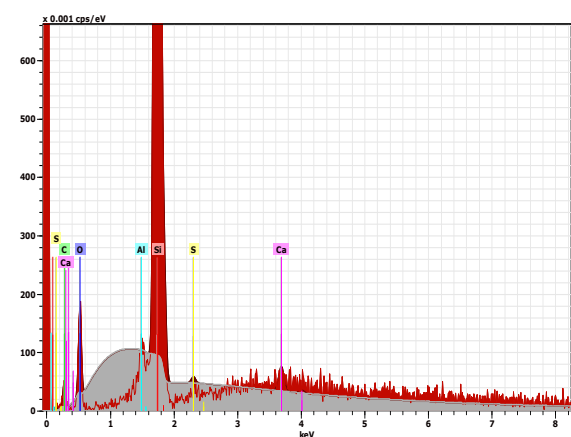
Rys. 7.8. Popiół P4 frakcji 0-20 μm, agregat o długości 34 μm – powiększenie 5000x



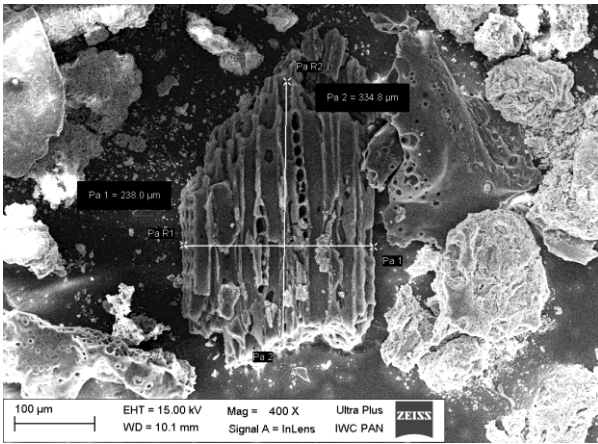
Rys. 7.9. Popiół P4 frakcji 0-20 μm, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze agregatu



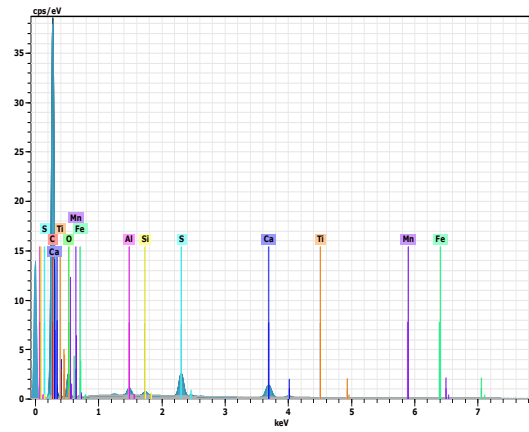
Rys. 7.10. Popiół P4 frakcji > 125 μm, ziarno kuliste o $\varnothing = 138,6 \mu\text{m}$ – powiększenie 1000x



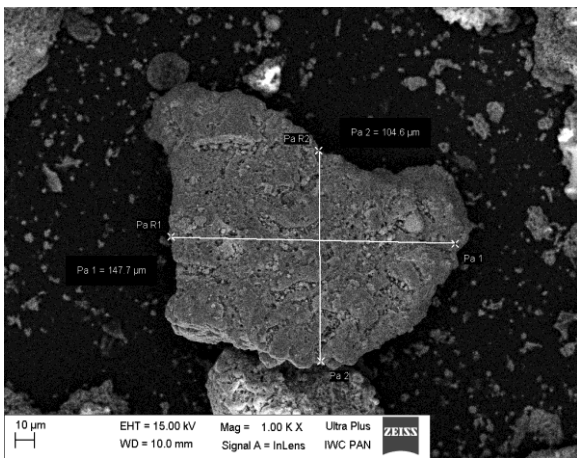
Rys. 7.11. Popiół P4 frakcji > 125 μm, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



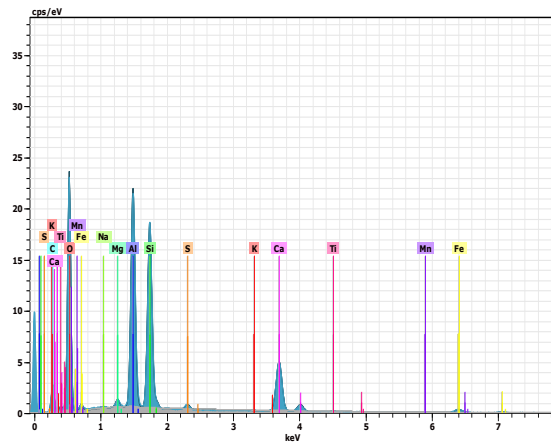
Rys. 7.12. Popiół P4 frakcji > 125 μm , ziarno nie spalonego węgla o wymiarach 238x335 μm – powiększenie 400x



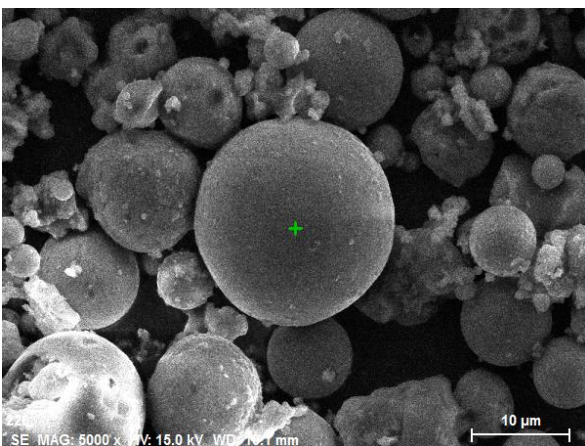
Rys. 7.13. Popiół P4 frakcji > 125 μm , analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



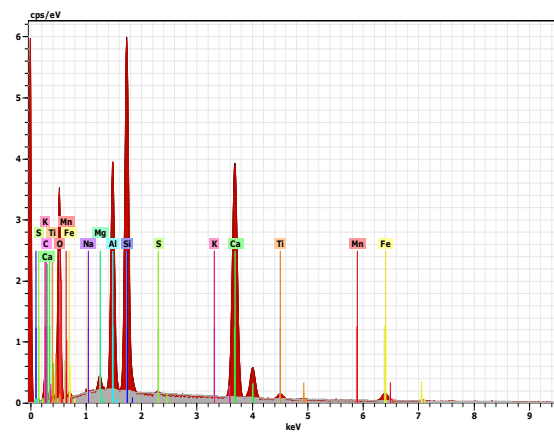
Rys. 7.14. Popiół P4 frakcji > 125 μm , agregat o wymiarach 147,7x104,6 μm – powiększenie 1000x



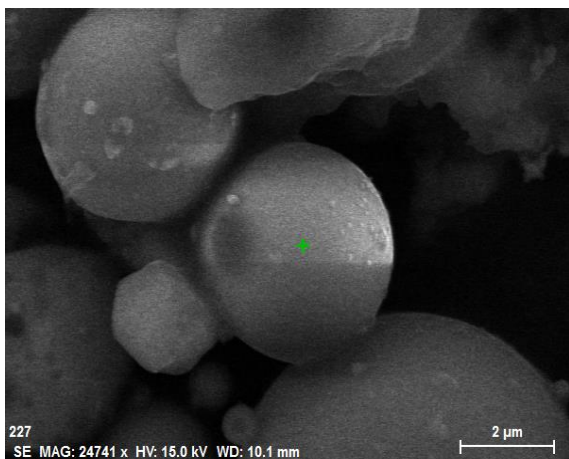
Rys. 7.15. Popiół P4 frakcji > 125 μm , analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze agregatu



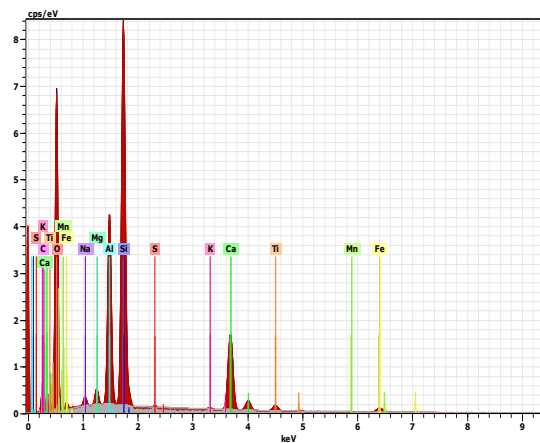
Rys. 7.16. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , ziarno kuliste o $\text{Ø} = 35 \mu\text{m}$ – powiększenie 5000x



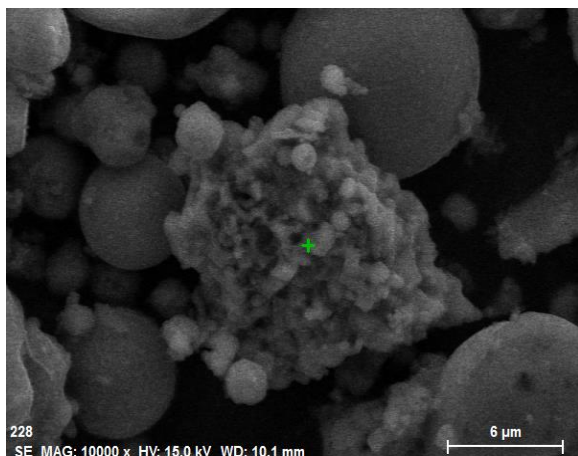
Rys. 7.17. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



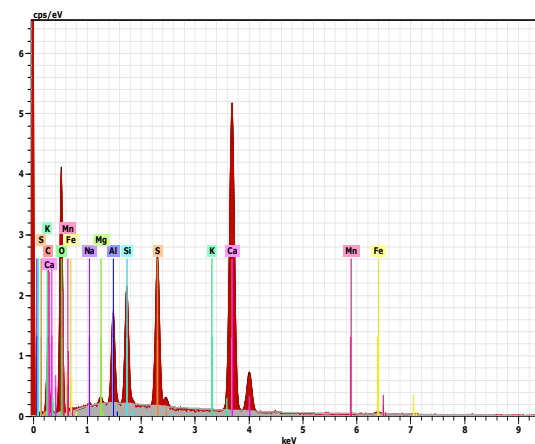
Rys. 7.18. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , ziarno kuliste o $\varnothing = 4,4 \mu\text{m}$ – powiększenie 25000x



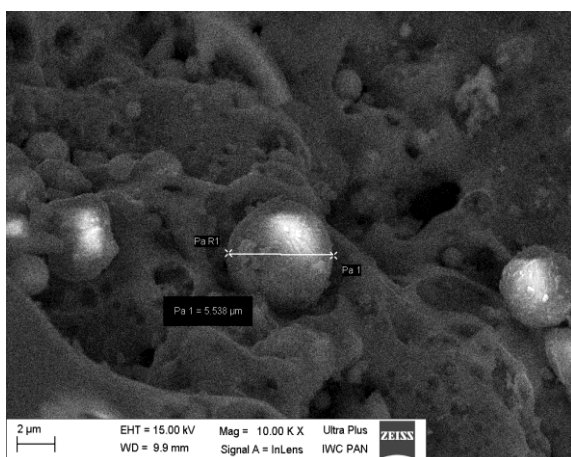
Rys. 7.19. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



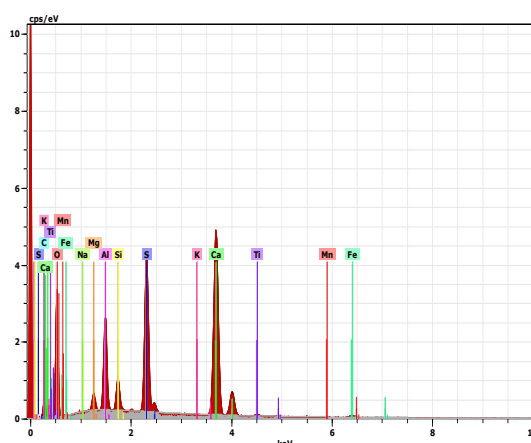
Rys. 7.20. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , agregat o wymiarach 12x14 μm – powiększenie 10000x



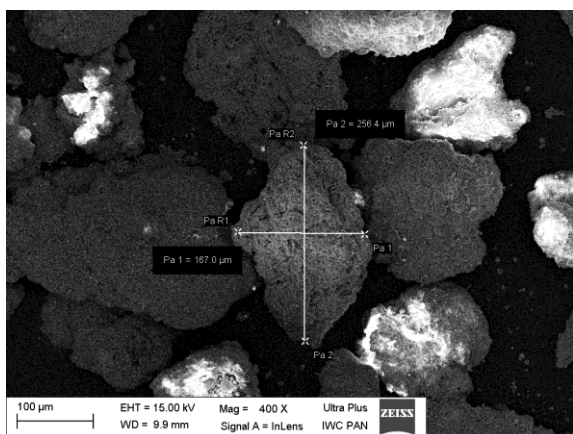
Rys. 7.21. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze agregatu



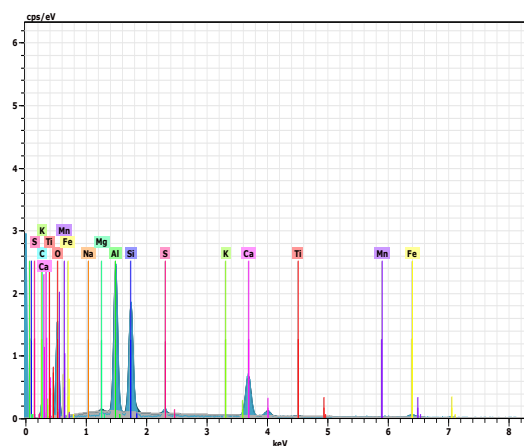
Rys. 7.22. Popiół P5 frakcji $> 125 \mu\text{m}$, ziarno kuliste o $\varnothing = 5,54 \mu\text{m}$ – powiększenie 10000x



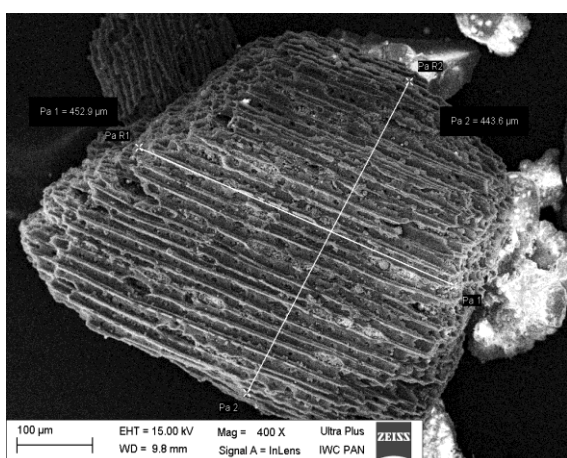
Rys. 7.23. Popiół P5 frakcji $> 125 \mu\text{m}$, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze ziarna



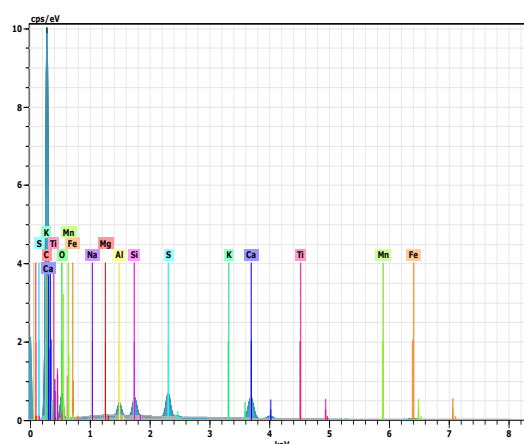
Rys. 7.24. Popiół P5 frakcji > 125 μm, agregat o wymiarach 167x256,4 μm – powiększenie 400x



Rys. 7.25. Popiół P5 frakcji > 125 μm, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze agregatu



Rys. 7.26. Popiół P5 frakcji > 125 μm, okruch niespalonego węgla o wymiarach 452,9x443,6 μm – powiększenie 400x



Rys. 7.28. Popiół P5 frakcji > 125 μm, analiza zawartości pierwiastków w mikroobszarze okrucha

Oznaczenie składu fazowego rozseparowanego *PLW* metodą *XRD* pozwoliło na zidentyfikowanie następujących składników krystalicznych: kwarc, anhydryt, minerały z grupy melilitów (głównie gelenit oraz akermanit), anortyt oraz hematyt. W niektórych próbkach zidentyfikowano także *CaO* (Tablica 7.10). Na podstawie znacznych różnic w intensywności refleksów diagnostycznych pochodzących od kryształów kwarcu i anhydrytu stwierdzono, że udział kwarcu zmniejsza się ze zwiększeniem wielkości ziaren, natomiast przeciwna tendencja obserwowana jest w przypadku anhydrytu. Dyfraktogramy rozseparowanych *PLW* zostały zamieszczone w Załączniku V. Plansza 2.

Tablica 7.10. Składniki krystaliczne w popiołach P4 i P5 po separacji ziarnowej

	Zidentyfikowane składniki krystaliczne							
	P4-I ^{#)}	P4-II	P4-III	P4-IV	P5-I	P5-II	P5-III	P5-IV
Kwarc	+	+	++	++	+	+	++	++
Anhydryt	++	+	+	+	++	+	+	+
Melility	+	+	+	+	+	+	+	+
Anortyt	+	+	+	+	+	+	+	+
Hematyt	+	+	+	+	+	+	+	+
CaO _{wolne}	+	+	+	-	+	+	-	-

^{#)} I, II, III, IV – frakcja ziarnowa zgodnie z oznaczeniami z Tablicy 7.2

(-) brak pików charakterystycznego

(+) składnik zidentyfikowany

(++) ponad dwukrotnie większa intensywność pików charakterystycznego składnika zidentyfikowanego

7.2.2. Ocena składu popiołów lotnych wapiennych po separacji ziarnowej

Separacja ziarnowa *PLW* na frakcje o średnicy ziaren 0-20 μm , 20-32 μm , 32-125 μm oraz większych od 125 μm umożliwiła porównanie składu chemicznego oraz morfologii ziaren pomiędzy frakcjami. Celem powyższych badań było wskazanie frakcji ziarnowej, której odrzucenie spowoduje poprawę jakości dodatku *PLW* w kontekście wykorzystania go jako dodatku w betonach napowietrzonych.

Przeprowadzone badania pozwoliły na stwierdzenie, że wraz ze zwiększeniem średnicy ziaren we frakcjach popiołowych następowało zmniejszenie udziału anhydrytu w składzie *PLW*. Potwierdza to analiza składu chemicznego wykonana metodą *XRF*, gdzie następowało jednoczesne zmniejszenie udziału SO_3 oraz CaO we frakcjach ziarnowych o coraz większych średnicach. Na podstawie obserwacji mikroskopowych frakcji ziarnowych o najmniejszych średnicach (0-20 μm , 20-32 μm) stwierdzono, że najliczniejszą grupę ziaren stanowiły ziarna kuliste. Analiza *EDS* w mikroobszarach wykazała, że zeszkłone ziarna kuliste zbudowane są z pierwiastków takich krzem, wapń i glin.

We frakcji ziarnowej większej od 125 μm największy udział stanowią aglomeraty ziaren o dużym rozwinięciu powierzchni, ziarna ostrokrawędziste oraz ziarna niespalonego węgla. Udział niespalonego węgla we frakcji większej od 125 μm jest pięciokrotnie większy w porównaniu do pozostałych frakcji, co wykazano w oznaczeniu udziału węgla organicznego w *PLW* za pomocą miareczkowania kulometrycznego. Zbliżoną tendencję prezentują wyniki strat prażenia.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń uznano, że usunięcie frakcji ziarnowej *PLW* powyżej 125 μm pozwoli pozbyć się znacznej zawartości niespalonego węgla utrudniającego napowietrzanie mieszanek betonowych. Dodatkowo zostanie usunięty znaczny udział ziaren ostrokrawędzistych, stanowiących najprawdopodobniej ziarna kwarcu. Uznano, że usuwanie frakcji poniżej 20 μm , spowoduje znaczne zmniejszenie udziału w *PLW* kulistych ziaren popiołu, odpowiadających za poprawę urabialności mieszanki oraz właściwości pucolanowe i hydrauliczne [51].

7.3. Wyniki charakterystyki aktywowanych popiołów lotnych wapiennych

7.3.1. Właściwości fizyczne

Określenie właściwości fizycznych *PLW* przeprowadzono z popiołami P4 i P5 aktywowanymi przez mielenie w młynku kulowym oraz po odseparowaniu ziaren o średnicach większych od 125 μm (Tablica 7.12). Pomimo nieznaczonej zmienności składu chemicznego, morfologii ziaren oraz powierzchni właściwej określanej metodą Blaine'a, różnica gęstości między popiołami P4 i P5 wynosiła 0,19 g/cm^3 . Należy wykluczyć błąd pomiarowy, gdyż popiół P5 po mieleniu i separacji ziarnowej także wykazywał podobne zmiany w gęstości w porównaniu do popiołów P4 po aktywacji.

Tablica 7.12. Właściwości fizyczne popiołów P4 i P5 przed i po aktywacji

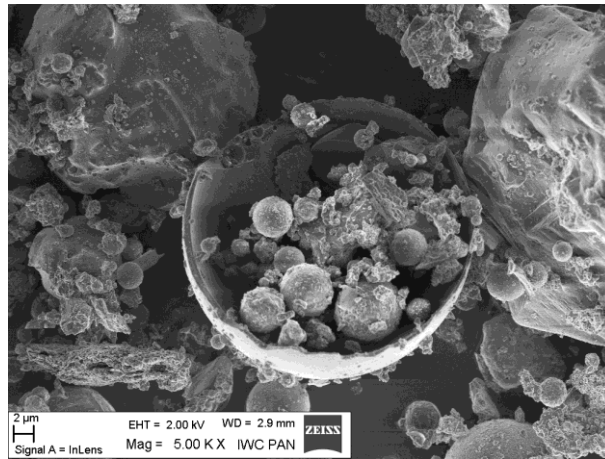
Ozn.	Rodzaj aktywacji	Gęstość [g/cm^3]	Miałkość [%]	Wodożądność [%]	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a [cm^2/g]	Charakterystyczna średnica ziaren	
						$d(0,5)$ [μm] ^{*)}	$d(0,9)$ [μm] ^{**)}
P4	nieprzetwarzany	2,60	46	110	2400	63	219
P4-M	mielenie-15 min.	2,67	21	104	3500	30	89
P4-S	separacja	2,65	43	108	2700	41	108
P5	nieprzetwarzany	2,41	59	116	2200	79	259
P5-M	mielenie-23 min.	2,50	20	106	4000	27	75
P5-S	separacja	2,48	55	112	2600	52	126

^{*)} – oznaczenia: średnica ziarna, poniżej której występuje 50% objętości popiołu (granulometria laserowa)

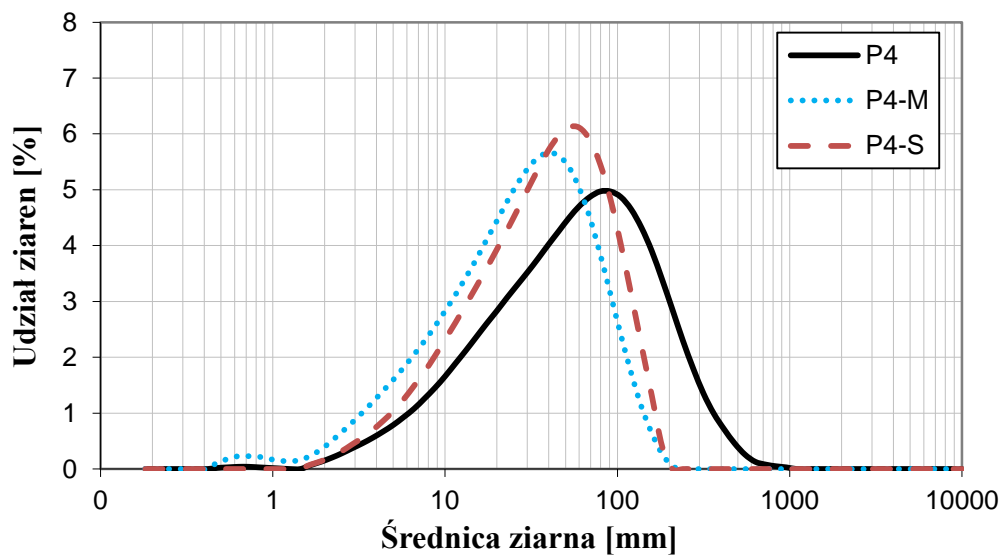
^{**)} – oznaczenia: średnica ziarna, poniżej której występuje 90% objętości popiołu (granulometria laserowa)

Aktywacja *PLW* przez mielenie w sposób znaczący zmieniło uziarnienie badanych popiołów. Powierzchnia właściwa wg Blaine'a zwiększyła się odpowiednio o 46% i 82% w przypadku popiołów P4 i P5. Rozwinięcie powierzchni *PLW* po mieleniu oznaczone za pomocą powierzchni właściwej wg Blaine'a, jest zbliżone do wartości uzyskiwanych w przypadku cementów o wysokich klasach wytrzymałościowych.

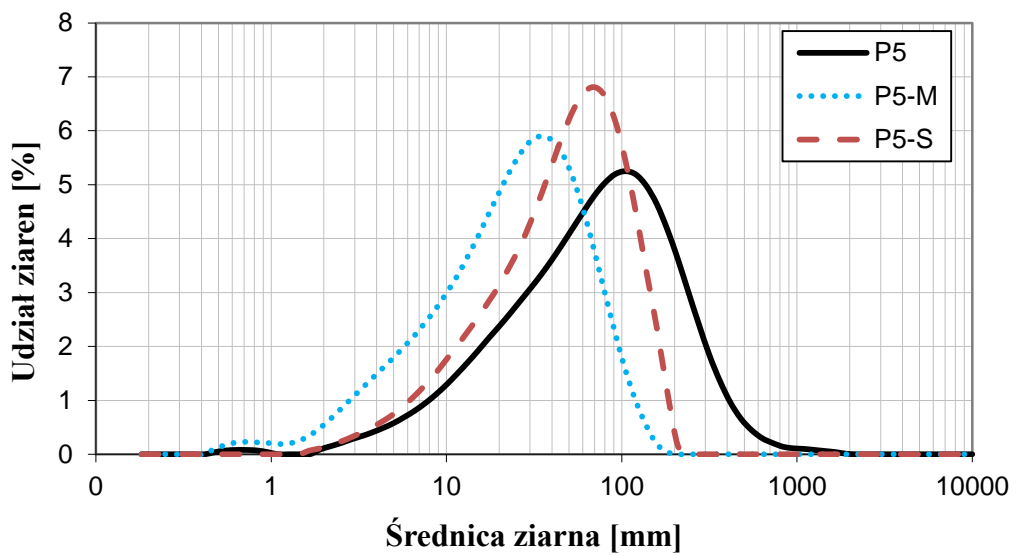
Zmiany właściwości takich jak miałkość oraz średnice charakterystyczne ziaren wyznaczone za pomocą granulometrii laserowej, $d(0,5)$ i $d(0,9)$, wykazują, że popiół P5 posiada większe ziarna niż popiołu P4. Mielenie powoduje zmniejszenie maksymalnej średnicy ziaren w badanych popiołach do średnic mniejszych niż 200 μm oraz pojawienie się ziaren mniejszych od 1 μm . Ziarna poniżej 1 μm stanowią najprawdopodobniej pył po ziarnach kruchych, takich jak zaobserwowane sfery popiołowe (Rys. 7.28). Mielenie *PLW* powoduje zmniejszenie dominującej średnicy ziarna z 80 μm do 40 μm w popiele P4 oraz z 100 μm do 40 μm w popiele P5 (Rys. 7.29 i 7.30). Przetwarzanie zmniejsza także wodożądność *PLW*. W przypadku popiołu P4 po mieleniu w młynku kulowym wodożądność wynosi 104%, co stanowi wynik dopuszczalny przez normę ASTM C618 [N2].



Rys. 7.28. Widok pękniętej sfery popiołowej z drobnymi ziarnami popiołu wewnątrz po mieleniu w młynku okresowym

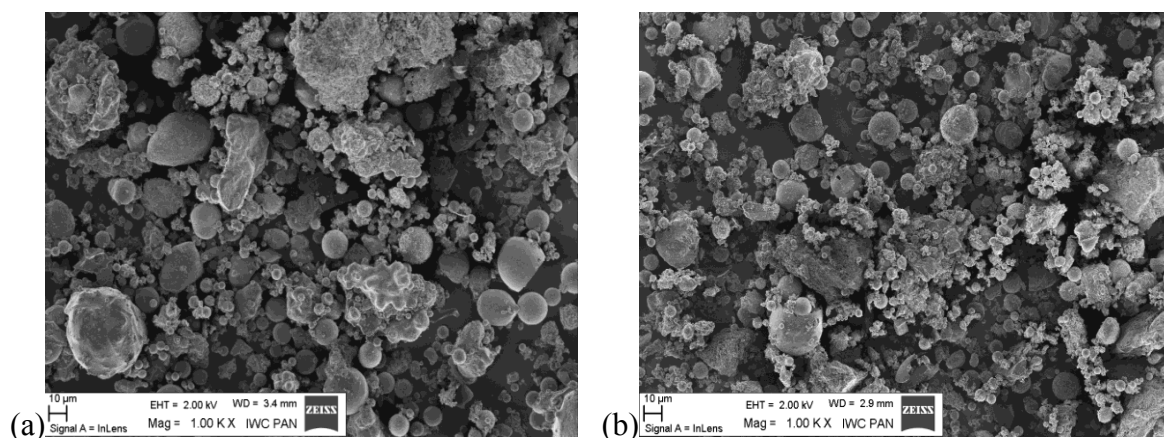


Rys. 7.29. Rozkład uziarnienia aktywowanego popiołu P4 (oznaczenia: M – mielenie; S – separacja ziarnowa)



Rys. 7.30. Rozkład uziarnienia aktywowanego popiołu P5 (oznaczenia: M – mielenie; S – separacja ziarnowa)

Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe w *SEM* nie dają jednoznacznego potwierdzenia, które z ziaren w większym stopniu zostały skruszone. Jednakże widoczne było zmniejszenie średnic ziaren *PLW*, a w szczególności dużych aglomeratów ziaren o średnicach większych niż 100 μm (Rys. 7.31).



Rys. 7.31. Wpływ mielenia na uziarnienie *PLW* widoczne w *SEM*:
(a) przed mieleniem; (b) po mieleniu

Odseparowanie z *PLW* ziaren większych od 125 μm spowodowało zmianę dominujących średnic ziaren, które wynoszą 60 μm i 70 μm , odpowiednio w przypadku popiołów P4 i P5 (Rys. 7.29 i 7.30). Podobnie jak w przypadku mielenia, nie występują już ziarna popiołu większe od 200 μm , natomiast nie występują ziarna o średnicach mniejszych od 1 μm . Potwierdzeniem zmniejszenia udziału frakcji grubej jest wskaźnik $d(0,9)$ wyznaczony za pomocą granulometrii laserowej, który zmniejszył się o około 50% w porównaniu z wyjściowymi *PLW*.

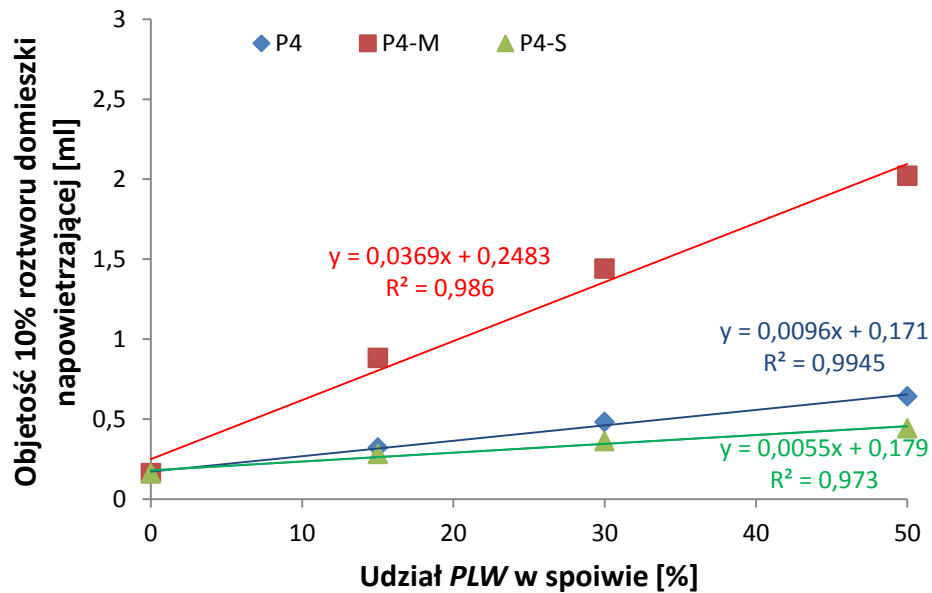
7.3.2. Kompatybilność z domieszką napowietrzającą

Badanie wskaźnika piany zostało przeprowadzone z popiołami P4 i P5 po aktywacji przez mielenie w młynku okresowych *PLW* oraz po odseparowaniu ziaren powyżej 125 μm . Kompatybilność z domieszką napowietrzającą wykonano także z cementami wieloskładnikowymi prezentowanymi w Rozdziale 4.2. Użyto domieszki wybranej w Rozdziale 6.4 oznaczonej AIR301 i cementu oznaczonego CM-9. Zastąpienie cementu portlandzkiego *PLW* w spoiwie wynosiło 0%, 15%, 30% i 50% masy.

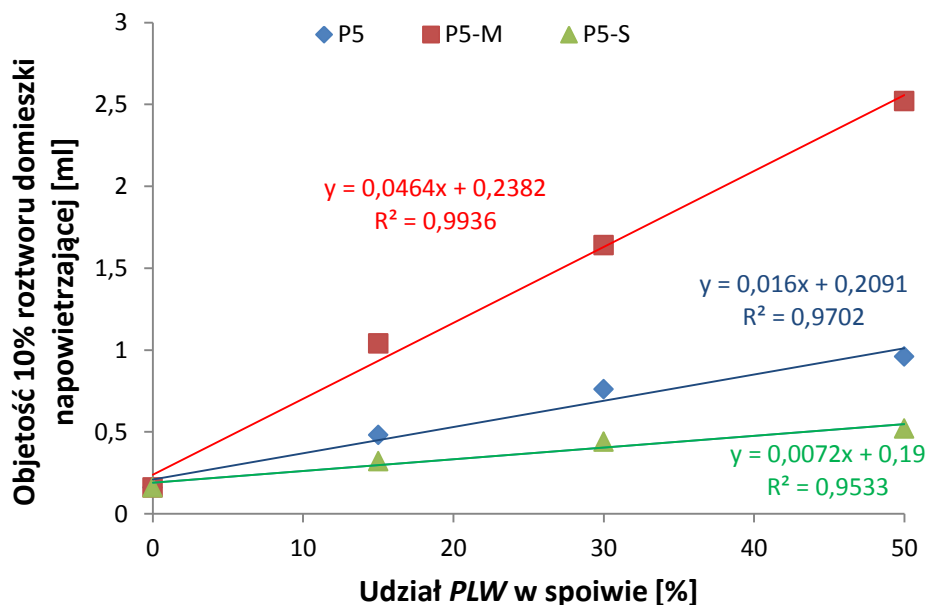
Badanie wskaźnika piany nieprzetwarzanych popiołów P4 i P5 podobnie jak w przypadku popiołów oznaczonych P1, P2, P3 wykazuje zależność liniową zwiększania się objętości domieszki napowietrzającej ze zwiększaniem udziału *PLW* w składzie spoiwa (Rys. 7.32 i 7.33). Uzyskane wyniki wskaźnika piany popiołów P4 i P5 są zbliżone. Odseparowanie frakcji większej od 125 μm w popiołach P4 i P5 powoduje zmniejszenie objętości domieszki napowietrzającej, niezbędnej do uzyskania stabilnego napowietrzenia względem popiołów nieprzetwarzanych. Zmiany objętości domieszki są największe przy 50% zawartości *PLW*, w której zmniejszenie objętości domieszki wynosi odpowiednio około 30% i 45% w przypadku popiołów P4 i P5.

Wykorzystanie mielenia jako sposobu aktywacji *PLW* wywołuje zwiększenie zapotrzebowania na domieszkę napowietrzającą. Objętość domieszki napowietrzającej w spoiwie z 50% udziałem *PLW* mielonego zwiększa się ponad dwuipółkrotnie w przypadku

popiołu P5 oraz trzykrotnie w przypadku nieprzetwarzanego popiołu P4 w porównaniu do objętości domieszki napowietrzającej w popiołach nieprzetwarzanych. Wynika to ze zwiększania powierzchni adsorpcji domieszki na rozdrobnionych ziarnach *PLW* i niespalonego węgla [93].



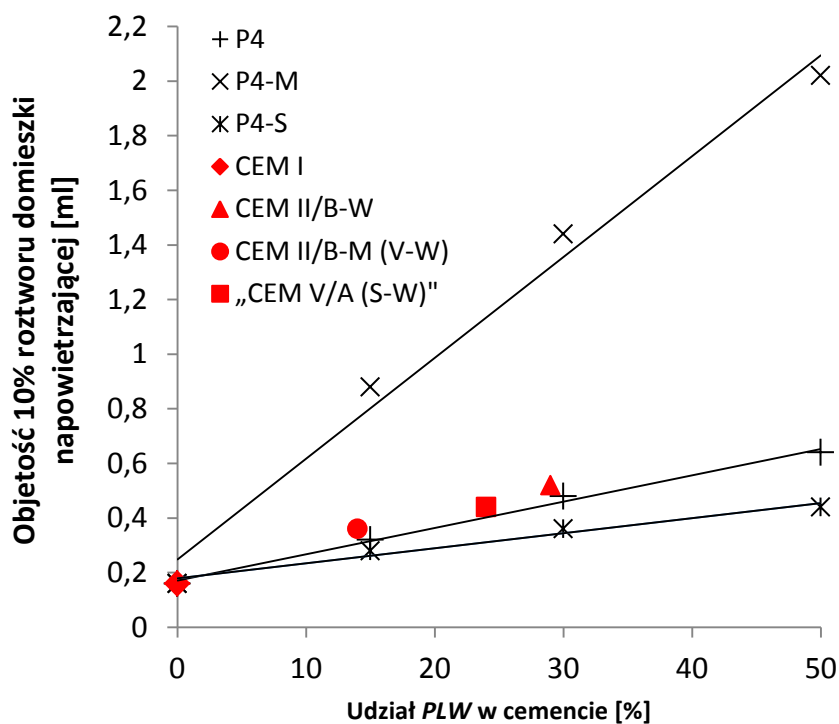
Rys. 7.32. Wpływ aktywacji popiołu P4 na objętość roztworu domieszki napowietrzającej AIR301 niezbędnej do uzyskania stabilnej piany (cement CM-9); oznaczenia: M – mielenie; S – separacja ziarnowa



Rys. 7.33. Wpływ przetworzenia popiołu P5 na objętość roztworu domieszki napowietrzającej AIR301 niezbędnej do uzyskania stabilnej piany (cement CM-9); oznaczenia: M – mielenie; S – separacja ziarnowa

Wykonanie cementów wieloskładnikowych przez wspólne mielenie klinkieru portlandzkiego i *PLW* z innymi dodatkami mineralnymi zwiększyło efektywność napowietrzania za pomocą domieszki napowietrzającej. Na Rysunku 7.34 przedstawiono wyniki badań wskaźnika piany z popiołem P4 w stanie nieprzetwarzanym, aktywowanym

przez mielenie, po separacji ziarnowej oraz zastosowanego w cementach wieloskładnikowych (skład w Rozdziale 4.2). Uzyskane wyniki świadczą o zbliżonej objętości domieszki napowietrzającej niezbędnej do stabilnego napowietrzenia mieszanek z cementami wieloskładnikowymi z *PLW*, jak i z popiołami nieprzetwarzanymi zastępującymi cement w spoiwie.



Rys. 7.34. Wpływ stosowania cementów wieloskładnikowych z *PLW* na objętość roztworu domieszki napowietrzającej AIR301, niezbędnej do uzyskania stabilnej piany

7.4. Podsumowanie

Wykorzystanie *PLW* w betonach napowietrzonych wymagało doboru metod przetwarzania popiołów, które zwiększają kompatybilność *PLW* z domieszkami napowietrzającymi. Na podstawie analizy składu chemicznego *PLW* i obserwacji mikroskopowych w wytypowanych frakcjach ziarnowych: 0-20 μm , 20-32 μm , 32-125 μm oraz powyżej 125 μm dokonano wyboru sposobu separacji ziarnowej. Stwierdzono, że wraz z frakcją ziarnową większą od 125 μm zostaną usunięte następujące składniki: ziarna niespalonego węgla, inertne chemicznie ziarna kwarcu oraz nieliczne ziarna kuliste. Odrzucenie frakcji powyżej 125 μm wywołuje zmniejszenie objętości domieszki napowietrzającej niezbędnej do uzyskania stabilnego napowietrzenia, badanego wskaźnikiem piany, o około 30-45% względem popiołu nieprzetwarzanego.

Analizując najczęściej stosowane metody poprawy właściwości popiołów lotnych stosowane w praktyce wybrano metodę aktywacji przez mielenie. Mielenie *PLW* miało na celu rozbicie aglomeratów ziaren zwiększając rozwinięcie powierzchni popiołu. Aktywacja przez mielenie zapewnia uziarnienie zbliżone do typowych cementów portlandzkich klasy 42,5R i 52,5R, wpływając na właściwości reologiczne mieszanek betonowych. Zwiększenie rozwinięcia powierzchni powoduje jednocześnie zmniejszenie efektywności stosowanych domieszek napowietrzających. Mielony *PLW* wymagał prawie trzykrotnego zwiększenia

objętości domieszki napowietrzającej niezbędnej do stabilnego napowietrzania mieszanki w badaniu wskaźnika piany.

Wspólne mielenie *PLW* klinkieru portlandzkiego i powszechnie stosowanych dodatków mineralnych (popiół lotny krzemionkowy i granulowany żużel wielkopiecowy) miało na celu uzyskanie synergii właściwości składników cementów wieloskładnikowych. Współmielenie zwiększyło efektywność domieszek napowietrzających w porównaniu z mieleniem jedynie *PLW*. Zwiększenie objętości domieszki napowietrzającej w badaniu wskaźnika piany zwiększyło się o 10% w porównaniu z dodatkiem nieprzetwarzanym.

Na podstawie powyższych badań wybrano popiół P4 do badań właściwości betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW*. Wybór był umotywowany mniejszą miałkością (klasa N), mniejszą wodożądnością, większymi wskaźnikami aktywności oraz większą kompatybilnością z domieszką napowietrzającą po aktywacji przez mielenie w porównaniu z popiołem P5. Popiół P4 został użyty także do wykonania cementów wieloskładnikowych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopiecowego (Rozdział 4.2).

8. Wpływ popiołu lotnego wapiennego na mikrostrukturę i właściwości betonów

8.1. Skład betonów

Seria betonów z popiołami P1 i P2 została zaprojektowana w celu określenia wpływu zmienności właściwości *PLW* na mikrostrukturę, mrozoodporność oraz szczelność betonów. Dodatkowo, w celu weryfikacji konieczności stosowania napowietrzenia, wykonano mieszanki bez domieszki napowietrzającej i z jej użyciem (Tablica 8.1). Wybór popiołów do badań wynikał ze znacznych różnic właściwości fizycznych między popiołem P1 i P2, pomimo zbliżonego składu chemicznego.

Tablica 8.1. Skład betonów z nieprzetwarzanymi popiołami P1 i P2 [kg/m³]

Oznaczenie próbek	CM-9 ^{#)}	Popiół P1	Popiół P2	Woda	Piasek kwar.	Grys amfibolitowy		AEA ^{##)}	SPL ^{###)}
						2-8 mm	8-16 mm		
P1-0*	415	-	-	158	578	598	649	-	6,5
P1-0	415	-	-	158	613	635	689	0,6	4,3
P1-30_CM-9*	298	133	-	158	603	624	677	-	4,8
P1-30_CM-9	298	133	-	158	566	585	635	1,1	3,2
P2-30_CM-9*	298	-	133	158	599	620	672	-	15,5
P2-30_CM-9	298	-	133	158	563	582	632	4,5	10,0

* betony nienapowietrzone

#) oznaczenie cementu zaproponowane w Tablicy 4.9

##) - domieszka napowietrzająca

###) - superplastyfikator

Zaprojektowano betony o udziale cementu, wynoszącym 415 kg/m³, stosowanym w przypadku górnych warstw nawierzchni drogowych. Wskaźnik *w/c* w betonie referencyjnym wynosił 0,37. W tej serii betonów użyto *PLW* w ilości 133 kg zastępując około 30% masy cementu portlandzkiego. Wykonano mieszanki nienapowietrzone oraz odpowiadające im mieszanki napowietrzone o zakładanej zawartości powietrza (mierzonej metodą ciśnieniową) około 5-6%. Procedura wykonywania betonów składała się z dwóch etapów. W pierwszym etapie homogenizowano składniki mieszanki w ustalonej kolejności:

- suche kruszywa
- kruszywa + 50% objętości wody zarobowej,
- przerwa technologiczna – 60 s,
- kruszywa + pozostała część wody zarobowej + cement + *PLW*.

W drugim etapie następowało dozowanie domieszek. W pierwszej kolejności dozowano domieszkę napowietrzającą (*AEA*) do uzyskania zakładanego udziału powietrza, mierzonego metodą ciśnieniową. W oszacowaniu udziału *AEA* pomocne okazały się zależności przedstawione w Rozdziale 6.4 dotyczącym kompatybilności *PLW* z domieszką napowietrzającą. Następnie dozowano domieszkę uplastyczniającą (*SPL*) do uzyskania zakładanej klasy konsystencji S3, oznaczanej metodą opadu stożka. W przypadku mieszanek

nienapowietrzonych dozowano jedynie domieszkę uplastyczniającą (*SPL*) do uzyskania klasy konsystencji S3. Właściwości mieszanki zostały przedstawione w Tabelicy 8.2.

Tablica 8.2. Właściwości mieszanek betonowych z nieprzetwarzanymi popiołami P1 i P2 (skład wg Tabelicy 8.1)

Oznaczenie próbek	Konsystencja – opad stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]
P-0*	140	1,8	2480
P1-0	120	6,0	2320
P1-30_CM-9*	130	2,0	2470
P1-30_CM-9	100	6,4	2330
P2-30_CM-9*	100	2,2	2480
P2-30_CM-9	110	5,0	2350

* betony nienapowietrzane

Betony z popiołem P3 zostały zaprojektowane z 20% i 40% udziałem dodatku *PLW* (Tablica 8.3). Dodatkowo użyto dwóch rodzajów cementu różniących się głównie zawartością *C₃A*. W betonie referencyjnym założono zawartość cementu 375 kg/m³ i stosunek *w/c* wynoszący 0,45, który stanowił przykład betonu przeznaczonego do konstrukcji mostowych. Założono zmniejszenie konsystencji mieszanki do wartości nieprzekraczającej 100 mm opadu stożka oraz zwiększenie napowietrzenia mieszanki do wartości 6-7% (Tablica 8.4). Wprowadzone zmiany były uzasadnione badaniami Glinickiego i Dąbrowskiego [54], w wyniku których stwierdzono, że zbyt ciekła konsystencja mieszanki powoduje odpowietrzanie mieszanki betonowej.

Tablica 8.3. Skład betonów z nieprzetwarzanym popiołem P3 i cementami CM-9 i CM-2 [kg/m³]

Oznaczenie próbek	CM-9 ^{#)}	CM-2 ^{#)}	Popiół P3	Woda	Piasek kwar.	Grys amfibolitowy		AEA ^{##)}	SPL ^{###)}
						2-8 mm	8-16 mm		
P3-0_CM_9	375	-	-	175	566	586	635	0,5	0,6
P3-20_CM_9	298	-	75	175	563	582	632	1,1	1,0
P3-40_CM_9	245	-	150	175	552	571	620	1,8	2,2
P3-0_CM_2	-	375	-	175	566	586	636	0,8	-
P3-20_CM_2	-	298	75	175	563	582	632	1,2	-
P3-40_CM_2	-	245	150	175	552	571	620	1,8	0,6

^{#)} oznaczenie cementu zaproponowane w Tabelicy 4.9

^{##)} - domieszka napowietrzająca

^{###)} - superplastyfikator

Analizując właściwości wykonanych dwóch serii betonów należy zwrócić uwagę, że uzyskanie zakładanego napowietrzenia wymagało stosowania kilkukrotnie większej ilości domieszki napowietrzającej w betonach z *PLW* w porównaniu do betonów referencyjnych (Tablice 8.1-8.4). Ponadto wystąpiły znaczne różnice w ilości dozowanej domieszki napowietrzającej w mieszankach różniących się rodzajem *PLW*. Stosowanie cementów o mniejszej zawartości C_3A w składzie mineralnym spowodowało nieznaczne zwiększenie zapotrzebowania na domieszkę napowietrzającą w porównaniu do mieszanki z cementem CM-9. W przypadku cementu o 2% zawartości C_3A nie było potrzeby stosowania domieszki uplastyczniającej w kompozycie z 20% dodatkiem *PLW*.

Tablica 8.4. Właściwości mieszanek betonowych z nieprzetworzonym popiołem P3 (skład wg Tablicy 8.3)

Oznaczenie próbek	Konsystencja – opad stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]
P3-0_CM_9	60	7,0	2430
P3-20_CM_9	50	7,2	2400
P3-40_CM_9	50	7,6	2380
P3-0_CM_2	100	6,0	2410
P3-20_CM_2	70	6,0	2370
P3-40_CM_2	80	7,4	2390

Do analizy składu fazowego matrycy cementowej wykonano zaczyny cementowe z *PLW* oznaczonymi P1, P2, P3 i dwoma rodzajami cementów CM-9 i CM-2 (Tablica 8.5).

Tablica 8.5. Zestawienie składu zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementami CM-9 i CM-2

Oznaczenie próbek	Rodzaj <i>PLW</i>
Z_P-0	-
Z_P1-30_CM-9	P1 (30%)*)
Z_P2-30_CM-9	P2 (30%)*)
Z_P3-30_CM-9	P3 (30%)*)
Z_P1-30_CM-2	P1 (30%)*)
Z_P2-30_CM-2	P2 (30%)*)
Z_P3-30_CM-2	P3 (30%)*)

*) – procent zastąpienia cementu w zaczynie

8.2. Wytrzymałość i współczynnik sprężystości

Badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonów z popiołami P1 i P2 wykonano po 28 i 90 dniach dojrzewania w wodzie (Tablica 8.6).

Tablica 8.6. Wytrzymałość na ściskanie (f_c) betonów z popiołem P1 i P2 (oznaczenie: P – rodzaj *PLW*; 30 – procentowe zastąpienie cementu *PLW*; CM – rodzaj cementu; * – kompozyt nienapowietrzony)

Oznaczenie	f_c [MPa]			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
P1-0_CM-9*	71,4	1,2	76,3	0,7
P1-0_CM-9	67,2	1,9	92,3	2,6
P1-30_CM-9*	59,6	1,8	85,5	1,6
P1-30_CM-9	54,9	2,1	72,1	1,6
P2-30_CM-9*	57,2	2,5	80,6	0,8
P2-30_CM-9	55,0	1,9	78,5	2,5

Napowietrzenie do 5-6% objętości powietrza w mieszance spowodowało zmniejszenie f_c betonów względem ich nienapowietrzonych odpowiedników o około 3-7% po 28 dniach dojrzewania oraz 4-15% po 90 dniach dojrzewania. Obliczono, że z każdym procentem wprowadzonego powietrza następuje zmniejszenie f_c o maksymalnie 3 MPa, co jest zgodne z danymi z literatury, wskazującymi na zmniejszenie f_c do 5 MPa z każdym procentem wprowadzanego powietrza w wyniku napowietrzania [89].

Zastosowanie *PLW* powoduje zmniejszenie f_c betonów o około 20% względem betonu referencyjnego po 28 dniach dojrzewania. Natomiast wydłużenie pielęgnacji w wodzie do 90 dnia dojrzewania powoduje zwiększenie f_c betonów z popiołami P1 i P2, odpowiednio o 17% i 11%. Nie zaobserwowano znaczącego wpływu rodzaju popiołu na uzyskiwane f_c w założonych terminach badań.

Zastosowanie dwóch rodzajów cementów różniących się głównie zawartością C_3A powoduje znaczące zmiany f_c badanych betonów (Tablica 8.7).

Tablica 8.7. Wytrzymałość na ściskanie (f_c) betonów z popiołem P3 oraz cementami CM-9 i CM-2 (oznaczenie: P – rodzaj *PLW*; 20, 40 – procentowe zastąpienie cementu *PLW*; CM – rodzaj cementu)

Oznaczenie	f_c [MPa]			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
P3-0_CM_9	63,9	2,5	72,1	0,8
P3-20_CM_9	50,2	1,6	76,3	1,5
P3-40_CM_9	47,3	2,4	73,5	1,6
P3-0_CM_2	57,2	1,1	64,6	1,0
P3-20_CM_2	40,8	2,6	55,9	2,1
P3-40_CM_2	35,4	3,7	52,8	1,8

Wytrzymałość na ściskanie była większa w przypadku betonów z cementem CM-9 w porównaniu do odpowiedników z cementem CM-2. Zmiana wytrzymałości na ściskanie

wynosiła od około 10%, między betonami referencyjnymi, do około 30% w przypadku betonów z 40% dodatkiem popiołu P3 po 90 dniach dojrzewania. Należy zauważyć, że cement CM-9 zwiększa wytrzymałość na ściskanie względem betonów z cementem CM-2 o około 20%. Zwiększenie zastąpienia cementu popiołem P3 w przypadku betonów z cementem CM-9, nie wpłynęło w sposób istotny na zmianę f_c , tak po 28 dniach jak i 90 dniach dojrzewania.

Rezonansowy moduł sprężystości (E_d) został wyznaczony na próbkach betonów z popiołami P1, P2 i P3 po 28 i 90 dniach dojrzewania, a rezultaty przedstawiono w Tablicach 8.8 i 8.9.

Tablica 8.8. Rezonansowy moduł sprężystości (E_d) betonów popiołami P1 i P2 (oznaczenie: P – rodzaj *PLW*; 30 – procentowe zastąpienie cementu *PLW*; CM – rodzaj cementu)

Oznaczenie	E_d [GPa]			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
P1-0_CM-9*	52,3	0,9	55,9	1,1
P1-0_CM-9	48,6	1,9	50,5	1,5
P1-30_CM-9*	43,1	0,6	49,9	1,8
P1-30_CM-9	41,6	0,9	47,4	1,2
P2-30_CM-9*	45,8	1,5	52,6	0,9
P2-30_CM-9	44,4	0,8	51,5	0,8

Tablica 8.9. Rezonansowy moduł sprężystości (E_d) betonów popiołem P3 oraz cementami CM-9 i CM-2 (oznaczenie: P – rodzaj *PLW*; 20, 40 – procentowe zastąpienie cementu *PLW*; CM – rodzaj cementu)

Oznaczenie	E_d [GPa]			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
P3-0_CM_9	46,5	1,5	49,9	1,4
P3-20_CM_9	41,8	2,1	48,3	1,1
P3-40_CM_9	37,4	1,1	43,8	1,2
P3-0_CM_2	42,5	1,3	45,8	0,7
P3-20_CM_2	38,2	0,7	43,5	1,0
P3-40_CM_2	35,7	1,2	40,4	0,8

Rezonansowy moduł sprężystości (E_d) po 28 dniach dojrzewania wynosił 52,3 GPa w przypadku betonu referencyjnego nienapowietrzonego (Tablica 8.9). Po tym samym czasie dojrzewania E_d betonów nienapowietrzonych z popiołami P1 i P2 był mniejszy o około 15%. Po 90 dniach dojrzewania E_d betonu referencyjnego zwiększył się do 55,9 MPa i był większy o około 10%, niż w przypadku nienapowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2. Zastosowanie napowietrzenia betonów wpłynęło na zmniejszenie rezonansowego modułu sprężystości o około 10-15% względem odpowiadających im betonów nienapowietrzonych.

Zmiana rodzaju cementu różniącego się głównie zawartością C_3A miała podobny wpływ na E_d betonów z PLW , jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie. Betony z cementem CM-9 charakteryzowały się większym o 10% E_d w porównaniu z kompozytami z cementem CM-2 (Tablica 8.10.). Zwiększenie udziału PLW w składzie betonu powoduje zmniejszenie E_d . W przypadku zastosowania 40% dodatku PLW rezonansowy moduł sprężystości (E_d) po 28 dniach dojrzewania zmniejszył się o około 20% i 17% w porównaniu z betonami referencyjnymi. Po 90 dniach dojrzewania E_d względem betonów referencyjnych zmniejszył się o około 13% w przypadku obydwu zastosowanych cementów.

8.3. Mikrostruktura i skład fazowy matrycy cementowej

Analiza składu fazowego zaczynów cementowych została wykonana z dodatkiem popiołów P1, P2, P3 oraz cementami oznaczonymi CM-9 i CM-2 po 180 dniach dojrzewania w wodzie. Założono, że po 180 dniach dojrzewania reakcję wiązania i twardnienia matrycy cementowej zakończyły się. Oznaczenia i skład zaczynów cementowych przedstawiono w Tablicy 8.5.

Na podstawie badań XRD zidentyfikowano piki charakterystyczne następujących składników krystalicznych: faza $C-S-H$, portlandyt, ettringit, kwarc, kalcyt oraz karboglinian wapnia (Tablica 8.10 i 8.11). Powyższe składniki krystaliczne zostały zidentyfikowane w przypadku obydwu serii zaczynów, do wykonania których użyto cementów różniących się udziałem głównie fazy C_3A . Podniesienie tła dyfraktogramu w zakresie $25-35^\circ$ kąta 2θ świadczy o obecności niekrystalicznych produktów hydratacji zaczynów cementowych [90]. Piki charakterystyczne ettringitu i karboglinianów wapnia były nieznacznie większe od intensywności tła, stąd ich obecność jest wątpliwa. Obecność kalcytu i karboglinianów wapnia można wytłumaczyć karbonatyzacją zaczynu cementowego-popiołowego. Zidentyfikowanie pików charakterystycznych kwarcu jedynie w zaczynach cementowych z PLW pozwala przypuszczać, że kwarc był składnikiem pochodzącym z dodatku popiołowego. Dyfraktogramy zostały przedstawione w Załączniku V (Plansza 3-4).

Tablica 8.10. Intensywność pików charakterystycznych zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-2

Nazwa wyróżnionego minerału	Płaszczyzna symetrii d [Å]	Intensywność pików [j.u.]				Intensyw. tła [j.u.]
		Z_P-0_CM-2	Z_P1-30_CM-2	Z_P2-30_CM-2	Z_P3-30_CM-2	
Portlandyt	4,90	773	588	444	329	150
	2,63	943	812	488	387	180
C-S-H	3,04	269	254	236	229	180
	2,77	405	317	359	349	180
Ettringit	9,73	282	287	299	269	260
	5,61	200	210	229	225	180
Karboglinian wapnia	7,60	-	226	233	224	220
Kalcyt	3,03	310	317	224	211	180
Kwarc	3,34	-	226	391	395	150

Tablica 8.11. Intensywność pików charakterystycznych zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-9

Nazwa wyróżnionego minerału	Płaszczyzna symetrii d [Å]	Intensywność pików [j.u.]				Intensyw. tła [j.u.]
		Z_P-0_CM-9	Z_P1-30_CM-9	Z_P2-30_CM-9	Z_P3-30_CM-9	
Portlandyt	4,90	1040	694	292	294	150
	2,63	961	684	386	388	180
C-S-H	3,04	321	271	238	301	180
	2,77	370	311	321	308	180
Ettringit	9,73	255	353	280	282	260
	5,61	188	272	225	225	200
Karboglinian wapnia	7,60	245	294	248	-	220
Kalcyt	3,04	431	347	318	318	180
Kwarc	3,34	-	226	391	489	150

Wyniki badań termicznych (TG, DTA) próbek zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz dwoma rodzajami cementu CM-9 i CM-2 po 180 dniach dojrzewania zostały przedstawione w Tablicach 8.12 i 8.13. Ubytek masy w zakresie temperatury od 20°C do 400°C (H_{CSH}) jest związany w głównie z rozkładem fazy C-S-H. Straty H_{CSH} we wszystkich badanych zaczynach z PLW stanowiły 70% całkowitych strat masy. Zastąpienie 30% cementu PLW powoduje zmniejszenie straty masy zaczynu wynikającej z rozkładu portlandytu (H_{CH}) względem betonu referencyjnego. Spowodowane jest to efektem rozcieńczenia cementu oraz aktywnością PLW w matrycy cementowej z portlandytem. Zmniejszenie udziału strat masy wynikające z obecności portlandytu jest charakterystyczne w przypadku reakcji pucolanowej i było obserwowane w badaniach [3],[4] w zbliżonym zakresie zmian. Szczegółowe wyniki badań termicznej analizy różnicowej przedstawiono w Załączniku IV (Plansze 2-3).

Tablica 8.12. Zestawienie wyników badań termicznych zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-2

Przedział temperatury [°C]	Oznaczenie	Zawartość składników [%]			
		Z_P-0_CM-2	Z_P1-30_CM-2	Z_P2-30_CM-2	Z_P3-30_CM-2
20-1000	Całkowita strata prażenia	21,7	20,8	19,4	15,7
20-400	H_{CSH}	18,2	17,8	16,5	13,4
400-500	H_{CH}	4,8	3,1	2,1	2,7
500-1000	H_{CC}	1,8	2,6	2,8	1,7

Tablica 8.13. Zestawienie wyników badań termicznych zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-9

Przedział temperatury [°C]	Oznaczenie	Zawartość składników [%]			
		Z_P-0_CM-9	Z_P1-30_CM-9	Z_P2-30_CM-9	Z_P3-30_CM-9
20-1000	Całkowita strata prażenia	26,3	25,5	21,9	22,6
20-400	H _{CSH}	11,5	14,1	10,9	12,0
400-500	H _{CH}	3,8	2,5	1,7	3,1
500-1000	H _{CC}	5,3	3,6	2,5	1,8

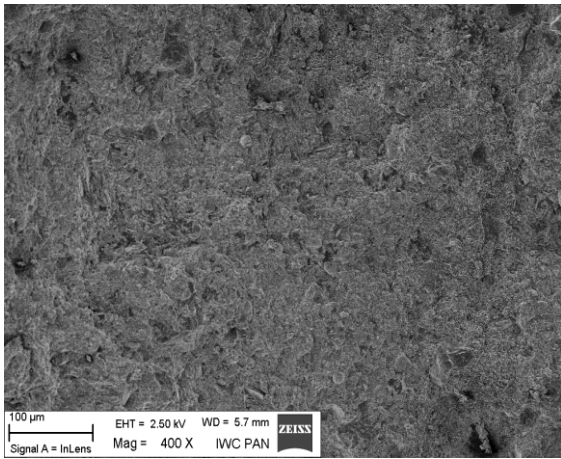
8.4. Morfologia produktów hydratacji

Mikrostrukturę zaczynów oceniano na podstawie obserwacji w *SEM* przełamów próbek zaczynów cementowych oraz betonów z dodatkiem popiołów P1, P2, P3 po 180 dniach dojrzewania w wodzie. Zaobserwowano następujące elementy charakterystyczne:

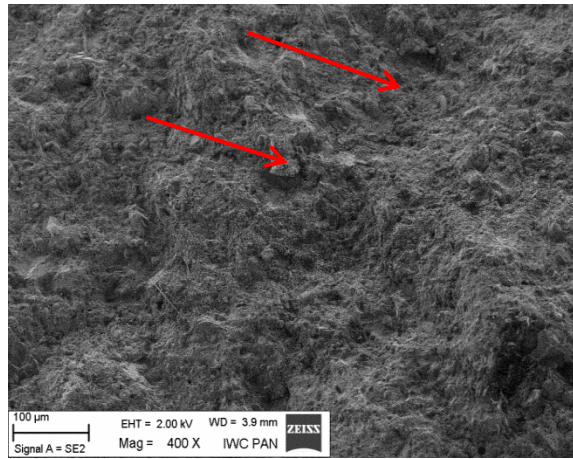
- produkty hydratacji w postaci jednolitej masy złożonej najczęściej z drobnowłóknistych, uwodnionych krzemianów wapnia typu *C-S-H*,
- heksagonalne tabliczki portlandytu,
- słupkowe kryształy ettringitu,
- węglan wapnia,
- pory powietrzne o zaokrąglonych kształtach, niektóre wypełnione całkowicie lub częściowo kryształami o pokroju tabliczek heksagonalnych, najprawdopodobniej portlandytu i słupkowymi kryształami ettringitu o zróżnicowanych wymiarach,
- okruchy niespalonego węgla, obecne w zaczynach z dodatkiem popiołów, przeważnie bardzo porowate, z obfitą krystalizacją produktów hydratacji cementu w ich wnętrzu.

W skali makroskopowej przełam zaczynu referencyjnego bez dodatku popiołu wykazywał zwartą strukturę o budowie drobnoziarnistej (Rys. 8.1). Zaczyn cementowy z dodatkiem *PLW* wykazały zbliżoną budowę makroskopową do zaczynów referencyjnych, jednakże widoczne były dodatkowo ziarna pochodzące z *PLW* (Rys. 8.2) oraz porowate ziarna niespalonego węgla o wymiarach osiagających 1 mm. W porach ziaren niespalonego węgla występowały produkty hydratacji zaczynu cementowego (Rys. 8.3), głównie ettringitu (Rys. 8.4).

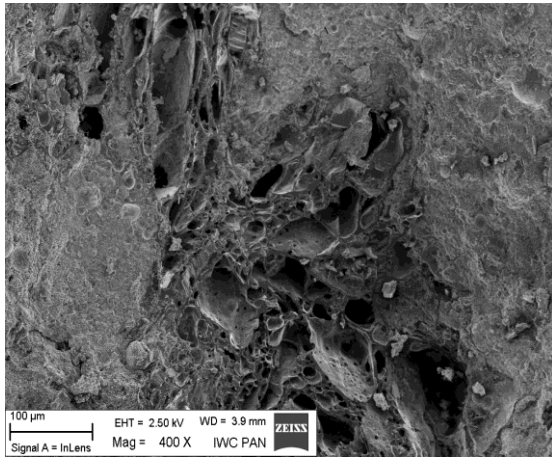
Główną fazę tworzącą zhydratyzowany zaczyn cementowy stanowi *C-S-H* o wielkości poszczególnych ziaren około 100-200 nm w przypadku wszystkich badanych zaczynów (Rys. 8.5 i 8.6). Morfologia ziaren fazy *C-S-H* nie zmieniła się po zastosowaniu dodatku *PLW*. Kryształy portlandytu obecne są w zaczynach cementowych w postaci warstwowych heksagonalnych płytek o wielkości do 4 µm (Rys. 8.7 i 8.8). Pustki powietrzne wypełnione są przez drobne igielki ettringitu oraz sześciokątne kryształy najprawdopodobniej stanowiące związki węglanowe (Rys. 8.9 i 8.10).



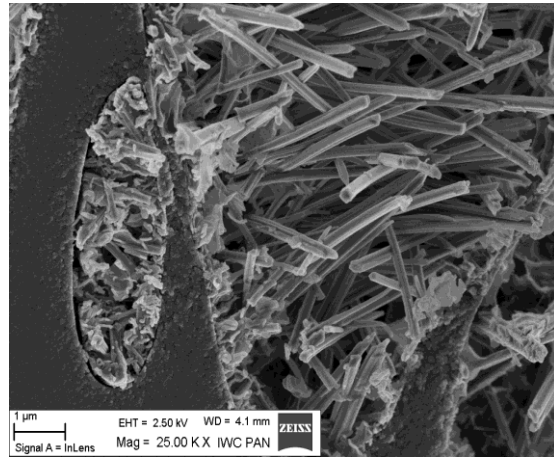
Rys. 8.1. Zwarta budowa zaczynu referencyjnego w zaczynie cementowym Z_P-0_CM-9



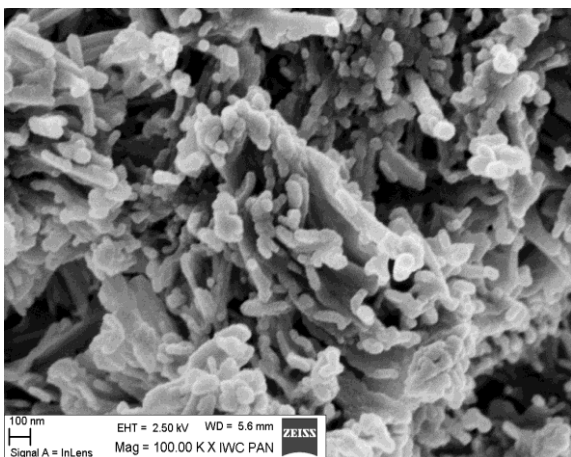
Rys. 8.2. Zwarta budowa drobnoziarnista z widocznymi kulistymi i kanciastymi ziarnami w zaczynie cementowo-popiołowym Z_P3-30_CM-9



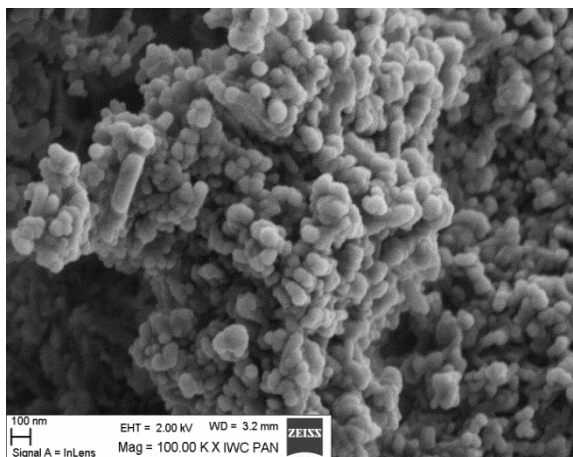
Rys. 8.3. Okruchy niespalonego węgla o dużej porowatości; pory te wypełnione są produktami hydratacji cementu



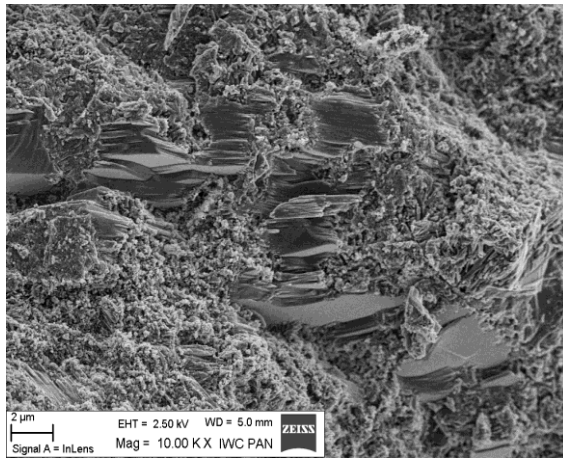
Rys. 8.4. Widoczne wydłużone kryształy ettringitu w porach okrusku niespalonego węgla



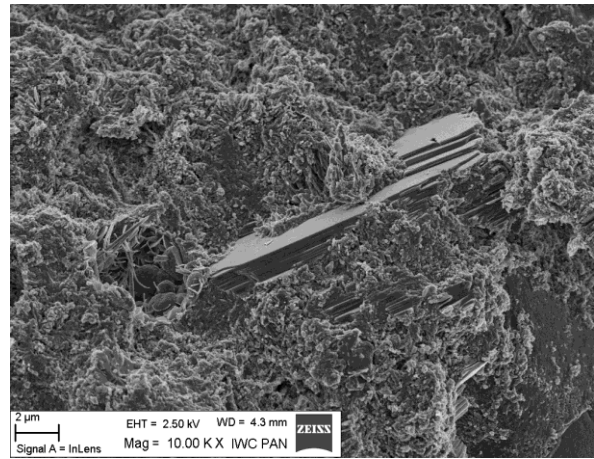
Rys. 8.5. Drobnoziarnista budowa zaczynu złożonego głównie z C-S-H w zaczynie cementowym Z_P-0_CM-9



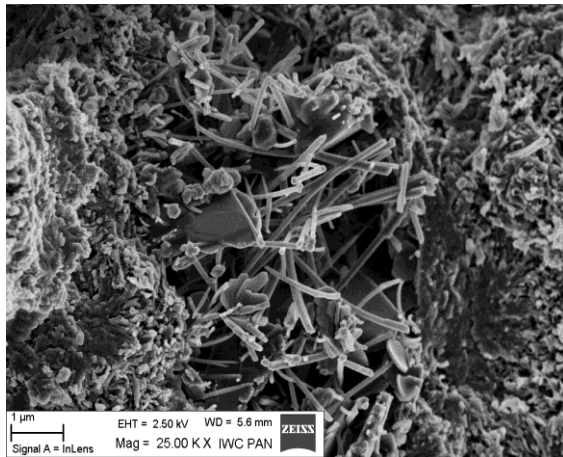
Rys. 8.6. Drobnoziarnista budowa zaczynu złożonego głównie z C-S-H w zaczynie cementowo-popiołowym Z_P3-30_CM-9



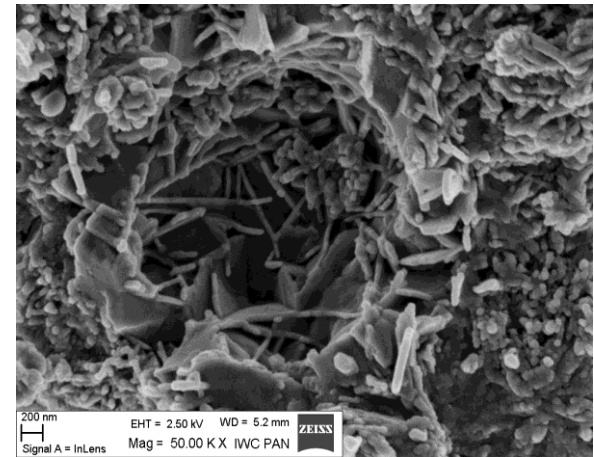
Rys. 8.7. Faza *C-S-H* i warstwowe kryształy portlandytu w zaczynie cementowym



Rys. 8.8. Droбноziarnista i drobnoporowata mikrostruktura zaczynu; widoczne warstwowe kryształy portlandytu i pory zarośnięte ettringitem w zaczynie cementowo-popiołowym Z_P1-30_CM-9

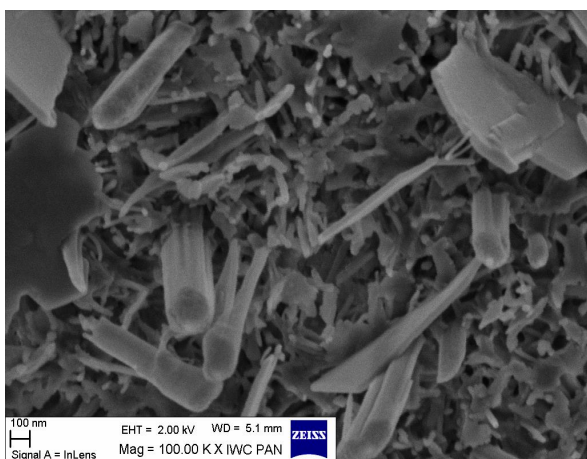


Rys. 8.9. Por powietrzny wypełniony wydłużonymi kryształami ettringitu i płytkami o pokroju sześciokątnym w zaczynie cementowym Z_P-0_CM-9

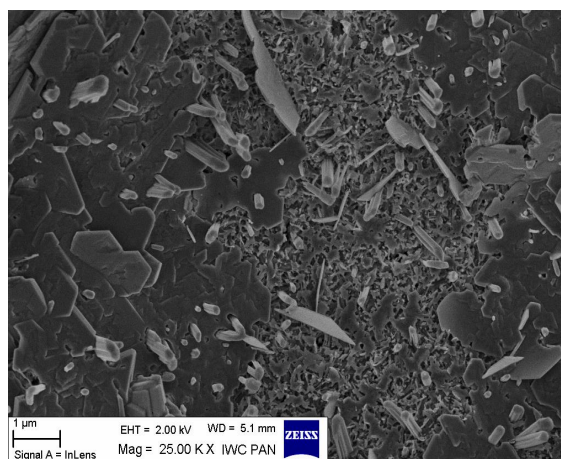


Rys. 8.10. Por powietrzny wypełniony wydłużonymi kryształami ettringitu i płytkami o pokroju sześciokątnym w zaczynie cementowo-popiołowym Z_P3-30_CM-9

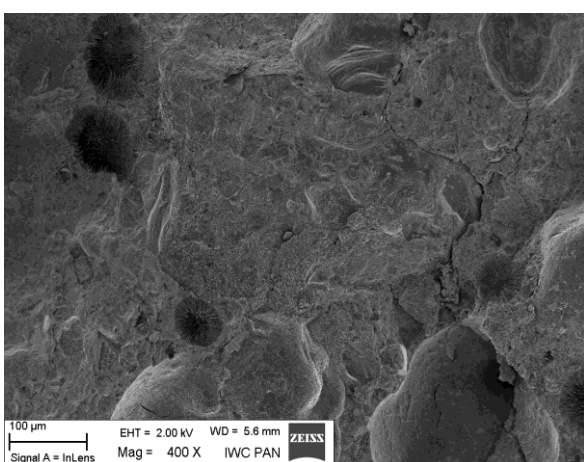
Zaobserwowane produkty hydratacji w postaci fazy *C-S-H* i ettringitu w próbkach betonów z dodatkiem *PLW* morfologicznie były zbliżone do obserwowanych w odpowiadających betonach referencyjnych. Kryształy ettringitu występowały w postaci rurek (Rys. 8.11). Ponadto kryształy portlandytu tworzyły skupiska niewielkich płytek o przekątnej 2-4 μm oraz nanometrycznej grubości (Rys. 8.12). Różnica wynikała najprawdopodobniej z faktu, że obserwowany przełam betonu powstał w sąsiedztwie strefy przejściowej ziarna kruszywa i matrycy cementowej, czyli w obszarze o zwiększonej zawartości portlandytu. Zaobserwowano charakterystyczną w przypadku napowietrzonych betonów obecność porów powietrznych o kulistym kształcie o wielkościach od 10 do 100 μm (Rys. 8.13). Pory są częściowo wypełnione ettringitem w postaci drobnych igielek (Rys. 8.14). Nie zaobserwowano znaczących różnic porowatości między betonem referencyjnym, a betonem z dodatkiem *PLW*. Pozostałe zdjęcia mikroskopowe zostały zamieszczone w Załączniku VII. Plansza 1-6.



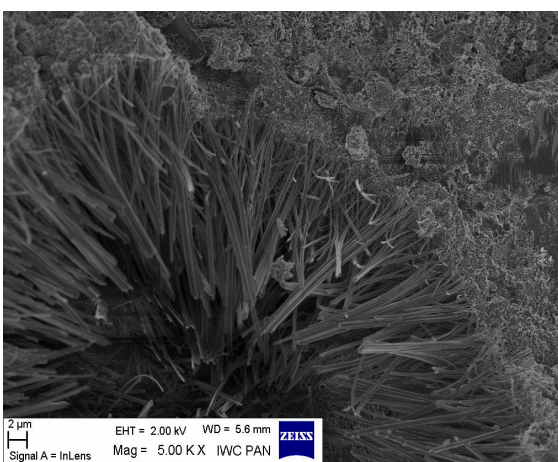
Rys. 8.11. Rurkowe kryształy ettringitu oraz płytki portlandytu w fazie *C-S-H*



Rys. 8.12. Skupiska płytek portlandytu oraz faza *C-S-H* i ettringit



Rys. 8.13. Pory w matrycy cementowo-popiołowej, częściowo wypełnione ettringitem

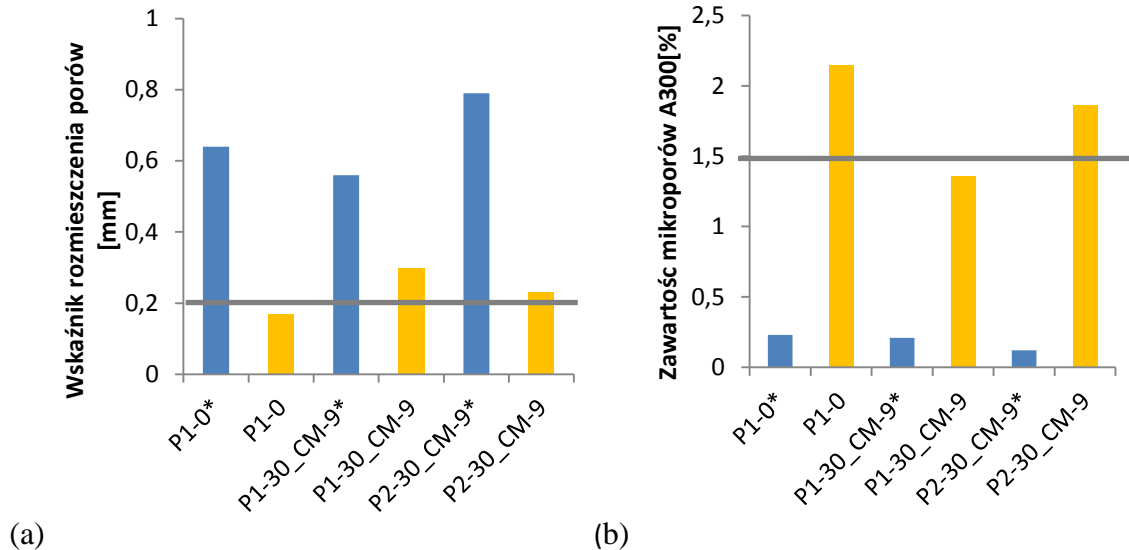


Rys. 8.14. Powiększony fragment Rys. 8.13; kryształy ettringitu wypełniające pustkę powietrzną

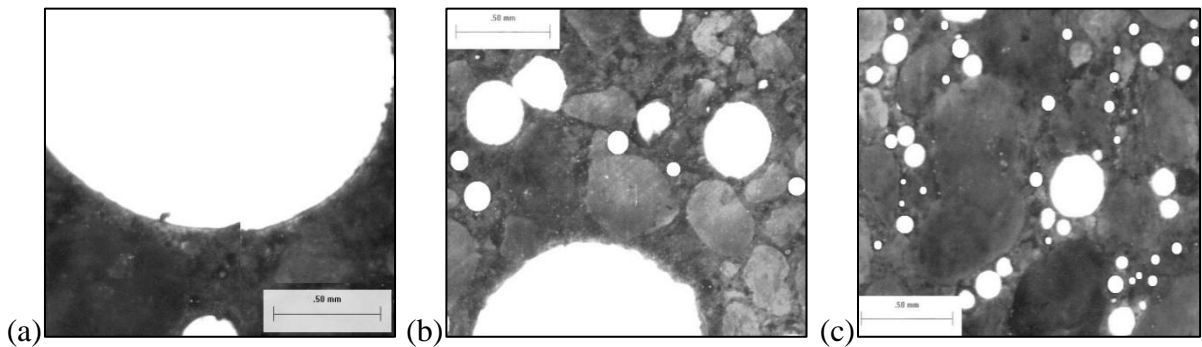
8.5. Charakterystyka porów powietrznych

Określenie rozmieszczenia porów powietrznych wykonano dla wszystkich badanych betonach, także nienapowietrzonych. Szczegółowe wyniki zostały przedstawione w Załączniku VIII, Plansza 1-2.

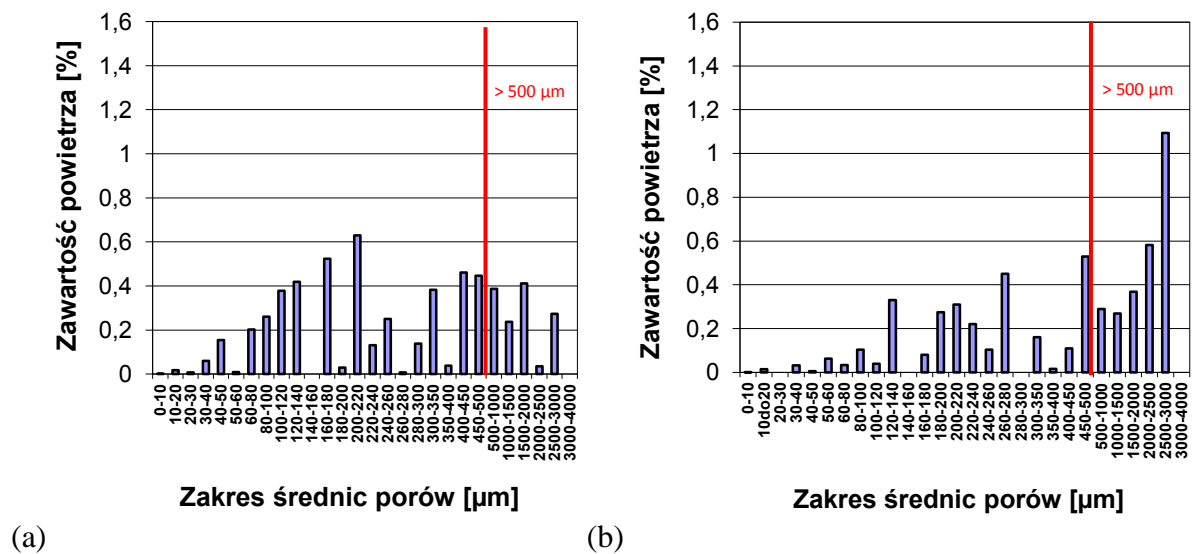
Na podstawie pomiarów rozmieszczenia porów powietrznych betonów nienapowietrzonych stwierdzono małą zawartość mikroporów (A_{300}) oraz duże odległości pomiędzy porami powietrznymi określone wskaźnikiem rozmieszczenia (\bar{L}). Zawartość mikroporów nie przekraczała 0,23%, a wskaźnik rozmieszczenia porów wynosił maksymalnie 0,8 mm (Rys. 8.15). Nienapowietrzone betony z *PLW* uzyskały zbliżoną charakterystykę porów, niezależną od właściwości stosowanego popiołu. Przykładowe obrazy mikrostruktury porów w próbkach betonów przedstawia Rysunek 8.16. Widoczne są duże różnice wielkości porów powietrznych skorelowane ze wskaźnikiem rozmieszczenia porów (\bar{L}).



Rys. 8.15. Charakterystyka porów powietrznych w betonach z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 (* betony nienapowietrzone): (a) wskaźnik rozmieszczenia; (b) zawartość mikroporów



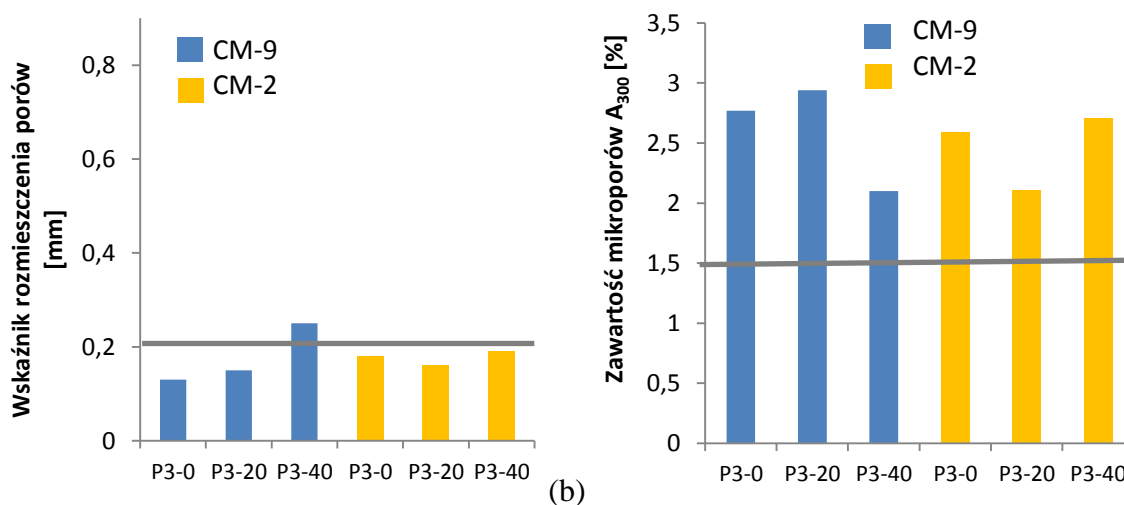
Rys. 8.16. Przykładowe obrazy porów powietrznych (kolor biały) widoczne na przekrojach próbek betonów: (a) P2-30_CM-9* ($\bar{L} = 0,79$ mm); (b) P1-30_CM-9 ($\bar{L} = 0,30$ mm); (c) P1-0 ($\bar{L} = 0,17$ mm)



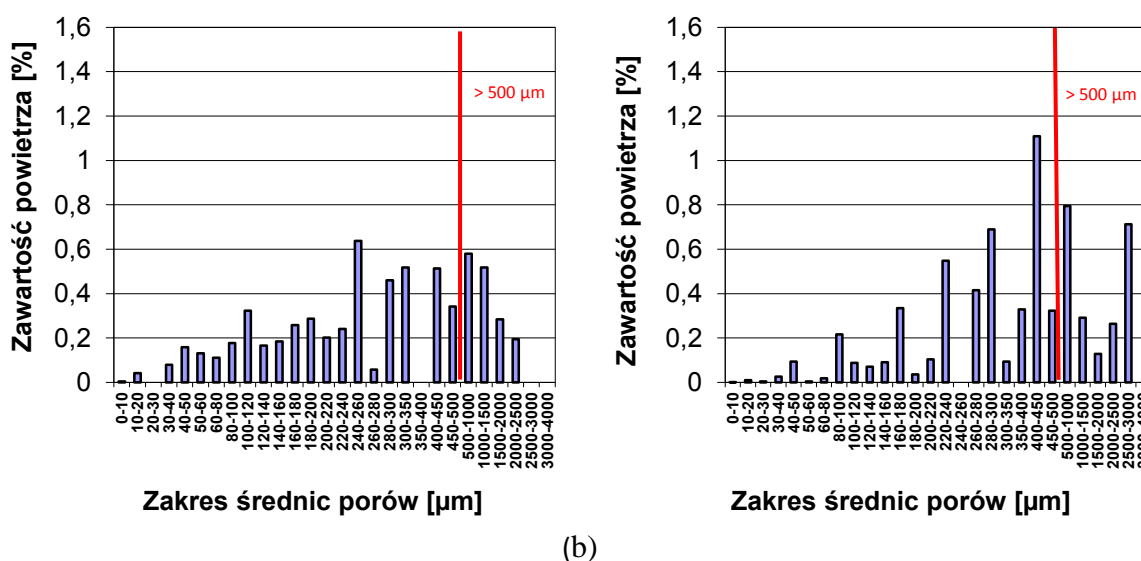
Rys. 8.17. Udział porów powietrznych w przedziałach porowatości betonów: (a) bez PLW - beton P1-0; (b) z 30% dodatkiem PLW - beton P1-30_CM-9

Zastosowanie domieszki napowietrzającej w betonie referencyjnym pozwoliło osiągnąć zadowalającą wartość wskaźnika \bar{L} wynoszący 0,17 mm i zawartość mikroporów A_{300} wynoszącą 2,15%. Zastosowanie dodatku popiołów P1 i P2 wpłynęło na zmniejszenie A_{300} i zwiększenie \bar{L} (Rys. 8.21). Na podstawie analizy rozkładu wielkości porów stwierdzono, że zastosowanie *PLW* powoduje zwiększenie całkowitego udziału porów o średnicach większych od 500 μm względem betonu referencyjnego (Rys. 8.17).

Na podstawie powyższych badań oraz pracy [54] zmieniono założenia technologiczne napowietrzania betonów, tak aby zapewnić właściwe rozmieszczenie mikrostruktury porów. W tym celu zwiększono zawartość powietrza do 6-7% i założono klasę konsystencji S2, aby osiągnąć większą zawartość mikroporów i ich stabilność technologiczną podczas zagęszczania mieszanki. Weryfikację zmian przeprowadzono na podstawie badania rozmieszczenia porów w betonach z popiołem P3 oraz cementami CM-2 i CM-9 (Rys. 8.18).



Rys. 8.18. Charakterystyka porów powietrznych w napowietrzonych betonach z popiołem P3 (20% i 40% zastąpienia) oraz cementami CM-9 i CM-2: (a) wskaźnik rozmieszczenia; (b) zawartość mikroporów



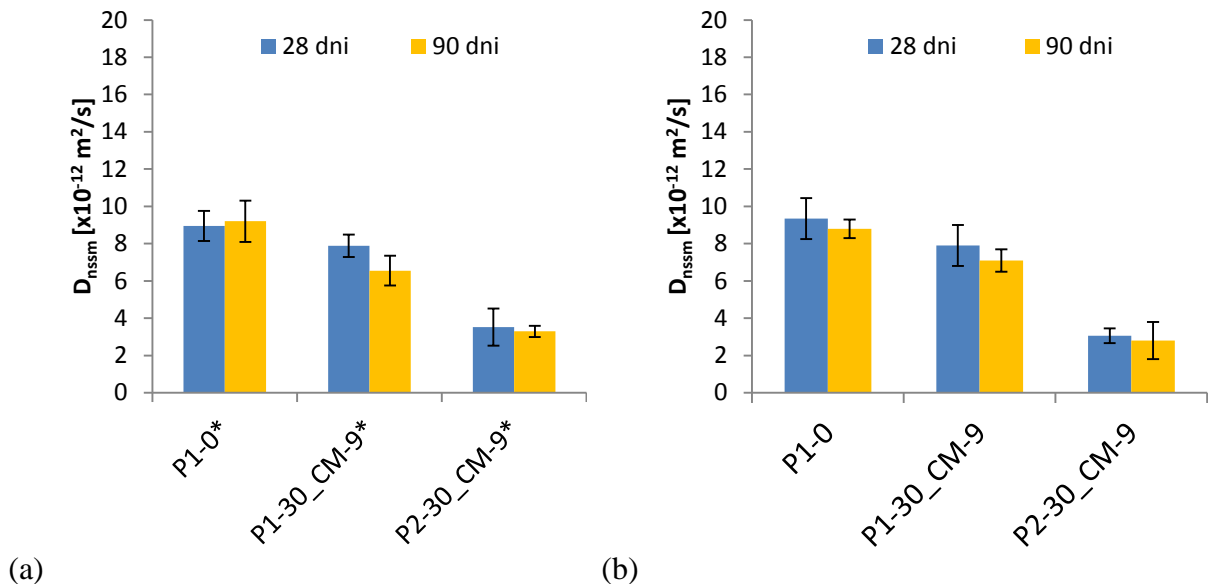
Rys. 8.19. Udział porów powietrznych w przedziałach porowatości betonów: (a) z 20% dodatkiem *PLW*- beton P3-20_CM-9; (b) z 40% dodatkiem *PLW* - beton P3-40_CM-9

Wszystkie badane betony z popiołem P3 zawierały więcej niż 2% mikroporów przy całkowitej zawartości porów od 4,5% do 7%. Wskaźnik rozmieszczenia jedynie w przypadku betonu P3-40_CM_9 był większy od 0,2 mm. Potwierdzono wpływ dodatku *PLW* na tworzenie się pustek o średnicach przekraczających 500 μm . Stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem udziału *PLW* w betonach zwiększa się całkowity udział porów powietrznych o średnicach większych od 500 μm (Rys. 8.19).

8.6. Przepuszczalność jonów chlorkowych

Określenie współczynnika migracji jonów chlorkowych (D_{nssm}) w stanie nieustalonym wykonano po 28 i 90 dniach dojrzewania próbek dojrzewających w wodzie. Wyniki badań betonów z popiołami P1, P2, P3 przedstawiono w Załączniku IX (Plansza 1).

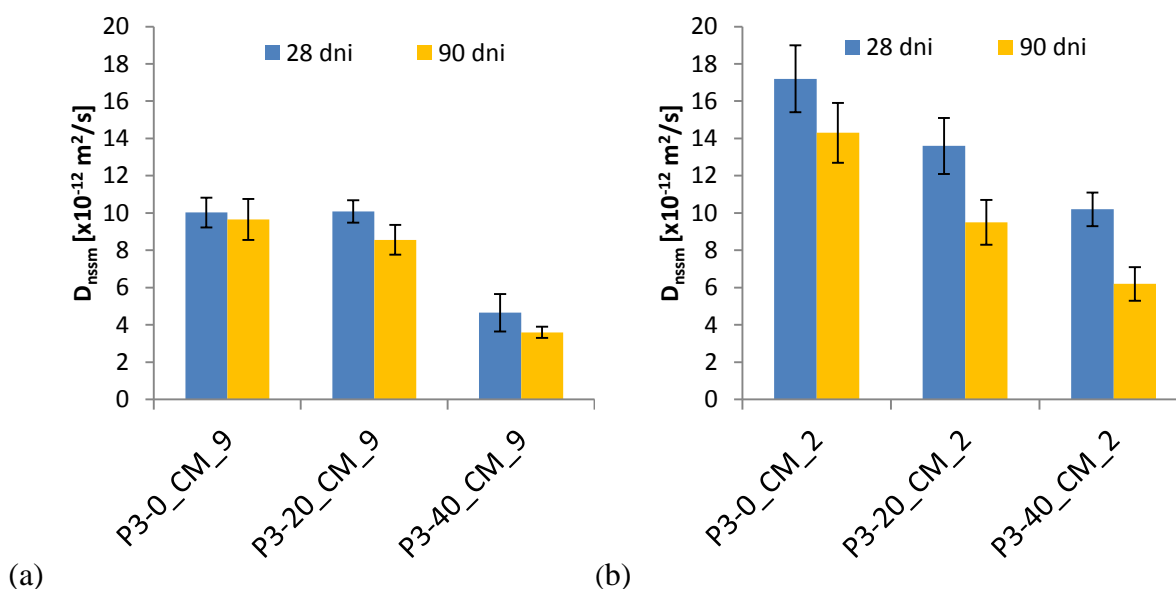
Stwierdzono brak istotnych różnic D_{nssm} między kompozytami napowietrzonymi i nienapowietrzonymi z popiołami P1 i P2 (Rys. 8.20).



Rys. 8.20. Współczynnik migracji jonów chlorkowych betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9: (a) betony nienapowietrzony*; (b) betony napowietrzony

Zastosowanie popiołu P1 spowodowało uzyskanie wartości D_{nssm} po 28 dniach dojrzewania zbliżonych do betonu referencyjnego. Jednakże wydłużenie czasu dojrzewania do 90 dni pozwoliło uzyskać D_{nssm} 20% mniejszy w porównaniu z betonem referencyjnym. Zmniejszenie D_{nssm} stwierdzono w przypadku betonów z popiołem P2, który charakteryzował się dużym rozwinięciem powierzchni ziaren wg Blane'a. Zastosowanie dodatku popiołu P2 w betonie zmniejszyło D_{nssm} względem napowietrzonego betonu referencyjnego o około 60-70% w obu terminach dojrzewania. Uzyskane wartości D_{nssm} wynoszą odpowiednio $3,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ i $2,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, po 28 i 90 dniach dojrzewania. Znaczne ograniczenie szybkości migracji jonów chlorowych w próbkach betonu z popiołem P2 wynika najprawdopodobniej z uszczelnienia mikrostruktury matrycy cementowej ziarnami popiołu o mniejszych rozmiarach.

Znaczące zmiany w odporności na migrację jonów chlorkowych występują między betonami różniącymi się rodzajem cementu (Rys. 8.21).



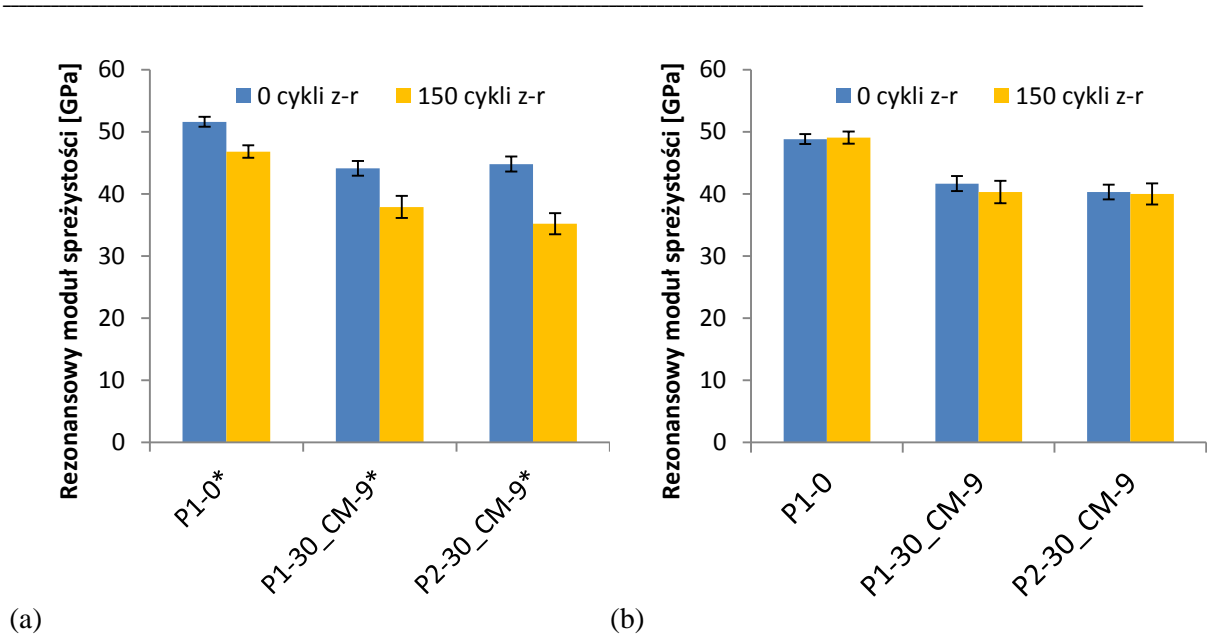
Rys. 8.21. Współczynnik migracji jonów chlorkowych napowietrzonych betonów z popiołem P3 oraz: (a) cementem CM-9; (b) cementem CM-2

Współczynniki D_{nssm} po 28 dniach dojrzewania betonów referencyjnych z cementami CM-9 i CM-2 wynoszą odpowiednio $10,2 \cdot 10^{-12}$ i $17,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s. Zastosowanie cementu CM-9 i 20% dodatku pozwala uzyskać zbliżone wyniki D_{nssm} względem betonu referencyjnego. Natomiast użycie 40% dodatku popiołu P3 zmniejsza D_{nssm} o 55% względem betonu bez dodatku PLW. Wydłużenie czasu dojrzewania nie wpłynęło na istotne zmniejszenie współczynnika D_{nssm} w betonach z cementem CM-9. Dodatek popiołu P3 do betonu z cementem CM-2 powoduje zmniejszenie wartości D_{nssm} proporcjonalny do udziału wprowadzonego popiołu P3 w porównaniu z betonem referencyjnym. Zastąpienie 20% PLW w betonie zmniejszyło D_{nssm} o około 20%. Zaobserwowano wpływ wydłużenia czasu dojrzewania na uzyskiwane rezultaty D_{nssm} betonów z PLW i cementem CM-2.

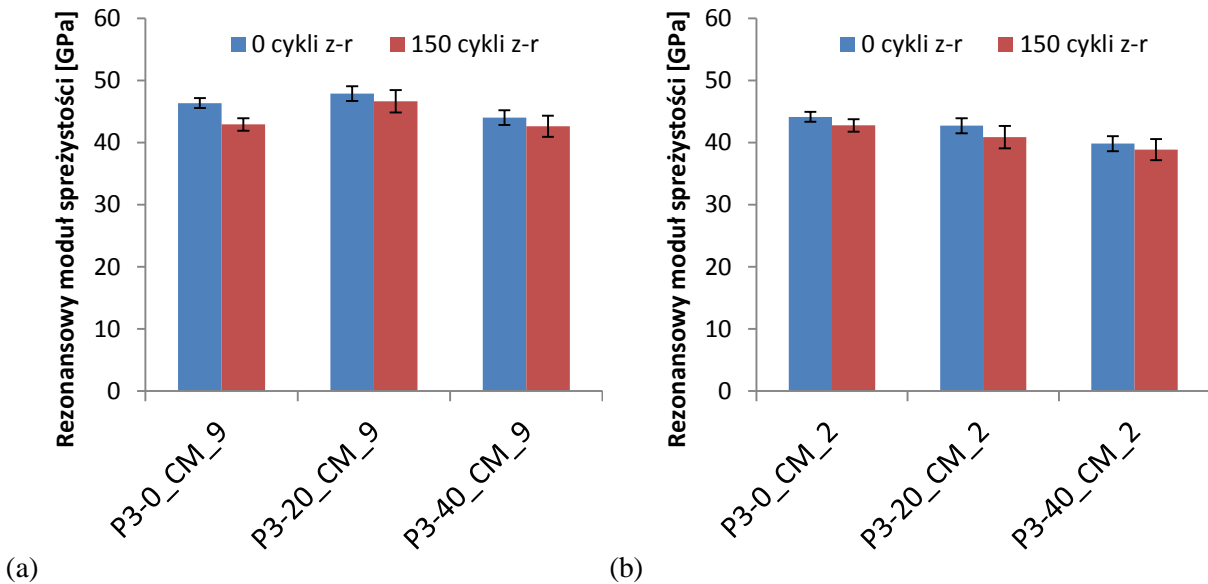
8.7. Odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie

Określenie wpływu cyklicznego zamrażania i rozmrażania na rezonansowy współczynnik sprężystości (E_d) zostało wykonane po 28 dniach dojrzewania betonów. Badania E_d wykonano przed umieszczeniem próbek w komorze klimatycznej oraz po 100 i 150 cyklach zamrażania i rozmrażania. Wyniki przedstawiono w Załączniku X (Plansza 1).

Nienapowietrzony beton z popiołami P1 i P2 przed rozpoczęciem zamrażania uzyskały średnią wartość E_d wynoszącą odpowiednio 44 GPa i 45 GPa (Rys. 8.22). Uzyskane wartości były około 13% mniejsze, niż w przypadku betonu referencyjnego. Po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania we wszystkich próbkach betonów stwierdzono zmniejszenie E_d . W przypadku betonu referencyjnego stwierdzono zmniejszenie E_d o 9%. Betony z 30% dodatkiem popiołów P1 i P2 wykazały zmniejszenie E_d o odpowiednio 14% i 22%. Świadczy to o pogorszeniu odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie nienapowietrzonych betonów z 30% dodatkiem PLW. Napowietrzony beton z cementami CM-9 i CM-2 oraz popiołem P3 nie wykazały istotnych zmian E_d po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania w porównaniu do E_d przed cyklami zamrażania (Rys. 8.23).



Rys. 8.22. Zmiana E_d po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania (z-r) betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9: (a) betony nienapowietrzone*; (b) betony napowietrzone



Rys. 8.23. Zmiana E_d po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania napowietrzonych betonów z popiołem P3 oraz cementem: (a) CM-9; (b) CM-2

Badanie odporności na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających zostało wykonane na próbkach betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 po 28 i 90 dniach dojrzewania. Powierzchniami narażonymi na czynniki środowiskowe były powierzchnie cięte oraz powierzchnie formowane próbek. Betony z popiołem P3 i cementami CM-9 i CM-2 badano jedynie po 90 dniach dojrzewania na powierzchniach ciętych. Szczegółowe wyniki badań przedstawiono w Załączniku X (Plansza 2).

Masa złuszczeń powierzchniowych w próbkach nienapowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2 przekraczała dopuszczalną masę $m_{56} \leq 1,00 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} < 2$ (Tablica 8.14). Masa złuszczeń powierzchniowych betonu referencyjnego wynosiła $m_{56} = 2,39 \text{ kg/m}^2$. Nienapowietrzone betony z popiołami P1 i P2 uzyskały mniejszą masę złuszczeń m_{56} , odpowiednio o 27% i 44%. Świadczy to o pozytywnym wpływie 30% dodatku PLW na ograniczenie masy złuszczonego betonu.

Napowietrzanie betonów referencyjnych spowodowało ograniczenie masy złuszczeń powierzchniowych do śladowych ilości, wynoszących jedynie 0,02 kg/m². W napowietrzonych betonach z dodatkiem popiołu P1 i P2 masa złuszczeń m_{56} wynosiła odpowiednio 0,23 kg/m² i 0,44 kg/m². Uzyskane rezultaty pozwalają sklasyfikować badane betony z *PLW* jako materiał o „dobrej” odporności na powierzchniowe łuszczenie, tj. spełniające kryterium: $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} \leq 2$.

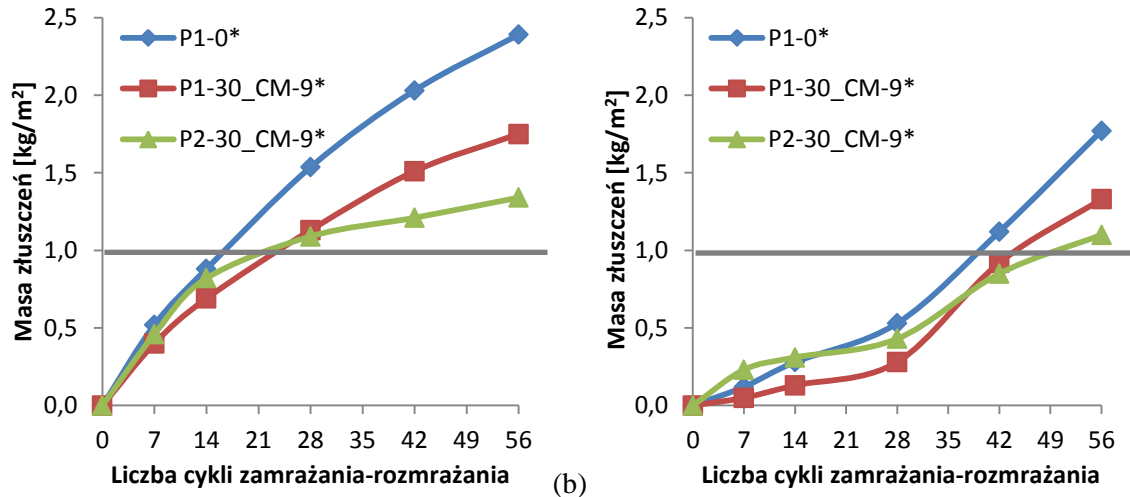
Tablica 8.14. Masa złuszczeń powierzchniowych po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania (m_{56}) betonów z popiołami P1 i P2

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Złuszczenia powierzchniowe	
			m_{56} [kg/m ²]	m_{56}/m_{28}
P1-0*	cięta	28	2,39	1,6
P1-30_CM-9*			1,75	1,5
P2-30_CM-9*			1,34	1,2
P1-0	cięta	28	0,02	1,2
P1-30_CM-9			0,23	1,2
P2-30_CM-9			0,44	1,2
P1-0*	formowana	28	1,77	3,3
P1-30_CM-9*			1,33	4,8
P2-30_CM-9*			1,10	2,6
P1-0	formowana	28	0,02	1,4
P1-30_CM-9			0,11	3,2
P2-30_CM-9			0,33	20,6
P1-0	cięta	90	0,02	1,2
P1-30_CM-9			0,17	1,4
P2-30_CM-9			0,36	1,3
P1-0	formowana	90	0,02	1,7
P1-30_CM-9			0,35	4,4
P2-30_CM-9			0,59	1,9

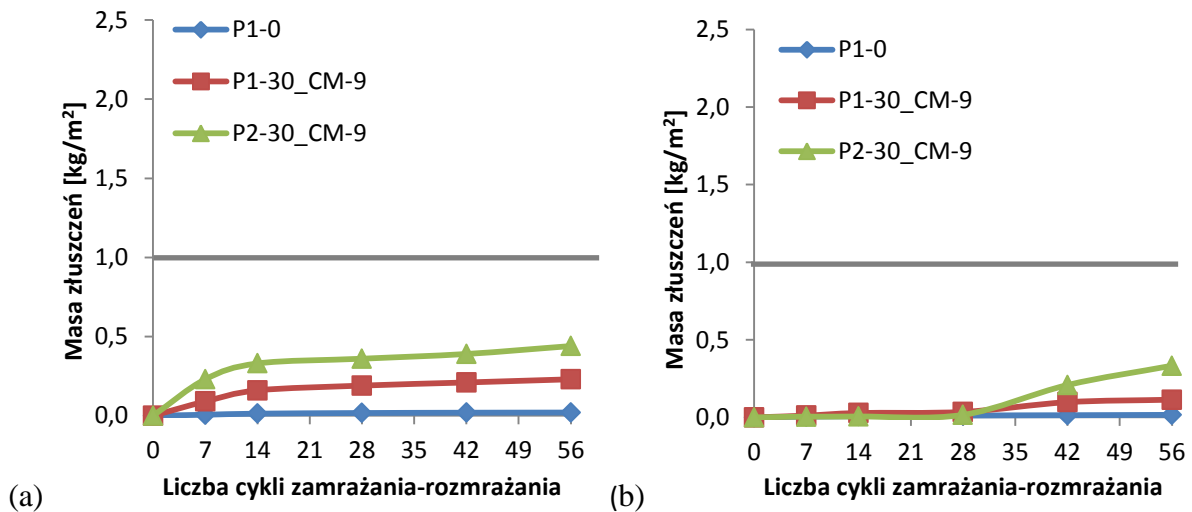
* betony nienapowietrzane

Badanie odporności na powierzchniowe złuszczenie wykonano także na powierzchni formowanej próbek betonów z popiołami P1 i P2 po 28 dniach dojrzewania. Zmiana badanej powierzchni wpłynęła na zmniejszenie masy złuszczonego materiału w próbkach betonów o tym samym składzie, szczególnie w betonach nienapowietrzonych. Najistotniejszą obserwacją związaną ze zmianą eksponowanej powierzchni jest szybkość przyrostu masy złuszczonego materiału ze zwiększeniem liczby cykli zamrażania i rozmrażania (Rys. 8.24 i 8.25). Na powierzchniach ciętych zaobserwowano największy przyrost masy złuszczeń po pierwszych 14 cyklach zamrażania i rozmrażania. Na powierzchniach formowanych próbek największą masę złuszczeń zaobserwowano po 28 cyklach zamrażania i rozmrażania,

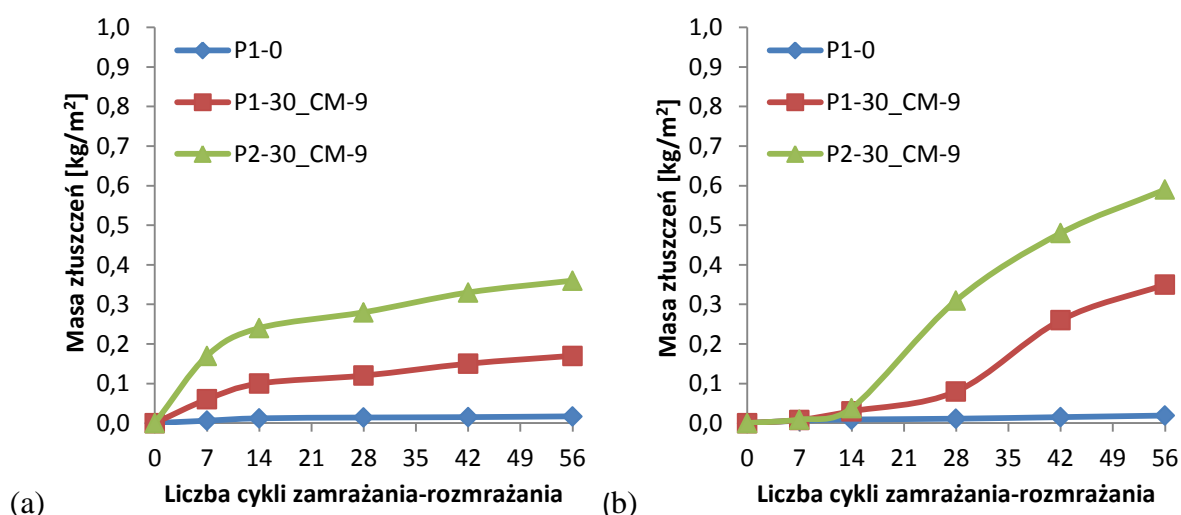
zwiększając stosunek m_{56}/m_{28} powyżej 2 (Tablica 8.14). Stosunek m_{56}/m_{28} powyżej 2 powoduje zakwalifikowanie betonów o masie złuszczeń większej od $0,20 \text{ kg/m}^2$ do kategorii niedopuszczalnej. Wydłużenie czasu dojrzewania napowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2 do 90 dni wpływa w niewielkim stopniu na masę złuszczeń m_{56} oznaczoną na powierzchni ciętej (Tablica 8.14). Masa złuszczeń m_{56} na powierzchni formowanej próbek z popiołem P1 i P2 po 90 dniach dojrzewania jest większa niż na powierzchni ciętej (Rys. 8.26).



Rys. 8.24. Zmiana masy złuszczeń powierzchniowych z cyklami zamrażania i rozmrażania nienapowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 z eksponowaną powierzchnią: (a) cięta; (b) formowaną



Rys. 8.25. Zmiana masy złuszczeń powierzchniowych z cyklami zamrażania i rozmrażania napowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 z eksponowaną powierzchnią: (a) cięta; (b) formowaną



Rys. 8.26. Zmiana masy złuszczeń powierzchniowych z cyklami zamrażania i rozmrażania napowietrzonych betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 po 90 dniach dojrzewania z eksponowaną powierzchnią: (a) ciętą; (b) formowaną

Uzyskana mikrostruktura porów w napowietrzonych betonach wykonanych z popiołem P3 i cementami CM-9 i CM-2 spełniała kryteria betonów mrozoodpornych. Dlatego założono, że odporność na powierzchniowe łuszczenie wynika jedynie z właściwościami *PLW* i zastosowanego cementu w betonach. W przypadku betonów referencyjnych masa złuszczeń m_{56} była zbliżona i wynosiły odpowiednio 0,23 kg/m² i 0,30 kg/m² przy użyciu cementów CM-9 i CM-2 (Tablica 8.15). Jednakże w przypadku betonów z popiołem P3 i cementem CM-2 masa złuszczeń m_{56} przekraczała 1 kg/m². Dlatego wpływ udziału dodatku *PLW* nie był w tym przypadku rozpatrywany. Betony z popiołem P3 i cementem CM-9 zostały zaklasyfikowane jako materiały o „dobrej” odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających. Należy zwrócić uwagę na zbliżoną masę złuszczeń m_{56} w betonie referencyjnym i betonie z 40% dodatkiem *PLW*. Zwiększenie odporności betonów na powierzchniowe łuszczenie wynika z przedłużonej pielęgnacji w wodzie betonu z *PLW*. Wydłużona pielęgnacja betonów z dodatkami popiołowymi według Valenzy [139] wpływa na poprawę odporności na powierzchniowe łuszczenie.

Tablica 8.12. Masa złuszczeń powierzchniowych po 56 cyklach zamrażania i rozmrażania (m_{56}) betonów z popiołem P3 i cementami CM-2 i CM-9

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Złuszczenia powierzchniowe [kg/m ²]	
			m_{56} [kg/m ²]	m_{56}/m_{28}
P3-0_CM_9	cięta	90	0,23	1,4
P3-20_CM_9			0,39	1,0
P3-40_CM_9			0,17	2,5
P3-0_CM_2	cięta	90	0,30	1,4
P3-20_CM_2			1,33	1,4
P3-40_CM_2			1,76	1,4

8.8. Podsumowanie

- 1) Wykorzystanie *PLW* jako dodatku w betonach przeznaczonych do konstrukcji, które są narażone na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odladzających, wymaga stosowania napowietrzenia. Stwierdzono, że napowietrzenie mieszanki betonowej z *PLW* wymaga uwzględnienia następujących właściwości *PLW*:
 - napowietrzanie betonów z *PLW* wymaga większych objętości domieszki napowietrzającej w porównaniu z betonem referencyjnym. W przypadku popiołów różniących się przede wszystkim rozwinięciem powierzchni ziaren (popioły P1 i P2), mierzonej metodą Blaine'a, udział domieszki w składzie mieszanki był ponad trzykrotnie większy dla większego rozwinięcia powierzchni.
 - stosowanie *PLW* w betonie napowietrzonym powoduje zwiększenie całkowitego udziału porów o średnicach większych od 500 μm względem betonu bez dodatków. Powoduje to zmniejszenie udziału mikroporów (A_{300}) w betonie. Aby przeciwdziałać powyższej właściwości *PLW*, należy zwiększyć projektowany udział powietrza w mieszance betonowej. Zwiększenie udziału powietrza w mieszance z zakresu 5-6% do 6-7% spowodowało uzyskanie udziału mikroporów w betonie powyżej 2%.
- 1) Zastosowanie 30% dodatku *PLW* pobranych w trzech różnych terminach nie spowodowało znaczących zmian ilościowych w zawartości fazy *C-S-H* w zaczynach cementowo-popiołowych, wyznaczonych za pomocą analizy termicznej (*DTA*, *TG*). Badania *XRD* umożliwiły zidentyfikowanie krystalicznych produktów hydratacji w zaczynie cementowym takich jak: *C-S-H*, portlandyt oraz ettringitu. Zastosowanie dodatku *PLW* w zaczynach cementowych nie spowodowało zmian jakościowych w składzie produktów hydratacji. Obserwacje w *SEM* nie wykazały istotnych zmian morfologii produktów hydratacji po zastosowaniu dodatku *PLW* do betonu.
- 2) Właściwości betonów z dodatkiem *PLW* zależą od składu fazowego użytego cementu portlandzkiego. Zastosowanie cementu o składzie fazowym charakteryzującym się głównie 2% udziałem C_3A zwiększyło masę złuszczeń powierzchniowych oraz zwiększyło migrację jonów chlorkowych w porównaniu do betonów z cementem portlandzkim z 9% udziałem C_3A . Z badań wynika, że betony z dodatkiem *PLW* narażone na oddziaływanie jonów chlorkowych są bardziej odporne na ich działanie, gdy użyty został cement o większej zawartości C_3A . Powyższy wniosek został wykorzystany do projektowania betonów w następnym rozdziale pracy.
- 3) Dłuższe dojrzewanie betonu z dodatkiem *PLW* znacząco zmniejsza współczynnik migracji jonów chlorkowych w porównaniu do betonu referencyjnego. Zwiększanie udziału dodatku *PLW* w betonie (do 40% zastąpienia) powoduje zmniejszenie współczynnika migracji jonów chlorkowych. Podobnie większe rozwinięcie powierzchni wg. Blaine'a powoduje zmniejszenie współczynnika migracji jonów chlorkowych.
- 4) Napowietrzony kompozyt z 40% dodatkiem popiołu P3 osiągnął odporność na powierzchniowe łuszczenie zbliżoną do betonu bez dodatków mineralnych. Rezultat osiągnięto w wyniku przedłużonej pielęgnacji betonu do 90 dni oraz udziałowi mikroporów $A_{300} > 2\%$.
- 5) Zmiana eksponowanej powierzchni z ciętej na powierzchnię formowaną w badaniu powierzchniowego łuszczenia wywołała zmianę kinetyki przyrostu masy złuszczonego materiału ze zwiększeniem liczby cykli zamrażania i rozmrażania. W wyniku zmiany eksponowanej powierzchni zmienił się stosunek m_{56}/m_{28} na większy od 2, powodując

zaklasyfikowanie betonów z dodatkiem *PLW* do klasy o „niedopuszczalnej” odporności na powierzchniowe łuszczenie.

9. Wpływ aktywacji popiołów lotnych wapiennych na mikrostrukturę i właściwości betonów

9.1. Skład betonów z aktywowanym popiołem lotnym wapiennym

Kolejną serię mieszanek zaprojektowano w celu określenia wpływu aktywacji *PLW* na mikrostrukturę i właściwości betonów. W badaniach użyto popiołu P4 aktywowanego przez mielenie oraz separację ziarnową. Kryteria wyboru *PLW* zostały omówione w Rozdziale 7.4. Wyjściowe proporcje składników mieszanki przyjęto tak, aby odpowiadały normowym ograniczeniom składu w typowych obiektach inżynierskich narażonych na oddziaływanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności środków odladzających (klasa ekspozycji *XF4*). Na podstawie normy PN-EN 206 [N25] w klasie ekspozycji *XF4* minimalna ilość cementu w betonie wynosi 340 kg/m^3 , a maksymalny wskaźnik *w/c* wynosi 0,45. Powyższe wartości graniczne przyjęto do projektowania napowietrzonego betonu referencyjnego. Użyto cementu o 9% zawartości C_3A (oznaczonego CM-9). Zastosowano kruszywo mrozo odporne granodiorytowe oraz naturalny piasek kwarcowy. Projektowana zawartość powietrza w mieszance wynosiła 6-7%, a klasa konsystencji S2. Zastąpienie cementu portlandzkiego w betonie dodatkiem *PLW* odbywało się przez zastąpienie 30% masy cementu. Korekta objętości kruszywa, wynikająca ze zmiany objętości spoiwa z *PLW*, została przeprowadzona przez zmniejszenie udziału frakcji piasku kwarcowego. Skład betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW* został przedstawiony w Tablicy 9.1. Powyższe założenia projektowe zostały zastosowane także w odniesieniu do betonów z cementami wieloskładnikowymi (Tablica 9.2).

Właściwości mieszanki betonowej z przetworzonymi *PLW* zostały przedstawione w Tablicach 9.3 i 9.4. Aktywacja przez separację ziarnową *PLW* dwukrotnie zmniejszała udział domieszki napowietrzającej niezbędnych do uzyskania zakładanego napowietrzenia mieszanki betonowej w porównaniu do betonu z nieprzetwarzanym dodatkiem. Zastosowanie mielenia powoduje trzykrotne zwiększenie zapotrzebowania na domieszkę napowietrzającą w porównaniu z betonem z nieprzetwarzanym *PLW*. Jednakże mielenie pozwala na trzykrotne zmniejszenie zapotrzebowania na domieszkę upłynniającą.

Tablica 9.1. Skład betonów z popiołem P4 [kg/m^3]

Oznaczenie próbek	CM-9	Popiół P4	Woda	Piasek kwar. 0-2 mm	Grys granodiorytowy		AEA ^{#)}	SPL ^{##)}
					2-8 mm	8-16 mm		
P4-0	340	-	153	591	609	595	0,1	0,3
P4-30	238	102	153	574	609	595	0,4	1,7
P4-30M	238	102 ^{*)}	153	574	609	595	1,1	0,5
P4-30S	238	102 ^{**)}	153	574	609	595	0,2	2,1

*) – popiół aktywowany przez mielenie (M)

***) – popiół po separacji ziarnowej (S)

#) - domieszka napowietrzająca

##) - superplastyfikator

Tablica 9.2. Skład betonów z cementami wieloskładnikowymi [kg/m^3]

Oznaczenie próbek	Cement		Woda	Piasek kwar. 0-2 mm	Grys granodiorytowy		AEA ^{##}	SPL ^{###}
	Rodzaj	Zawartość			2-8 mm	8-16 mm		
C-I	CEM I [#]	340	153	591	609	595	0,22	0,2
C-II(W)	CEM II/B-W [#]	340	153	591	609	595	0,69	0,9
C-II(V-W)	CEM II/B-M (V-W) [#]	340	153	591	609	595	0,41	0,5
C-V(S-W)	"CEM V/A (S-W)" [#]	340	153	591	609	595	0,52	1,0

[#]) - skład cementu wg Tablicy 4.5

^{##}) - domieszka napowietrzająca

^{###}) - superplastyfikator

Tablica 9.3. Właściwości betonu o składzie podanym w Tablicy 9.1

Oznaczenie próbek	Konsystencja – opad stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Gęstość objętościowa [kg/m^3]
P4-0	60	6,5	2370
P4-30	80	6,5	2360
P4-30M	70	6,5	2370
P4-30S	90	7,0	2350

Tablica 9.4. Właściwości betonu o składzie podanym w Tablicy 9.2

Oznaczenie próbek	Konsystencja – opad stożka [mm]	Zawartość powietrza [%]	Gęstość objętościowa [kg/m^3]
C-I	60	6,5	2280
C-II(W)	60	7,2	2300
C-II(V-W)	50	7,0	2290
C-V(S-W)	50	6,8	2300

9.2. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie betonów z aktywowanymi *PLW* oraz betonów z cementami wieloskładnikowymi wykonano po 28 i 90 dniach dojrzewania.

Zastosowanie 30% popiołu P4 aktywowanego przez mielenie (M) i separację ziarnową (S) pozwoliło uzyskać wytrzymałość na ściskanie (f_c) po 28 dniach dojrzewania w wodzie zbliżoną do betonu referencyjnego wynoszącą odpowiednio 47,2 MPa i 45,5 MPa (Tablica 9.5). Wytrzymałość próbek z dodatkiem *PLW* w postaci nieprzetworzonej była o 15% mniejsza od betonów z aktywowanym *PLW*. Wydłużenie czasu dojrzewania w wodzie do 90 dni zwiększa wytrzymałość betonów z dodatkiem *PLW* od 10% do 20% w porównaniu z betonem referencyjnym. Pielęgnacja próbek w warunkach powietrzno-suchych nie wpłynęła

znacząco na f_c próbek referencyjnych. Jednakże f_c betonów z *PLW* zmniejszyła się o około 12-20% w porównaniu do betonu referencyjnego. Spośród betonów z *PLW* większe wytrzymałości uzyskały próbki z popiołami aktywowanymi. Pielęgnacja w warunkach powietrzno-suchych przez 90 dni wykazała zbliżone f_c próbek betonów z aktywowanym *PLW* i betonu referencyjnego. Jedynie f_c betonu P4-30 z nieprzetworzonym *PLW* zmniejszyła się o 8%.

Tablica 9.5. Wytrzymałości na ściskanie betonów z popiołem P4

Oznaczenie	Średnia wytrzymałości na ściskanie [MPa]							
	Pielęgnacja w wodzie				Pielęgnacja w powietrzu			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
P4-0	46,8	1,8	49,4	2,3	44,3	1,2	46,2	1,6
P4-30	40,3	1,5	54,7	1,8	35,2	1,6	42,8	1,1
P4-30M	47,2	0,9	57,5	1,4	39,2	1,1	46,8	0,9
P4-30S	45,5	1,1	59,3	1,5	38,6	0,6	46,4	1,4

Wytrzymałość na ściskanie próbek betonu referencyjnego w serii mieszanek z cementami wieloskładnikowymi wynosiła 45,8 MPa po 28 dniach dojrzewania (Tablica 9.6). Jedynie beton z cementem z 30% udziałem *PLW* (C-II(V-W)) osiągnął porównywalną wytrzymałość. Pozostałe betony zawierające cementy z mieszaniną dodatków uzyskały f_c o 8-10% mniejszą. Wydłużenie okresu dojrzewania do 90 dni powoduje zwiększenie f_c betonów z cementami wieloskładnikowymi od 4-18% w porównaniu z betonem referencyjnym. Betony dojrzewające 28 dni w powietrzu uzyskały f_c o 3-10% niższą, niż dojrzewające w wodzie. Jednakże w odniesieniu do betonu referencyjnego zmniejszenie wytrzymałości betonów z cementami C-II(V-W) i C-V(S-W) wynosi około 15%. Wydłużenie pielęgnacji w warunkach powietrzno-suchych betonów z cementami wieloskładnikowymi do 90 dni zapewniło nieznacznie większą f_c w porównaniu z betonem referencyjnym.

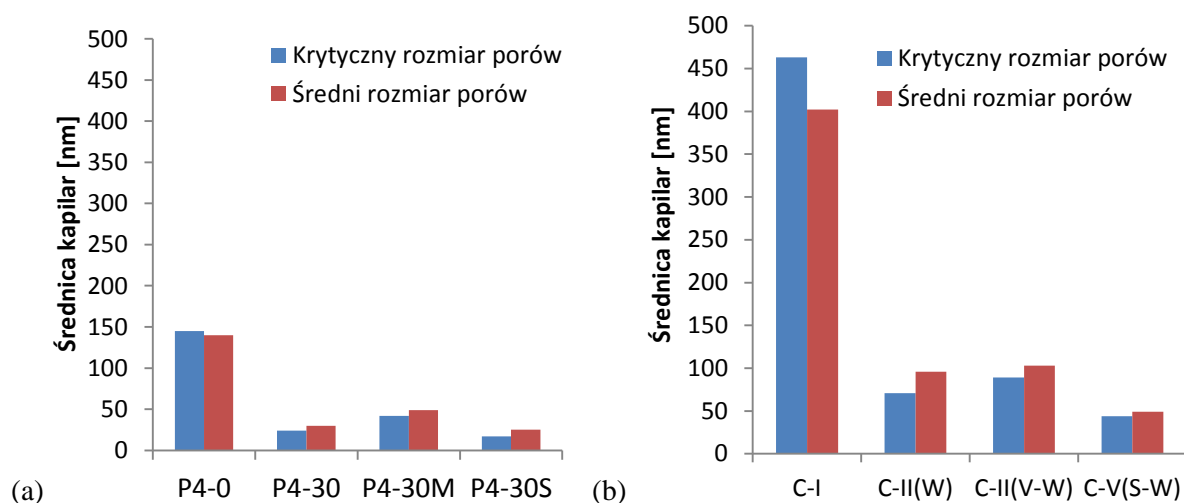
Tablica 9.6. Wytrzymałości na ściskanie betonów z cementami wieloskładnikowymi

Oznaczenie	Średnia wartość wytrzymałości na ściskanie [MPa]							
	Pielęgnacja w wodzie				Pielęgnacja w powietrzu			
	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.	28 dni	Odch. stand.	90 dni	Odch. stand.
C-I	45,8	0,8	47,0	0,6	43,7	0,7	45,2	1,1
C-II(W)	46,6	0,3	58,0	0,9	41,1	0,8	42,7	0,6
C-II(V-W)	41,2	0,6	54,5	1,3	37,3	1,5	47,1	0,5
C-V(S-W)	40,3	1,0	50,8	1,7	35,1	1,3	48,1	1,0

9.3. Rozkład wielkości porów na podstawie porozymetrii rtęciowej

Na podstawie wyników badań *MIP* wyznaczono następujące wskaźniki: krytyczny średnica porów kapilarnych (r_k), średnia średnica porów (r_{ave}) oraz udział procentowy porów w wybranych przedziałach średnic. Badanie zostało wykonane po 90 dniach dojrzewania betonu w wodzie. Wyniki pomiarów porozymetrii rtęciowej przedstawiono w Złączniku XI.

Wyznaczone wskaźniki r_k i r_{ave} zostały przedstawione na Rys. 9.1. Krytyczna średnica porów w kompozycie referencyjnym P4-0 wynosiła 145 nm i była trzykrotnie mniejsza niż w przypadku betonu C-I. Krytyczna średnica porów w betonach z dodatkiem *PLW* (dodatek do betonu i w cementach wieloskładnikowych) była około pięciokrotnie mniejsze niż w przypadku betonu referencyjnego. Różnice krytycznej średnicy porów są zależne do sposobu aktywacji *PLW*. Najmniejsze r_k wykazują betony z popiołem nieprzetwarzanym oraz po separacji ziarnowej, wynoszą odpowiednio 24 nm i 17 nm. Popiół mielony powoduje zwiększenie r_k do 42 nm. Najmniejszą r_k w betonach z cementami wieloskładnikowymi wyniosła 44 nm w przypadku zastosowania cementu o największym udziale dodatków mineralnych (CEM V/A (S-W)). Użycie w betonie cementów CEM II/B-W i CEM II/B-M (V-W) zwiększyło r_k o ponad 30%.



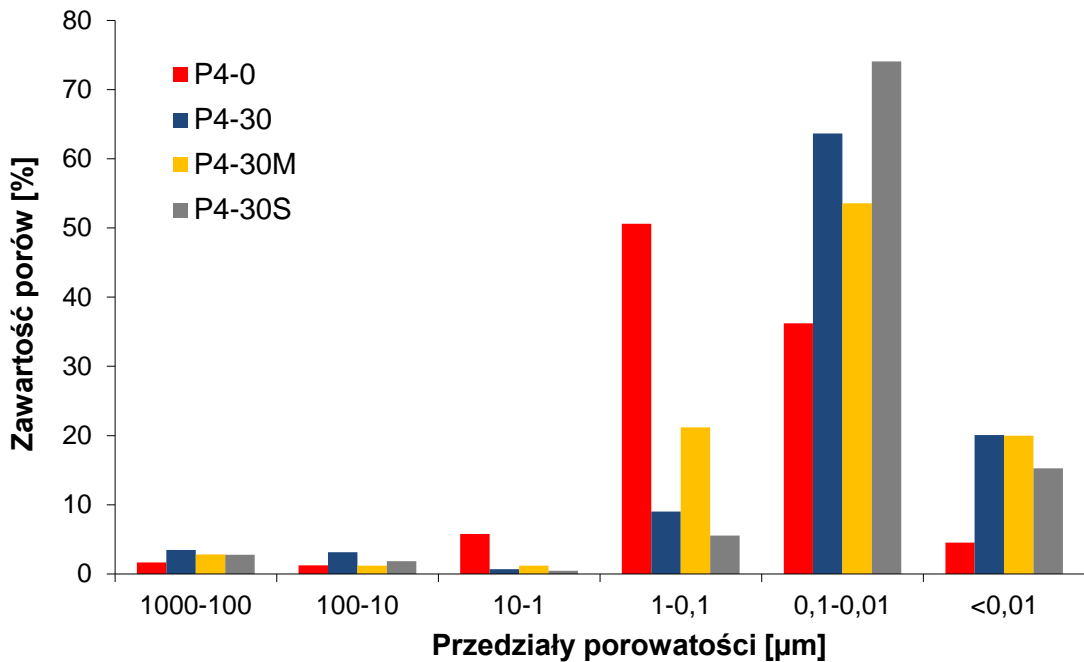
Rys. 9.1. Krytyczna i średnia średnica porów na podstawie *MIP* w próbkach betonów z: (a) aktywowanymi *PLW*; (b) cementami wieloskładnikowymi z *PLW*

Udział procentowy porów w wybranych przedziałach średnic został przedstawiony na Rys. 9.2. Autor rozprawy zaproponował podział porowatości na sześć klas: 0-10 nm; 10-100 nm; 100-1000 nm; 1-10 μm ; 10-100 μm ; 100-1000 μm . Udział porów w klasie przedstawiono jako udział procentowy w całkowitej objętości porów.

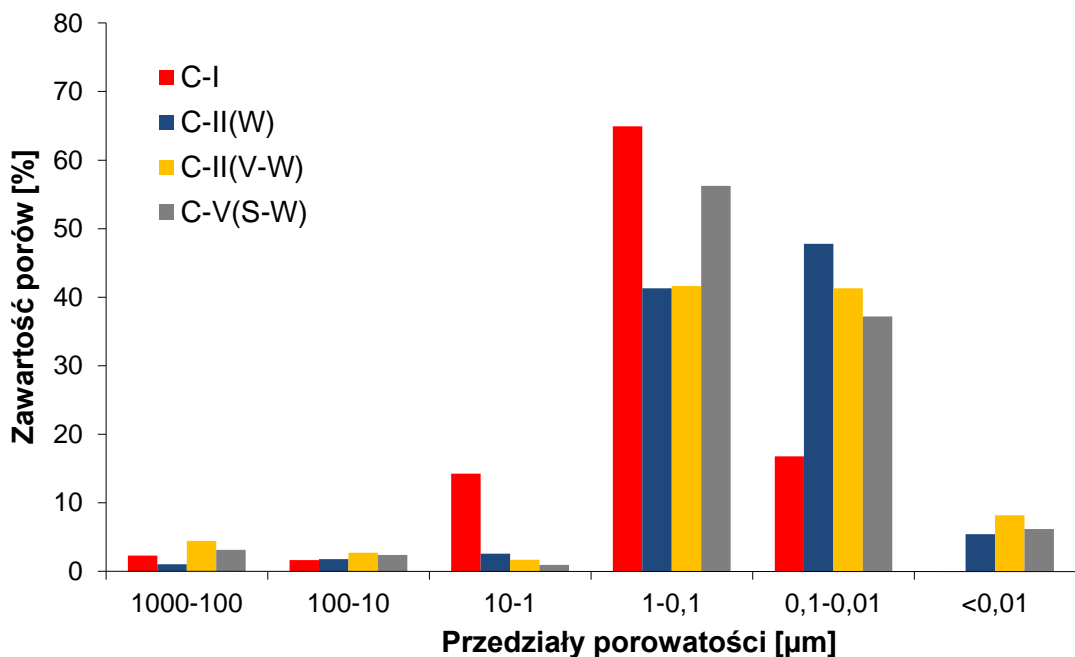
Dodatek *PLW* do betonu wywołał największe zmiany w porach kapilarnych o średnicach 0,003-1 μm , które stanowiły ponad 90% wszystkich porów. Użycie *PLW* w betonie powoduje zmniejszenie udziału porów z przedziału od 0,1-1 μm oraz zwiększenie udziału porów z przedziału 0,003-0,1 μm w porównaniu z betonem referencyjnym.

Interpretacja wyników rozkładu porowatości kapilarnej w betonach z cementami wieloskładnikowymi jest problematyczna, gdyż oprócz cementu referencyjnego i cementu z dodatkiem *PLW* pozostałe cementy stanowią mieszaninę dodatku *PLW* z popiołem lotnym krzemionkowym bądź granulowanym żużlem wielkopieczowym. Dlatego interpretacja wpływu zastosowania *PLW* w cemencie dotyczyła jedynie cementu CEM II/B-W. Zastosowanie cementów wieloskładnikowych w betonie spowodowało znaczne zmniejszenie

udziału porów od 1 μm do 10 μm (Rys. 9.3). Zastosowanie dodatku *PLW* do cementu spowodowało zmniejszenie udziału objętości porów z przedziału od 0,1-1 μm oraz zwiększenie udziału porów z przedziału 0,003-0,1 μm w porównaniu z betonem referencyjnym. Użycie w betonach cementów wieloskładnikowych z mieszaniną dodatków wykazuje zbliżone zmiany mikrostruktury porów kapilarnych do betonów z cementem CEM II/B-W. Niezależnie od składu cementów wieloskładnikowych rejestrowana jest obecność porów żelowych poniżej 0,01 μm .



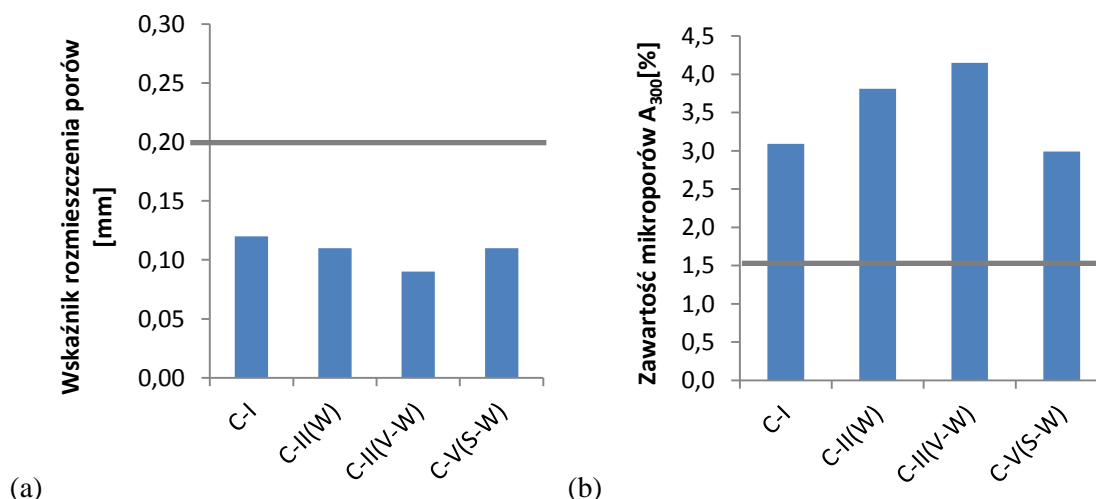
Rys. 9.2. Udział porów w wyszczególnionych przedziałach porowatości w betonach z aktywowanym *PLW*



Rys. 9.3. Udział porów w wyszczególnionych przedziałach porowatości w betonach z cementami wieloskładnikowymi z *PLW*

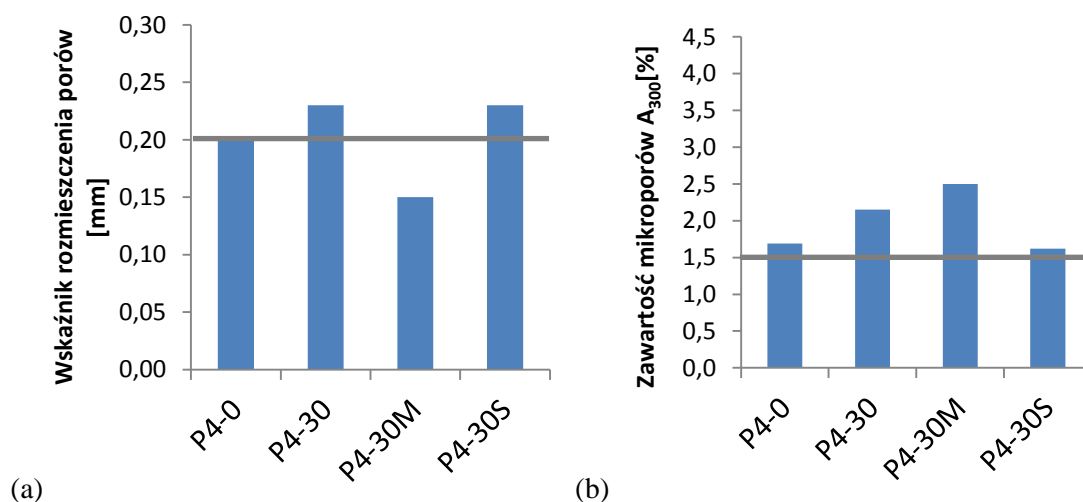
9.4. Charakterystyka porów powietrznych

Wyniki pomiarów charakterystyki porów powietrznych zostały przedstawione na Rys. 9.4-9.7. Przy założonym napowietrzeniu mieszanek wynoszącym 6-7% uzyskanie projektowanych parametrów mikrostruktury porów powietrznych w betonach z cementami wieloskładnikowymi z *PLW* nie budziło zastrzeżeń. Wskaźnik rozmieszczenia porów w próbkach z cementami wieloskładnikowymi nie był większy od 0,12 mm, a udział mikroporów A_{300} nie był mniejszy niż 3% (Rys. 9.7).



Rys. 9.4. Charakterystyka porów powietrznych betonów z cementami wieloskładnikowymi z *PLW*: (a) wskaźnik rozmieszczenia – \bar{L} ; (b) zawartość mikroporów – A_{300}

Zastosowanie *PLW* jako dodatku do betonu przy takich samych założeniach, jak w betonach z cementami wieloskładnikowymi zapewniło udział mikroporów A_{300} powyżej 1,5% (Rys. 9.5). Jednakże całkowita zawartość powietrza obliczona na podstawie pomiarów była znacząco mniejsza w porównaniu do betonów z cementami wieloskładnikowymi (Rys. 9.6a i 9.8a).

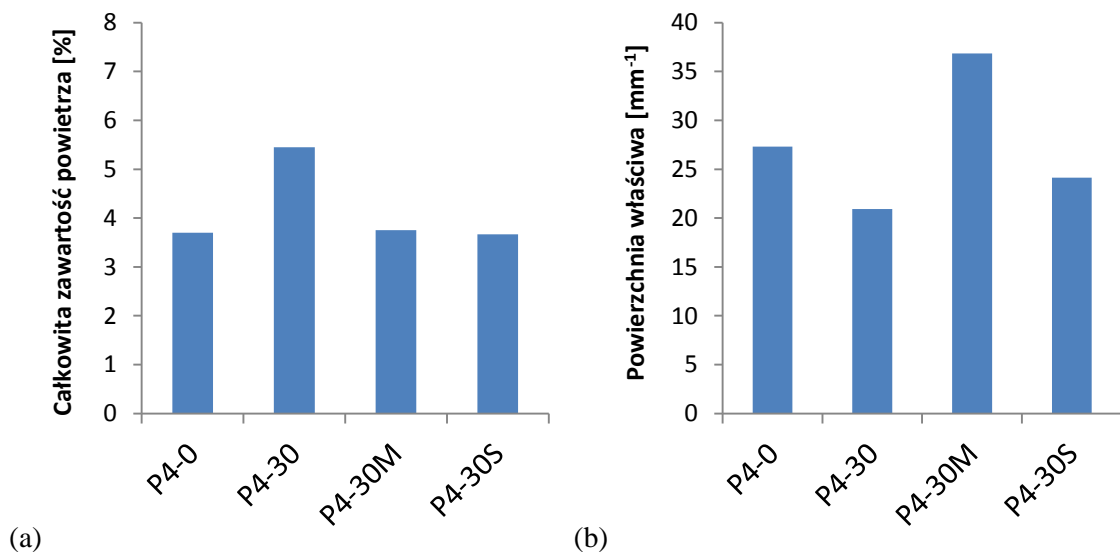


Rys. 9.5. Charakterystyka porów powietrznych betonów z przetwarzanymi *PLW*: (a) wskaźnik rozmieszczenia – \bar{L} ; (b) zawartość mikroporów – A_{300}

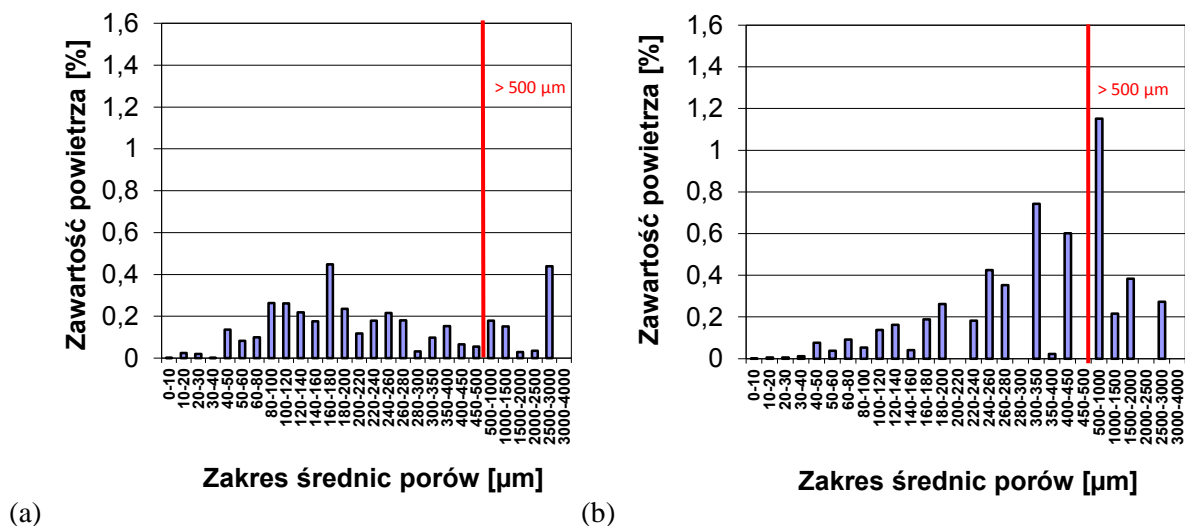
Zastosowanie dodatku *PLW* do betonu aktywowanego przez separację ziarnową powoduje uzyskanie zbliżonej dystrybucji porów określonej wskaźnikiem rozmieszczenia

porów \bar{L} oraz powierzchnią właściwą porów w porównaniu do betonu z dodatkiem nieprzetwarzanym (Rys. 9.5 i 9.6). Zatem można stwierdzić, że separacja ziarnowa *PLW* wpłynęła jedynie na poprawę stabilności pęcherzyków powietrza na etapie homogenizacji i zagęszczania mieszanek betonowych, zmniejszając objętość domieszki napowietrzającej niezbędnej do projektowanego napowietrzenia.

Największą powierzchnię właściwą porów zaobserwowano w próbkach betonu z 30% dodatkiem *PLW* mielonego (Rys. 9.6). Potwierdza to spostrzeżenie z wcześniejszej pracy autora [54], w której stwierdzono, że mielenie *PLW* stosowanego jako dodatek do betonu powoduje znaczne zmniejszenie udziału dużych pęcherzyków powietrza podczas zagęszczania mieszanki (Rys. 9.7).



Rys. 9.6. Charakterystyka porów powietrznych betonów z przetwarzanymi *PLW*:
(a) całkowita zawartość powietrza – *A*; (b) powierzchnia właściwa porów – α

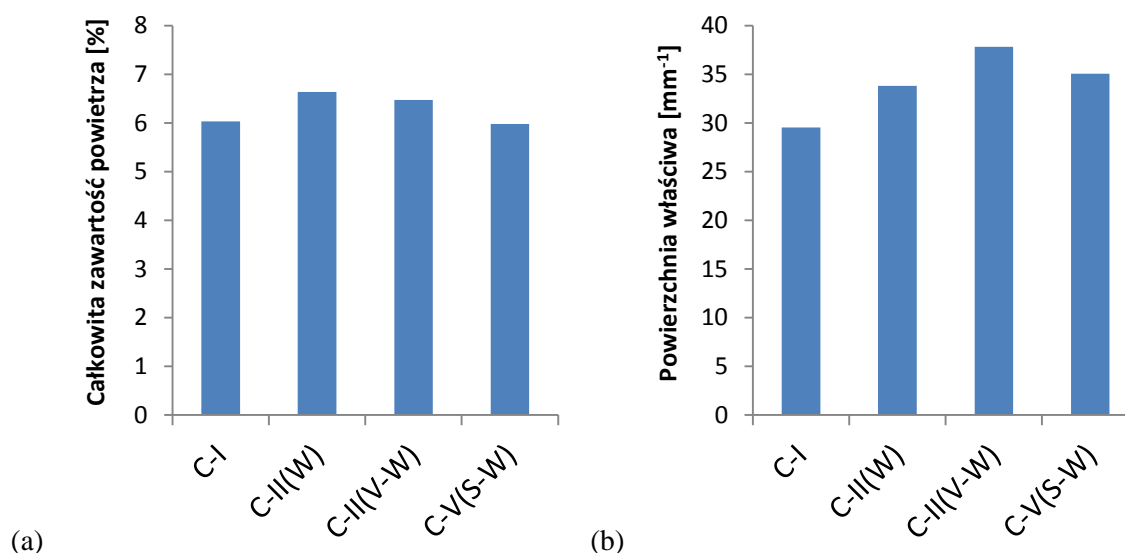


Rys. 9.7. Udział porów powietrznych powyżej 500 μm w betonach z popiołem:
(a) P4-30M; (b) P4-30

Najbardziej prawdopodobną przyczyną powyższego zjawiska jest zmiana właściwości reologicznych mieszanki betonowej z dodatkiem *PLW*, jednakże nie były one przedmiotem pracy. Skutkiem szybszego odpowietrzania mieszanki jest stosowanie znacznie większej

objętości domieszki napowietrzającej w betonowych z mielonym *PLW*, niż w mieszance z nieprzetworzonym *PLW*, w celu osiągnięcia projektowanego udziału powietrza. Jednakże zjawisko to pozwala uzyskać znacznie większy udział mikroporów (A_{300}) w całkowitej zawartości powietrza w betonie z mielonym *PLW*, niż w betonie z nieprzetworzonym *PLW*. Konsekwencją jest zwiększenie rozwinięcia powierzchni porów powietrznych (α) oraz zmniejszenie wskaźnika rozmieszczenia porów (\bar{L}).

Całkowity udział powietrza w betonach z cementami wieloskładnikowymi z *PLW* obliczony na podstawie badania rozmieszczenia porów wynosił od 6,0-6,6% (Rys. 9.8). Wyniki charakterystyki porów były mniejsze od udziału powietrza mierzonego metodą ciśnieniową o około 1% (Tablica 9.4). Świadczy to o stabilności wprowadzanego powietrza podczas homogenizacji składników i zagęszczania mieszanki betonowej z cementami wieloskładnikowymi. Wskaźnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) oraz zawartość mikroporów (A_{300}) potwierdzają właściwe napowietrzenie betonu. Większa stabilność napowietrzenia betonów z cementami wieloskładnikowymi w porównaniu z pozostałymi metodami aktywacji wynika najprawdopodobniej z większej jednorodności cementu po współmieleniu z *PLW*, niż betonu wykonanego z dodatkiem *PLW*. Wyniki charakterystyki porów powietrznych betonów przedstawiono w Załączniku VII (Plansza 3-4).



Rys. 9.8. Charakterystyka porów powietrznych betonów z przetworzonymi *PLW*:
(a) całkowita zawartość powietrza – A ; (b) powierzchnia właściwa porów – α

9.5. Podciąganie kapilarne

Badania absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonów z aktywowanym *PLW* zostały wykonane po 28 i 90 dniach dojrzewania.

Zastosowanie dodatku nieprzetworzanego *PLW* do betonu zmniejszyło masę całkowicie zaabsorbowanej wody (m_{pk}) oraz początkową szybkość absorpcji wody (S_{pk}) względem betonu referencyjnego o około 30% po 28 dojrzewania w wodzie (Tablica 9.7). Po 90 dniach dojrzewania w wodzie początkowa szybkość absorpcji wody była mniejsza od betonu referencyjnego o 45%. Czas zmiany szybkości nasycania betonu (T_{pk}) z dodatkiem nieprzetworzanego *PLW* zmniejszył się dwukrotnie w porównaniu z betonem referencyjnym po 28 i 90 dniach dojrzewania w wodzie. Oznacza to, że betony z dodatkiem *PLW*: absorbują

mniej wody niż beton bez dodatków, ich szybkość absorpcji była mniejsza niż w betonie bez dodatków, a czas ich nasycenia był o połowę krótszy w porównaniu z betonem bez dodatków.

Tablica 9.7. Charakterystyka podciągania kapilarnego betonów z *PLW* dojrzewających w wodzie

Oznaczenie	Czas dojrzewania	m_{pk} [g/cm ³]	S_{pk} [10 ⁻⁴ mm/s ^{1/2}]	T_{pk} [h]	W_{pk} [10 ⁻⁴ mm/s ^{1/2}]
P4-0	28	6,31	174,4	20,1	33,2
P4-30		5,01	128,7	10,3	42,4
P4-30M		4,88	113,0	7,0	49,4
P4-30S		4,37	102,9	11,4	40,6
P4-0	90	5,02	143,4	17,8	27,8
P4-30		3,85	83,6	9,6	35,7
P4-30M		2,93	50,9	3,4	35,2
P4-30S		2,21	46,3	6,9	23,7

m_{pk} - całkowitą masę zaabsorbowanej wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

S_{pk} - początkowa szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

T_{pk} - początkowa szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

W_{pk} - wtórna szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

Masa całkowicie zaabsorbowanej wody (m_{pk}) i początkowa szybkość absorpcji wody (S_{pk}) betonów z aktywowanymi *PLW* zmniejszyła się o 5-35% w porównaniu do betonów z dodatkiem nieprzetwarzanym po 28, jak i po 90 dniach dojrzewania. Zastosowanie w betonach dodatku *PLW* aktywowanego przez mielenie skróciło czas zmiany szybkości nasycania betonu (T_{pk}) o 30% w przypadku 28 dni dojrzewania w wodzie oraz trzykrotnie po 90 dniach dojrzewania.

Zmiana sposobu pielęgnacji betonów, na dojrzewanie w warunkach powietrzno-suchych (20±2°C i RH≈50-60%) zwiększyła masę całkowicie zaabsorbowanej wody (m_{pk}) oraz początkową szybkość absorpcji wody (S_{pk}) w porównaniu z próbkami dojrzewającymi w wodzie (Tablica 9.8). Po 28 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych zastosowanie nieprzetwarzanego *PLW* w betonie zwiększyło o 15% początkową szybkość absorpcji wody (S_{pk}) w porównaniu do betonu bez dodatków. Natomiast masa całkowicie zaabsorbowanej wody (m_{pk}) była zbliżona. Aktywacja *PLW* stosowanego w betonie spowodowała, że uzyskiwane wyniki podciągania kapilarnego nie były większe od betonu bez dodatków. Wydłużenie pielęgnacji w warunkach powietrzno-suchych zmniejszyła do 15-25% masę całkowicie zaabsorbowanej wody (m_{pk}) w porównaniu z betonem referencyjnym. Należy zauważyć, że czas zmiany szybkości nasycania betonu (T_{pk}) był najmniejszy w przypadku zastosowania dodatku z *PLW* aktywowanym przez mielenie. Wyniki pomiarów podciągania kapilarnego badanych próbek betonu przedstawiono w Załączniku XII.

Tablica 9.8. Charakterystyka podciągania kapilarnego betonów z *PLW* dojrzewających w warunkach powietrzno-suchych

Oznaczenie	Czas dojrzewania	m_{pk} [g/cm ³]	S_{pk} [10 ⁻⁴ mm/s ^{1/2}]	T_{pk} [h]	W_{pk} [10 ⁻⁴ mm/s ^{1/2}]
P4-0_P	28	7,87	208,2	28,9	25,3
P4-30_P		8,02	252,5	12,5	63,3
P4-30M_P		7,77	192,1	7,7	75,1
P4-30S_P		8,33	200,7	9,6	77,1
P4-0_P	90	6,82	186,6	23,6	27,9
P4-30_P		5,89	163,3	17,2	34,1
P4-30M_P		5,53	144,1	7,0	53,1
P4-30S_P		5,22	130,5	18,5	34,4

m_{pk} - całkowitą masę zaabsorbowanej wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

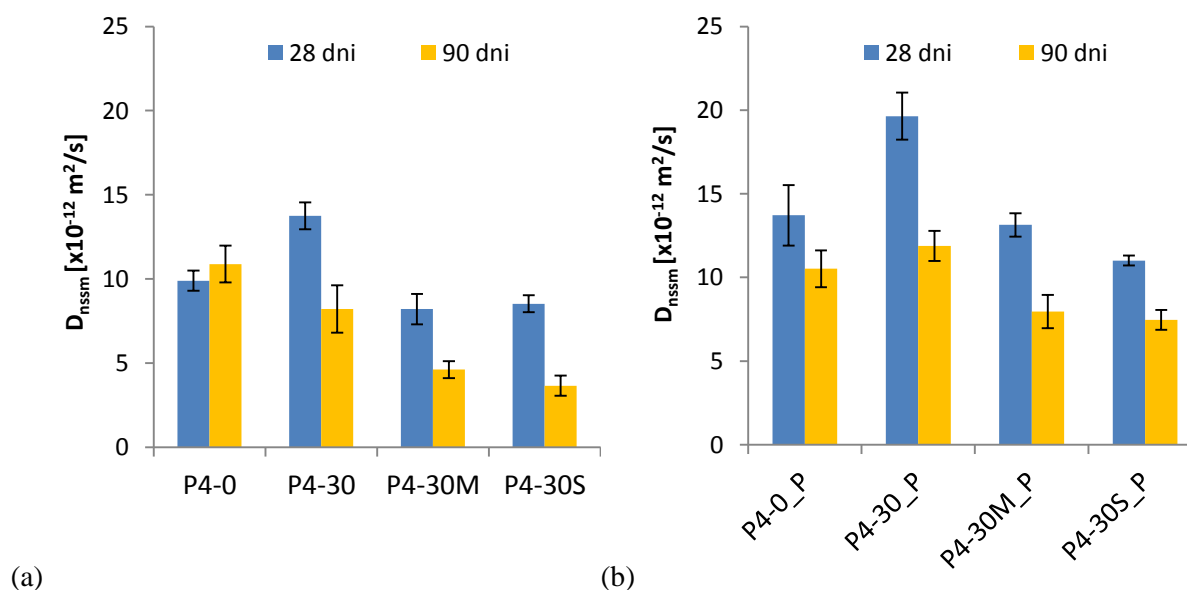
S_{pk} - początkowa szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

T_{pk} - początkowa szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

W_{pk} - wtórna szybkość absorpcji wody (opis w Rozdziale 5.2.2)

9.6. Przepuszczalność jonów chlorkowych

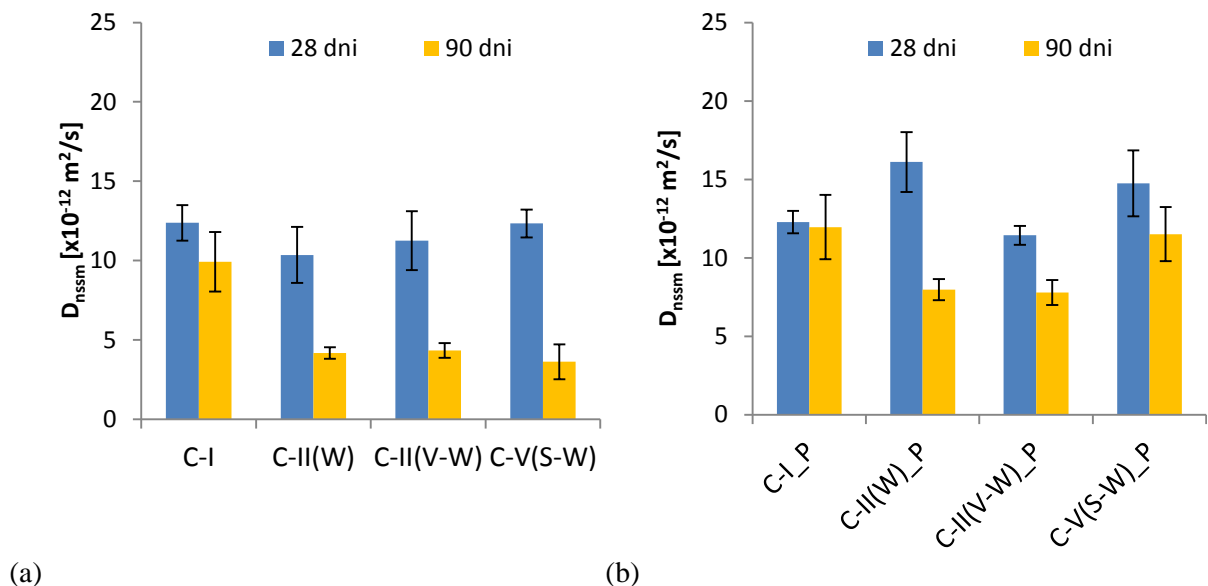
Oznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych (D_{nssm}), wykonano po 28 i 90 dniach dojrzewania. Badania przeprowadzono na próbkach dojrzewających w wodzie i warunkach powietrzno-suchych. Współczynnik D_{nssm} betonu referencyjnego po 28 dniach dojrzewania wynosił $9,9 \cdot 10^{-12}$ m/s², tj. odpowiadał „dostatecznej” odporności na wnikanie jonów chlorkowych. Odporność ta nie zmienia się w sposób znaczący po wydłużeniu okresu dojrzewania do 90 dni (Rys. 9.9).



Rys. 9.9. Współczynnik migracji jonów chlorkowych betonów z aktywowanym *PLW* dojrzewających: (a) w wodzie; (b) w warunkach powietrzno-suchych – P

Stosowanie 30% dodatku *PLW* nieprzetworzonego po 28 dniach dojrzewania w wodzie powoduje zwiększenie szybkości migracji jonów chlorkowych o około 30% w porównaniu do betonu referencyjnego. Aktywacja *PLW* powoduje, że po 28 dniach dojrzewania betony z ich dodatkiem osiągają D_{nssm} zbliżony do betonu referencyjnego. Wydłużenie czasu dojrzewania w wodzie do 90 dni powoduje zmniejszenie szybkości wnikania jonów chlorkowych o 40-65%. Najmniejszy współczynnik D_{nssm} stwierdzono w kompozytach z przetworzonym *PLW*. Dojrzewanie w warunkach powietrzno-suchych przez 28 dni powoduje podobny względny wpływ *PLW* na D_{nssm} , jak obserwowany w próbkach dojrzewających w wodzie. Próbki dojrzewające 90 dni w warunkach powietrzno-suchych nie wykazują tak znacznego zmniejszenia D_{nssm} w porównaniu z odpowiadającymi próbkami dojrzewającymi w wodzie. Aktywacja *PLW* spowodowała zmniejszenie D_{nssm} o około 30% względem betonu odniesienia. Natomiast w przypadku betonu z nieprzetworzonym *PLW* po 90 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych stwierdzono zbliżony D_{nssm} w porównaniu z betonem referencyjnym.

Zastosowanie cementów wieloskładnikowych z *PLW* w betonach nie spowodowało istotnych zmian D_{nssm} w porównaniu z betonem referencyjnym po 28 dniach dojrzewania w wodzie (Rys. 9.10). Natomiast wydłużenie dojrzewania spowodowało 60% zmniejszenie D_{nssm} we wszystkich betonach z cementami wieloskładnikowymi. Zmiana sposobu dojrzewania na powietrzno-suchy spowodowała uzyskanie D_{nssm} zbliżonego do betonu referencyjnego, w przypadku użycia cementu CEM II/B-M(V-W). W przypadku pozostałych cementów wieloskładnikowych D_{nssm} był większy od betonu referencyjnego o około 15-20%. Po 90 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych jedynie kompozyt z cementem „CEM V/A (S-W) uzyskał współczynnik D_{nssm} zbliżony do betonu referencyjnego. Pozostałe cementy wieloskładnikowe spowodowały zmniejszenie D_{nssm} betonów o około 30% w porównaniu z betonem referencyjnym.



Rys. 9.10. Współczynnik migracji jonów chlorkowych betonów z cementami wieloskładnikowymi z *PLW* dojrzewających: (a) w wodzie; (b) w warunkach powietrzno-suchych – P

9.7. Odporność na powierzchniowe złuszczenie

Badania powierzchniowego złuszczenia betonów z aktywowanymi *PLW* oraz cementami wieloskładnikowymi z *PLW* przeprowadzono po 28 i 90 dniach dojrzewania.

Zastosowanie dodatku nieprzetwarzanego *PLW* wykazało 2,5-krotny zwiększenie masy złuszczeń powierzchniowych m_{56} w porównaniu z betonem referencyjnym po 28 dniach dojrzewania w wodzie. Separacja ziarnowa *PLW* stosowanego w betonie wywołała dwukrotne zwiększenie masy złuszczeń powierzchniowych m_{56} w porównaniu z betonem referencyjnym. W przypadku dodatku do betonu zmielonego *PLW* masa złuszczeń powierzchniowych m_{56} zwiększyła się jedynie o 30% w odniesieniu do betonu bez dodatków mineralnych. Powyższe wyniki badań powierzchniowego łuszczenia betonu odniesienia i betonów z dodatkiem *PLW* odpowiadały kategorii „dobrej” odporności na powierzchniowe łuszczenie (kryteria Rozdział 5.2.3). Wydłużona pielęgnacja w wodzie do 90 dni spowodowała zmniejszenie masy złuszczeń m_{56} o 10-20%. Natomiast klasa odporności na powierzchniowe łuszczenie nie uległa zmianie.

Tablica 9.10. Wyniki badania powierzchniowego złuszczenia betonów z aktywowanymi *PLW*

Oznaczenie	Czas dojrzewania	Rodzaj dojrzewania	Złuszczenia powierzchniowe		
			m_{56} [kg/m ²]	m_{56}/m_{28}	Klasa odporności
P4-0	28	woda	0,20	1,5	dobra
P4-30			0,53	1,3	dobra
P4-30M			0,26	1,2	dobra
P4-30S			0,41	1,1	dobra
P4-0	90	woda	0,18	1,3	dobra
P4-30			0,43	1,3	dobra
P4-30M			0,32	1,3	dobra
P4-30S			0,33	1,1	dobra
P4-0_P	28	powietrze	0,24	1,5	dobra
P4-30_P			0,97	1,3	dopuszczalna
P4-30M_P			0,44	1,2	dobra
P4-30S_P			0,47	1,1	dobra
P4-0_P	90	powietrze	0,16	1,3	dobra
P4-30_P			0,60	1,3	dopuszczalna
P4-30M_P			0,40	1,3	dobra
P4-30S_P			0,35	1,1	dobra

W przypadku dojrzewania próbek w warunkach powietrzno-suchych masa złuszczeń powierzchniowych m_{56} po 28 dniach dojrzewania zwiększyła się w porównaniu do próbek dojrzewających w wodzie. Masa złuszczeń m_{56} zwiększyła się najbardziej w przypadku betonu z dodatkiem popiołu nieprzetwarzanego i wynosiła 0,97 kg/m². Natomiast masa złuszczeń m_{56} betonów z aktywowanym *PLW* nie przekraczała 0,47 kg/m². Wydłużenie czasu

dojrzewania do 90 dni pozwala osiągnąć masę złuszczeń powierzchniowych do 40% mniejszą niż po 28 dniach dojrzewania. Należy zauważyć, że pomimo zmiany sposobu pielęgnacji z wodnej na powietrzno-suchą klasa odporności betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW* odpowiadała „dobrej” odporności na powierzchniowe łuszczenie, tak po 28 dniach, jak i 90 dniach dojrzewania.

Odporność betonów z cementami wieloskładnikowymi dojrzewającymi w wodzie była „bardzo dobra”, tj. masa m_{56} była mniejsza od $0,1 \text{ kg/m}^2$. Nie można rozróżnić efektów rodzaju zastosowanego cementu.

Tablica 9.11. Wyniki badania powierzchniowego złuszczenia betonów z cementami wieloskładnikowymi z *PLW*

Oznaczenie	Czas dojrzewania	Rodzaj dojrzewania	Złuszczenia powierzchniowe		
			$m_{56} [\text{kg/m}^2]$	m_{56}/m_{28}	Klasa odporności
C-I	28	woda	0,01	1,1	bardzo dobra
C-II(W)			0,05	1,2	bardzo dobra
C-II(V-W)			0,01	1,2	bardzo dobra
C-V(S-W)			0,04	1,1	bardzo dobra
C-I	90	woda	0,05	1,1	bardzo dobra
C-II(W)			0,04	1,1	bardzo dobra
C-II(V-W)			0,03	1,2	bardzo dobra
C-V(S-W)			0,06	1,2	bardzo dobra
C-I_P	28	powietrze	0,14	1,2	dobra
C-II(W)_P			0,40	1,3	dobra
C-II(V-W)_P			0,58	1,5	dobra
C-V(S-W)_P			0,43	1,6	dobra
C-I_P	90	powietrze	0,17	1,1	dobra
C-II(W)_P			0,17	1,4	dobra
C-II(V-W)_P			0,23	1,4	dobra
C-V(S-W)_P			0,10	1,3	bardzo dobra

W przypadku dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych betonów z cementami zawierającymi *PLW* masa złuszczeń powierzchniowych m_{56} zwiększyła się. Zmiana sposobu dojrzewania z pielęgnacji w wodzie na powietrzno-suchą spowodowała zmianę kategorii odporności na powierzchniowe łuszczenie z „bardzo dobrej” na „dobrą” po 28 dniach dojrzewania. Najbardziej podatny na zmianę warunków dojrzewania okazał się kompozyt z cementem CEM II/B-M (V-W), tj. zawierający jednocześnie *PLW* i popiół lotny krzemionkowy. Wydłużenie czasu dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych do 90 dni zmniejszyło znacznie masę złuszczeń m_{56} wszystkich badanych betonów. Wydłużenie dojrzewania był szczególnie istotne w przypadku cementu „CEM V/A (S-W)” z największym udziałem dodatków.

Warto zwrócić uwagę na wyraźnie wyższą odporność na złuszczenia powierzchniowe betonów z cementami wieloskładnikowymi niż betonów z *PLW* dodawanym do mieszanki betonowej. Uzyskane wartości m_{56} widoczne w Tabelicy 9.11 są znacznie mniejsze niż w Tabelicy 9.10. Odwołując się do rezultatów pomiarów \bar{L} , α i A_{300} (Rys. 9.7-9.11), zasadnicze znaczenie można przypisać korzystnej charakterystyce porów powietrznych: mniejszym i bliżej rozmieszczonym porom powietrznym.

9.8. Podsumowanie

Celem badań była ocena wpływu aktywacji *PLW* na właściwości projektowanych betonów. Przedstawiona w Rozdziale 7 charakterystyka metod przetwarzania oraz analiza właściwości fizycznych i składu chemicznego poszczególnych frakcji ziarnowych *PLW* pozwoliła na wybór najefektywniejszych sposobów poprawy właściwości popiołów. Wpływ aktywacji *PLW* na właściwości betonów przeprowadzono na dwóch seriach mieszanek. Pierwszą stanowiły betony z *PLW*, który był stosowany jako dodatek do betonu. Zastosowano dodatek popiołu P4, który był dodawany w formie nieprzetworzonej oraz po aktywacji (mielenie i separacja ziarnowa). Drugą serię betonów stanowiły kompozycje z cementami wieloskładnikowymi z dodatkiem *PLW*, popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopieczowego.

Zastosowanie aktywowanych *PLW* jako dodatku do betonu zwiększyło wytrzymałość na ściskanie względem betonu z dodatkiem nieprzetwarzanym po 28 dniach dojrzewania, a wytrzymałość na ściskanie była zbliżona do betonu bez dodatków mineralnych. Po 90 dniach dojrzewania wytrzymałość na ściskanie była większa od betonu z dodatkiem *PLW* nieprzetwarzanego oraz betonu referencyjnego, odpowiednio o 10% i 15%. W przypadku betonów z cementem zawierającym dodatek *PLW* (CEM II/B-W), uzyskano zbliżone tendencję do betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW*.

Użycie *PLW* w betonie zmniejsza udział porów kapilarnych z przedziału od 0,1-1 μm oraz zwiększenia udział porów z przedziału 0,003-0,1 μm w porównaniu z betonem referencyjnym. Wpływ aktywacji *PLW* był niewielki i spowodował nieznaczne zmiany krytycznej i średniej średnicy porów (r_k i r_{ave}). Charakterystyka porów powietrznych w betonach napowietrzonych wykazała znacznie większą stabilność pęcherzyków powietrza, w przypadku zastosowania *PLW* w cementach wieloskładnikowych, niż użytych jako dodatek do betonu. Aktywacja przez separację ziarnową dodatku *PLW* nie wpływa na zmiany jakościowe w charakterystyce porów powietrznych w betonach, a jedynie zmniejsza zapotrzebowanie na domieszkę napowietrzającą w porównaniu z dodatkiem nieprzetwarzanym. Aktywacja przez zmielenie *PLW* wywołuje w mieszance betonowej ucieczkę pęcherzyków powietrza większych od 500 μm . Skutkiem odpowietrzania był znacznie większy udział mikroporów mniejszych od 300 μm (A_{300}) w całkowitej objętości powietrza w betonie.

Szczelność betonów z dodatkiem aktywowanych *PLW* mierzona metodą podciągania kapilarnego i współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym jest większa, niż w przypadku betonów z dodatkiem nieprzetwarzanym. Badania pociągania kapilarnego wykazują, że betony z dodatkiem *PLW* absorbują mniej wody niż beton bez dodatków. Prędkość absorpcji jest mniejsza niż w betonie bez dodatków. Czas nasycenia betonów z *PLW* jest o połowę krótszy w porównaniu z betonem bez dodatków. Aktywacja

PLW stosowanych w betonach zwiększa powyższe efekty stosowania dodatku popiołowego. Zastosowanie aktywowanych *PLW* jako dodatku do betonu zmniejszyło współczynnik migracji jonów chlorkowych względem betonu z dodatkiem nieprzetwarzanym po 28 dniach dojrzewania, a współczynnik migracji jonów chlorkowych był zbliżony do betonu bez dodatków mineralnych. Po 90 dniach dojrzewania współczynnik migracji jonów chlorkowych jest mniejszy od betonu z dodatkiem nieprzetwarzanego *PLW* oraz betonu referencyjnego, odpowiednio o 30% i 60%. Betony z cementami wieloskładnikowymi z mieszaniną dodatków wykazały współczynnik migracji jonów chlorkowych zbliżony do betonu bez dodatków po 28 dniach dojrzewania. Natomiast po 90 dniach współczynnik migracji jonów chlorkowych zmniejszył się o około 50-60%.

Stosując *PLW* w cementach wieloskładnikowych uzyskano „bardzo dobrą” odporność na powierzchniowe łuszczenie, wykazując znikomą masę złuszczeń, zbliżoną do betonu bez dodatków mineralnych, po 28 i 90 dniach dojrzewania w wodzie. Aktywacja przez mielenie i separację ziarnową *PLW* powoduje 30-100% zmniejszenie masy złuszczeń powierzchniowych betonów w porównaniu z betonem z nieprzetwarzanym *PLW* po 28 i 90 dniach dojrzewania. Jednakże uzyskane rezultaty są dwukrotnie większe, niż w przypadku betonu bez dodatków mineralnych.

Pielęgnacja betonów z dodatkiem *PLW* w warunkach powietrzno-suchych zmniejszyła wytrzymałość na ściskanie, szczelność betonów oraz odporność na powierzchniowe łuszczenie względem betonów dojrzewających w wodzie. Zastosowanie dodatku aktywowanego *PLW* w betonie wykazało zbliżoną tendencję zmian właściwości jaka była obserwowana w przypadku dojrzewania w wodzie. Stosowanie aktywowanych *PLW* pozwoliło na uzyskanie zbliżonych właściwości do betonu referencyjnego bez dodatków mineralnych po 90 dniach dojrzewania w warunkach powietrzno-suchych.

10. Podsumowanie wyników badań

Projektowanie betonów odpornych na działanie cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności soli odladzających wymaga zapewnienia właściwej mikrostruktury porów powietrznych w matrycy cementowej. Zastosowanie dodatków mineralnych utrudnia napowietrzanie betonów za pomocą domieszek o działaniu powierzchniowo czynnym. Trudności wynikają z niestabilności pęcherzyków powietrza w mieszance betonowej podczas homogenizacji i zagęszczania mieszanki. Zatem właściwe projektowanie i wykonawstwo konstrukcji betonowych z dodatkami mineralnymi ma fundamentalne znaczenia w zapobieganiu destrukcji wywołanej cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem.

W niniejszej pracy podjęto zagadnienie wpływu *PLW* na mikrostrukturę i mrozoodporność napowietrzonych betonów zwykłych. Mikrostrukturę i mrozoodporność betonów oceniono uwzględniając: właściwości *PLW*, zawartość *PLW* w betonie, udział fazy C_3A w cemencie portlandzkim oraz wpływ aktywacji *PLW*.

Popiół lotny wapienny zastosowany w badaniach zawierał średnio 24,9% CaO , 39,5% SiO_2 , oraz 20,9% Al_2O_3 (Tablica 10.1). Popioły charakteryzowały się niską zawartością alkaliów oraz strat prażenia (*SP*). Wśród strat prażenia 50% stanowiły ziarna niespalonego węgla (Tablica 6.3). Należy zwrócić uwagę, że współczynniki zmienności składników stanowiących największy udział w popiele CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 wynoszą od 9% do 16% (Tablica 10.1). Współczynnik zmienności niezwiązanego tlenku wapnia (CaO_w), mogącego mieć wpływ na właściwości betonów, wynosił 45%.

Tablica 10.1. Zmienność składu chemicznego *PLW*

		CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	$SP^{*)}$	$SO_3^{**)}$	$CaO_w^{***)}$
Minimum	[% masy]	19,1	33,6	19,0	4,3	0,1	0,1	1,9	2,3	1,0
Średnia		24,9	39,5	20,9	5,2	0,1	0,2	2,5	3,6	1,5
Maksimum		31,3	47,4	24,0	6,1	0,2	0,3	3,4	4,5	2,9
Odchylenie standardowe		4,1	4,8	1,8	0,7	0,0	0,1	0,5	0,8	0,7
Współczynnik zmienności [%]		16	12	9	14	35	42	21	22	45

*) – strata prażenia do 1000°C

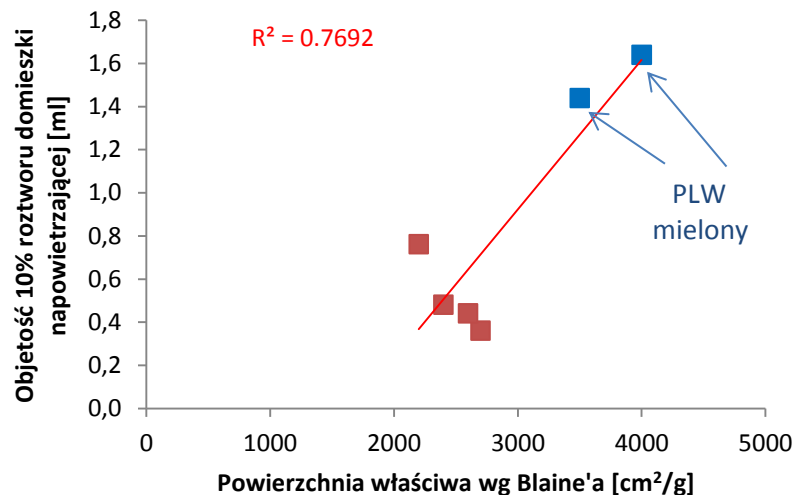
**) – metoda wagowa

***) – niezwiązane CaO (metoda glikolowa)

Popioły pobrane w różnych terminach znacząco różniły się morfologią i rozkładem średnic ziaren (Tablica 6.1). Wyróżniono trzy typy ziaren: aglomeraty ziaren o dużym rozwinięciu powierzchni (największy udział), ziarna kuliste, ziarna kanciaste (najmniejszy udział). Rozdzielenie *PLW* na cztery frakcje: 0-20 μm , 20-32 μm , 32-125 μm oraz większych od 125 μm wykazało, że we frakcji najdrobniejszej dominują ziarna kuliste zbudowane ze szkła krzemowo-wapniowo-glinowego. Frakcję powyżej 125 μm stanowią głównie aglomeraty ziaren, kanciaste ziarna kwarcu, nieliczne ziarna kuliste oraz występują ziarna niespalonego węgla o dużym rozwinięciu powierzchni (Tablica 7.5). Składnikami krystalicznymi *PLW* były: kwarc, anhydryt, magnetyt, hematyt, mullit, portlandyt, CaO , peryklaz oraz kalcyt (Tablica 6.4). Stwierdzono, że wraz ze zwiększeniem średnicy ziaren we frakcjach popiołowych następowało zmniejszenie udziału anhydrytu w składzie *PLW*.

Stabilność domieszek chemicznych o działaniu powierzchniowo czynnym w spoiwach z dodatkiem popiołowym w analizowanej literaturze wynika głównie z obecności ziaren niespalonego węgla [69],[93]. Na podstawie badań wskaźnika piany stwierdzono, że objętość domieszki niezbędnej do stabilnego napowietrzenia mieszanki cementu z *PLW* zależy głównie od morfologii ziaren i ich uziarnienia. Popiół o dużym rozwinięciu powierzchni wg Blaine'a wymagał trzykrotnego zwiększenia objętości domieszki napowietrzającej względem popiołu o zbliżonym składzie chemicznym i mniejszym rozwinięciu powierzchni właściwej wg Blaine'a (Rys. 6.9).

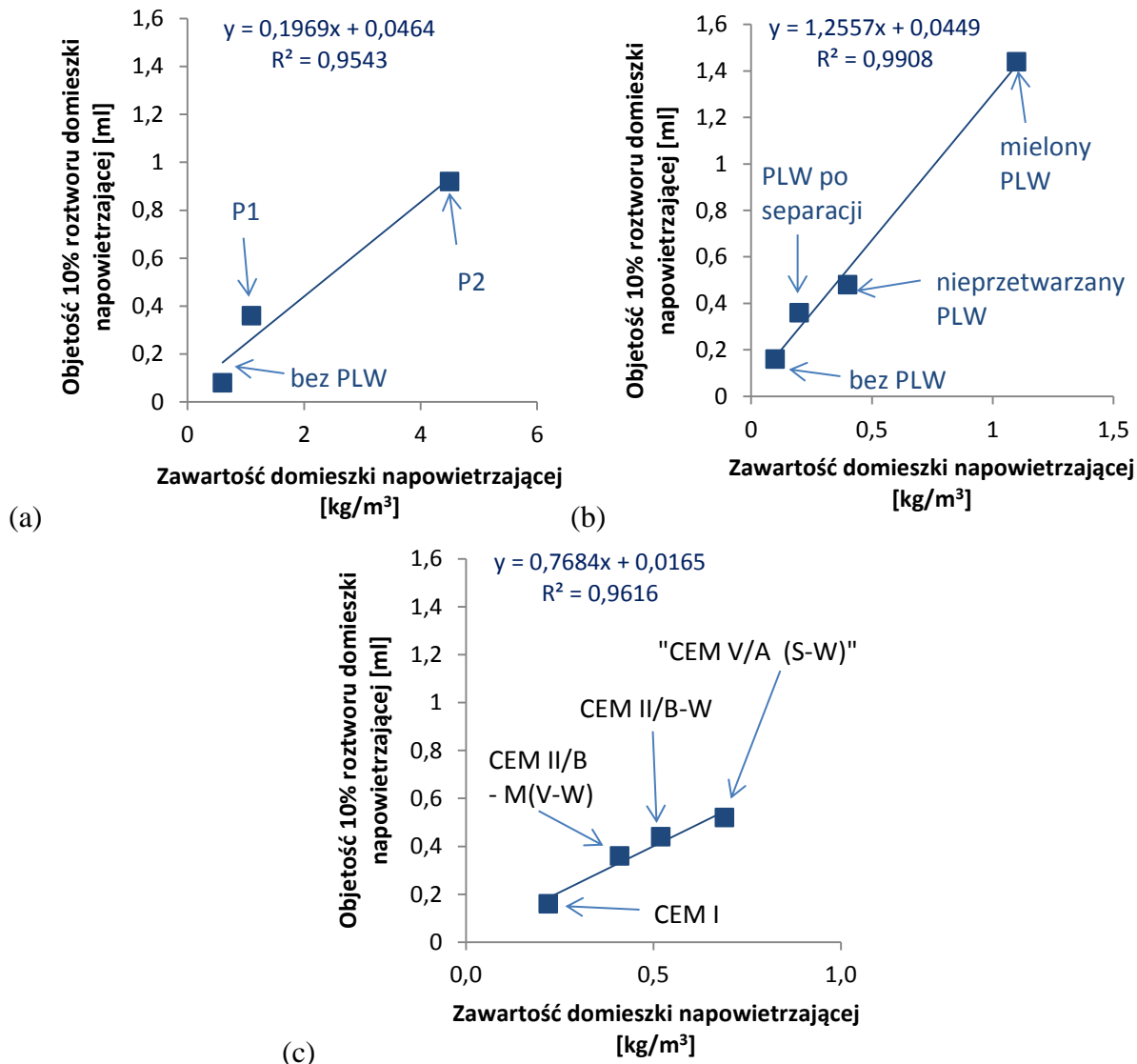
Analiza wyników badań przedstawiona w podsumowaniu Rozdziałów 6 i 7 umożliwiła wybór metod aktywacji popiołów lotnych wapiennych. Stwierdzono, że rozkruszenie aglomeratów ziaren o nieregularnych kształtach zwiększy aktywność *PLW* i poprawi właściwości mechaniczne betonów [51],[114],[126]. Stąd zaproponowano aktywację *PLW* przez mielenie *PLW* w młynku kulowym na dwa sposoby: mielenie wyłącznie *PLW* oraz wspólny przemiał *PLW* (i innych dodatków mineralnych) z klinkierem portlandzkim. Zwiększenie stabilności pęcherzyków powietrza podczas napowietrzania mieszanki betonowej uzyskano po odseparowaniu frakcji powyżej 125 μm (Rys. 7.32 i 7.33). Należy zauważyć, że aktywacja *PLW* przez mielenie znacząco podwyższa powierzchnię właściwą popiołu i zwiększa objętość domieszki napowietrzającej w badaniu wskaźnika piany (Rys. 7.32 i 7.33). Pozwoliło to na wykreślenie poglądowych zależności między wskaźnikiem piany, a rozwinięciem powierzchni wg Blaine'a (Rys. 10.1).



Rys. 10.1. Zależność wskaźnik piany aktywowanych popiołów P4 i P5 w przypadku 30% dodatku *PLW* w spoiwie od rozwinięcia powierzchni wg Blaine'a

Podczas wykonywania mieszanek betonowych z dodatkiem *PLW* stwierdzono, że uzyskany udział domieszek napowietrzających niezbędnych do uzyskania stabilnego napowietrzenia, oznaczony metoda wskaźnika piany, wykazuje korelację z zawartością domieszki napowietrzającej w mieszankach betonowych (Rys. 10.2). Stwierdzono liniową zależność łączącą zawartość domieszki napowietrzającej niezbędnej do uzyskania projektowanej zawartości powietrza w mieszance, niezależnie od rodzaju *PLW* (Rys. 10.2a), sposobu jego przetwarzania (Rys. 10.2b), czy użycia cementach wieloskładnikowych z *PLW* (Rys. 10.2c). Zatem uznano, że badanie wskaźnika piany stanowi użyteczną metodę

określającą udział domieszki napowietrzającej na etapie projektowania składu betonów mrozoodpornych z dodatkiem *PLW*.

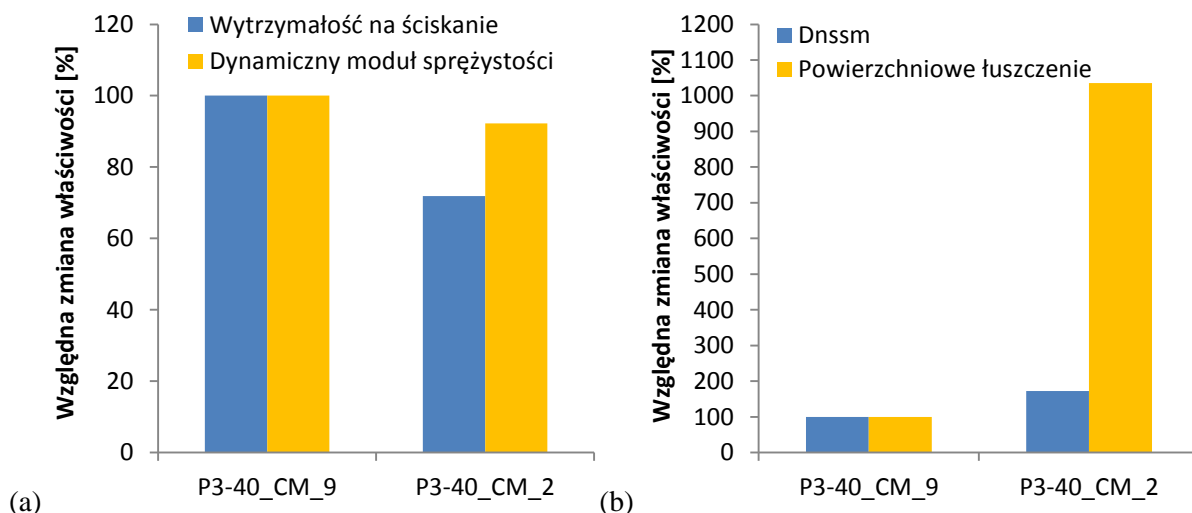


Rys. 10.2. Zależność między zawartością domieszki napowietrzającej, określoną za pomocą wskaźnika piany i zawartością domieszki w mieszance niezbędnej do projektowanego napowietrzenia kompozytu: (a) 30% dodatku popiołu P1 i P2; (b) 30% dodatku popiołu P4 nieprzetwarzanego, separowanego i mielonego; (c) z cementami wieloskładnikowymi z *PLW*

Zmienność składu chemicznego i właściwości fizycznych *PLW* nie wpłynęła na zmianę właściwości mechanicznych. Uzyskano zbliżone wytrzymałości na ściskanie (Tablica 8.6) i rezonansowe moduły sprężystości (Tablica 8.8) betonu z popiołami pobranymi w różnych terminach. W porównaniu do betonów bez dodatków mineralnych zastosowanie *PLW* w betonie zmniejsza wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania. Natomiast wytrzymałość na ściskanie po dłuższych okresach dojrzewania jest zbliżona do betonów bez dodatków mineralnych bądź osiąga większe wartości. Powyższe zależności są zbliżone do badań innych autorów [51],[114],[126]. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały nieznacznie zmniejszoną wytrzymałość na ściskanie (około 5%), wynikającą ze zwiększania udziału *PLW* w betonach z 20% do 40%. Aktywacja *PLW* przez mielenie i separację ziarnową pozwoliła zwiększyć wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w porównaniu do

betonu z dodatkiem nieprzetwarzanym, osiągając wytrzymałość na ściskanie zbliżoną do betonów bez dodatków mineralnych. Jedyne niewłaściwa pielęgnacja wilgotnościowa ograniczała efekt aktywacji. Wytrzymałość po 90 dniach dojrzewania betonów z aktywowanymi *PLW* była do 20% większa niż betonu bez dodatków mineralnych. Największy przyrost wytrzymałości był zaobserwowany w przypadku zastosowania *PLW* jako składnika głównego cementu. Powyższy wpływ współmielenia potwierdzają badania przedstawione przez Giergicznego [51].

Rodzaj zastosowanego cementu w betonach z *PLW* ma znaczący wpływ na właściwości betonów. W badaniach zastosowano dwa rodzaje cementu, z których jeden stanowił cement specjalny odporny na korozję siarczanową CEM I 42,5N-SR3/NA o udziale C_3A wynoszącym około 2% (oznaczenie CM-2) oraz cement portlandzki CEM I 42,5R o 9% (oznaczenie CM-9) udziale C_3A (Rozdział 8). Zastosowanie cementu o 2% udziale C_3A w betonach z *PLW* zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, szczelność betonów oraz odporność na powierzchniowe łuszczenie w porównaniu z cementem z 9% zawartością C_3A (Rys. 10.3). W literaturze powyższy wpływ faz glinianowych był obserwowany w betonach z popiołami krzemionkowymi o małej zawartości SO_3 i alkaliów [4]. Największe zmiany właściwości betonów z cementami różniącymi się głównie udziałem fazy C_3A wykazały badania, w których występuje oddziaływanie jonów chlorkowych (współczynnik migracji jonów chlorkowych, powierzchniowe łuszczenie). Większy udział faz glinianowych w matrycy cementowej umożliwił najprawdopodobniej bardziej efektywną immobilizację jonów chlorkowych w matrycy cementowej w postaci soli Friedla [71]. Powyższa hipoteza wykraczała poza tematykę pracy.



Rys. 10.3. Względna zmiana właściwości betonu z 40% dodatkiem popiołu P3 i cementem CM-2 (P3-40_CM_2) względem betonu z cementem CM-9: (a) właściwości mechaniczne; (b) współczynnik migracji jonów chlorkowych oraz odporność na powierzchniowe łuszczenie

Badania składu fazowego umożliwiły identyfikację składników zaczynów cementowo-popiołowych, którymi były: faza *C-S-H*, portlandyt oraz niewielki udział kryształów ettringitu (Tablice 8.10-8.13). Zastosowanie *PLW* w zaczynie cementowym z cementem CM-9 zwiększyło o około 10% udział fazy *C-S-H* w porównaniu do zaczynu cementowego bez dodatków mineralnych. Zanotowano także charakterystyczne zmniejszenie udziału portlandytu po zastosowaniu dodatku *PLW* do zaczynu cementowego. Zmienność składu

chemicznego i właściwości fizycznych badanych popiołów lotnych wapiennych nie wpłynęła na zmianę jakościową składu fazowego zaczynów cementowo-popiołowych oraz morfologię produktów hydratacji.

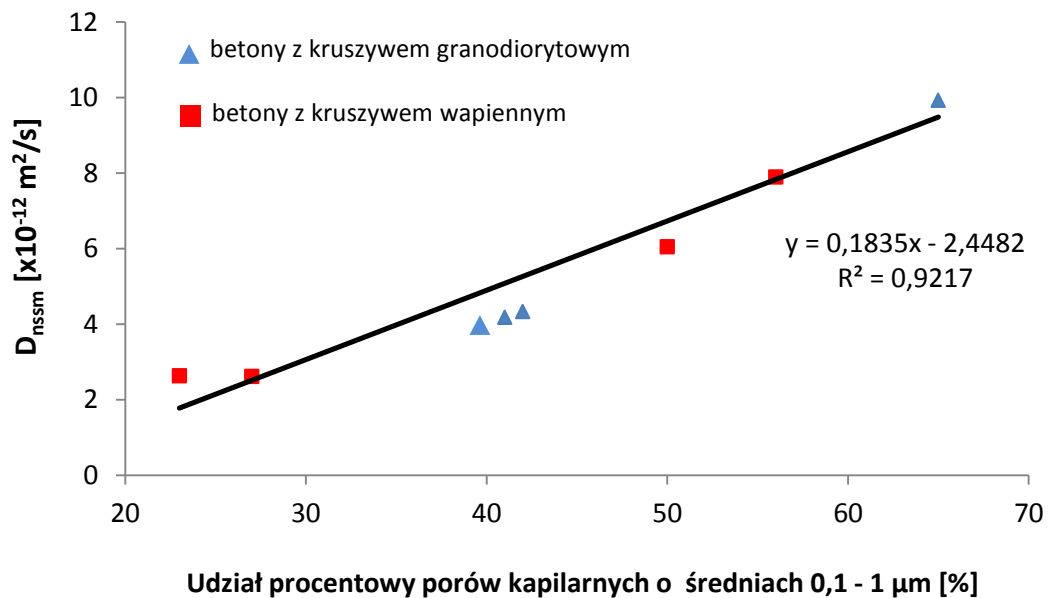
Stwierdzono zmiany mikrostrukturalne w betonach modyfikowanych dodatkiem *PLW*. Zastosowanie *PLW* nie wpłynęło znacząco na całkowitą objętość porów kapilarnych betonów po dłuższych okresach dojrzewania (>90 dni) w porównaniu z betonem bez dodatków. Natomiast powodowało zmniejszenie udziału porów kapilarnych z przedziału od 0,1-1 μm oraz zwiększenie udziału porów z przedziału 0,003-0,1 μm w porównaniu z betonem bez dodatków mineralnych. Brak istotnych zmian całkowitej objętości porów kapilarnych przy ponad pięciokrotnym zmniejszeniu krytycznych średnicy porów (r_k) betonów z *PLW* względem betonu bez dodatków, świadczy o znaczącym zwiększeniu liczebności porów kapilarnych w objętości betonu. Wpływ aktywacji *PLW* był niewielki i spowodował nieznaczne zmiany krytycznej i średniej średnicy porów. Dostępne w literaturze badania porozymetrii rtęciowej nienapowietrzonych betonów z *PLW* [5],[143] wykazują jedynie osiągnięcie zbliżonej bądź mniejszej całkowitej objętości porów kapilarnych w odniesieniu do betonów bez dodatków mineralnych.

Stabilność systemu porów powietrznych w mieszankach betonowych była weryfikowana za pomocą pomiaru charakterystyki porów powietrznych na zglądach betonowych. Prezentowane w analizowanej literaturze metody projektowania betonów z dodatkiem *PLW* nie weryfikowały stabilności porów powietrznych w stwardniałym betonie [66],[128]. Prezentowane badania (Rozdział 8.5) wykazały, że dodatek *PLW* powoduje zwiększenie udziału porów powietrznych o średnicach większych od 500 μm i zmniejszenie udziału mikroporów A_{300} . Dlatego założono większą zawartość powietrza w mieszance betonowej, wynoszącą 6-7%. Zwiększenie zawartości powietrza z jednoczesnym zmniejszeniem konsystencji zapewniało satysfakcjonującą zawartość mikroporów (A_{300}) w stwardniałym betonie, powyżej 2%. Zaobserwowano, że aktywacja *PLW* przez mielenie zwiększała ucieczkę pęcherzyków powietrza, przede wszystkim o średnicach większych od 500 μm , podczas mieszania składników betonu. Wpływało to na uzyskiwany stosunek mikroporów (A_{300}) do całkowitego udziału powietrza (A), który był 20% większy niż w betonach bez dodatków mineralnych, pomimo zbliżonej całkowitej zawartości powietrza (A). Jednakże uzyskanie zakładanego napowietrzenia mieszanki betonowej z dodatkiem mielonego *PLW* wymagało trzykrotnego zwiększenia zawartości domieszki napowietrzającej względem nieprzetwarzanego *PLW*. Odseparowanie frakcji ziarnowej *PLW* większej od 125 μm powoduje osiągnięcie zbliżonego stosunku A_{300}/A w porównaniu do betonów z popiołami nieprzetwarzanymi. Skutkiem separacji ziarnowej *PLW* było zmniejszenie objętości domieszki napowietrzającej, niezbędnej do uzyskania zakładanego napowietrzenia betonu. Obserwacje w *SEM* pustek powietrznych pochodzących od napowietrzenia wykazały obecność igiełkowatych kryształów ettringitu. Produkty hydratacji rekrytalizujące w pustkach kompozytu mogą wpływać na mrozoodporność, gdyż zmniejszają całkowitą objętość porów powietrznych powstałych w wyniku napowietrzania. Szczególnie narażone są pustki powietrzne o niewielkich rozmiarach, tj. mikropory poniżej 300 μm (A_{300}) [138].

Współczynnik migracji jonów chlorkowych (D_{nssm}) po zastosowaniu *PLW* w betonach był zbliżony lub zmniejszył się w porównaniu do betonu bez dodatków. Podobny wpływ został zaprezentowany w badaniach migracji jonów chlorkowych w betonach nienapowietrzonych z *PLW* [5],[47],[140]. Popioły lotne wapienne o dużym rozwinięciu

powierzchni wykazały 60% mniejszy współczynnik D_{nssm} w porównaniu z popiołami o mniejszym rozwinięciu powierzchni. Spowodowane jest to prawdopodobnie uszczelnieniem matrycy cementowej po zastosowaniu drobniejszych ziaren popiołu, który sugeruje Sekulic [114]. Zastosowanie 20% dodatku PLW w betonach zapewnia współczynnik D_{nssm} zbliżony do betonu referencyjnego bądź mniejszy, w zależności od rodzaju użytego cementu portlandzkiego (udział C_3A). Zwiększenie udziału PLW w betonie z 20% do 40% powoduje dalsze zmniejszenie się współczynnika D_{nssm} . Zastosowanie aktywowanych PLW jako dodatku do betonu zmniejszyło współczynnik D_{nssm} w porównaniu do betonu z dodatkiem nieprzetwarzanym. Szczególnie istotne było zmniejszenie współczynnika D_{nssm} po 28 dniach dojrzewania, po których był on mniejszy o 30% od betonu z nieprzetwarzanym PLW oraz zbliżony do betonu bez dodatków mineralnych. Po 90 dniach dojrzewania współczynnik D_{nssm} betonów z aktywowanym PLW był o połowę mniejszy, niż w betonie bez dodatków mineralnych.

Wyniki badań D_{nssm} betonów z cementami wieloskładnikowymi, rozszerzone o betony z kruszywem wapiennym [29], wykazały liniową zależność D_{nssm} od udziału porów kapilarnych o średnicach 0,1-1 μm mierzonych metodą porozymetrii rтęciovей (Rys. 10.4). Wyniki rozprawy doprecyzowują ustalenia raportu RILEM [105], w którym wykazano, że za przepuszczalność matrycy cementowej odpowiadają pory o większych średnicach z przedziału 0,05-1 μm wyznaczone za pomocą MIP . W analizowanej literaturze jedynie Yang [141], uzyskał wcześniej liniową zależność współczynnika D_{nssm} i krytycznej średnicy porów (mierzonej metodą porozymetrii rтęciovей), ale jedynie w przypadku betonów bez dodatków mineralnych.



Rys. 10.4. Zależność współczynnika migracji D_{nssm} od udziału porów kapilarnych o średnicach 0,1-1 μm betonów z cementami wieloskładnikowymi [29]

Badania pociągania kapilarnego wykazują, że betony z dodatkiem PLW absorbują o 15-20% mniej wody niż beton bez dodatków. Szybkość absorpcji jest mniejsza o 20-25% niż w betonie bez dodatków. Czas nasycenia betonów z PLW jest o połowę krótszy

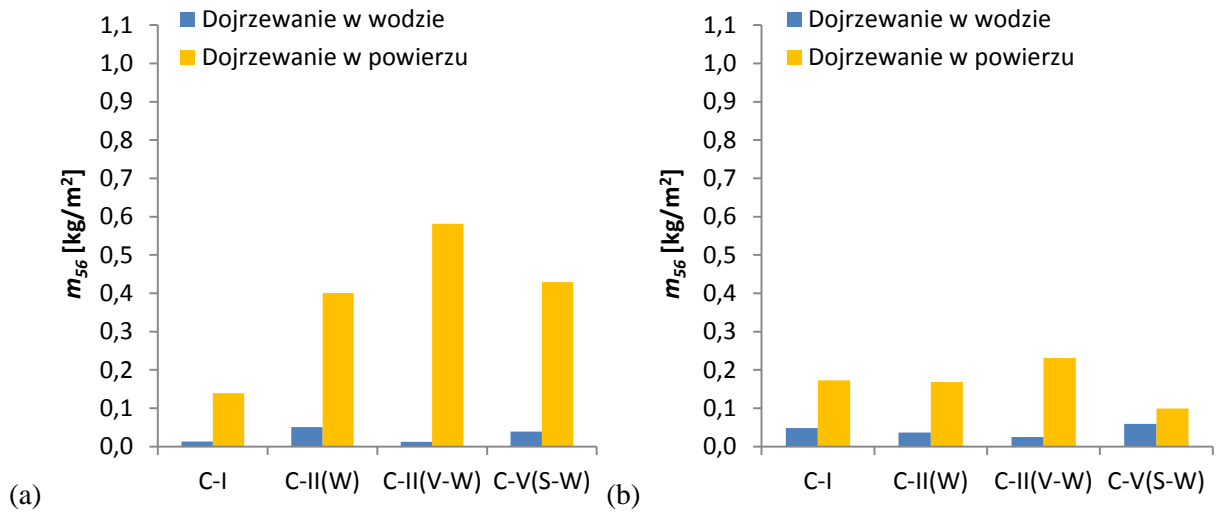
w porównaniu z betonem bez dodatków. Aktywacja *PLW* zwiększa o 5-50% powyższe efekty stosowania dodatku popiołowego w betonach.

Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie nienapowietrzonych betonów z dodatkiem *PLW* zmniejszyło rezonansowy moduł sprężystości (E_d) o 10-22%. Zmiany E_d były uzależnione od właściwości *PLW*, a w szczególności morfologii ziaren. Napowietrzanie betony z *PLW* nie wykazują zmian E_d po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania, potwierdzając wnioski z badań dostępnych w literaturze [128],[140]. Dodatek *PLW* w betonach nienapowietrzonych wykazał zmniejszenie masy złuszczeń powierzchniowych w porównaniu z betonem bez dodatków mineralnych po 28 dniach dojrzewania. Jednakże uzyskane wyniki były powyżej „dopuszczalnej” masy złuszczeń ($>1 \text{ kg/m}^2$).

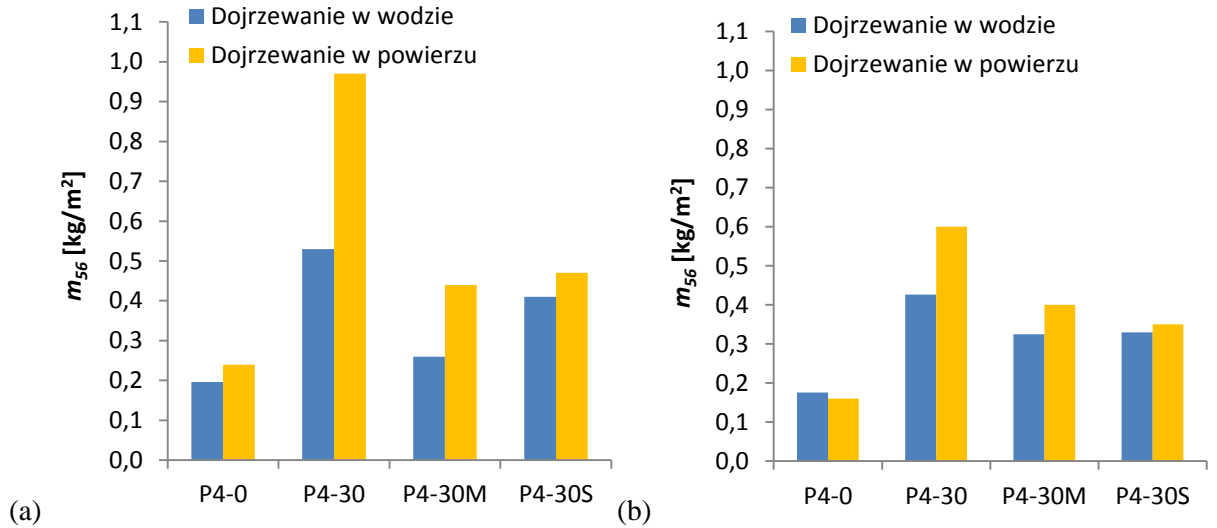
Zmienność właściwości nieprzetwarzanych *PLW* wpływała na uzyskiwaną masę złuszczeń (m_{56}) betonów napowietrzonych. Masa złuszczeń (m_{56}) betonów z *PLW* różniących się uziarnieniem zawierały się w „dobrej” klasie odporności po 28 dniach dojrzewania, a beton referencyjny wykazał znikomą masę złuszczeń i został sklasyfikowany jako „bardzo dobry”. Jednakże beton z *PLW* o większej powierzchni właściwej wg Blaine’a wykazał ponad dwukrotnie większą masę złuszczeń (m_{56}) w porównaniu z betonem z popiołem o mniejszej powierzchni właściwej wg Blaine’a. Zwiększenie dodatku *PLW* z 20% do 40% zmniejszyło masę złuszczeń powierzchniowych (m_{56}), która była zbliżona do betonu bez dodatków mineralnych po 90 dniach dojrzewania. Zgodnie z obserwacjami Valenzy i Sherera [138] efekty poprawy odporności na powierzchniowe łuszczenie, przy właściwym napowietrzeniu, wynikają głównie z właściwości mechanicznych matrycy cementowej w chwili badania [138]. Wydłużenie dojrzewania zapewniło większą wytrzymałość matrycy cementowej z 40% dodatkiem *PLW*. W badaniach prezentowanych w analizowanej literaturze zazwyczaj masa złuszczeń powierzchniowych napowietrzonych betonów z *PLW* była większa niż betonu bez dodatków mineralnych [46],[68],[92].

Stwierdzono wpływ aktywacji *PLW* na masę złuszczeń (m_{56}). Użycie cementów wieloskładnikowych w betonach zapewniło „bardzo dobrą” odporność na powierzchniowe łuszczenie, zbliżoną do kompozytu bez dodatków mineralnych, osiągając masę złuszczeń (m_{56}) poniżej $0,1 \text{ kg/m}^2$. W literaturze nie stwierdzono tak niewielkich i zbliżonych do cementów bez dodatków mineralnych wyników powierzchniowego łuszczenia. Zazwyczaj masa złuszczeń (m_{56}) była większa, niż w betonach z cementem portlandzkim [20],[50],[79]. Stosowanie dodatku aktywowanych *PLW* w betonach poprawia odporność na powierzchniowe łuszczenie w porównaniu do betonów z nieprzetworzonym *PLW*. Jednakże kompozyty z popiołami aktywowanymi i nieprzetwarzanymi uzyskały masę złuszczeń (m_{56}) w tej samej klasie odporności – „dobrej”. Betony z dodatkiem mielonego *PLW* wykazywały dwukrotnie mniejszą masę złuszczeń (m_{56}) po 28 dniach dojrzewania w porównaniu do betonów z *PLW* po separacji ziarnowej. Wynikało to z większej aktywności dodatku popiołowego.

Warunki dojrzewania były szczególnie istotne w próbkach betonów z cementami wieloskładnikowymi, gdzie zastosowanie powietrzno-suchych warunków dojrzewania spowodowało zmianę klasy odporności na złuszczenia powierzchniowe z „bardzo dobrej” na „dobrą” (Rys. 10.5). Zastosowanie w betonach dodatku aktywowanych *PLW* zmniejsza masę złuszczeń (m_{56}) w porównaniu do betonów z dodatkiem nieprzetwarzanym (Rys. 10.6). Wydłużenie pielęgnacji powietrzno-suchej do 90 dni dojrzewania znacząco zwiększa odporność na powierzchniowe złuszczenie.



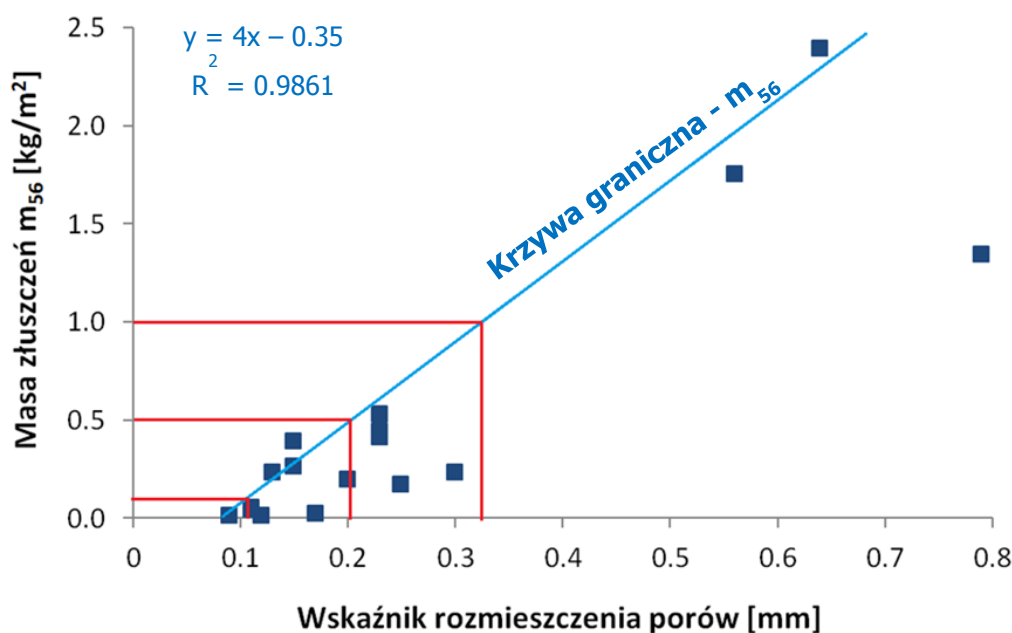
Rys. 10.5. Wpływ sposobu dojrzewania kompozytów na masę złuszczeń (m_{56}) betonów z cementami wieloskładnikowymi dojrzewających: (a) 28 dni; (b) 90 dni



Rys. 10.6. Wpływ sposobu dojrzewania kompozytów na masę złuszczeń (m_{56}) betonów z aktywowanymi PLW dojrzewających: (a) 28 dni; (b) 90 dni

Efekt skróconej pielęgnacji wilgotnościowej kompozytów z dodatkami pucolanowymi przedstawił w swoich badaniach Jacobsen i Sellevold [63] podkreślając znaczenie wydłużenia pielęgnacji w warunkach powietrzno-suchych w celu zwiększenia wytrzymałości matrycy cementowej, która zwiększa odporność na powierzchniowe złuszczenie betonów. W badaniach Bisshopa [18] dodatkowo podkreślany był wpływ zmniejszonej wilgotności na odwadnianie ettringitu i monosiarczanu, powodujące powstawanie rys i spękań, które ograniczają odporność na powierzchniowe łuszczenie. Dotyczy to przede wszystkim warstwy powierzchniowej betonu, co zaobserwowali Zanga i Glassera [145].

Na podstawie wyników badań charakterystyki porów badanych betonów z dodatkiem PLW (do 40% zastąpienia cementu) wyznaczono zależność łączącą masę złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) ze wskaźnikiem rozmieszczenia porów (\bar{L}) (Rys. 10.7).



Rys. 10.7. Wpływ wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} na m_{56} próbek kompozytów cementowych po 28 dniach dojrzewania w wodzie badanych na powierzchni ciętej

Ocenę wykonano uwzględniając wszystkie wykonane betony: bez dodatków mineralnych, z dodatkiem *PLW* w stanie dostawy i po aktywacji, z cementami wieloskładnikowymi z *PLW* i innymi dodatkami mineralnymi. Krzywa graniczna stanowiła przybliżenie liniowe maksymalnej masy złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) betonów w odniesieniu do uzyskanego wskaźników rozmieszczenia porów. Z Rysunku 10.7 wynika, że uzyskanie „dopuszczalnej” odporności na powierzchniowe łuszczenie ($<1 \text{ kg/m}^2$) betonów z *PLW* jest możliwe w przypadku wskaźnika rozmieszczenia porów $\bar{L} < 0,33 \text{ mm}$. Na podstawie krzywej granicznej wyznaczono maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów niezbędny do uzyskania „dobrej” odporności na powierzchniowe łuszczenie ($m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ i $m_{56}/m_{28} \leq 2$), który wynosił $0,20 \text{ mm}$. Aby uzyskać masę złuszczeń powierzchniowych betonów z *PLW* w kategorii „bardzo dobrej” ($<0,1 \text{ kg/m}^2$), należy uzyskać wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L} \leq 0,11 \text{ mm}$. Powyższy maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów jest o połowę mniejszy, niż prezentowana w literaturze wartość graniczna w betonach bez dodatków mineralnych ($\bar{L} \leq 0,20 \text{ mm}$). Wykorzystanie *PLW* jako składnika betonu o „bardzo dobrej” odporności na powierzchniowe złuszczenie w skutek działania mrozu i środków odladzających wymaga więc znaczącego zmniejszenia rozstawu porów powietrznych.

11. Wnioski końcowe

Przedmiotem badań był wpływ dodatku *PLW* na mikrostrukturę i mrozoodporność betonów. Zbadano odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie kompozytów cementowych z dodatkiem *PLW* w postaci nieprzetwarzanej oraz po aktywacji przez mielenie popiołu, współmielenie popiołu z klinkierem portlandzkim i innymi dodatkami mineralnymi oraz separację ziarnową. Rozszerzając dotychczasowy stan wiedzy w tej dziedzinie, nacisk położono na określenie wpływu aktywacji *PLW* na powstającą mikrostrukturę betonów napowietrzonych. Charakterystykę mikrostruktury przeprowadzono w odniesieniu do mrozoodporności betonu oraz transportu cieczy i roztworu soli odladzających do wnętrza betonu. Na podstawie przeprowadzonych w rozprawie badań sformułowano następujące wnioski:

1. Popiół lotny wapienny, pochodzący ze spalania węgla brunatnego w Elektrowni Bełchatów przyczynia się do niestabilności pęcherzyków powietrza podczas napowietrzania mieszanki betonowej. Zwiększenie zawartości *PLW* w spoiwie (do 50%) powoduje liniowe zwiększenie objętości domieszki o działaniu powierzchniowo czynnym w celu uzyskania zakładanego napowietrzania. Adsorpcje domieszki przez *PLW* należy wiązać z obecnością w jego składzie aglomeratów ziaren o dużym rozwinięciu powierzchni oraz ziaren niespalonego węgla.
2. Zmienność składu chemicznego i właściwości fizycznych badanych *PLW* nie wpłynęła w istotny sposób na zmiany wytrzymałości na ściskanie i moduł sprężystości betonu po 28 i 90 dniach dojrzewania.
3. Zastosowanie dodatku *PLW* w napowietrzonych betonach wywołuje następujące zmiany mikrostruktury porów powietrznych:
 - a) użycie *PLW* w stanie dostawy powoduje zwiększenie udziału porów powietrznych o średnicach większych od 500 μm i zmniejszenie udziału mikroporów poniżej 300 μm (A_{300}) w porównaniu z betonem bez dodatków mineralnych.
 - b) użycie aktywowanego *PLW* przez mielenie powoduje 20% zwiększenie udziału mikroporów (A_{300}) w stosunku do całkowitego udziału powietrza (A) w porównaniu z betonami bez dodatków mineralnych.
4. Dodatek *PLW* do betonu powoduje zmniejszenie udziału porów kapilarnych z przedziału od 0,1-1 μm oraz zwiększenie udział porów z przedziału 0,003-0,1 μm w porównaniu z betonem bez dodatków mineralnych. Brak istotnych zmian całkowitej objętości porów kapilarnych (V_t) oraz ponad pięciokrotne zmniejszenie krytycznej średnicy porów (r_k) betonów z *PLW* względem betonu bez dodatków, świadczy o znaczącym zwiększeniu liczebności porów kapilarnych w objętości betonu.
5. Zastosowanie w betonie z *PLW* cementu portlandzkiego o 2% udziale C_3A zmniejsza wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, odporność na penetrację jonów chlorkowych oraz odporność na powierzchniowe łuszczenie w porównaniu z cementem z 9% zawartością C_3A . Spostrzeżenie dotyczy betonów po 28 i 90 dniach dojrzewania.
6. W wyniku podciągania kapilarnego betony z dodatkiem *PLW* absorbują o 15-20% mniej wody niż beton bez dodatków. Szybkość absorpcji (S_{pk}) jest mniejsza o 20-25% niż w betonie bez dodatków. Czas nasycenia betonów z *PLW* (T_{pk}) jest o połowę krótszy w porównaniu z betonem bez dodatków.

7. Przeprowadzone badania wykazały zmniejszenie współczynnika migracji jonów chlorkowych (D_{nssm}) betonów z *PLW* (do 40% dodatku) względem betonów bez dodatków mineralnych po 90 dniach dojrzewania. Należy to wiązać z:
 - a) 10% większym udziałem fazy C-S-H w matrycy cementowej, co skutkuje zmniejszeniem średnic porów kapilarnych,
 - b) większą aktywnością *PLW* po mieleniu i odseparowaniu frakcji inertej chemicznie powyżej 125 μm .
8. Wyznaczono liniową zależność współczynnika migracji jonów chlorkowych D_{nssm} od udziału porów kapilarnych o średnicach z przedziału 0,1-1 μm w betonach z cementami wieloskładnikowymi z *PLW* oraz mieszaniną dodatków z popiołem lotnym krzemionkowych i granulowanym żużlem wielkopieczowym. Zwiększenie udziału porów kapilarnych o średnicach z przedziału 0,1-1 μm powoduje zwiększenie współczynnika D_{nssm} .
9. Wskaźnik rozmieszczenia porów $\bar{L} \leq 0,25$ mm zapewnia odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie napowietrzonych betonów z dodatkiem *PLW*.
10. Oceniając odporność na powierzchniowe łuszczenie betonów z dodatkiem *PLW*, poddanych cyklicznemu zamrażaniu-rozmrażaniu oraz oddziaływaniu soli odladzających, stwierdzono, że:
 - a) zwiększenie rozwinięcia powierzchni właściwej wg. Blaine'a popiołów z 2900 cm^2/g do 4400 cm^2/g dwukrotnie zwiększyło masę złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) betonu,
 - b) betony z dodatkiem *PLW* o zbliżonej dystrybucji porów powietrznych, określonej jako wskaźnik rozmieszczenia porów ($\bar{L} = 0,20 \pm 3$ mm), wykazują większą masę złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) w porównaniu z betonem bez dodatków mineralnych,
 - c) aktywacja *PLW* przez mielenie zapewnia zmniejszenie o połowę masy złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) w porównaniu z betonem z popiołem nieprzetwarzanym po 28 dniach dojrzewania,
 - d) zapewnienie udziału mikroporów (A_{300}) powyżej 2% i wydłużonej pielęgnacji do 90 dni w betonie z 40% dodatkiem *PLW* zapewnia zbliżoną masę złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) do betonów bez dodatków mineralnych,
 - e) uzyskanie bardzo dobrej odporności na złuszczenia powierzchniowe oraz masy złuszczeń powierzchniowych (m_{56}) betonów z dodatkiem *PLW*, zbliżonej do betonu bez dodatków, wymaga osiągnięcia wskaźnika rozmieszczenia porów $\bar{L} \leq 0,11$ mm.

Literatura cytowana w pracy

- [1] Aligizaki K.K. (2006) "Pore structure of cement-based materials. Testing, interpretation and requirements", Taylor and Francis, London.
- [2] Antiohos S., Tsimas S. (2005) "Investigating the role of reactive silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems", *Cement and Concrete Composites*, 27, 171-181.
- [3] Antiohos S., Papadakis V.G., Maganari K., Tsimas S. (2003) "The development of blended supplementary cementing materials consisting of high and low calcium fly ashes", *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, Durban, 765-777.
- [4] Antiohos S.K., Papageorgiou A., Papadakis V.G., Tsimas S. (2008) "Influence of quicklime addition on the mechanical properties and hydration degree of blended cements containing different fly ashes", *Construction and Building Materials*, 22, 1191-1200.
- [5] Aponte D.F., Barra M., Vazquez E. (2012) "Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes", *Construction and Building Materials*, 30, 537-546.
- [6] Arnfelt H. (1943) "Damage on Concrete Pavements by Wintertime Salt Treatment", *Meddelande*, vol. 66, Statens Väginstytut, Stockholm.
- [7] Atahan H.N., Carlos C., Chae S., Monteiro P.J.M., Bastacky J. (2008) "The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants", *Cement and Concrete Composites*, 30, 566-575.
- [8] Atis C.D., Kilic A., Sevim U.K. (2004) "Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash", *Cement and Concrete Research*, 34, 99-102.
- [9] Attiogbe, E.K.(1993) "Mean spacing of air voids in hardened of concrete – a new approach", *ACI Material Journal*, 90, 174-181.
- [10] Bai J., Wild S., Sabir B.B. (2002) "Sorptivity and strength of air-cured and water-cured PC-PFA-MK concrete and the influence of binder composition on carbonation depth", *Cement and Concrete Research*, 32, 1813-1821.
- [11] Baltrus J.P., LaCount R.B. (2001) "Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement", *Cement Concrete Research*, 31, 819-824.
- [12] Baran T., Drożdż W. (2013) „Ocena właściwości krajowych popiołów lotnych i metod ich uzdatniania”, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12 (1), 5-16,
- [13] Barbhuiya S.A., Gbagbo J.K., Russell M.I., Basheer P.A.M. (2009) "Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume", *Construction and Building Materials*, 23, 3233-3239.
- [14] Beaudoin J.J., MacInnis C. (1974) "The mechanism of frost damage in hardened cement paste", *Cement Concrete Research*, 4 (2), 139-147.
- [15] Bentur A. (2006) "Impact of additions: indicators for durability and strength performance", *International RILEM Workshop on Performance based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, 259-272.
- [16] Berg W., Feuerborn H-J. (2006) „Popioły lotne z węgla brunatnego w Europie – właściwości i ich zastosowanie”, *Międzynarodowe Seminarium Naukowe*

- Techniczne. Przetwarzanie i Wykorzystanie Popiołów Wysokowapniowych, Belchatów, 19-27.
- [17] Berry R. (1994) "Hydration in high-volume fly ash binders", *ACI Material Journal*, 91, 384-389.
- [18] Bisschop J., Van Mier J.G.M. (2002) "How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy", *Cement and Concrete Research*, 32, 279-287.
- [19] Bilodeau A., Malhotra V.M. (1992) "Concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ashes: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration", in: Malhotra V.M. (Ed.), *ACI Special Publication SP-132*, American Concrete Institute, Detroit, 319-349.
- [20] Bilodeau A., Malhotra V.M. (1993) "Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating supplementary cementing materials", *CANMET researches*, International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in the Presence of Deicing Salts, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Beton, Université de Sherbrooke-Université Laval, Quebec, 191-228.
- [21] Bjegovic D., Mikulic D., Ukraincik V. (1987) "Theoretical aspect and methods of testing concrete resistance to freezing and deicing chemicals", Katherine and Bryant Mather International Conference on the Concrete Durability, Atlanta, 947-971.
- [22] Bouzoubaa N., Zhang M.H., Malhotra V.M. (2001) "Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash", *Cement and Concrete Research*, 31, 1393-1402.
- [23] Brandt A.M. (1998) „Wpływ warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych (BWW)”, II Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej – MATBUD ‘98”, Kraków -Mogilany, 21-30.
- [24] Brandt A.M., Józwiak-Niedźwiedzka D. (2001) „Uszkodzenia powierzchni betonu spowodowane cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem”, Referaty XLVII Konferencji Naukowej KiLW PAN i KN PZiTB, Materiały budowlane, tom 1, Opole -Krynica, 277-284.
- [25] Bruere G.M. (1958) "Mechanisms by which air-entraining agents affect viscosities and bleeding properties of cement pastes", *Australian Journal of Applied Science*, 9, 349-359.
- [26] Chindaprasirt P., Chotithanorn C., Cao H.T., Sirivivatnanon V. (2007) "Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete", *Construction and Building Materials*, 21, 356-361.
- [27] Ciardullo J.P., Sweeney D.J., Scherer G.W. (2005) "Thermal expansion kinetics: method to measure the permeability of cementitious materials: IV. Effect of thermal gradients", *Journal of the American Ceramic Society*, 88 (5), 1213-1221.
- [28] Das B.B., Kondraivendhan B. (2012) "Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete", *Construction and Building Materials*, 28, 382-386.
- [29] Dąbrowski M., Gibas K., Glinicki M.A. (2015) "Influence of blended cement with HCFA on microstructure and chloride ions transport of concrete resistant to surface

- scaling”, 11th International Symposium Brittle Matrix Composites: BMC-11, 111-120.
- [30] Dąbrowski M., Glinicki M.A. (2013) „Air void system parameters and frost resistance of air-entrained concrete containing calcareous fly ash”, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12 (1), 5-19.
- [31] Deja J. (2003) “Freezing and de-icing salt resistance of blast furnace slag concretes”, *Cement and Concrete Composites*, 25, 357-361.
- [32] Diamond S. (2000) “Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials”, *Cement and Concrete Research*, 30, 1517-1525.
- [33] Diamond S., Huang J. (2001) “The *ITZ* in concrete – a different view based on image analysis and *SEM* observation”, *Cement and Concrete Composites*, 23, 179-188.
- [34] Dodson V.H. (1990) “Concrete admixtures”, 1st ed.: Van Nostrand Reinhold, New York, “Air-entraining”, 129-164.
- [35] Du L., Folliard K.J. (2005) “Mechanisms of air entrainment in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 35, 1463-1471.
- [36] Eck T. (2008) “Wykorzystanie popiołów z węgla do betonu – doświadczenia w Niemczech”, Międzynarodowa Konferencja EUROCOALASH, Warszawa, 99-114.
- [37] Enders M. (1996) “The *CaO* distribution to mineral phases in a high calcium fly ash ash from Eastern Germany”, *Cement Concrete Research*, 26 (2), 243-251.
- [38] Fabbri A., Coussy O., Fen-Chong T. (2007) “Influence of the permeability on the frost-thaw behavior of concrete”, *European Journal of Civil Engineering*, 11 (6), 751-761.
- [39] Fagerlund G. (1977) “The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete”, *Mater. Constr.*, 10 (58), 230-251.
- [40] Fagerlund G. (1990) “Air-pore instability and its effect on the concrete properties”, *Nordic Concrete Research*, 9, 39-52.
- [41] Fagerlund G. (1997) „Trwałość konstrukcji betonowych”, Arkady, Warszawa.
- [42] Galle C. (2001) “Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying”, *Cement Concrete Research*, 31, 1467-1477.
- [43] Garbacik A., Baran T. (2008) “Wpływ dodatku popiołu lotnego krzemionkowego z różną zawartością części palnych na właściwości cementu”, *Konferencja Dni Betonu*, 513-521.
- [44] Garces P., Andion L.G., Zornoza E., Bonilla M., Paya J. (2010) “The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement – modified fly ash mortars”, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2), 204-210.
- [45] Gawlicki M., Nocuń-Wczelik W., Pyzalski M. (1984) “Studies on the hydration of calcium aluminates”, *Jurnal of Termal Analysis*, 29 (5), 1005-1008.
- [46] Gebler S., Klieger P. (1983) “Effects of fly ash on the air-void stability of concrete”, *Proceedings of the Canmet/ACI. First International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete*, 1, 103–142.

- [47] Gibas K., Glinicki M.A., Nowowiejski G. (2013) „Ocena szczelności betonu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego wobec mediów środowiskowych”, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12 (2), 159-171.
- [48] Giergiczny Z., Garbacik A., Ostrowski M. (2013) „Aktywność pucolanowa i hydrauliczna wapiennych popiołów lotnych”, *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 12 (1), 71-82.
- [49] Giergiczny Z., Weryńska A. (1998) “Influence of fineness of fly ashes on their hydraulic activity”, *Proceedings Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, 97-115.
- [50] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J. (2002) „Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji”, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole.
- [51] Giergiczny Z. (2006) „Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych”, Monografia 325, Politechnika Krakowska.
- [52] Giergiczny Z. (2006) “The hydraulic activity of high calcium fly ash”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 83 (1), 227-232.
- [53] Giergiczny Z. (2008) „Metody badań odporności betonu na korozję chlorkową i siarczanową”, II Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement – właściwości i zastosowanie”, Kraków, 77-96.
- [54] Glinicki M.A., Dąbrowski M. (2010) „Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na napowietrzenie mieszanki betonowej i charakterystykę porów w betonie”, *Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki*, Warszawa, 77-92.
- [55] Grandt S.A. (2000) “Physical and chemical factor affecting contaminant hydrology in cold environments”, Technical Report ERDC/CRREL TR-00-21, U.S. Army Waterways Experiment Station.
- [56] Grzeszczyk S., Lipowski G. (1998) “Effect of low-calcium fly ash on the rheology of fresh cement pastes”. *Applied Mechanics and Engineering*, 3, 589-600.
- [57] Gulati S.T., Hagy H.E. (1982) “Analysis and measurement of glue-spall stresses in glass-epoxy bonds, *Journal of American Ceramics Society*, 65 (1), 1-5.
- [58] Hachmann L., Burnett A., Gao Y-M, Hurt R. H., Suuberg E. M. (1998) “Surfactant adsorptivity of solid products from pulverized-coal combustion under controlled conditions”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, 2965-2971.
- [59] Hammer T.A., Sellevold E.J. (1990) “Frost resistance of high-strength concrete”, in: Hester W.T. (Ed.), *ACI Special Publication SP-121*, American Concrete Institute, Detroit, 457-487.
- [60] Helmuth R.A. (1962) “Discussion of the paper “Frost Action in Concrete”, in: Nerenst P. (Ed.), *Proc. 4th Int. Cong. Chemistry of Cement*, NBS Monog. 43, vol. II, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 820-833.
- [61] Hewlett P. C. (2008) “*Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*”, Elsevier, London.
- [62] Igarashi S., Watanabe A., Kawamura M. (2005) “Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages”, *Cement and Concrete Research*, 35, 513-519.
- [63] Jacobsen S., Sellevold E.J. (1993) “Frost/salt scaling and ice formation of concrete: effect of curing temperature and silica fume on normal and high strength concrete”, *International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling due to Freezing in*

- the Presence of Deicing Salts, Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Beton, Université de Sherbrooke-Université Laval, Quebec, 230-246.
- [64] Jacobsen S., Sather D., Sellevold E. (1997) "Frost testing of high strength concrete: frost/salt different cooling rates", *Materials and Structures*, 30 (1), 33-42.
- [65] Jasiczak J. Zieliński K. (2006) "Effect of protein additive on properties of mortar", *Cement and Concrete Composites*, 28 (5), 451-457.
- [66] Johnston C. (1987) "Effects of microsilica and class C fly ash on resistance of concrete to rapid freezing and thawing, and scaling in the presence of deicing agents", in: J. Scanlon (Ed.), *ACI Special Publication SP-100*, 1183-1204.
- [67] Józwiak-Niedźwiedzka D. (2004) „Przeciwdziałanie niszczeniu powierzchni betonowych spowodowanemu cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem”, *Rozprawa doktorska, IPPT PAN Warszawa*.
- [68] Klieger P., Gebler S. (1987) "Fly ash and concrete durability". Katharine and Bryant Mather International Conference on the Concrete Durability, Atlanta, *ACI SP 100*, 1, 1043-1069.
- [69] Kulaots I., Hsu A., Hurt R.H., Suuberg E. M. (2003) „Adsorption of surfactants on unburned carbon in fly ash and development of a standardized foam index test”, *Cement and Concrete Research*, 33, 2091-2099.
- [70] Kulaots I., Hurt R.H., Suuberg E.M. (2004) „Size distribution of unburned carbon in coal fly ash and its implications”, *Fuel*, 83, 223-230.
- [71] Kurdowski W. (2010) „Chemia cementu i betonu” PWN, Warszawa.
- [72] Laroche M., Marchand J., Pigeon M. (1997) "Reliability of the ASTM C672 test procedure. Freeze-thaw durability of concrete". *Proceedings of the International Workshop in the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freeze in the Presence of De-icing Salts*. E&FN SPON, London.
- [73] Leemann A., Münch B., Gasser P., Holzer L. (2006) "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete", *Cement and Concrete Research*, 36, 1425-1433.
- [74] Leemann A., Loser R., Münch B. (2010) Influence of cement type on *ITZ* porosity and chloride resistance of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, 32, 116-120.
- [75] Lindmark S. (1998) "Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: studies and hypothesis", Ph.D. thesis (Report TVBN 1017), Lund Inst. Tech., Lund, Sweden.
- [76] Litvan G.G. (1972) "Phase transitions of adsorbates: III. Heat effects and dimensional changes in nonequilibrium temperature cycles", *Journal of Colloid Interface Science*, 38 (1), 75-83.
- [77] Liu Z., Hansen W. (2015) "Sorptivity as a measure of salt frost scaling resistance of air-entrained concrete", *Key Engineering Materials*, Vols. 629-630, 195-200.
- [78] Liu H., Lu Z., Lin S. (1980) "Hydraulic behavior of ground blastfurnace slag in cement matrix", 7th International Congress of Cement Chemistry, t.III, 53-62, Paris.
- [79] Marchand J., Sellevold E., Pigeon M. (1994) "The deicer salt scaling deterioration of concrete – an overview", *Durability of Concrete. III International Conference*, *ACI SP 145-1*, Nice, 1-46.

- [80] Marchand J., Gagne R., Pigeon M., Jacobsen S., Sellevold E.J., "Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading", in: Sakai K., Banthia N., Gjorv O.E. (1995), E & FN Spon, 1, 273-288.
- [81] Marchand J., Pleau R., Gagné R. (1995) "Deterioration of concrete due to freezing and thawing", in: Skalny J., Mindess S. (Eds.), *Materials Science of Concrete, IV*, American Ceramics Society, Westerville, OH, 283-354.
- [82] Marchand J., Pigeon M., Bager, Talbot C. (1999) "Influence of chloride solution concentration of salt scaling deterioration of concrete", *ACI Materials Journal*, 429-435.
- [83] Massazza F., Daimond M. (1992) "Chemistry of hydration of cements and cementitious systems", *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, New Dheli, India, 1, 382-448.
- [84] Metha P.K., Monterio P.J.M. (2006) "Concrete, Microstructure, Properties and Materials", McGraw-Hill, London.
- [85] Midgley H.G. Illston J.M. (1984) "The penetration of chlorides into hardened cement paste", *Cement Concrete Research*, 14, 546-558.
- [86] Naik T.R., Singh S.S. (1995) "Use of high-calcium fly ash in cement-based construction materials". 5th CANMET/ACI Int. Conf. on Fly Ash, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete. Milwaukee, Supplementary Papers, 1-44.
- [87] Naik T.R., Singh S.S., Hossain M.M. (1995) "Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash", *Construction and Building Materials*, 9 (4), 195-204.
- [88] Nassar R., Soroushian P., Ghebrab T. (2013) "Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete", *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 78-85.
- [89] Neville A. (2000) „Właściwości betonu”, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków.
- [90] Ostrowski M., Gawlicki M. (2013) „Aktywność pucolanowa i hydrauliczna wapiennych popiołów lotnych z Elektrowni Bełchatów stanowiących składnik główny cementów powszechnego użytku”, IX Konferencja i Zjazd Polskiego Towarzystwa Ceramicznego, Zakopane, 118-126.
- [91] Papadakis V.G. (2000) "Effect of fly ash on Portland cement systems. Part II. High-calcium fly ash", *Cement and Concrete Research*, 30, 1647-1654.
- [92] Papayianni I. (1988) "Scaling resistance of concrete with high calcium fly ash in marine environment", *Second CANMET/ACI International Conference on the Performance of Concrete in Marine Environment*, St. Andrews, Supplementary Papers, 137-155.
- [93] Pedersen K.H., Jensen A.D., Skjřth-Rasmussen M.S., Dam-Johansen K. (2008) "A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete", *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 135-154.
- [94] Pedersen K.H., Jensen A.D., Dam-Johansen K. (2010) „The effect of low-NO_x combustion on residual carbon in fly ash and its adsorption capacity for air entrainment admixtures in concrete”, *Combustion and Flame*, 157, 208-216.
- [95] Philleo R. (1987) "Frost susceptibility of high-strength concrete", *Katharine and Bryant Mather International Conference on the Concrete Durability*, Atlanta, ACI SP 100-46, 821-842.
- [96] Philleo, R.E. (1983) "A method for analyzing void distribution in air-entrained concrete", *Cement, Concrete Aggregates*, 5, 128-130.

- [97] Pigeon M., Pleau R., (1995) "Durability of Concrete in Cold Climates", E & FN Spon, London.
- [98] Pigeon M., Talbot C., Marchand J., Hornain H. (1996) "Surface microstructure and scaling resistance of concrete", *Cement and Concrete Research*, 26 (10), 1555-1566.
- [99] Pleau R., Pigeon M. (1996) "The use of the flow length concept to assess the efficiency of air entrained concrete with regards to frost durability: part I – description of the test method", *Cement, Concrete Aggregates*, 18, 19-29.
- [100] Powers T.C. (1949) "The air requirement of frost resistant concrete", *Proceedings Highway Research Board*, 29, 184-211.
- [101] Powers T.C. Helmuth R.A. (1953) "Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing", *Proceeding Highway Research Board*, 32, 285-297.
- [102] Powers T.C. (1954) "Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete", *Journal of the American Concrete Institute*, 50, 741-760.
- [103] Powers T.C. (1968) "The Properties of Fresh Concrete", John Wiley and Sons, New York.
- [104] RILEM TC 176-IDC (2004) "Internal damage of concrete due to frost action", *Materials and Structures*, 37, 340-359.
- [105] Rilem report 12 (1995) "Performance criteria for concrete durability, In: Kropp J, Hilsdorf H.K, editors.
- [106] Rixom R., Mailvaganam N. (1986) "Chemical admixtures for concrete", E&Spon, New York.
- [107] Rösli A., Harnik A.B. (1980) "Improving the durability of concrete to freezing and deicing salts", in: Sereda P.J., Litvan G.G. (Eds.), *Durability Building Materials and Components*. ASTM Special Technical Publication STP-691, ASTM, Philadelphia, 464-473.
- [108] Rusin Z. (2002) „Technologia betonów mrozoodpornych”, Polski Cement, Kraków.
- [109] Sellevold E.J., Farstad T. (1991) "Frost/salt testing of concrete: effect of test parameters and concrete moisture history", *Nordic Concrete Research*, 10, 121-138.
- [110] Scherer G.W., Valenza J.J. (2005) "Mechanisms of frost damage", in: Skalny J., Young F. (Eds.), *Materials Science of Concrete*, American Ceramic Society, vol.VII, 209-246.
- [111] Scherer G.W., Chen J., Valenza J. (2002) "Method of protecting concrete from freeze/damage", U.S. Patent 6 485 560.
- [112] Scherer G.W. (2004) "Characterization of saturated porous bodies", *Concrete Science and Engineering*, 37 (265), 21-30.
- [113] Scrivener K.L., Crumbie A.K., Pratt PL. (1988) "A study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete", In: Mindess S, Sha SP, editors. *Bonding in Cementitious Composites*. Materials Research Society, 87-95.
- [114] Sekulić Z., Popov S., Duricić M., Rosić A. (1999) "Mechanical activation of cement with addition of fly ash", *Materials Letters*, 39, 115-121.
- [115] Setzer M.J. (2001) "Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid", *Journal of Colloid and Interface Science*, 243, 193-201.
- [116] Shi X., Fay L., Peterson M.M., Berry M., Mooney M. (2011) "A FESEM/EDX Investigation into How Continuous Deicer Exposure Affects the Chemistry of Portland Cement Concrete", *Construction and Building Materials*, 25 (2), 957- 966.

- [117] Snyder K.A. (1998) "A numerical test of air void spacing equations", *Advanced Cement Based Materials*, 8, 28-44.
- [118] Sommer H. (1979) "The precision of the microscopical determination of the air-void system in hardened concrete", *Cement, Concrete Aggregates*, 1 (2), 49-55.
- [119] Stark J., Ludwig H.M. (1997) "Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast-furnace slag", Paper 4iv035, Proc. 10th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 4, SINTEF, Trondheim, Norway.
- [120] Stencil J.M., Song H., Ochsenbein M. (2007) "Automated Foam Index Testing of Coal Ashes", *World of Coal Ash (WOCA)*, USA, 1-5.
- [121] Sumision E.S., Guthrie W.S. (2013) "Physical and chemical effects of deicers on concrete pavement: Literature review", Report No. UT-13.09 prepared for Utah Department of Transportation.
- [122] Tang L. (1996) "Chloride transport in concrete – measurement and prediction", Publication P-96:6, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Göteborg.
- [123] Tasong W.A., Lynsdale C.J., Cripps J.C. (1999) "Aggregate-cement paste interface. Part I. Influence of aggregate geochemistry", *Cement and Concrete Research*, 29, 1019-1025.
- [124] Taylor H.F.W. (1990) "Cement Chemistry", Academic Press, London.
- [125] Tkaczewska E., Malolepszy J. (2009) "Effect of fineness of siliceous fly ashes on the hydration of blended cement", 17. ibausil – 17 International baustofftagung, 23-26 September, Weimar, Bundesrepublik Deutschland.
- [126] Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A. (2006) "High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives". *Cement and Concrete Composites*, 27, 231-237.
- [127] Wang K., Nelsen D.E., Nixon W.A. (2006) "Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials", *Cement and Concrete Composites*, 28 (2), 173-188.
- [128] Wang S., Llamazos E., Baxter L., Fonseca F. (2008) "Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests", *Fuel*, 87, 359-364.
- [129] Washburn E.W., (1921) „Note on a method determining the distribution of pore sizes in a porous material”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 7, 115.
- [130] Weissenberger J., Dieckmann G., Gradinger R., Spindler M. (1992) "Sea ice: a cast technique to examine and analyze brine pockets and channel structure", *Limnol. Oceanogr.*, 37 (1), 179-183.
- [131] Whiting D., Schmitt J. (1989) "A model for deicer scaling resistance of field concretes containing high-range water reducers", in: "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", Malhotra V.M. (Ed.), American Concrete Institute, Detroit, ACI Special Publication SP-119, 343-359.
- [132] Wiens U. Schiessl P. (1997) "Chloride binding of cement paste containing fly ash", 10th International Congress of Cement Chemistry, t.IV, referat HIV016, Göteborg.
- [133] Winnefeld F., Leemann A., Lucuk M., Svoboda P., Neuroth M. (2010) "Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials", *Construction and Building Materials*, 24, 1086-1093.

- [134] Wong H.S., Pappas A.M., Zimmerman R.W., Buenfeld N.R. (2011) "Effect of entrained air voids on the microstructure and mass transport properties of concrete", *Cement and Concrete Research*, 41, 1067-1077.
- [135] Wong H.S., Zobel M., Buenfeld N.R., Zimmerman R.W. (2009) "Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying", *Magazine Concrete Research*, 8, 571-589.
- [136] Valenza J.J., Scherer G.W. (2006) "Mechanism for salt scaling", *Journal of American Ceramic Society*, 89 (4), 1161-1179.
- [137] Verbeck G.J., Klieger P. (1957) "Studies of salt scaling of concrete", *Highway Research Board Bulletin*, 150, 1-17.
- [138] Valenza J.J., Scherer G.W. (2007) "A review of salt scaling: I. Phenomenology", *Cement and Concrete Research*, 37, 1007-1021,
- [139] Valenza J.J., Scherer G.W. (2007) "A review of salt scaling: II. Mechanisms", *Cement and Concrete Research*, 37, 1022-1034.
- [140] Vichit-Vadakan W., Scherer G.W. (2000) "Measuring permeability of rigid materials by the beam-bending method: II. Porous Vycor", *Journal of American Ceramic Society*, 83 (9), 2240-2245.
- [141] Yang C.C. (2006) "On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials", *Cement and Concrete Research*, 36, 1304-1311.
- [142] Yazici H. (2008) "The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 22, 456-462.
- [143] Yu Z., Ye G. (2013) "The pore structure of cement paste blended with fly ash", *Construction and Building Materials*, 45, 30-35.
- [144] Załocha D. (2004) „Identyfikacja struktury betonu metodą komputerowej analizy obrazów”, *Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa.*
- [145] Zhang L., Glasser F.P. (2000) "Critical examination of drying damage to cement pastes", *Advances in Cement Research*, 12 (2), 79-88.
- [146] Zhang Y., Nelson S. Jr. (2007) „Development of a New Method to Replace the Foam Index Test”, *World of Coal Ash (WOCA), USA*, 45-53.

Normy i zalecenia techniczne

- [N1] ASTM C 457 (2012) "Standard test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete".
- [N2] ASTM C618 (2015) „Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”.
- [N3] ASTM C-1202 (2012) "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration".
- [N4] CEB Durable Concrete Structure, CEB Design Guide, Comite Euro-International du Beton, Bulletin No. 182, Lausanne, June 1989.
- [N5] CEN/TR 15177 (2006) "Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage".

- [N6] CUAP Common Understanding of Assessment Procedure Fly Ash for Concrete, ETA request No 03.01/34, Updated by BMC Certificate, Final Version June 2008, Netherlands.
- [N7] ITB 357/98 (1998) "Badanie składu fazowego betonu".
- [N8] NT BUILD 492 (1999) "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments".
- [N9] ÖNorm B 3303 (2002) "Testing of concrete".
- [N10] PKN-CEN/TS 12390-9 (2007) "Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance. Scaling".
- [N11] PN-88/B- 6250 (1988) „Beton zwykły”.
- [N12] PN-EN 12350-2 (2011) „Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”.
- [N13] PN-EN 12350-6 (2011) „Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość”.
- [N14] PN-EN 12350-7 (2011) „Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza – metody ciśnieniowe”.
- [N15] PN-EN 12390-3 (2011) „Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań”.
- [N16] PN-EN 196-1 (2006) „Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości”.
- [N17] PN-EN 196-2 (2013) „Metody badania cementu. Część 2: Analiza chemiczna cementu”.
- [N18] PN-EN 196-6 (2011) „Metody badania cementu. Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia”.
- [N19] PN-EN 196-21 (1997) „Metody badania cementu. Oznaczanie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie”.
- [N20] PN-EN 197-1 (2012) „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”.
- [N21] PN-EN 450-1 (2012) „Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”.
- [N22] PN-EN 480-11 (2008) „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie”.
- [N23] PN-EN 451-1 (2004) „Metoda badania popiołu lotnego. Część 1: Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia”.
- [N24] PN-EN 451-2 (1998) „Metoda badania popiołu lotnego. Oznaczanie miałkości przez przesiewanie na mokro”.
- [N25] PN-EN 206 (2014) „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.
- [N26] SS 137244 (2005) "Concrete testing. Hardened concrete. Frost resistance".
- [N27] PN-EN 12390-2 (2011) „Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”.

Streszczenie

Rozprawa dotyczy betonów narażonych na działanie mrozu, wykonanych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych (*PLW*). Celem rozprawy było rozpoznanie wpływu *PLW* pochodzących z jednego źródła na technologię wykonania, zmiany mikrostruktury i trwałość kompozytów narażonych na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie, zwłaszcza w obecności soli odladzających. Główne tezy pracy dotyczą możliwości zastosowania przetworzonych *PLW* w materiałach do konstrukcji inżynierskich w warunkach klimatu Polski, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska powierzchniowego łuszczenia związanego z oddziaływaniem soli odladzających.

Podsumowano stan wiedzy dotyczący problematyki oddziaływania cyklicznego zamrażania i rozmrażania na procesy niszczenia betonów oraz omówiono podstawy projektowania betonów mrozoodpornych. Na podstawie literatury przedstawiono wpływ dodatku *PLW* na właściwości mechaniczne, mikrostrukturę i trwałość kompozytów cementowych w środowisku cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Stwierdzono istotny wpływ zmienności właściwości *PLW* na analizowane właściwości betonu oraz istotne braki w charakterystyce mikrostrukturalnej napowietrzonych betonów z *PLW*.

Aby wykazać słuszność postawionych tez przeprowadzono badania laboratoryjne, wykorzystując wyselekcjonowane materiały oraz metody badawcze. Badania obejmowały szczegółową charakterystykę właściwości fizyko-chemicznych nieprzetworzonych *PLW* oraz *PLW* po aktywacji. Przedstawiono analizę wpływu zmienności właściwości nieprzetworzonych *PLW*, zawartości dodatku, rodzaju stosowanego cementu, warunków pielęgnacji oraz napowietrzenia na powstającą mikrostrukturę i mrozoodporność betonów, a także inne właściwości fizyczne i mechaniczne. W kolejnym rozdziale przedstawiono analizę wpływu trzech sposobów aktywacji *PLW* na mikrostrukturę i powyższe właściwości betonu. Zbadane właściwości betonów zostały przedyskutowane w odniesieniu do odporności na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności roztworu *NaCl*.

Wyniki badań potwierdziły słuszność tez rozprawy, co przedstawiono we wnioskach. Stwierdzono, że zastosowanie aktywowanych przez mielenie *PLW* w betonie zwiększa stosunek udziału mikroporów do całkowitej zawartości powietrza. Ponadto, wykazano, że aktywacja *PLW* przez separację ziarnową zmniejsza niestabilność napowietrzenia mieszanki betonowej. Zastosowanie aktywacji przez współmielenie *PLW* z klinkierem portlandzkim i innymi dodatkami mineralnymi przy wytwarzaniu cementów wieloskładnikowych pozwoliło uzyskać odporność na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie w obecności środków odladzających zbliżoną do odporności betonów bez dodatków mineralnych. Wyznaczono maksymalny wskaźnik rozmieszczenia porów (\bar{L}) w betonach z dodatkiem *PLW*, niezbędny do uzyskania „dobrej” i „bardzo dobrej” kategorii odporności na powierzchniowe łuszczenie.

Summary

The study of freeze-thaw resistance of concrete with additives of calcareous fly ash (*CFA*) is presented. Investigation of the influence of *CFA* coming from a single source on production technology, microstructure and durability of composites exposed to cyclic freezing and thawing, especially in the presence of de-icing salts, is the aim of the dissertation. The main theses concern the possibility of using processed *CFA* for construction materials in the condition of Polish climate with particular emphasis on the surface scaling associated with the influence of de-icing salts.

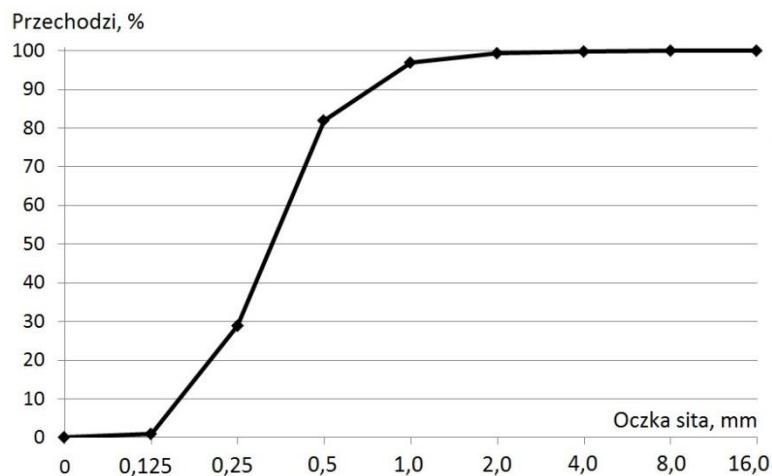
The state of knowledge concerning issue of temperature cycles influence on properties of concrete was reviewed. The effect of *CFA* additive on mechanical properties, microstructure and durability connected with freezing and thawing environmental conditions of concrete was presented. A significant influence of *CFA* properties variability on analyzed concrete was observed. The lack of systematic research on microstructure and durability of air-entrained concrete determine the need to develop of this issue.

The study of physicochemical properties of unprocessed and processed *CFA* was conducted. The analysis of variability of unprocessed *CFA*, content of additive, type of cement, curing condition and air-entraining on the microstructure and freeze-thaw resistance of concrete, and other physical and mechanical properties was carried out. At the next step processed *CFA* was used to determine material properties and microstructural changes resulting from processing type. The results and obtained relationships were discussed in relation to freeze-thaw resistance, and also in the context of presence of *NaCl* solution.

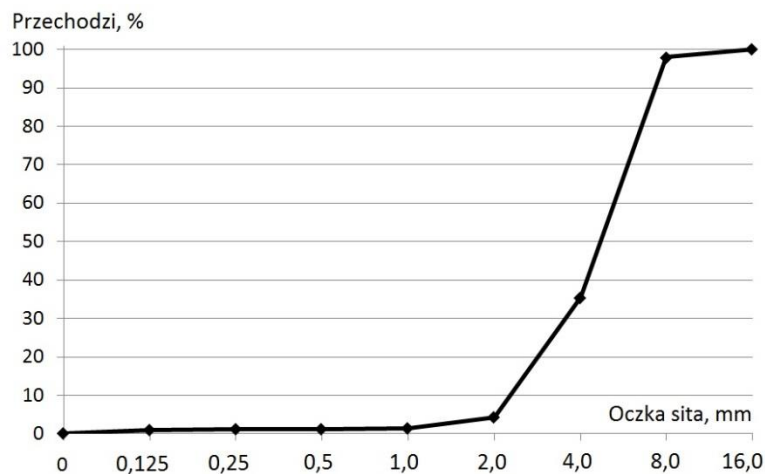
The laboratory tests confirmed theses of dissertation, which was describe in the conclusions. The influence of processing of *CFA* by grinding on the microstructure of air-entrained concrete was found. Use of ground *CFA* addition caused a relative increase of volume of micropores in respect to total pore volume. Processing *CFA* by grain separation showed a decrease of instability of entrained air during mixing and compaction of concrete. Grinding of *CFA* with Portland clinker and other cementitious additives to create blended cement allowed to obtain the surface scaling resistance similar to concrete without additives. The spacing factor (\bar{L}) in concrete containing *CFA* necessary to obtain “good” and “very good” surface scaling resistance was determined.

Załączniki

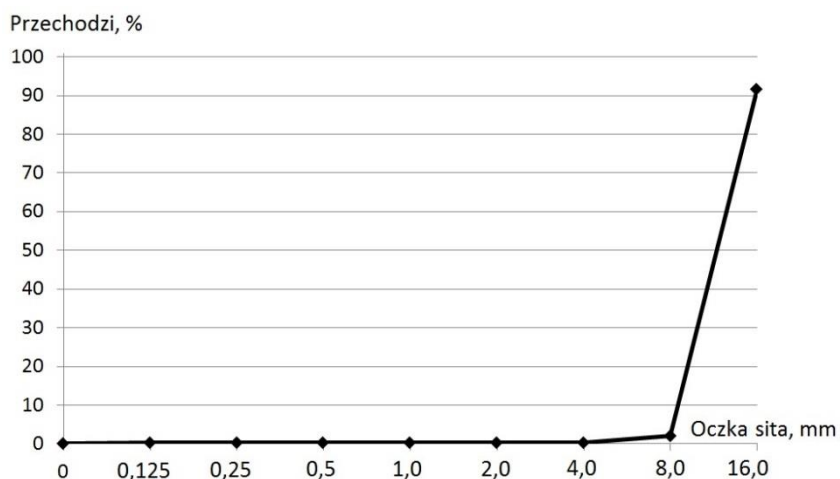
Załącznik I. Krzywe uziarnienia kruszyw



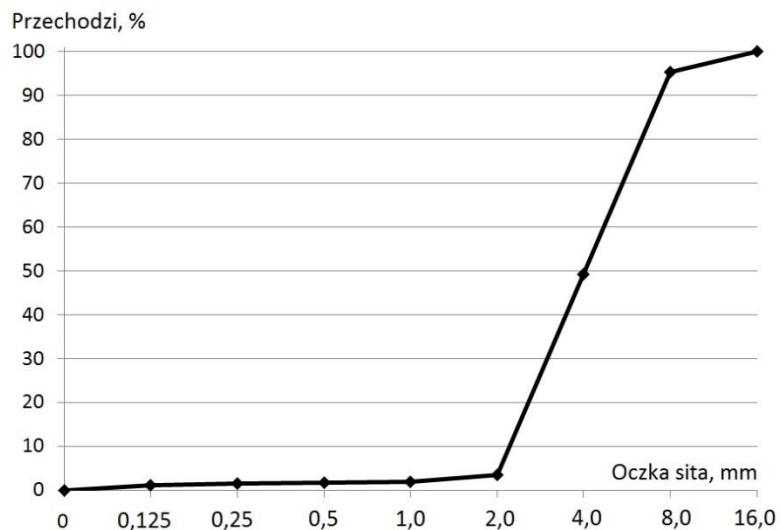
Rys. 1. Krzywa przesiewu piasku naturalnego frakcji 0-2 mm



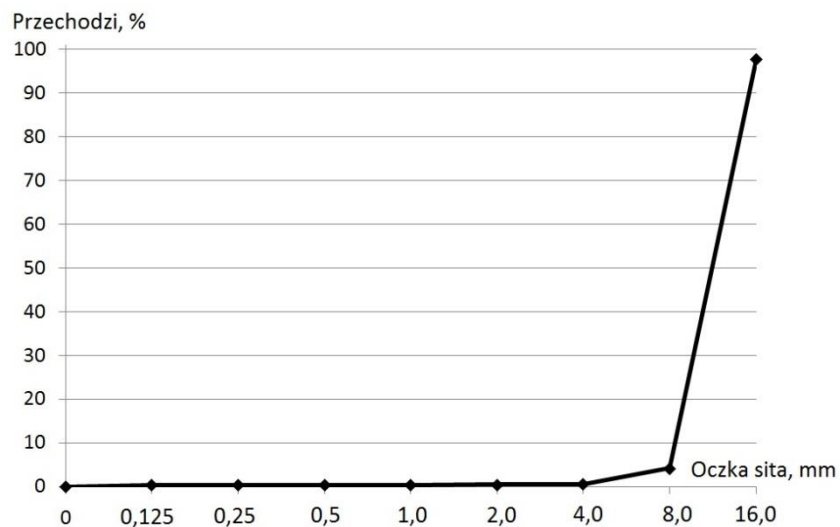
Rys. 2. Krzywa przesiewu gysu amfibolitowego frakcji 2-8 mm



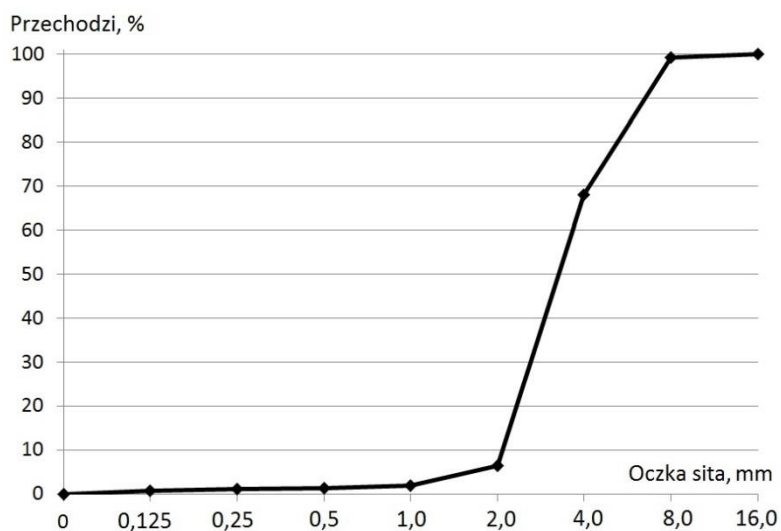
Rys. 3. Krzywa przesiewu gysu amfibolitowego frakcji 8-16 mm



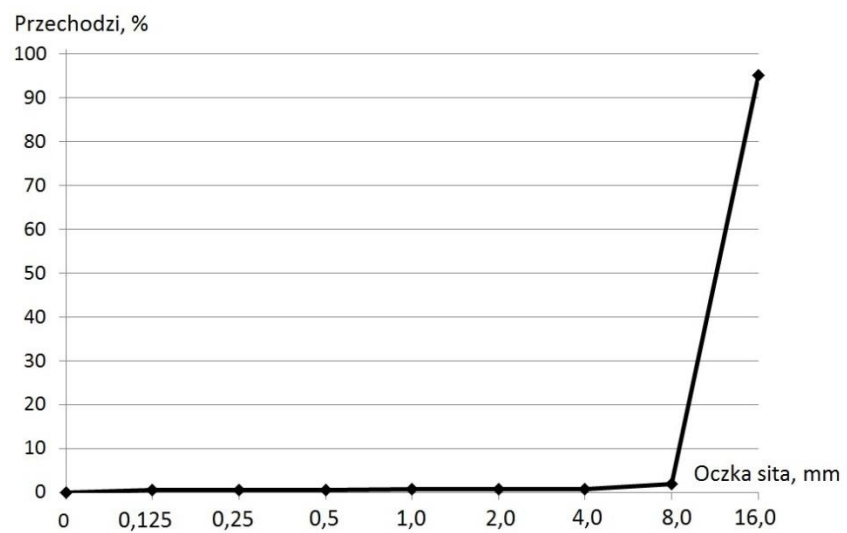
Rys. 4. Krzywa przesiewu gysu granodiorytowego frakcji 2-8 mm



Rys. 5. Krzywa przesiewu gysu granodiorytowego frakcji 8-16 mm



Rys. 6. Krzywa przesiewu gysu wapiennego frakcji 2-8 mm

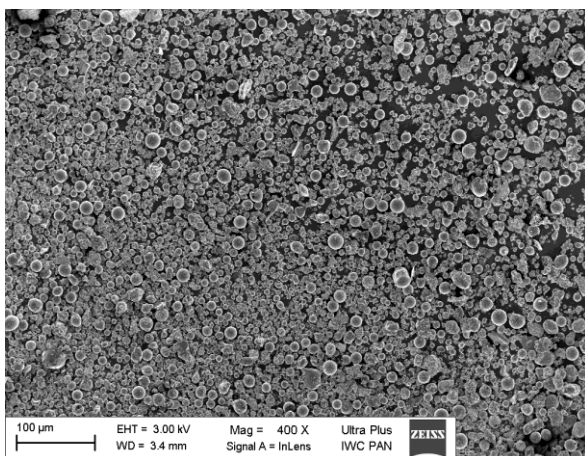


Rys. 7. Krzywa przesiewu gysu wapiennego frakcji 8-16 mm

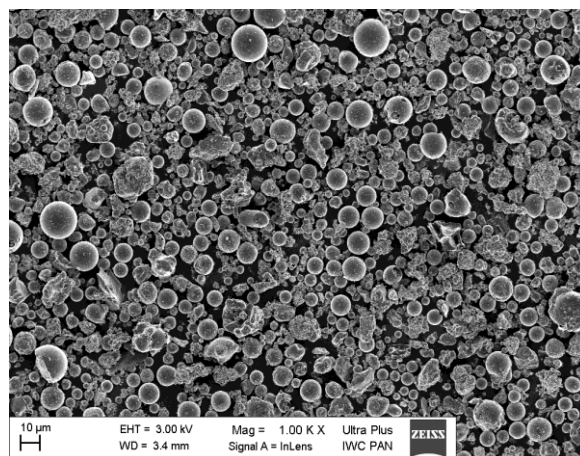
Załącznik II. Fotografie popiołu lotnego wapiennego w mikroskopie skaningowym

Plansza 1. Popiół P4, frakcja 0-20 μm , SEM, preparat proszkowy

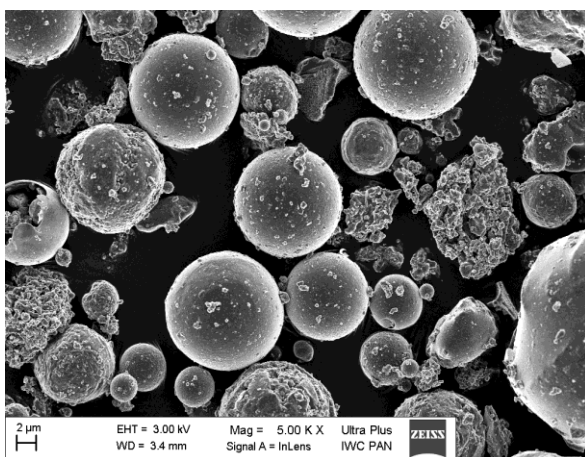
Wyróżniono dwa rodzaje ziaren pod względem ilościowym składników: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 1 do 18 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i długości od 5 do 20 μm , złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych od wielkości od 1 do 10 μm . Ziarna kuliste przeważają nad agregatami ziaren. Powierzchnie ziaren kulistych są przeważnie gładkie.



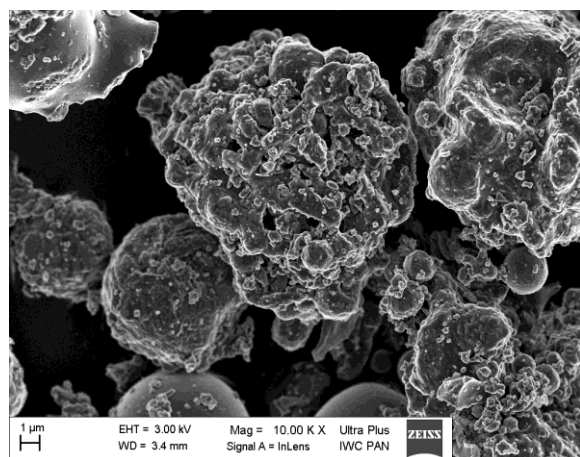
Rys. 1. Popiół P4 frakcji 0-20 μm
– powiększenie 400x



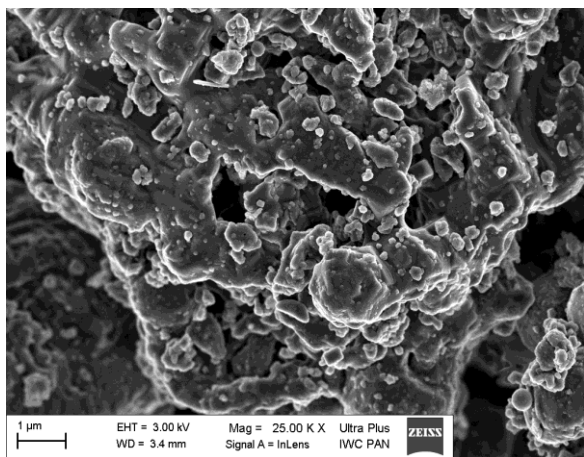
Rys. 2. Popiół P4 frakcji 0-20 μm
– powiększenie 1000x



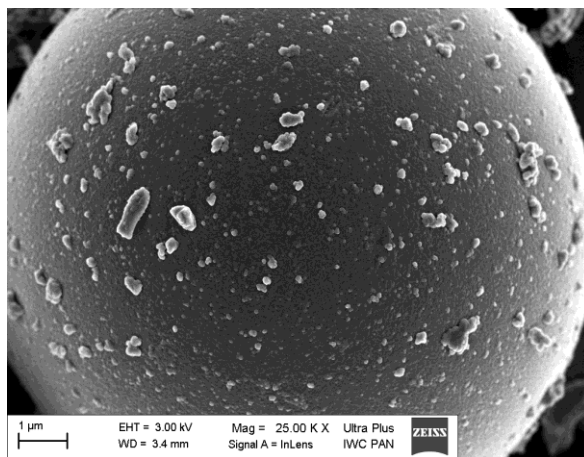
Rys. 3. Popiół P4 frakcji 0-20 μm , przewaga
ziaren kulistych – powiększenie 5000x



Rys. 4. Popiół P4 frakcji 0-20 μm
– powiększenie 10000x



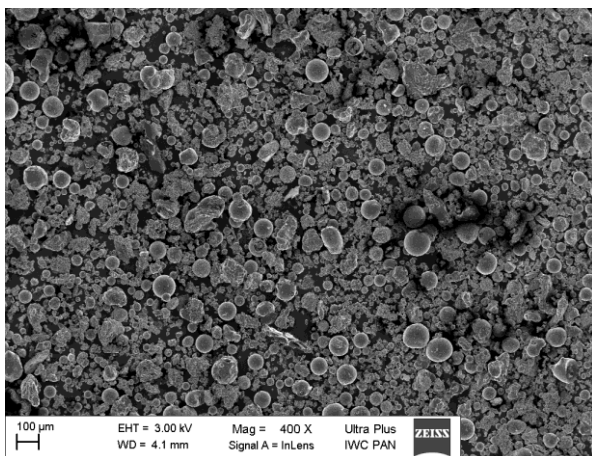
Rys. 5. Popiół P4 frakcji 0-20 μm,
powierzchnia agregatu – powiększenie
25000x



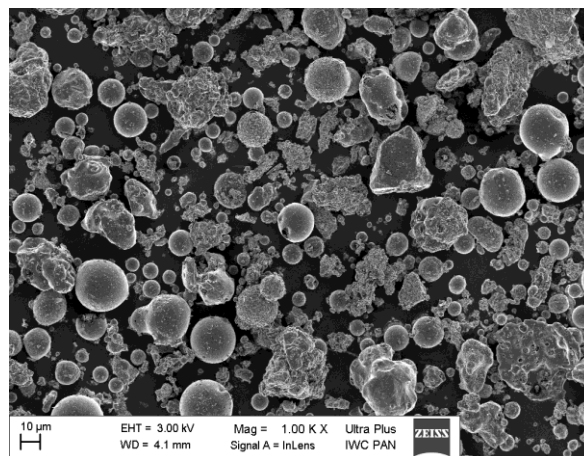
Rys. 6. Popiół P4 frakcji 0-20 μm,
powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie
25000x

Plansza 2. Popiół P4, frakcja 20-32 μm , SEM, preparat proszkowy

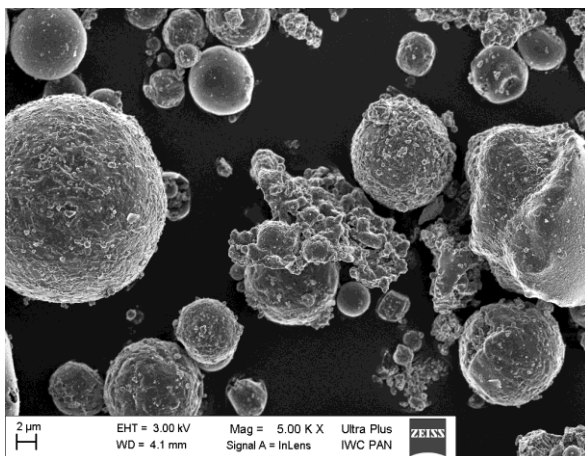
Wyróżniono dwa rodzaje dominujących pod względem ilościowym składników: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 0,5 do 30 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i wielkości od 0,5 do 40 μm , złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych o wielkości do 1 μm . Powierzchnie ziaren kulistych są gładkie lub zmienione powierzchniowo.



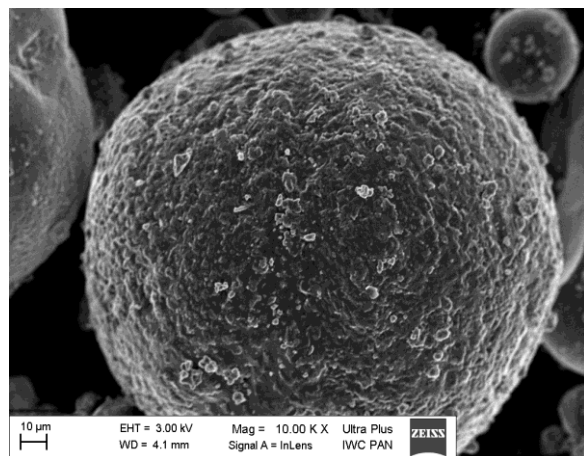
Rys. 1. Popiół P4 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 400x



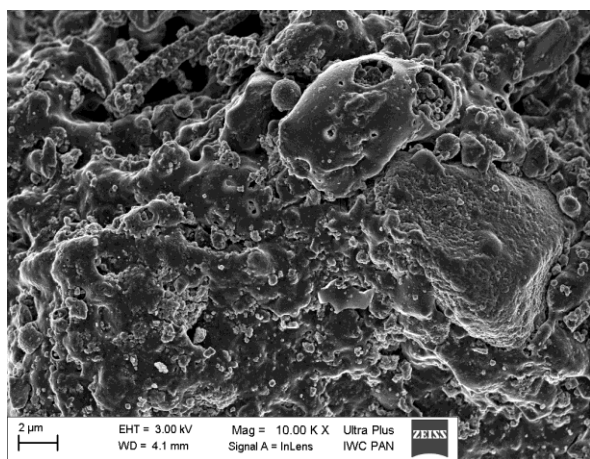
Rys. 2. Popiół P4 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 1000x



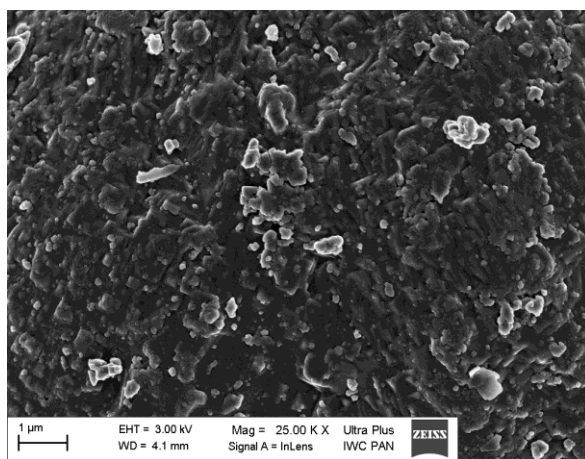
Rys. 3. Popiół P4 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 5000x



Rys. 4. Popiół P4 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 10000x



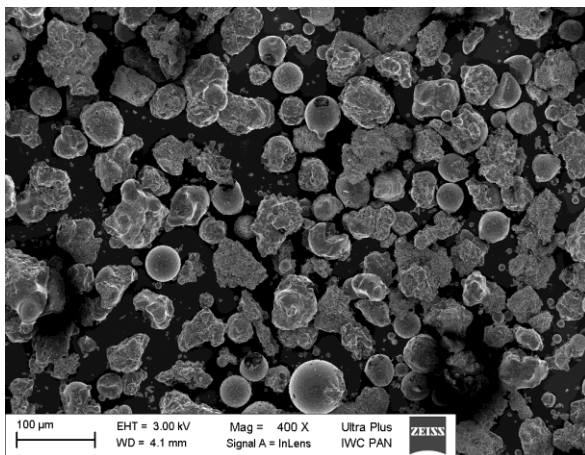
Rys. 5. Popiół P4 frakcji 20-32 μm,
powierzchnia agregatu – powiększenie
10000x



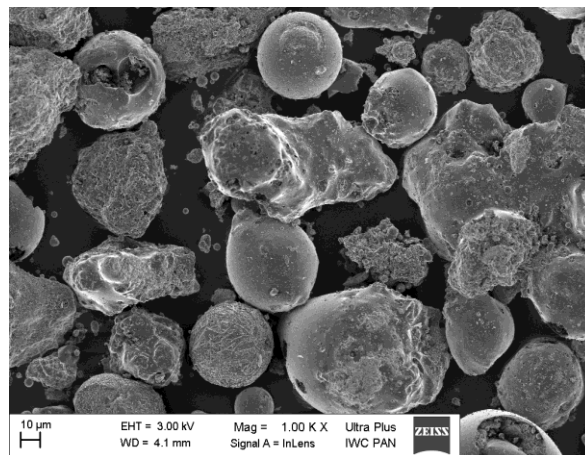
Rys. 6. Popiół P4 frakcji 20-32 μm,
powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie
25000x

Plansza 3. Popiół P4, frakcja 32–125 μm , SEM, preparat proszkowy

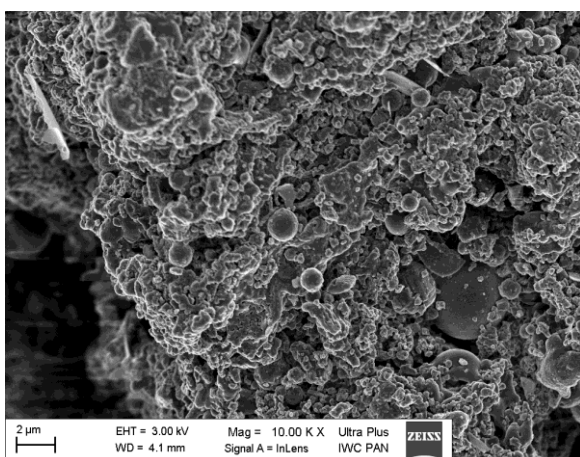
Wyróżniono dominujące składniki: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 30 do 60 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i wielkości znacząco większej niż ziarna kuliste, złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych o wielkości do 1 μm . Powierzchnie ziaren kulistych są przeważnie gładkie.



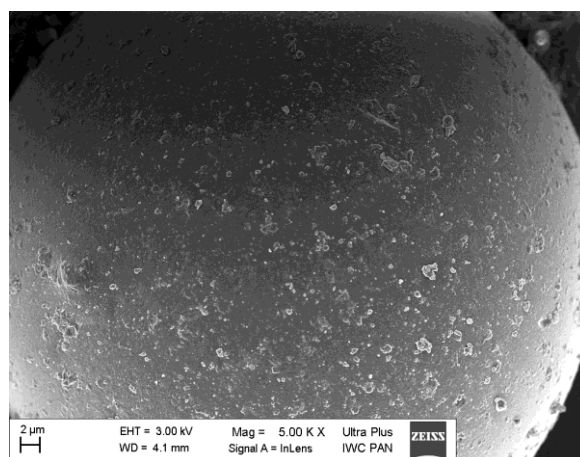
Rys. 1. Popiół P4 frakcji 32-125 μm
– powiększenie 400x



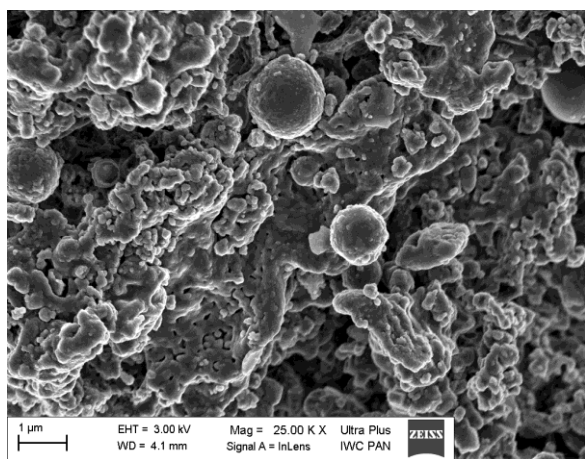
Rys. 2. Popiół P4 frakcji 32-125 μm
– powiększenie 1000x



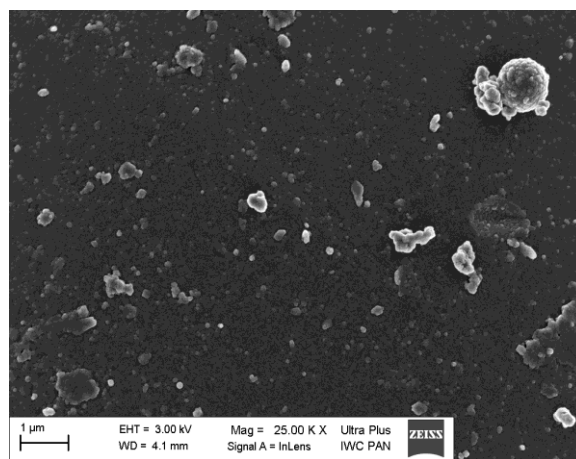
Rys. 3. Popiół P4 frakcji 32-125 μm ,
powierzchnia agregatu – powiększenie
10000x



Rys. 4. Popiół P4 frakcji 32-125 μm ,
powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie
5000x



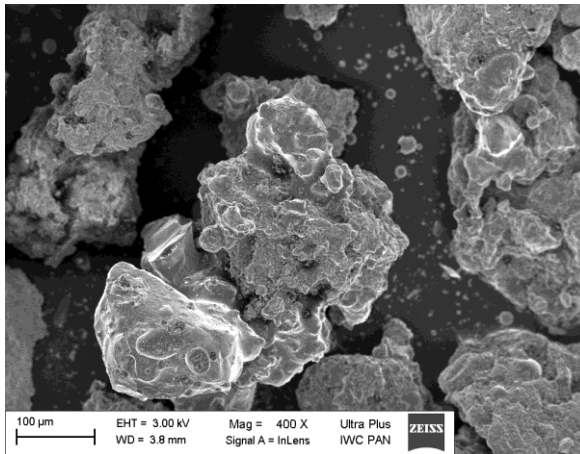
Rys. 5. Popiół P4 frakcji 32-125 μm, powierzchnia agregatu – powiększenie 25000x



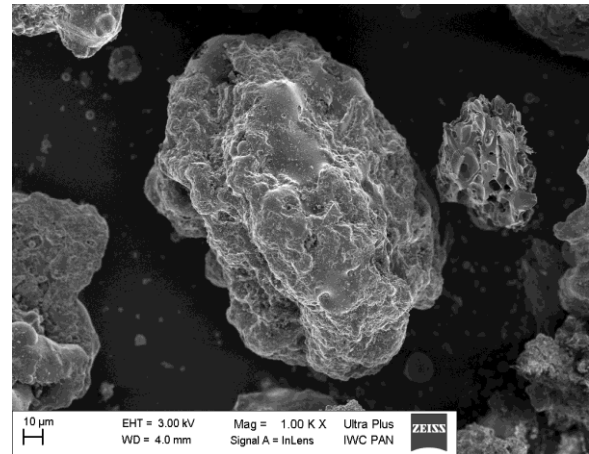
Rys. 6. Popiół P4 frakcji 32-125 μm, gładka powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie 25000x

Plansza 4. Popiół P4, frakcja >125 μm , SEM, preparat proszkowy

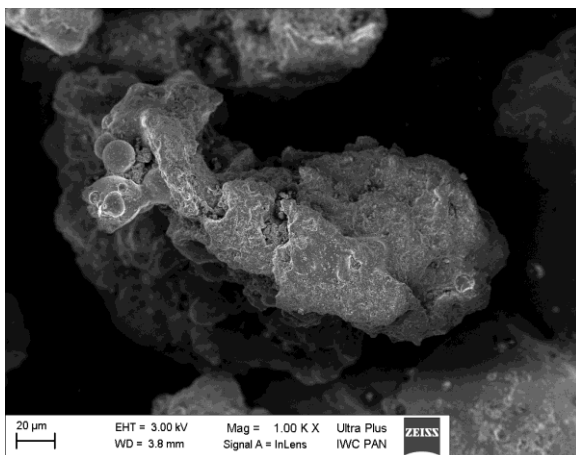
Wyróżniono liczne agregaty, złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym, bardzo drobnych ziaren i ziaren kulistych, o zróżnicowanej porowatości oraz większe okruchy niespalonego węgla ze stosunkowo dużymi porami, w których widoczne są liczne drobne ziarna oraz ziarna kuliste.



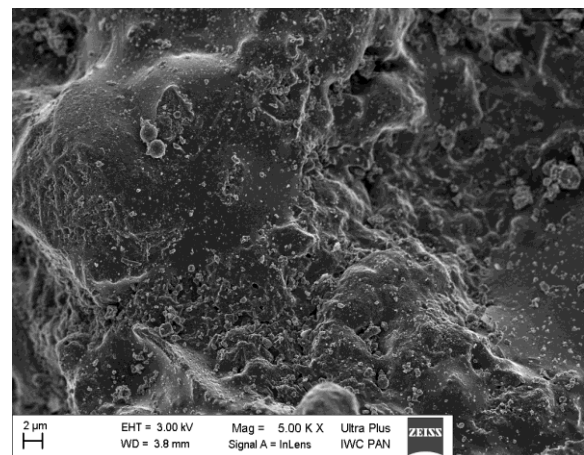
Rys. 1. Popiół P4 frakcji >125 μm , agregaty drobnych ziaren – powiększenie 400x



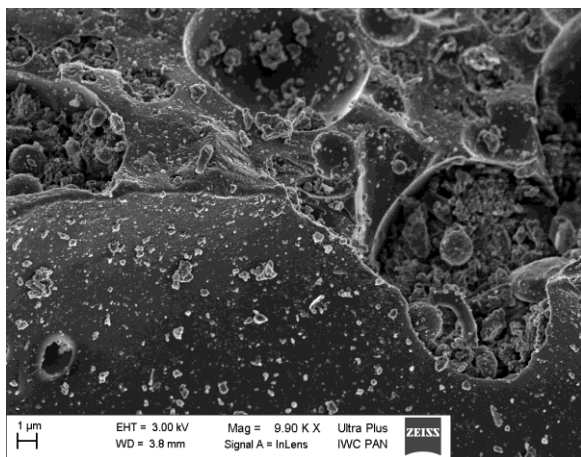
Rys. 2. Popiół P4 frakcji >125 μm , agregat i porowaty okruch nie spalonego węgla (mniejszy z prawej) – powiększenie 1000x



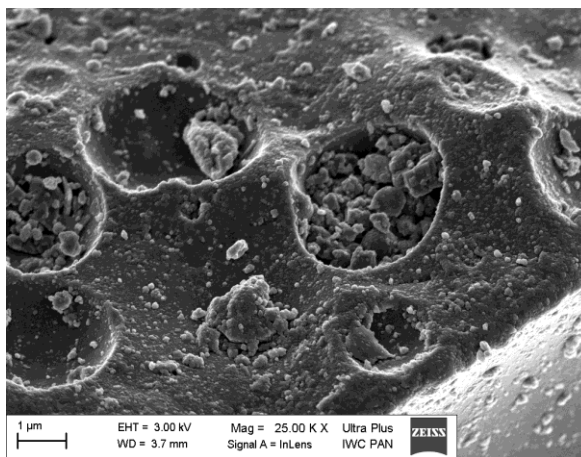
Rys. 3. Popiół P4 frakcji >125 μm , agregat z drobnymi cząstkami kulistymi – powiększenie 1000x



Rys. 4. Popiół P4 frakcji >125 μm , powierzchnia agregatu – powiększenie 5000x



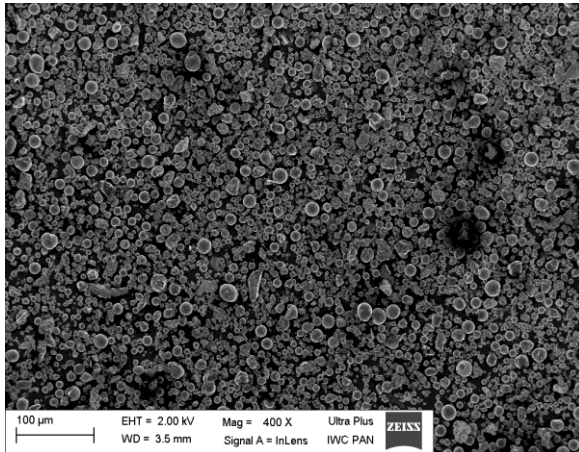
Rys. 5. Popiół P4 frakcji >125 μm, powierzchnia reliktu nie spalonego węgla z krystalizacją wewnątrz porów – powiększenie 9900x



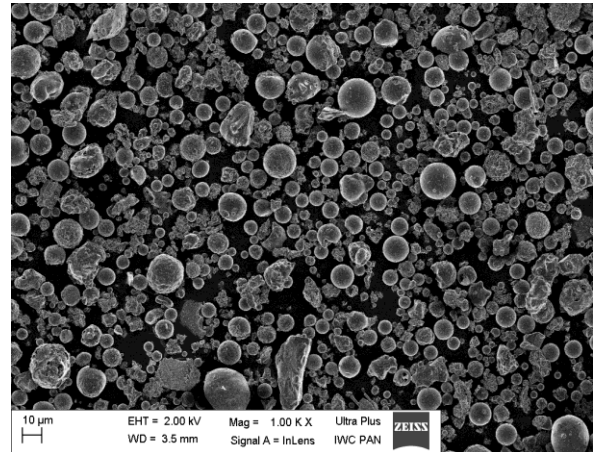
Rys. 6. Popiół P4 frakcji >125 μm, powierzchnia reliktu nie spalonego węgla z krystalizacją wewnątrz porów – powiększenie 25000x

Plansza 5. Popiół P5, frakcja 0-20 μm , SEM, preparat proszkowy

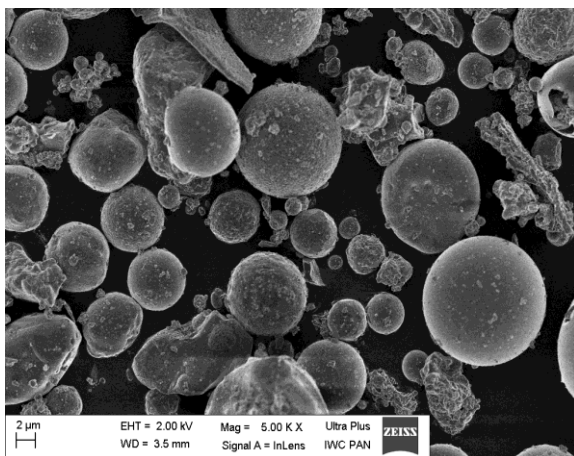
Wyróżniono dwa rodzaje składników: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 2,0 do 25 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i długości od 5 do 30 μm , złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych o wielkości od 1 do 10 μm . Ziarna kuliste ilościowo przeważają nad agregatami. Powierzchnie ziaren kulistych są przeważnie gładkie.



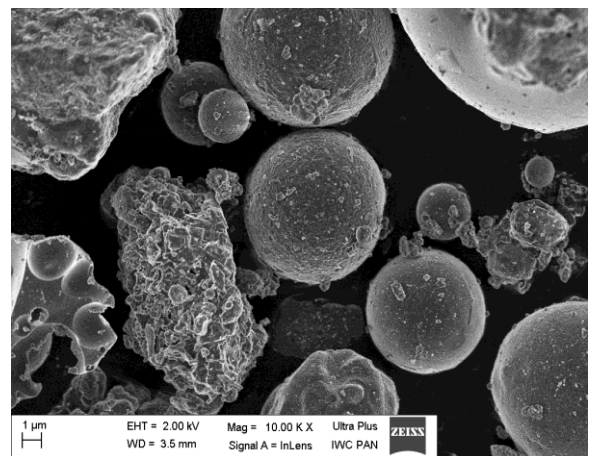
Rys. 1. Popiół P5 frakcji 0-20 μm
– powiększenie 400x



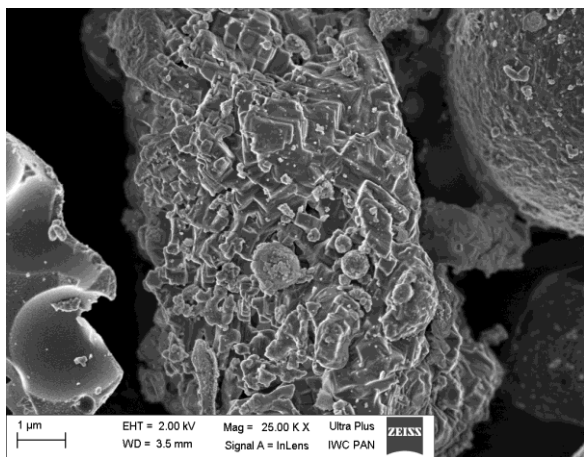
Rys. 2. Popiół P5 frakcji 0-20 μm
– powiększenie 1000x



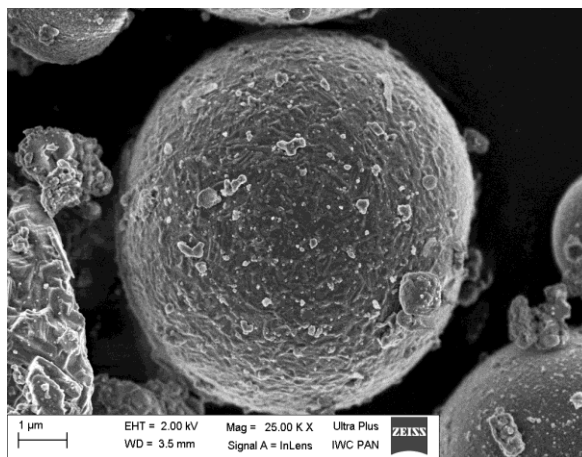
Rys. 3. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , przewaga
ziaren kulistych nad agregatami –
powiększenie 5000x



Rys. 4. Popiół P5 frakcji 0-20 μm , ziarna
kuliste i agregaty – powiększenie 10000x



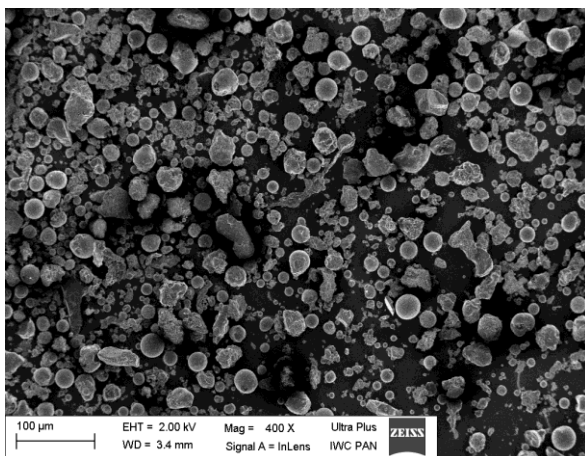
Rys. 5. Popiół P5 frakcji 0-20 μm,
powierzchnia agregatu – powiększenie
25000x



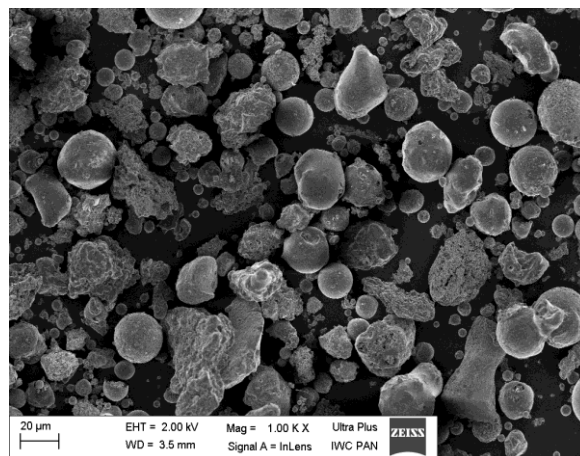
Rys. 6. Popiół P5 frakcji 0-20 μm,
powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie
25000x

Plansza 6. Popiół P5, frakcja 20–32 μm , SEM, preparat proszkowy

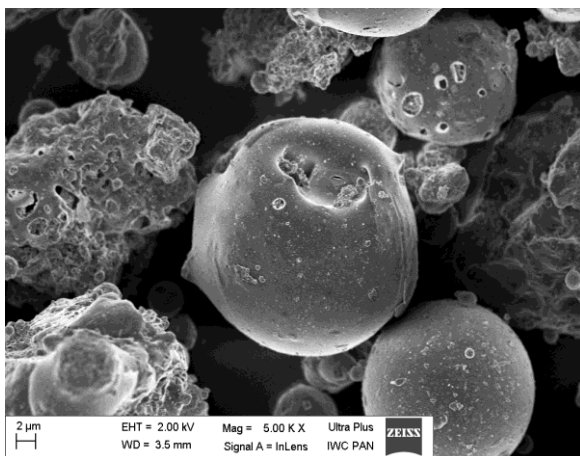
Wyróżniono dwa dominujące składniki: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 8 do 30 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i wielkości do 30 μm , złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych o wielkości do 1 μm . Powierzchnie ziaren kulistych są przeważnie gładkie, ale niektóre wykazują zmiany powierzchni w postaci zagłębień lub porów.



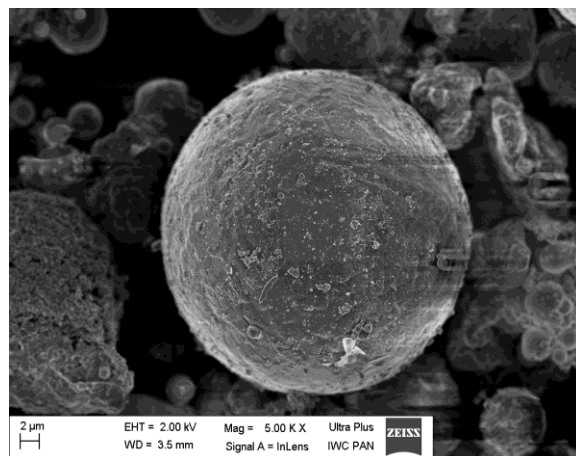
Rys. 1. Popiół P5 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 400x



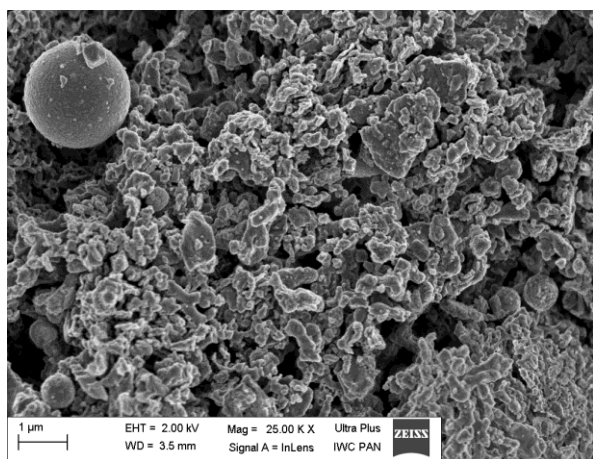
Rys. 2. Popiół P5 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 1000x



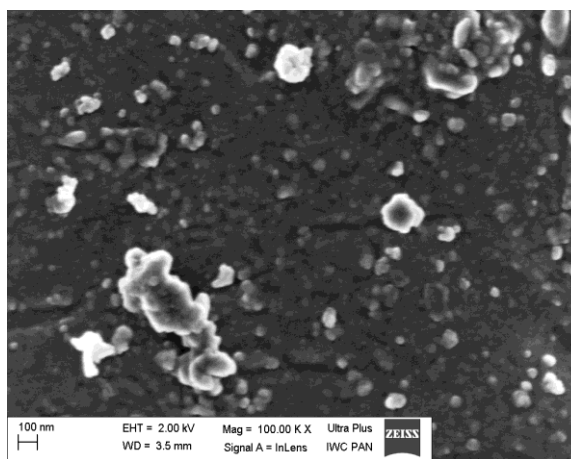
Rys. 3. Popiół P5 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 5000x



Rys. 4. Popiół P5 frakcji 20-32 μm
– powiększenie 5000x



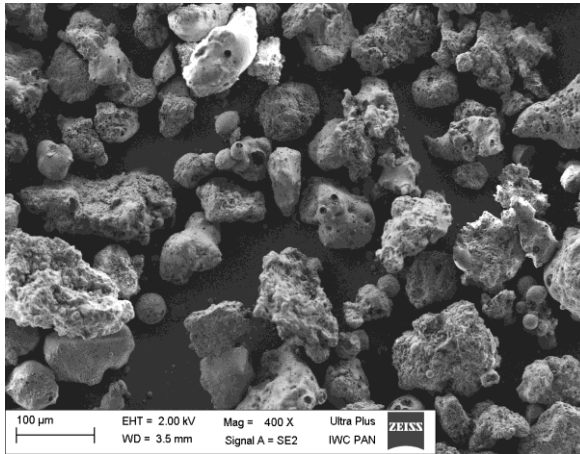
Rys. 5. Popiół P5 frakcji 20-32 μm,
powierzchnia agregatu – powiększenie
25000x



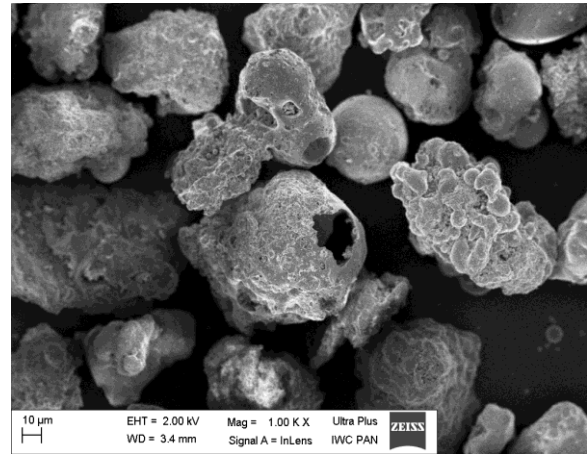
Rys. 6. Popiół P5 frakcji 20-32 μm,
powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie
100000x

Plansza 7. Popiół P5, frakcja 32–125 μm , SEM, preparat proszkowy

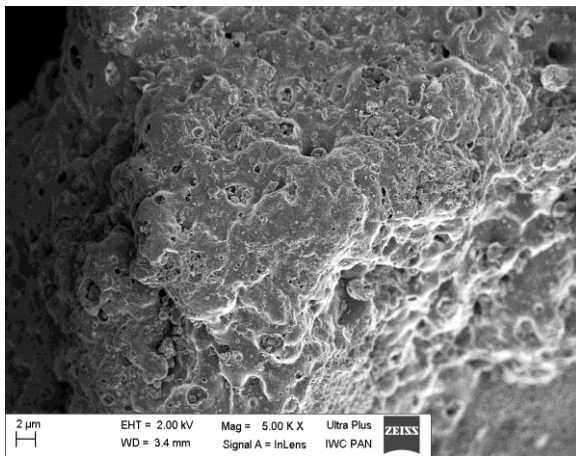
Wyróżniono dwa rodzaje składników: ziarna kuliste o średnicach w granicach od 30 do 60 μm i agregaty ziaren o nieregularnych kształtach i wielkości znacząco większej niż ziarna kuliste, złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym drobnych ziaren i ziaren kulistych o wielkości do 1 μm . Powierzchnie ziaren kulistych są przeważnie zmienione powierzchniowo, tylko nieliczne są stosunkowo gładkie.



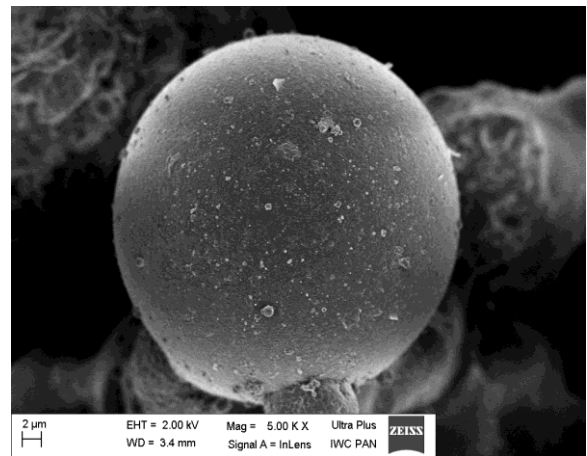
Rys. 1. Popiół P5 frakcji 32-125 μm
– powiększenie 400x



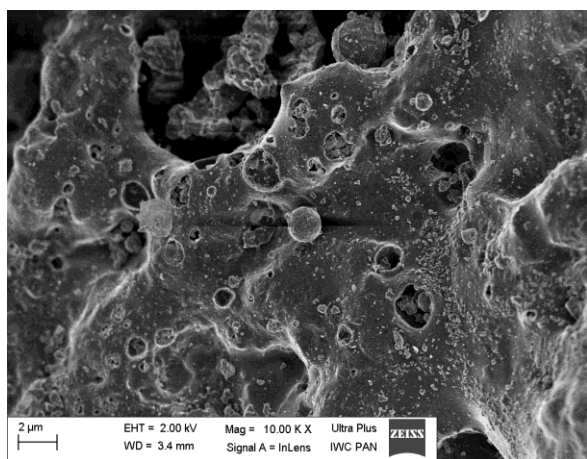
Rys. 2. Popiół P5 frakcji 32-125 μm
– powiększenie 1000x



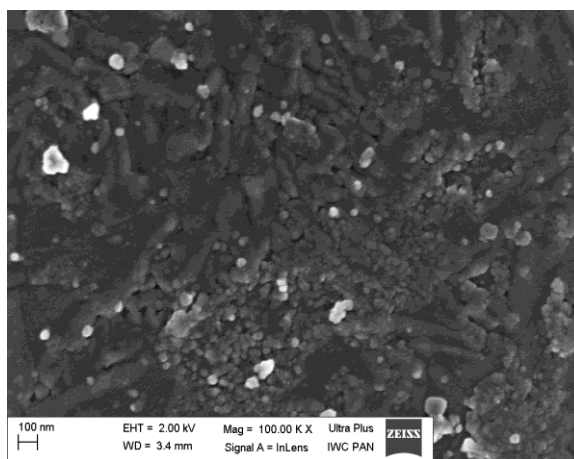
Rys. 3. Popiół P5 frakcji 32-125 μm ,
powierzchnia agregatu – powiększenie 5000x



Rys. 4. Popiół P5 frakcji 32-125 μm
– powiększenie 5000x



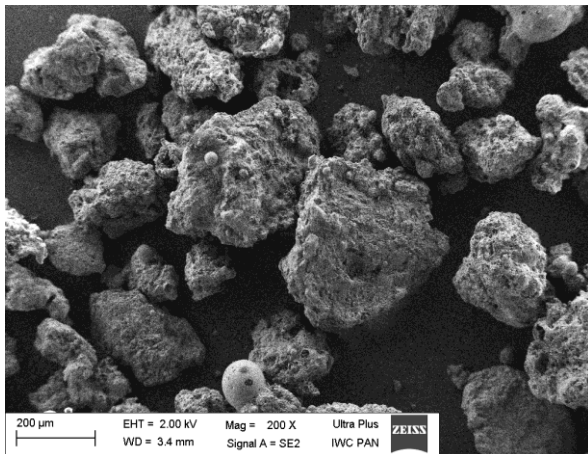
Rys. 5. Popiół P5 frakcji 32-125 μm, powierzchnia agregatu – powiększenie 10000x



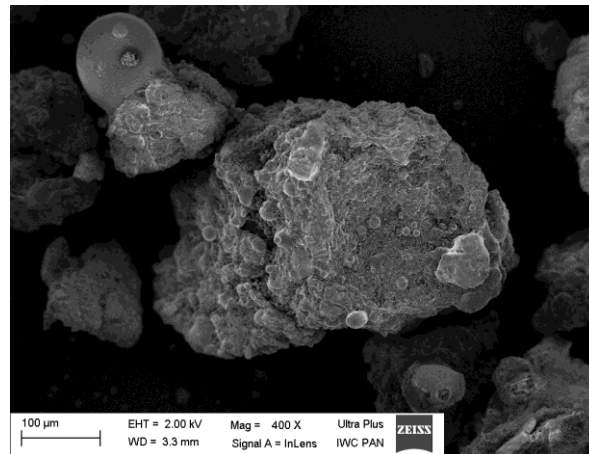
Rys. 6. Popiół P5 frakcji 32-125 μm, powierzchnia ziarna kulistej – powiększenie 100000x

Plansza 8. Popiół P5, frakcja $>125\ \mu\text{m}$, SEM, preparat proszkowy

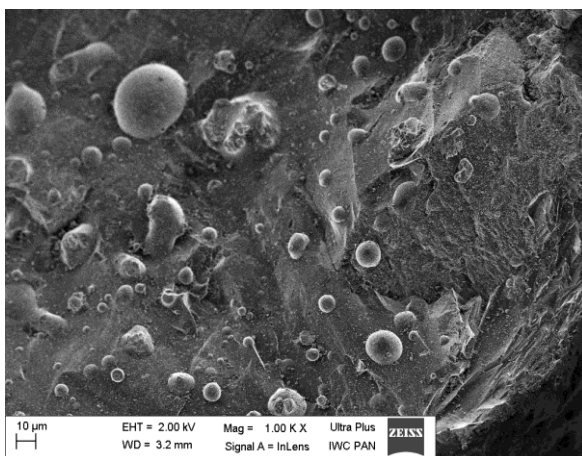
Wyróżniono liczne agregaty, złożone ze zróżnicowanych pod względem morfologicznym, bardzo drobnych ziaren i ziaren kulistych, o zróżnicowanej porowatości oraz większe okruchy niespalonego węgla ze stosunkowo dużymi porami, w których widoczne są liczne drobne ziarna oraz ziarna kuliste.



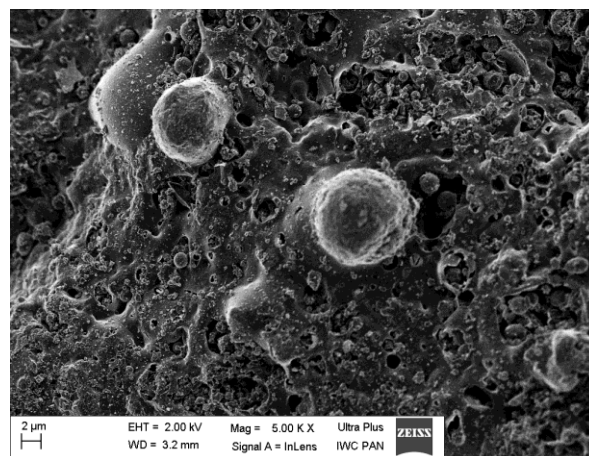
Rys. 1. Popiół P5 frakcji $>125\ \mu\text{m}$
– powiększenie 200x



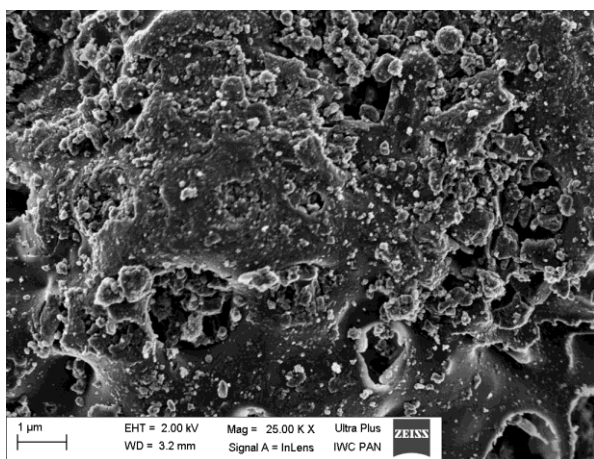
Rys. 2. Popiół P5 frakcji $>125\ \mu\text{m}$
– powiększenie 400x



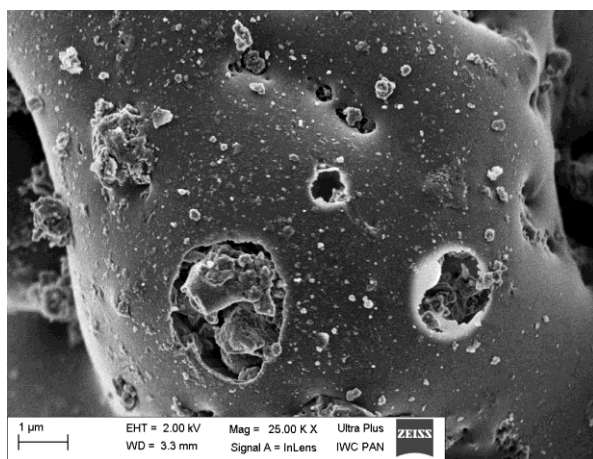
Rys. 3. Popiół P5 frakcji $>125\ \mu\text{m}$,
powierzchnia agregatu – powiększenie 1000x



Rys. 4. Popiół P5 frakcji $>125\ \mu\text{m}$
– powiększenie 5000x



Rys. 5. Popiół P5 frakcji $>125 \mu\text{m}$,
powierzchnia agregatu – powiększenie
25000x



Rys. 6. Popiół P5 frakcji $>125 \mu\text{m}$,
powierzchnia agregatu – powiększenie
25000x

Załącznik III. Wyniki badań granulometrii laserowej

Tablica 1. Wyniki granulometrii laserowej popiołów P1-P3 oraz cementów wieloskładnikowych

Rozmiar początkowy ziarna w klasie [μm]	Udział ziaren w klasie [%]				
	P1	P2	P3	CEM I	CEM II/B-W
0,275	0	0	0	0	0
0,316	0	0	0	0,01	0
0,363	0	0	0	0,11	0,03
0,417	0	0	0	0,15	0,09
0,479	0,01	0	0,05	0,19	0,13
0,55	0,02	0	0,08	0,23	0,15
0,631	0,02	0	0,09	0,26	0,18
0,724	0,02	0	0,09	0,28	0,2
0,832	0,02	0	0,08	0,3	0,22
0,955	0,01	0	0,05	0,32	0,23
1,096	0,01	0	0,01	0,35	0,25
1,259	0	0	0	0,39	0,27
1,445	0	0,01	0	0,45	0,31
1,66	0,09	0,09	0,05	0,52	0,35
1,905	0,16	0,16	0,11	0,62	0,4
2,188	0,25	0,24	0,17	0,75	0,48
2,512	0,36	0,33	0,23	0,9	0,57
2,884	0,48	0,43	0,31	1,08	0,68
3,311	0,6	0,54	0,38	1,29	0,81
3,802	0,73	0,65	0,45	1,51	0,97
4,365	0,87	0,78	0,53	1,77	1,16
5,012	1,02	0,92	0,62	2,04	1,37
5,754	1,19	1,08	0,72	2,33	1,61
6,607	1,38	1,26	0,83	2,64	1,88
7,586	1,59	1,46	0,97	2,96	2,19
8,71	1,82	1,69	1,12	3,28	2,51
10	2,07	1,95	1,29	3,6	2,85
11,482	2,33	2,22	1,48	3,89	3,2
13,183	2,6	2,53	1,68	4,14	3,54

15,136	2,88	2,84	1,9	4,35	3,87
17,378	3,15	3,18	2,14	4,5	4,17
19,953	3,4	3,52	2,39	4,59	4,44
22,909	3,64	3,87	2,65	4,63	4,65
26,303	3,84	4,21	2,93	4,62	4,81
30,2	4,02	4,54	3,23	4,57	4,9
34,674	4,18	4,84	3,55	4,48	4,91
39,811	4,3	5,09	3,89	4,35	4,85
45,709	4,39	5,28	4,23	4,18	4,71
52,481	4,46	5,38	4,58	3,97	4,49
60,256	4,49	5,37	4,89	3,7	4,2
69,183	4,47	5,25	5,15	3,38	3,87
79,433	4,41	5	5,33	3	3,49
91,201	4,28	4,64	5,4	2,57	3,1
104,713	4,08	4,18	5,33	2,12	2,71
120,226	3,81	3,66	5,13	1,67	2,33
138,038	3,47	3,09	4,8	1,24	1,98
158,489	3,08	2,53	4,36	0,86	1,66
181,97	2,65	2	3,82	0,53	1,35
208,93	2,23	1,54	3,23	0,23	1,08
239,883	1,81	1,15	2,63	0,06	0,82
275,423	1,43	0,84	2,07	0,02	0,56
316,228	1,1	0,61	1,57	0,01	0,32
363,078	0,84	0,44	1,16	0,01	0,07
416,869	0,63	0,29	0,83	0,01	0,03
478,63	0,47	0,2	0,59	0	0,03
549,541	0,33	0,1	0,38	0	0
630,957	0,22	0,03	0,22	0	0
724,436	0,13	0	0,11	0	0
831,764	0,08	0	0,07	0	0
954,993	0,03	0	0,04	0	0
1096,478	0,02	0	0,02	0	0
1258,925	0,02	0	0,01	0	0
1445,44	0	0	0	0	0

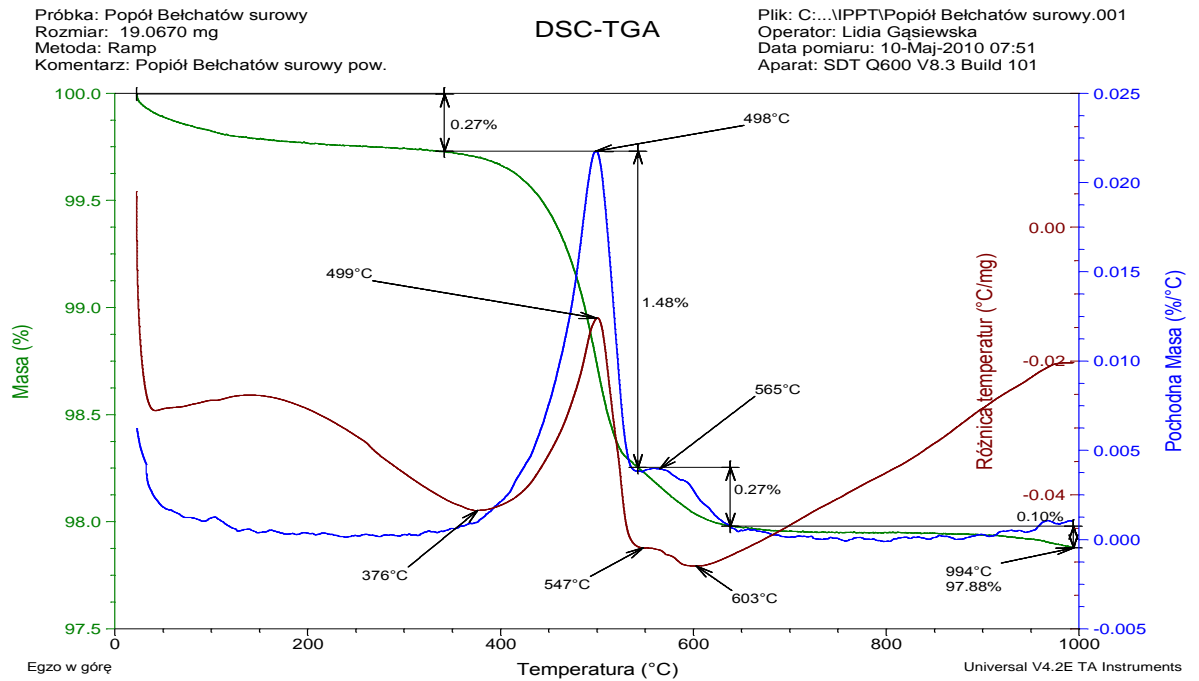
Tablica 2. Wyniki granulometrii laserowej przetwarzanych popiołów P4 i P5

Rozmiar początkowy ziarna w klasie [μm]	Udział ziaren w klasie [%]					
	P4	P4-M	P4-S	P5	P5-M	P5-S
0,275	0	0	0	0	0	0
0,316	0	0	0	0	0	0
0,363	0	0	0	0	0	0
0,417	0	0	0	0	0	0
0,479	0,02	0,12	0	0,04	0,11	0
0,55	0,03	0,18	0	0,07	0,17	0
0,631	0,04	0,23	0	0,08	0,22	0
0,724	0,04	0,23	0	0,08	0,23	0
0,832	0,03	0,22	0	0,07	0,22	0
0,955	0,02	0,18	0	0,04	0,21	0
1,096	0,01	0,15	0	0	0,19	0
1,259	0	0,14	0	0	0,2	0
1,445	0	0,16	0,01	0	0,25	0
1,66	0,07	0,24	0,08	0	0,35	0,07
1,905	0,13	0,35	0,14	0,09	0,49	0,11
2,188	0,2	0,5	0,22	0,15	0,66	0,17
2,512	0,28	0,66	0,32	0,21	0,85	0,24
2,884	0,37	0,83	0,44	0,28	1,04	0,32
3,311	0,46	1,01	0,56	0,34	1,23	0,41
3,802	0,56	1,2	0,7	0,41	1,42	0,51
4,365	0,67	1,4	0,86	0,49	1,61	0,62
5,012	0,79	1,6	1,04	0,58	1,8	0,75
5,754	0,93	1,82	1,25	0,69	2	0,91
6,607	1,08	2,05	1,49	0,81	2,21	1,09
7,586	1,26	2,29	1,74	0,95	2,45	1,29
8,71	1,45	2,55	2,02	1,11	2,7	1,51
10	1,66	2,83	2,32	1,29	2,99	1,76
11,482	1,89	3,12	2,62	1,49	3,3	2,01
13,183	2,12	3,43	2,94	1,7	3,66	2,27
15,136	2,36	3,75	3,26	1,92	4,04	2,54
17,378	2,6	4,1	3,59	2,15	4,45	2,83
19,953	2,83	4,44	3,93	2,37	4,85	3,13

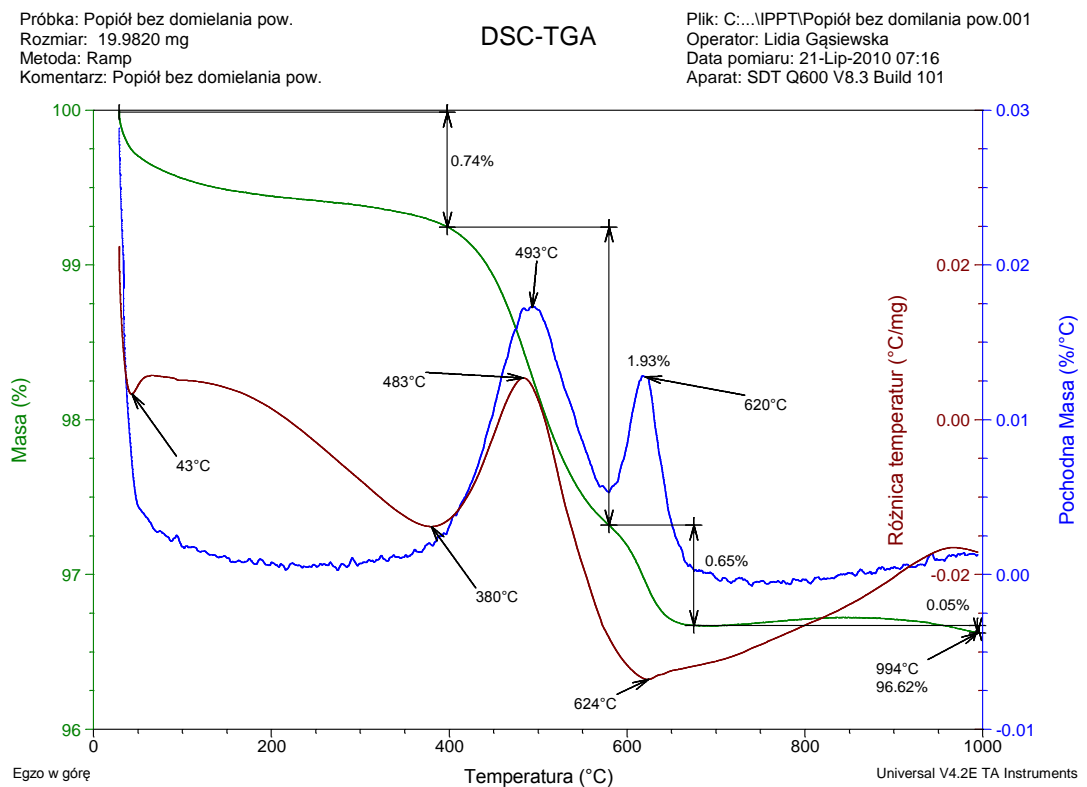
22,909	3,07	4,79	4,28	2,6	5,24	3,48
26,303	3,3	5,11	4,64	2,84	5,57	3,86
30,2	3,53	5,38	5,01	3,08	5,81	4,31
34,674	3,77	5,58	5,37	3,33	5,9	4,81
39,811	4,02	5,66	5,71	3,6	5,83	5,35
45,709	4,26	5,61	5,97	3,89	5,58	5,89
52,481	4,5	5,4	6,12	4,19	5,14	6,36
60,256	4,71	5,02	6,11	4,49	4,54	6,69
69,183	4,87	4,5	5,89	4,78	3,82	6,81
79,433	4,97	3,85	5,46	5,02	3,04	6,66
91,201	4,97	3,13	4,83	5,19	2,28	6,21
104,713	4,87	2,4	4,02	5,25	1,57	5,46
120,226	4,65	1,72	3,13	5,19	0,99	4,5
138,038	4,32	1,11	2,21	4,98	0,53	3,4
158,489	3,9	0,64	1,31	4,64	0,19	2,35
181,97	3,39	0,27	0,4	4,17	0,04	1,16
208,93	2,85	0,05	0	3,62	0	0,16
239,883	2,3	0	0	3,01	0	0
275,423	1,8	0	0	2,41	0	0
316,228	1,35	0	0	1,84	0	0
363,078	0,99	0	0	1,36	0	0
416,869	0,71	0	0	0,96	0	0
478,63	0,46	0	0	0,66	0	0
549,541	0,26	0	0	0,45	0	0
630,957	0,13	0	0	0,3	0	0
724,436	0,08	0	0	0,21	0	0
831,764	0,05	0	0	0,14	0	0
954,993	0,03	0	0	0,11	0	0
1096,478	0	0	0	0,1	0	0
1258,925	0	0	0	0,08	0	0
1445,44	0	0	0	0,06	0	0
1659,587	0	0	0	0,04	0	0
1905,461	0	0	0	0,01	0	0
2187,762	0	0	0	0	0	0

Załącznik IV. Termogramy

Plansza 1. Analiza termiczna popiołów P1-P3



Rys. 1. Termogram próbki popiołu lotnego P1

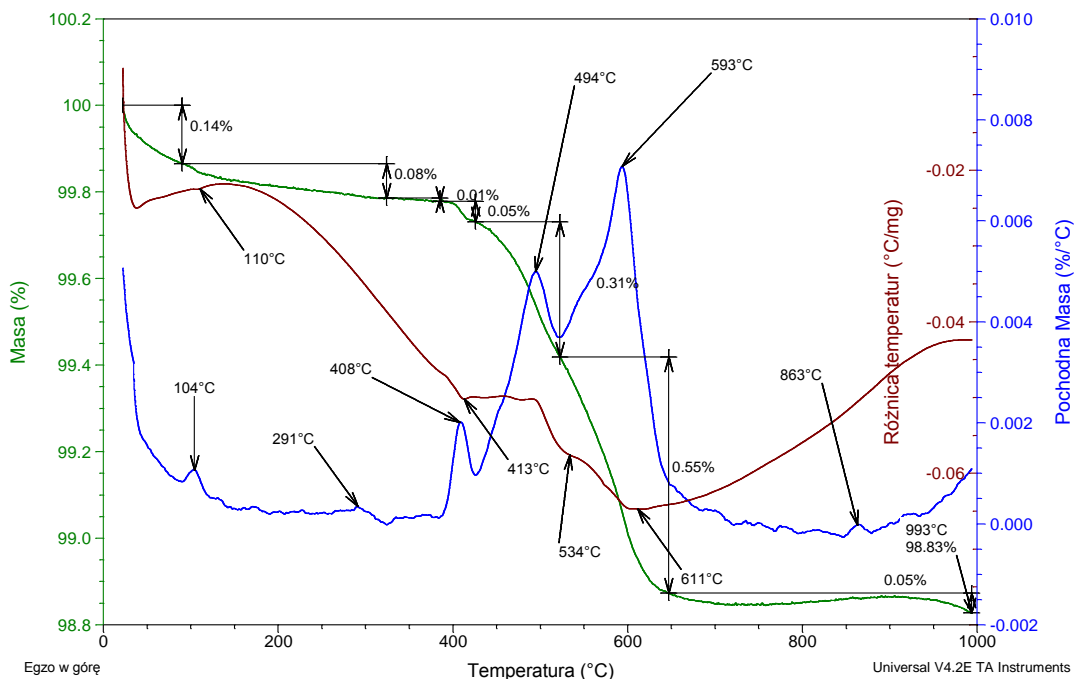


Rys. 2. Termogram próbki popiołu lotnego P2

Próbka: B III pow.
 Rozmiar: 18.9630 mg
 Metoda: Ramp
 Komentarz: B III pow.

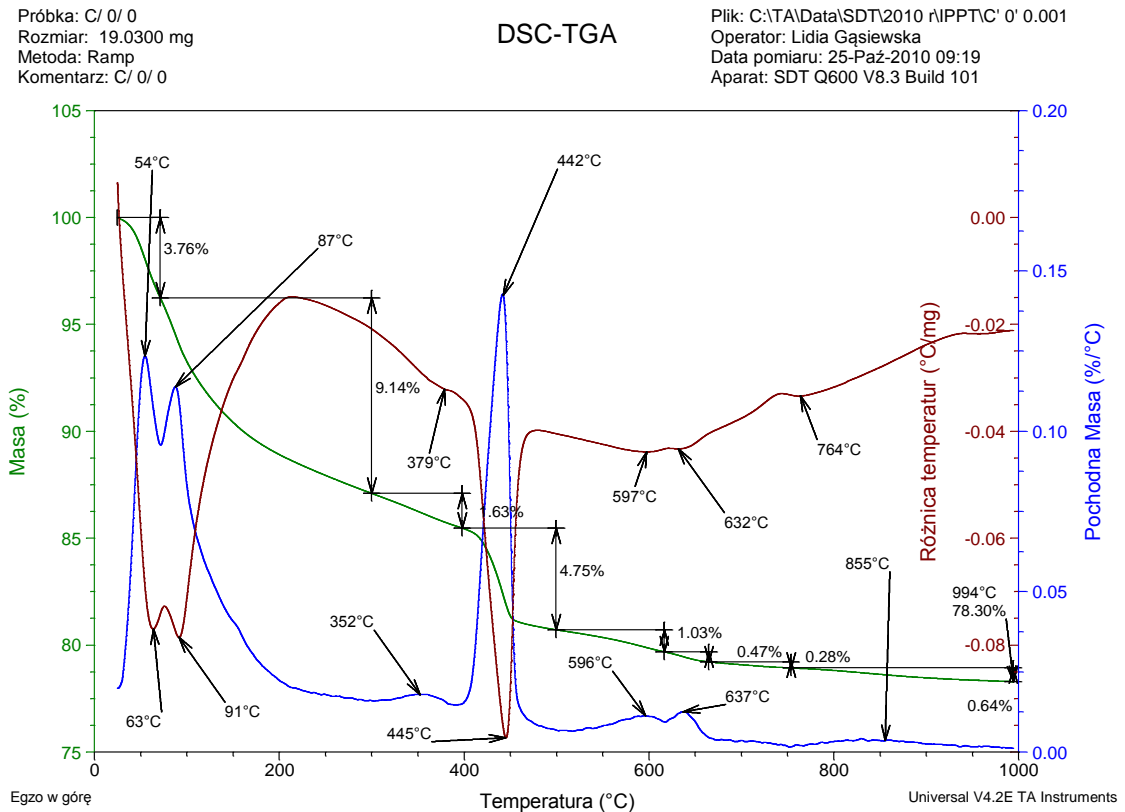
DSC-TGA

Plik: C:\TA\Data\SDT\2010 r\NIPPT\BIII pow.001
 Operator: Lidia Gąsiewska
 Data pomiaru: 06-Wrz-2010 07:04
 Aparat: SDT Q600 V8.3 Build 101

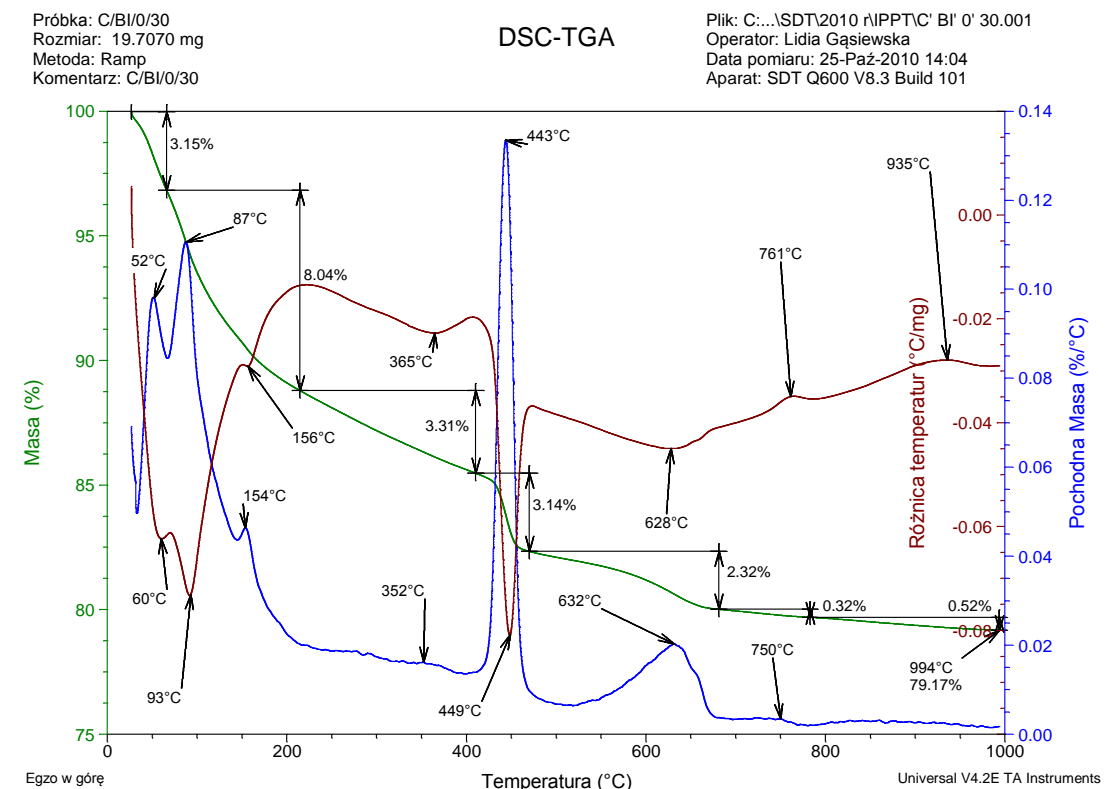


Rys. 3. Termogram próbki popiołu lotnego P3

Plansza 2. Analiza termiczna zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-2



Rys. 1. Termogram próbki zaczynu Z_P-0_CM-2

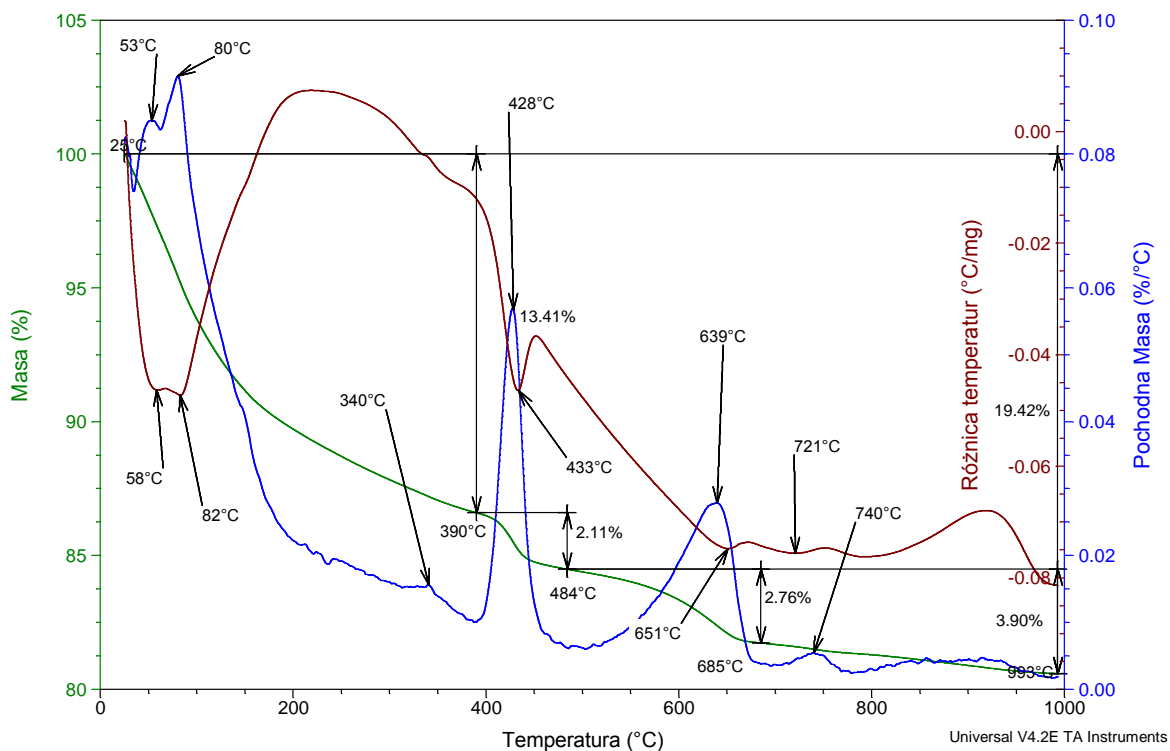


Rys. 2. Termogram próbki zaczynu Z_P1-30_CM-2

Próbka: C/2/0/30
 Rozmiar: 18.0420 mg
 Metoda: Ramp
 Komentarz: C/2/0/30

DSC-TGA

Plik: C:\...\2011\IPPT\II etap\C' 2' 0' 30.001
 Operator: Lidia Gąsiewska
 Data pomiaru: 18-Kwi-2011 13:01
 Aparat: SDT Q600 V8.3 Build 101

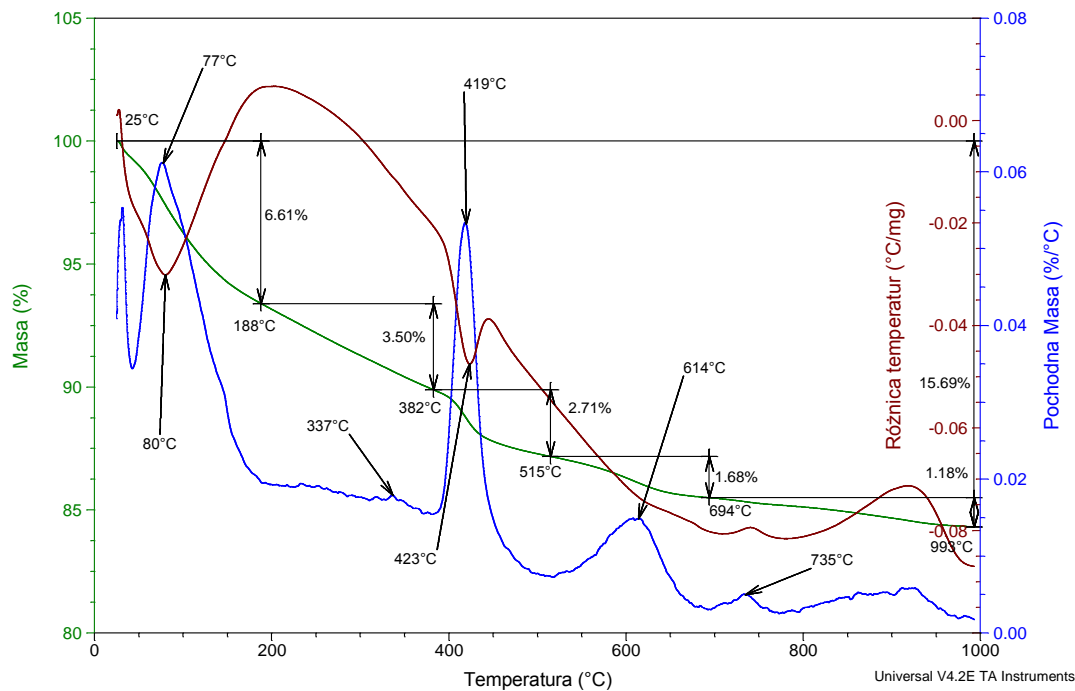


Rys. 3. Termogram próbki zaczynu Z_P2-30_CM-2

Próbka: C/3/0/30
 Rozmiar: 18.0330 mg
 Metoda: Ramp
 Komentarz: C/3/0/30

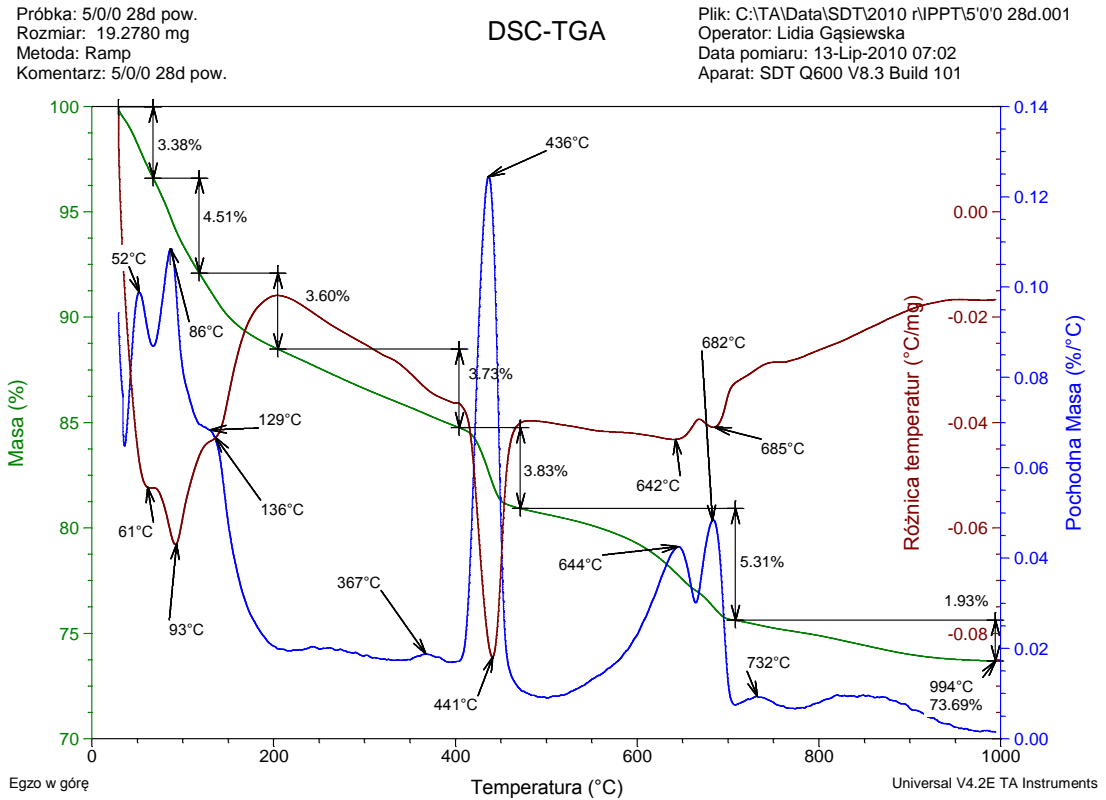
DSC-TGA

Plik: C:\...\2011\IPPT\II etap\C' 3' 0' 30.001
 Operator: Lidia Gąsiewska
 Data pomiaru: 19-Kwi-2011 13:41
 Aparat: SDT Q600 V8.3 Build 101

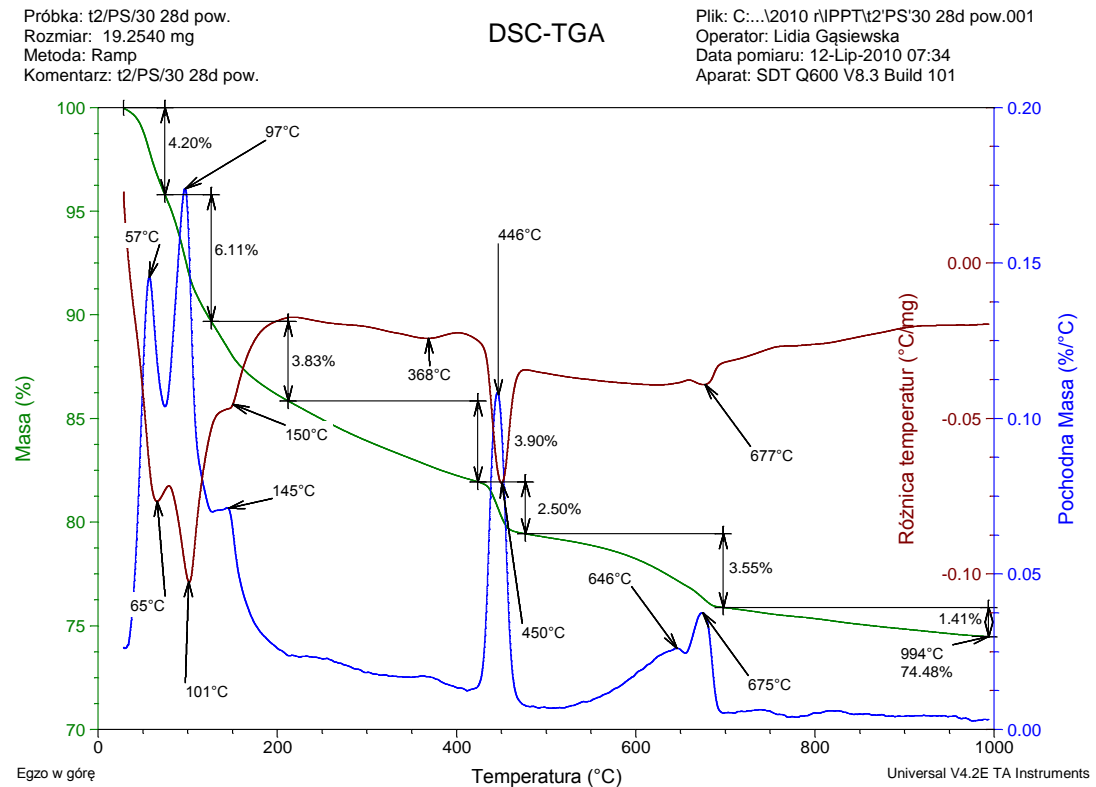


Rys. 4. Termogram próbki zaczynu Z_P3-30_CM-2

Plansza 3. Analiza termiczna zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-9



Rys. 1. Termogram próbki zaczynu Z_P-0_CM-9

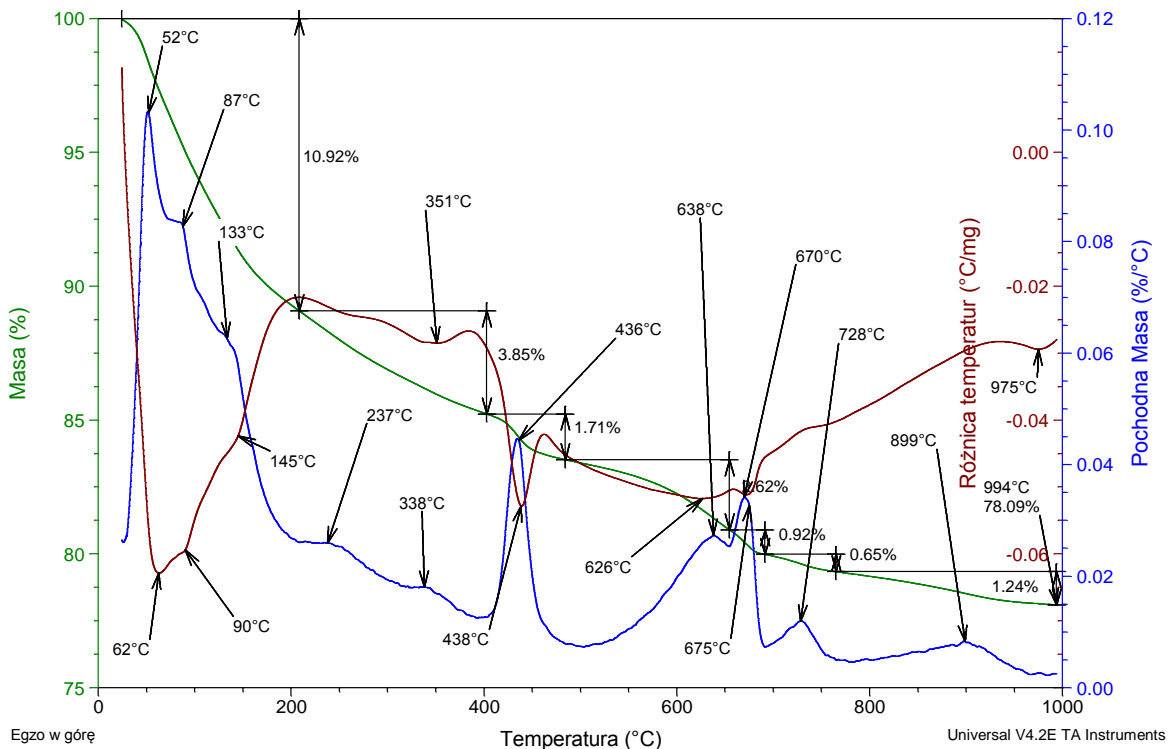


Rys. 2. Termogram próbki zaczynu Z_P1-30_CM-9

Próbka: G/BIII/0/30
 Rozmiar: 19.0370 mg
 Metoda: Ramp
 Komentarz: G/BIII/0/30

DSC-TGA

Plik: C:\...\SDT\2010 \RIPPT\G'BIII'0'30.001
 Operator: Lidia Gąsiewska
 Data pomiaru: 28-Wrz-2010 12:52
 Aparat: SDT Q600 V8.3 Build 101

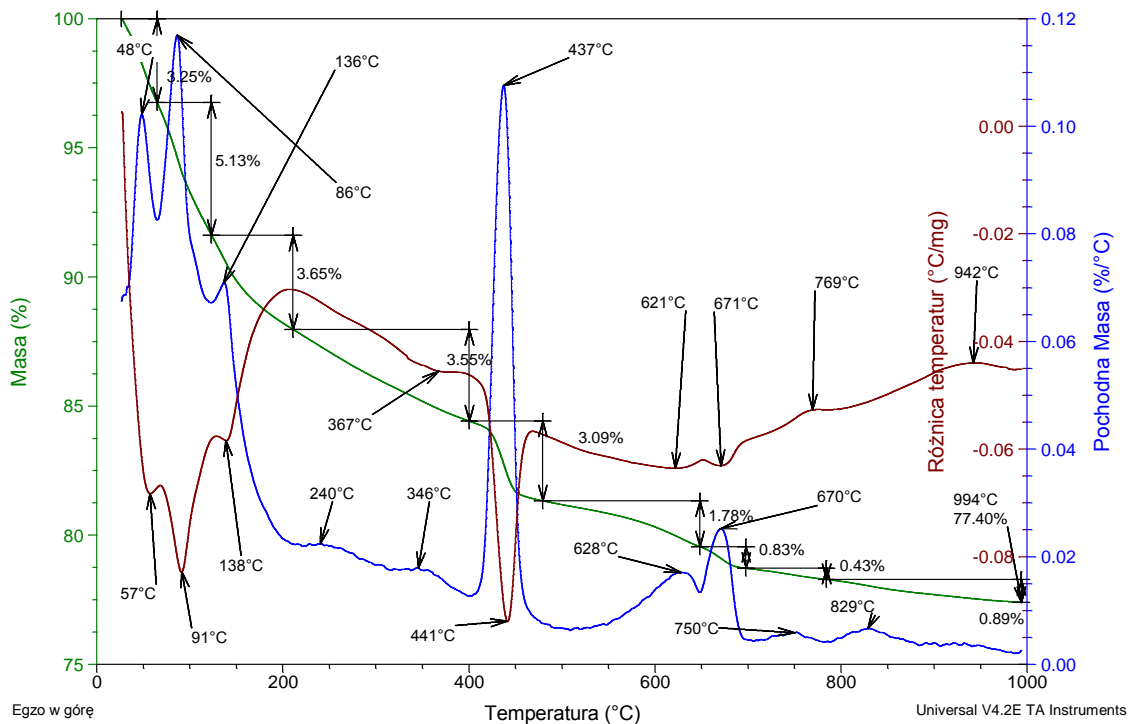


Rys. 3. Termogram próbki zaczynu Z_P2-30_CM-9

Próbka: G/BIII/0/30
 Rozmiar: 19.2580 mg
 Metoda: Ramp
 Komentarz: G/BIII/0/30

DSC-TGA

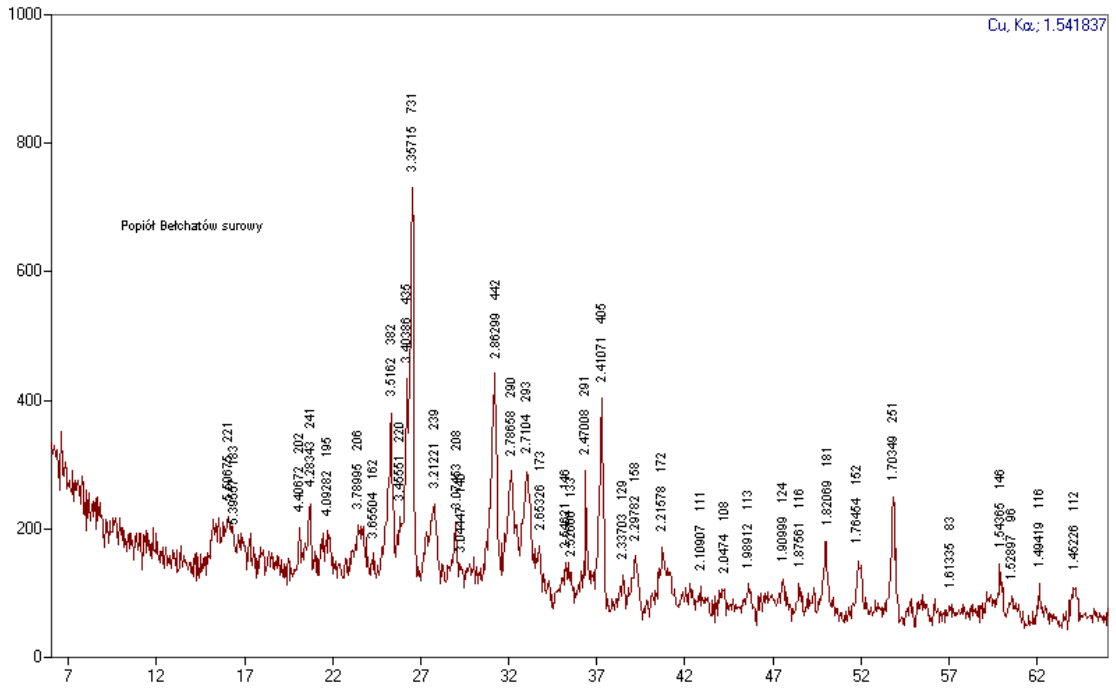
Plik: C:\...\SDT\2010 \RIPPT\G'BIII'0'30.001
 Operator: Lidia Gąsiewska
 Data pomiaru: 27-Paź-2010 10:56
 Aparat: SDT Q600 V8.3 Build 101



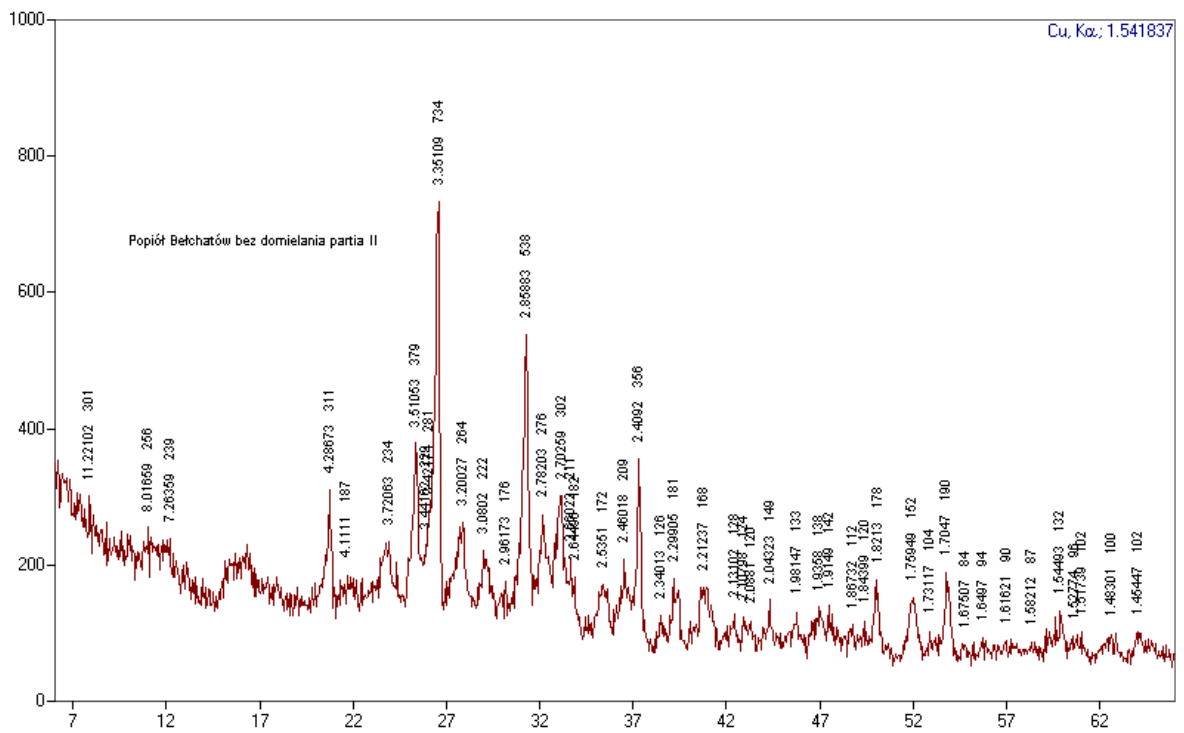
Rys. 4. Termogram próbki zaczynu Z_P3-30_CM-9

Załącznik V. Dyfraktogramy rentgenowskie

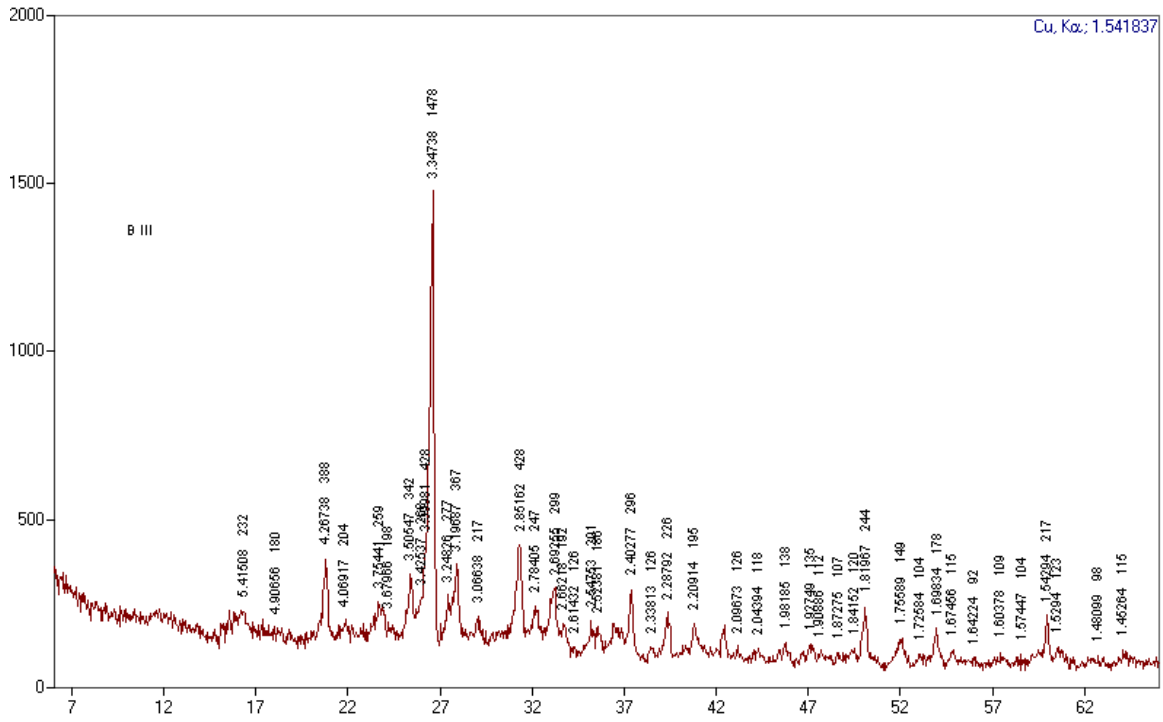
Plansza 1. Dyfraktogramy rentgenowskie popiołów P1-P3



Rys. 1. Dyfraktogram rentgenowski popiołu P1

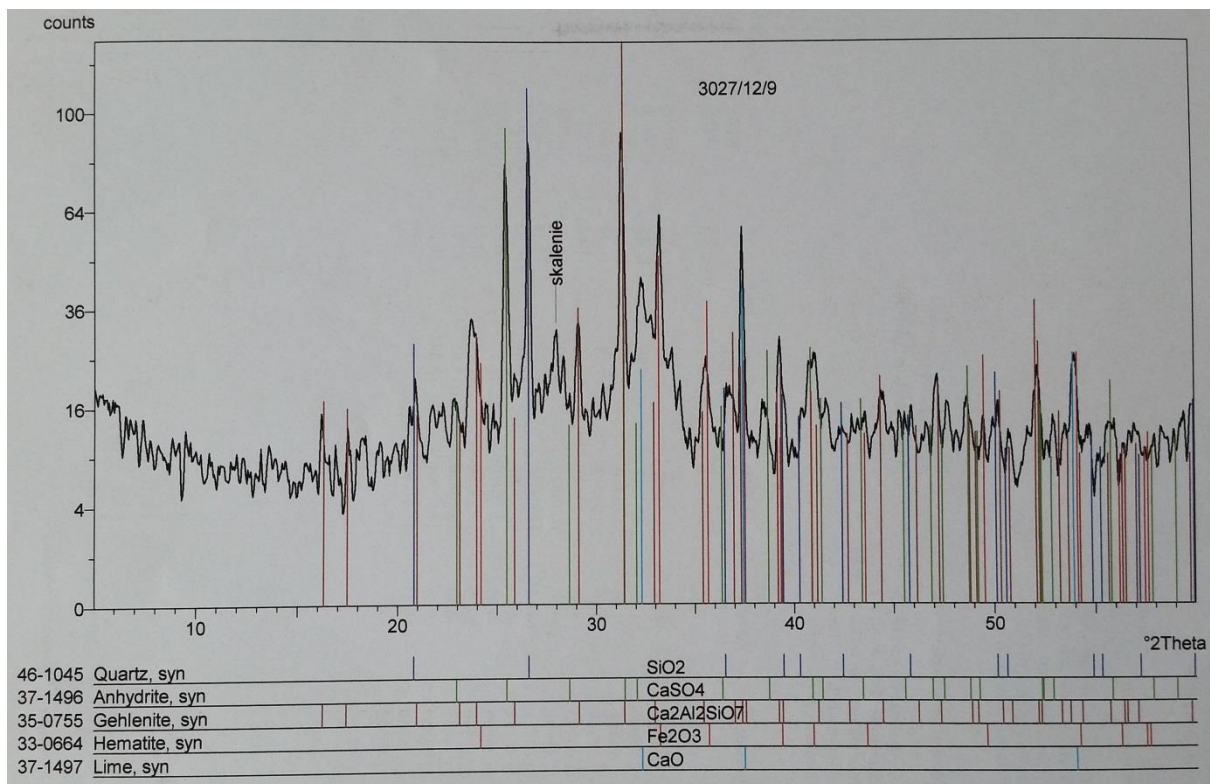


Rys. 2. Dyfraktogram rentgenowski popiołu P2

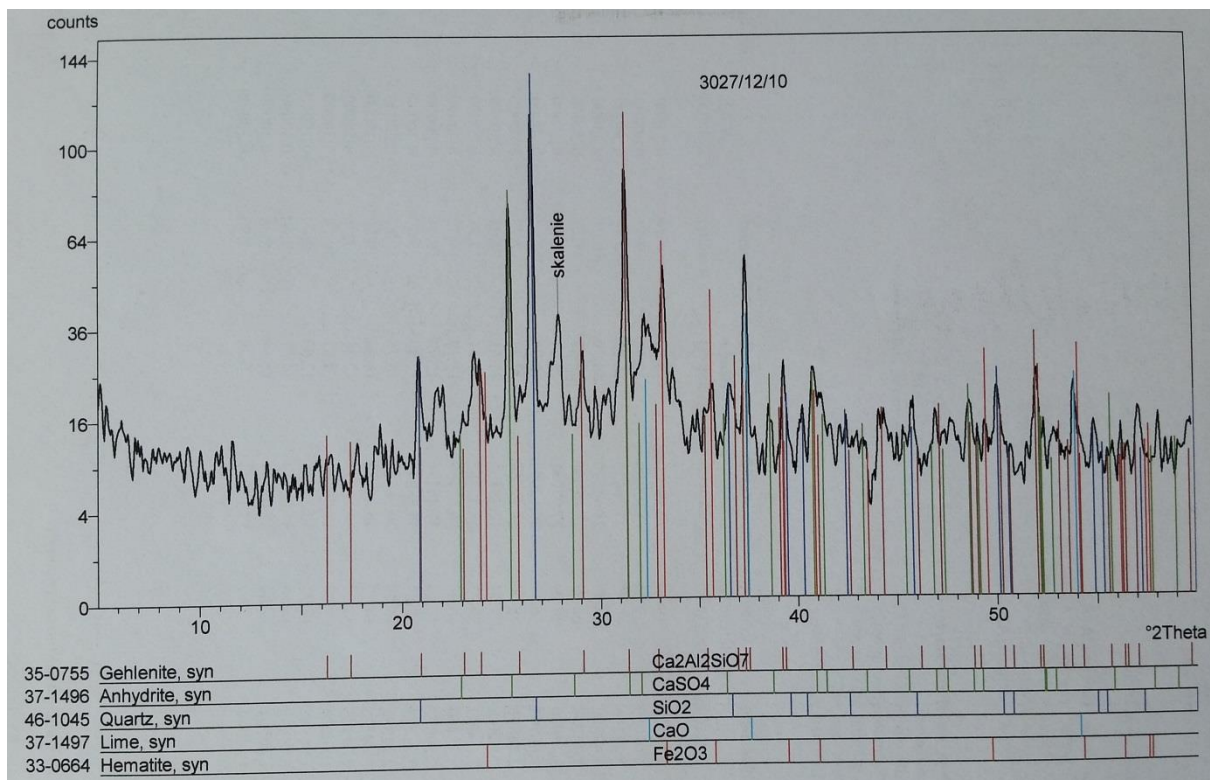


Rys. 3. Dyfraktogram rentgenowski popiołu P3

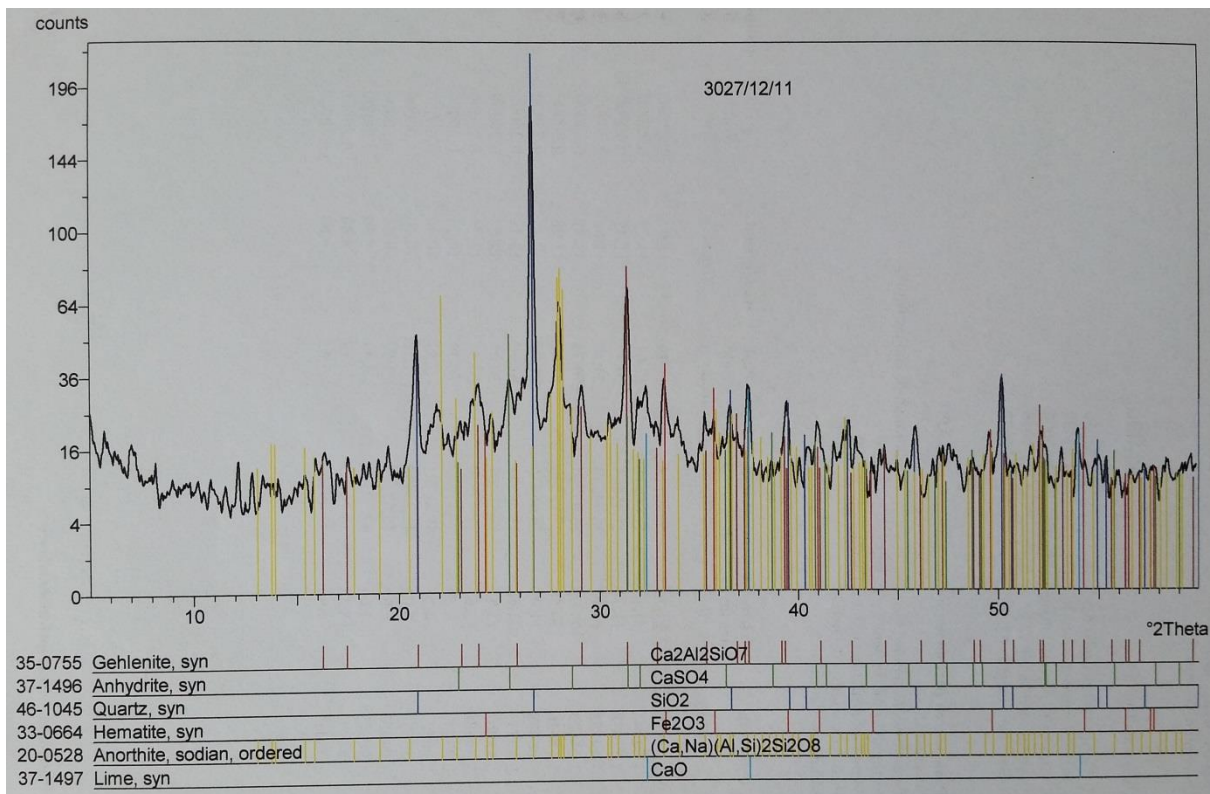
Plansza 2. Dyfraktogramy rentgenowskie popiołów P4-P5 po separacji ziarnowej



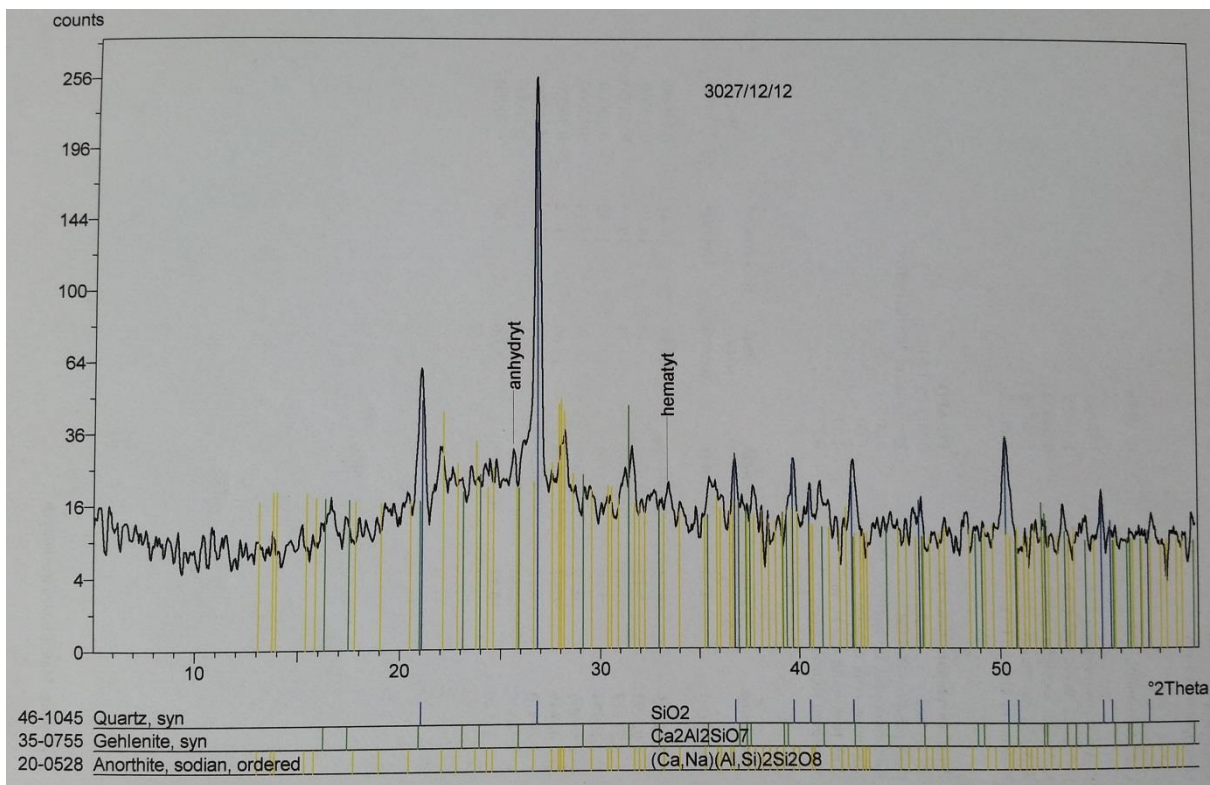
Rys. 1. Dyfraktogram popiołu P4 frakcji ziarnowej 0-20 μm



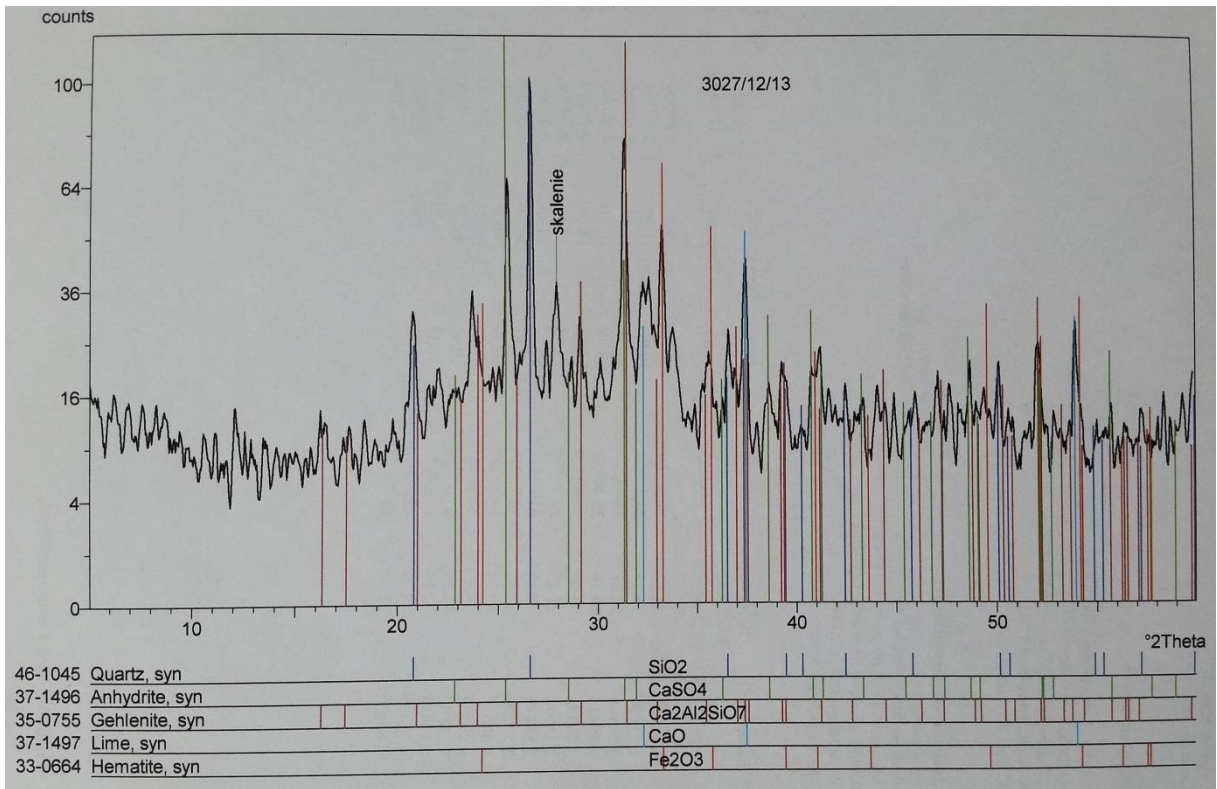
Rys. 2. Dyfraktogram popiołu P4 frakcji ziarnowej 20-32 μm



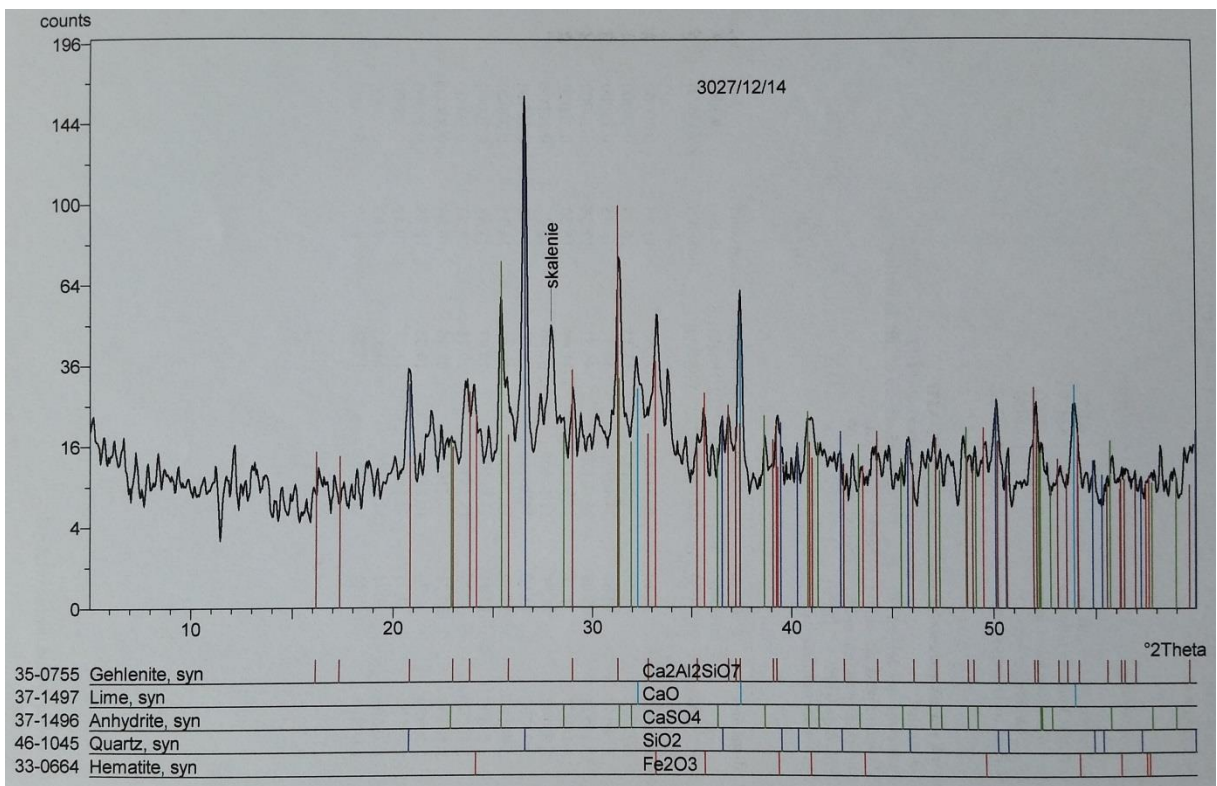
Rys. 3. Dyfraktogram popiołu P4 frakcji ziarnowej 32-125 μm



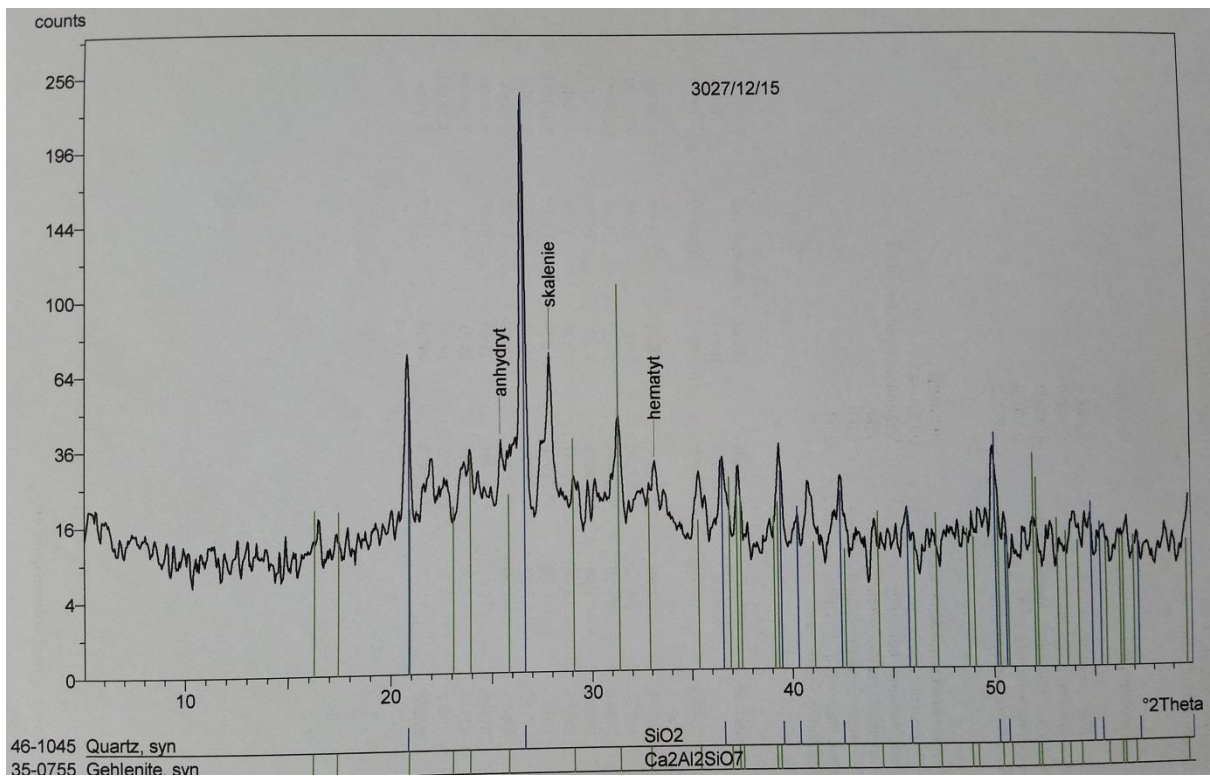
Rys. 4. Dyfraktogram popiołu P4 frakcji ziarnowej powyżej 125 μm



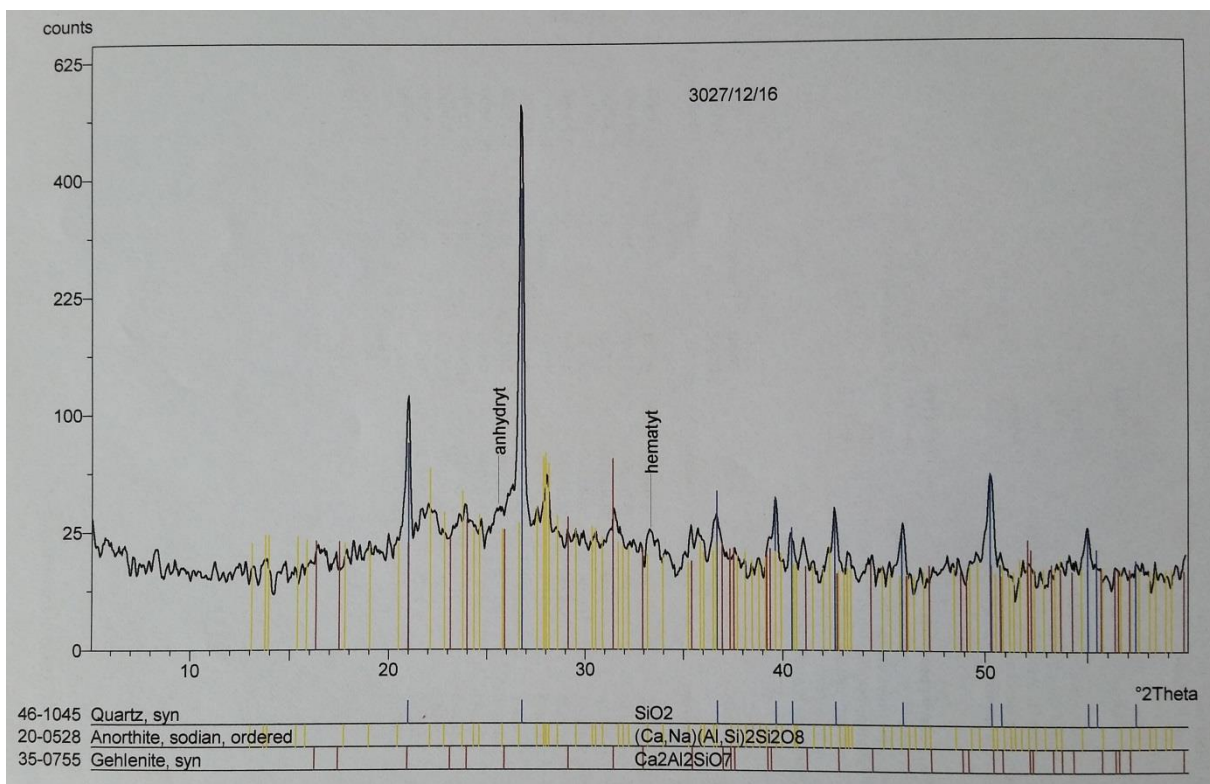
Rys. 5. Dyfraktogram popiołu P5 frakcji ziarnowej 0-20 μm



Rys. 6. Dyfraktogram popiołu P5 frakcji ziarnowej 20-32 μm

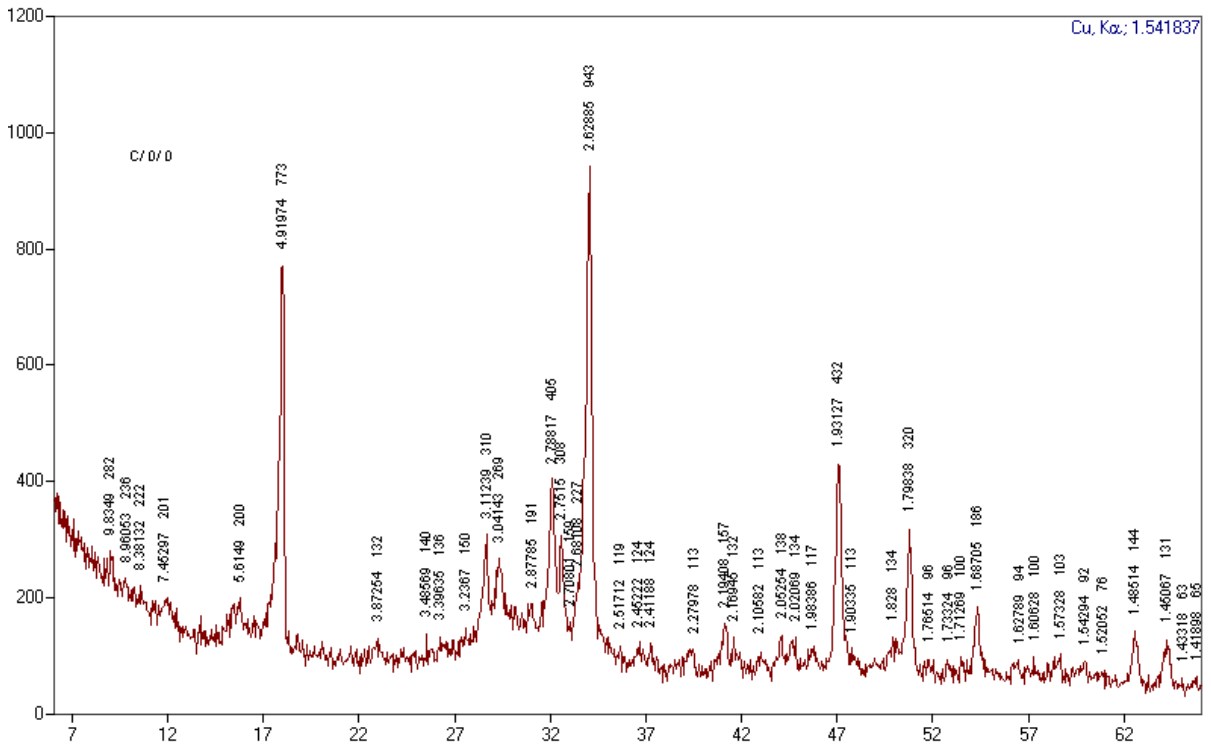


Rys. 7. Dyfraktogram popiołu P5 frakcji ziarnowej 32-125 μm

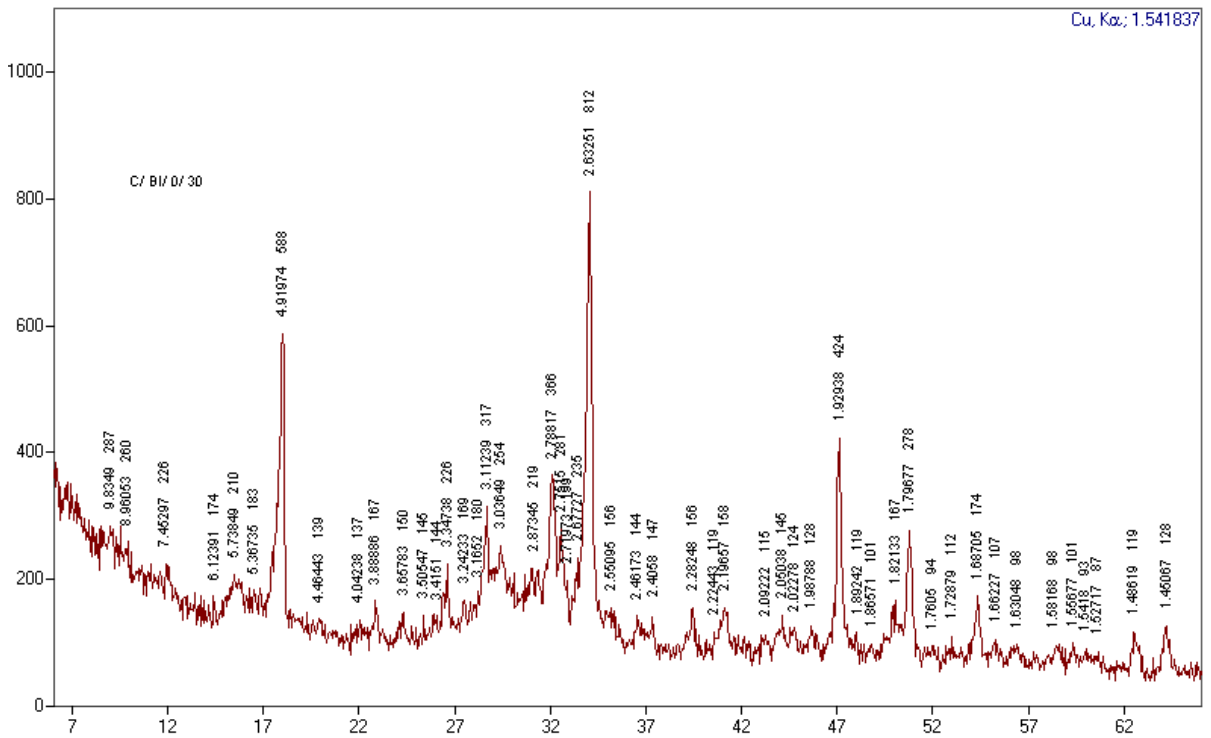


Rys. 8. Dyfraktogram popiołu P5 frakcji ziarnowej powyżej 125 μm

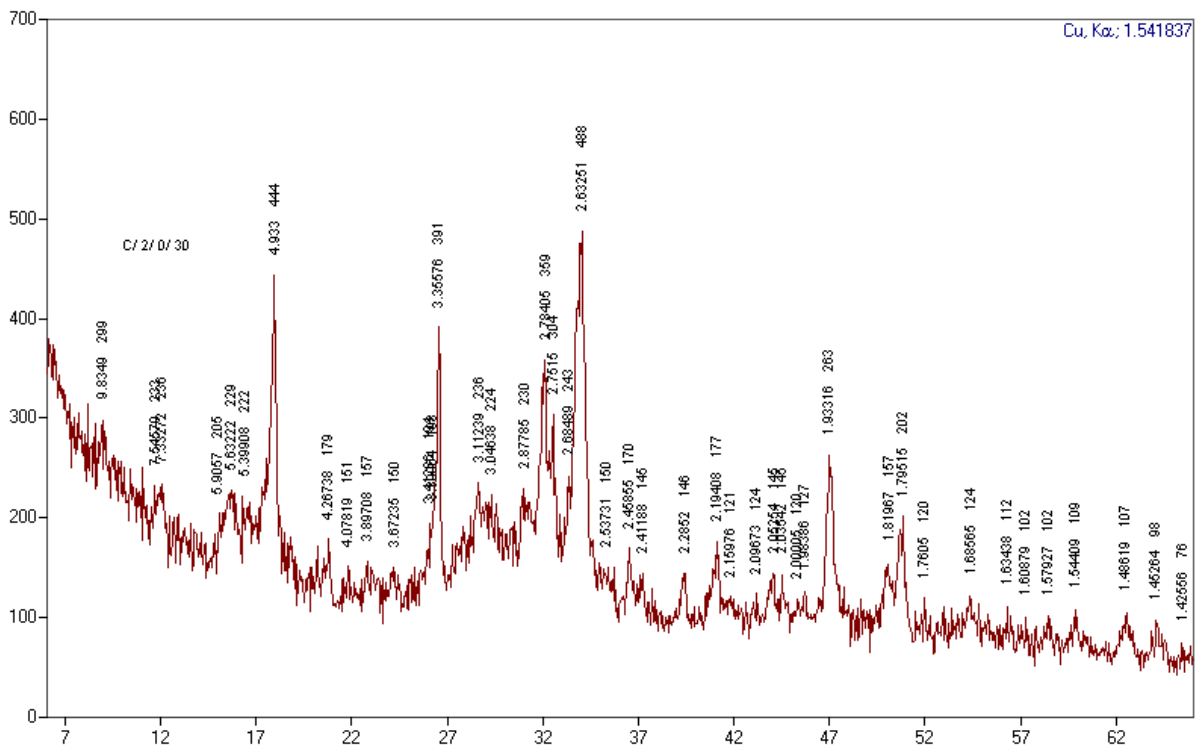
Plansza 3. Dyfraktogramy rentgenowskie zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-2



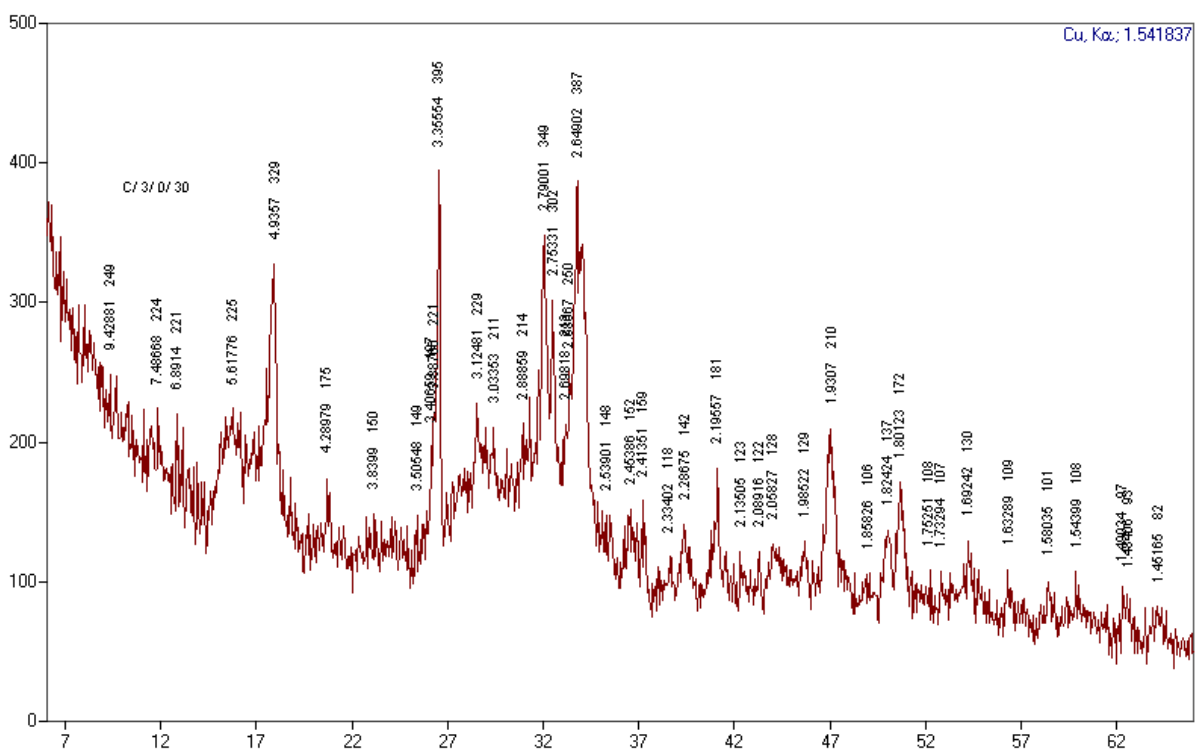
Rys. 1. Dyfraktogram zaczynu Z_P-0_CM-2



Rys. 2. Dyfraktogram zaczynu Z_P1-30_CM-2

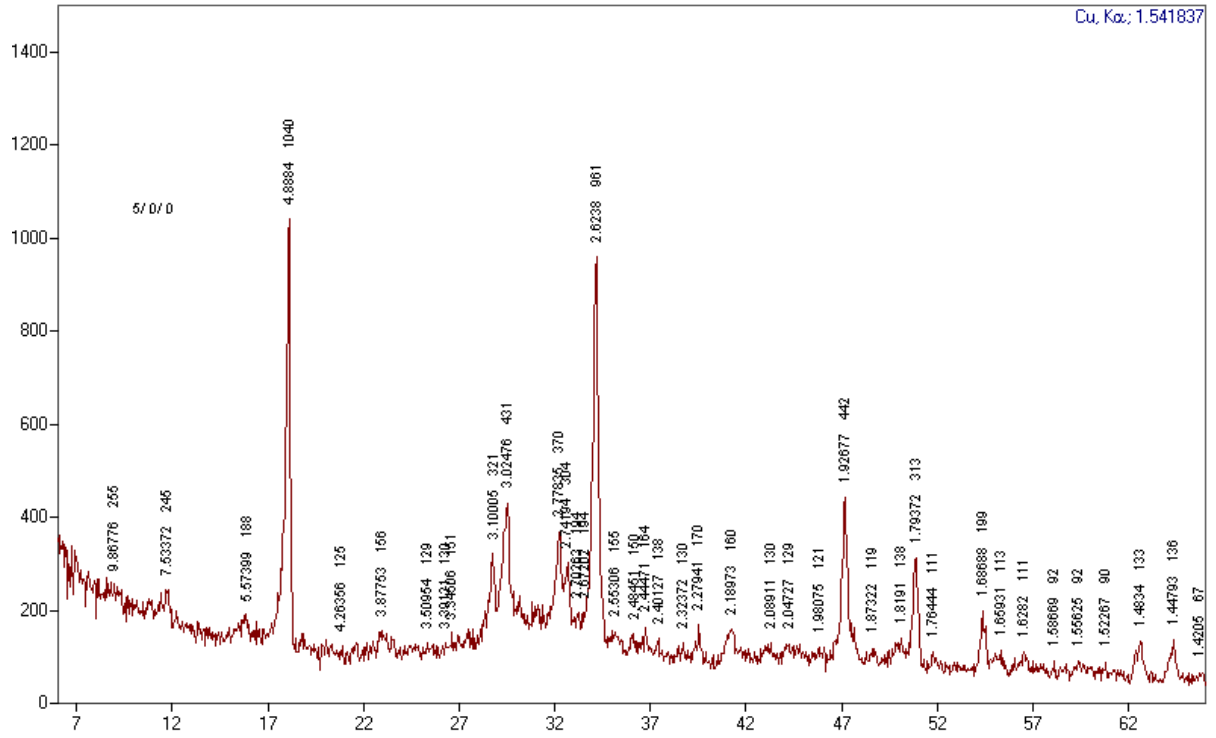


Rys. 3. Dyfraktogram zaczynu Z_P2-30_CM-2

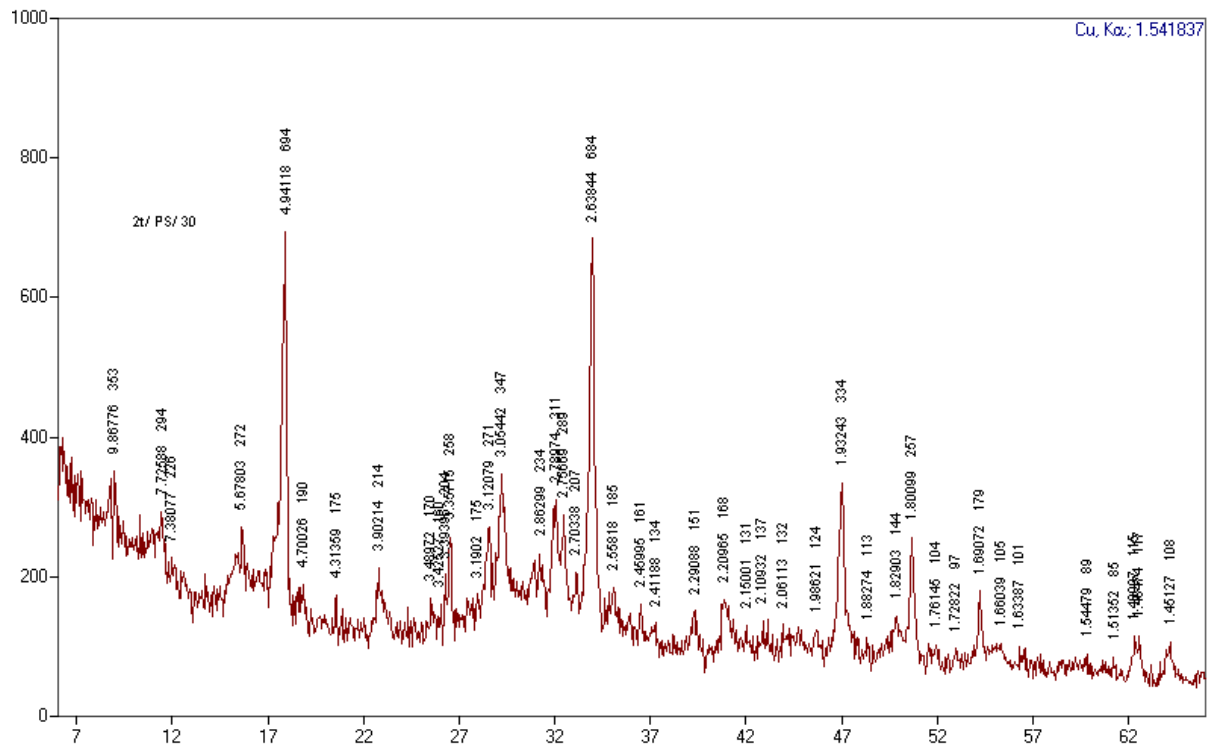


Rys. 4. Dyfraktogram zaczynu Z_P3-30_CM-2

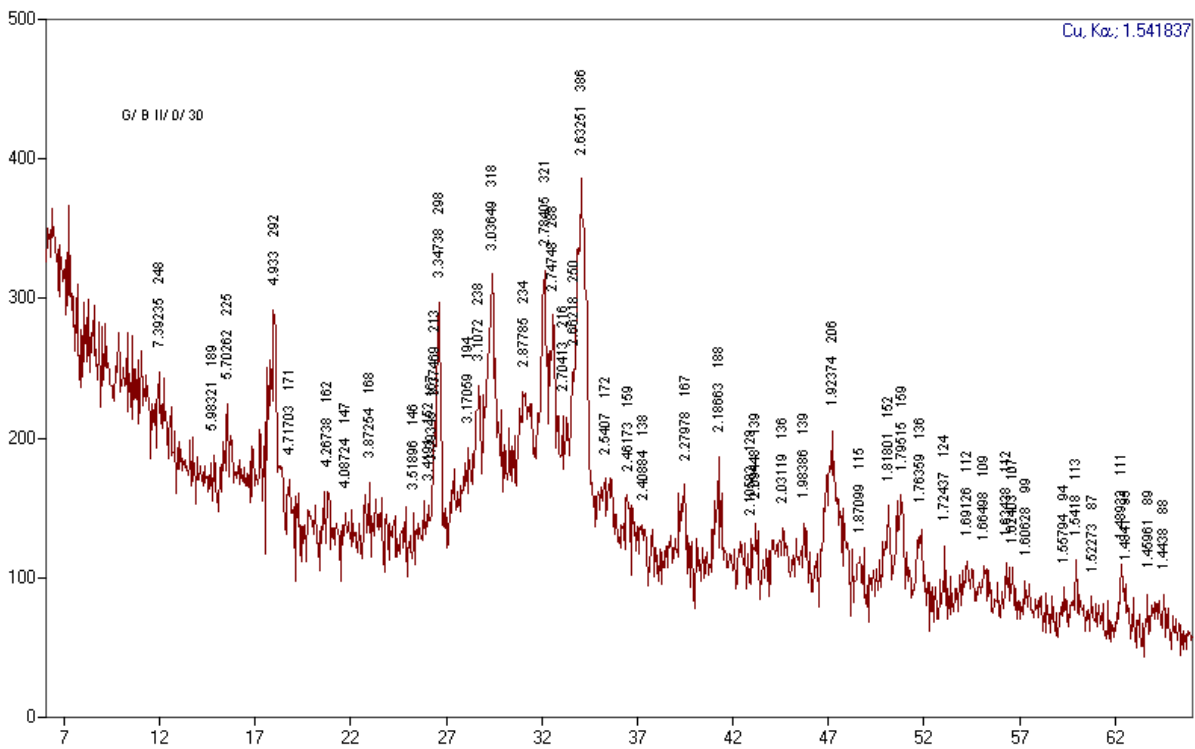
Plansza 4. Dyfraktogramy rentgenowskie zaczynów cementowych z popiołami P1, P2, P3 oraz cementem CM-9



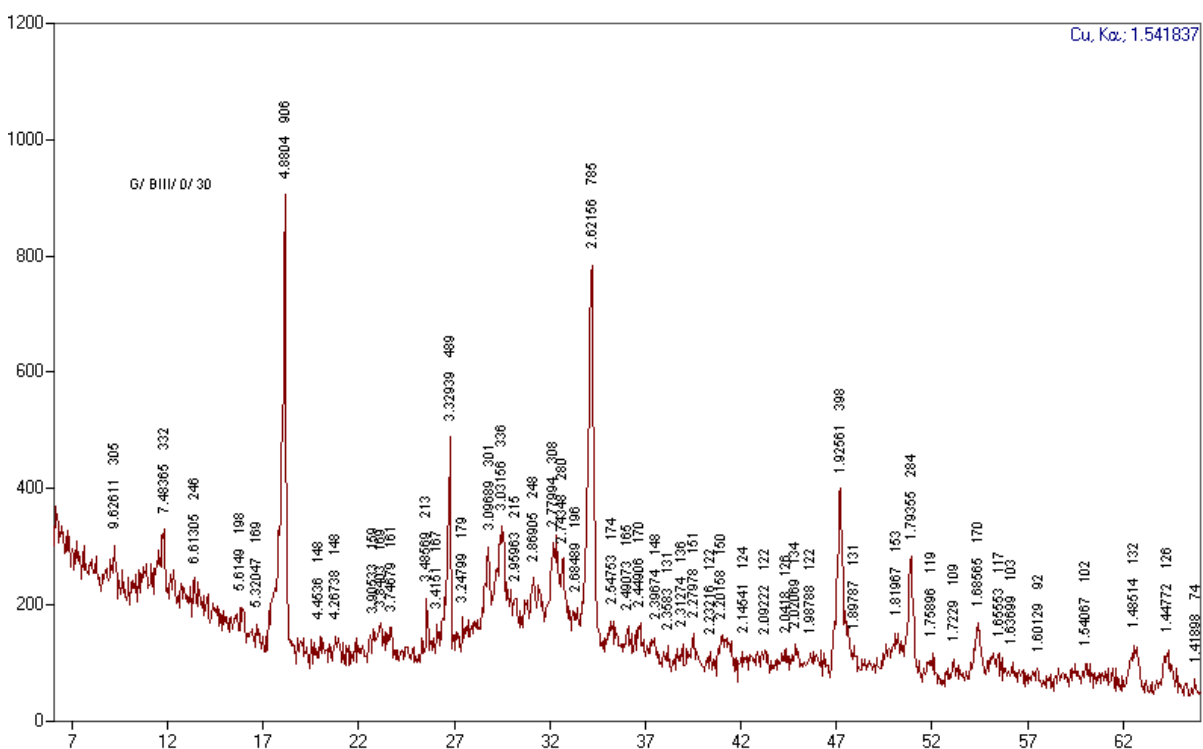
Rys. 1. Dyfraktogram zaczynu Z_P-0_CM-9



Rys. 2. Dyfraktogram zaczynu Z_P1-30_CM-9



Rys. 3. Dyfraktogram zaczynu Z_P2-30_CM-9



Rys. 4. Dyfraktogram zaczynu Z_P3-30_CM-9

Załącznik VI. Wyniki badań wskaźnika piany

Tablica 1. Badanie indeksu piany popiołu P1, P2, P3 z cementem CM-2

Domieszka napowietrzająca	Skład spoiwa		P1	P2	P3
	Udział cementu [% masy]	Udział PLW [% masy]	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]		
LP70	100	0	0,12	0,12	0,12
LP70	85	15	0,44	0,88	0,36
LP70	70	30	0,76	1,92	0,72
LP70	50	50	0,96	2,52	1,00
LP75	100	0	0,08	0,08	0,08
LP75	85	15	0,12	0,60	0,16
LP75	70	30	0,24	1,44	0,32
LP75	50	50	0,32	1,96	0,44
NK3	100	0	0,12	0,12	0,12
NK3	85	15	0,32	0,92	0,28
NK3	70	30	0,48	1,52	0,40
NK3	50	50	0,56	2,00	0,48
BT	100	0	0,36	0,36	0,36
BT	85	15	0,88	2,00	0,80
BT	70	30	1,24	2,76	1,20
BT	50	50	1,56	3,32	1,44
A10	100	0	0,28	0,28	0,28
A10	85	15	0,84	1,78	0,72
A10	70	30	1,04	2,40	0,96
A10	50	50	1,28	2,96	1,20
AIR301	100	0	0,08	0,08	0,08
AIR301	85	15	0,24	0,40	0,20
AIR301	70	30	0,36	0,92	0,32
AIR301	50	50	0,44	1,16	0,44

Tablica 2. Badanie indeksu piany popiołu P1, P2, P3 z cementem CM-4

Domieszka napowietrzająca	Skład spoiwa		P1	P2	P3
	Udział cementu [% masy]	Udział PLW [% masy]	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]		
LP70	100	0	0,12	0,12	0,12
LP70	85	15	0,52	0,92	0,44
LP70	70	30	0,84	1,88	0,72
LP70	50	50	1,04	2,40	1,00
LP75	100	0	0,08	0,08	0,08
LP75	85	15	0,16	0,60	0,16
LP75	70	30	0,24	1,56	0,28
LP75	50	50	0,32	2,12	0,36
NK3	100	0	0,16	0,16	0,16
NK3	85	15	0,32	0,96	0,28
NK3	70	30	0,52	1,44	0,52
NK3	50	50	0,68	1,76	0,72
BT	100	0	0,40	0,40	0,40
BT	85	15	0,96	2,12	0,80
BT	70	30	1,44	3,00	1,24
BT	50	50	1,80	3,56	1,72
A10	100	0	0,32	0,32	0,32
A10	85	15	0,80	1,80	0,60
A10	70	30	1,16	2,44	0,96
A10	50	50	1,36	2,92	1,20
AIR301	100	0	0,12	0,12	0,12
AIR301	85	15	0,24	0,40	0,20
AIR301	70	30	0,32	0,80	0,28
AIR301	50	50	0,40	0,60	0,36

Tablica 3. Badanie indeksu piany popiołu P1, P2, P3 z cementem CM-9

Domieszka napowietrzająca	Skład spoiwa		P1	P2	P3
	Udział cementu [% masy]	Udział PLW [% masy]	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]		
LP70	100	0	0,16	0,16	0,16
LP70	85	15	0,68	1,04	0,48
LP70	70	30	0,92	2,00	0,80
LP70	50	50	1,16	2,56	1,08
LP75	100	0	0,08	0,08	0,08
LP75	85	15	0,16	0,64	0,16
LP75	70	30	0,28	1,60	0,24
LP75	50	50	0,36	2,04	0,32
NK3	100	0	0,24	0,24	0,24
NK3	85	15	0,40	1,00	0,32
NK3	70	30	0,56	1,44	0,48
NK3	50	50	0,68	1,72	0,64
BT	100	0	0,60	0,60	0,60
BT	85	15	1,32	2,40	0,96
BT	70	30	1,80	3,12	1,44
BT	50	50	2,12	3,52	1,88
A10	100	0	0,52	0,52	0,52
A10	85	15	1,00	1,88	0,88
A10	70	30	1,28	2,72	1,00
A10	50	50	1,56	3,44	1,44
AIR301	100	0	0,16	0,16	0,16
AIR301	85	15	0,28	0,40	0,24
AIR301	70	30	0,36	0,92	0,36
AIR301	50	50	0,44	1,24	0,48

Tablica 4. Badanie indeksu piany popiołu P4 przed i po przetwarzaniu (M-mielenie; S-separacja ziarnowa) z cementem CM-9 i domieszką napowietrzającą AIR301

Domieszka napowietrzająca	Skład spoiwa		P4	P4-M	P4-S
	Udział cementu [% masy]	Udział PLW [% masy]	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]		
AIR301	100	0	0,16	0,16	0,16
AIR301	85	15	0,32	0,88	0,28
AIR301	70	30	0,48	1,44	0,36
AIR301	50	50	0,64	2,02	0,44

Tablica 5. Badanie indeksu piany popiołu P4 przed i po przetwarzaniu (M-mielenie; S-separacja ziarnowa) z cementem CM-9 i domieszką napowietrzającą AIR301

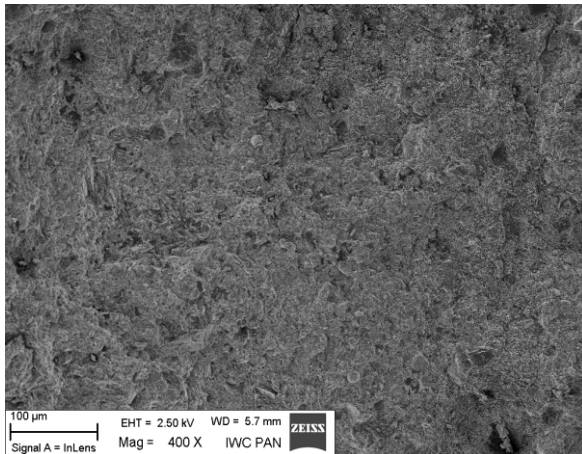
Domieszka napowietrzająca	Skład spoiwa		P5	P5-M	P5-S
	Udział cementu [% masy]	Udział PLW [% masy]	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]		
AIR301	100	0	0,16	0,16	0,16
AIR301	85	15	0,48	1,04	0,32
AIR301	70	30	0,76	1,64	0,44
AIR301	50	50	0,96	2,52	0,52

Tablica 6. Badanie indeksu piany cementów wieloskładnikowych z domieszką napowietrzającą AIR301

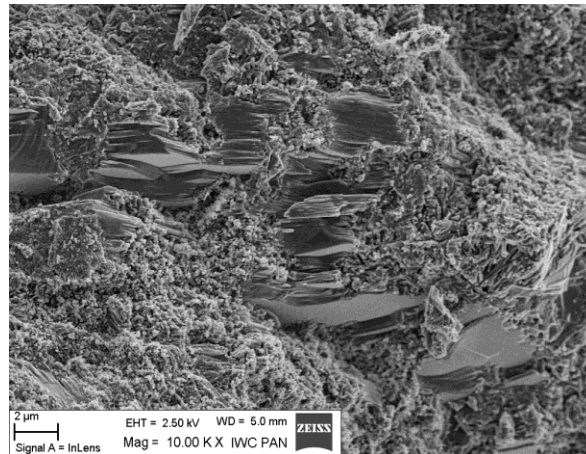
Domieszka napowietrzająca	CEM I	CEM II/B-W	CEM II/B-M (V-W)	„CEM V/A (S-W)”
	Objętość 10% roztworu domieszki napowietrzającej [ml]			
AIR301	0,16	0,52	0,36	0,44

Załącznik VII. Fotografie zaczynów i betonów z popiołem lotnym wapiennym w mikroskopie skaningowym

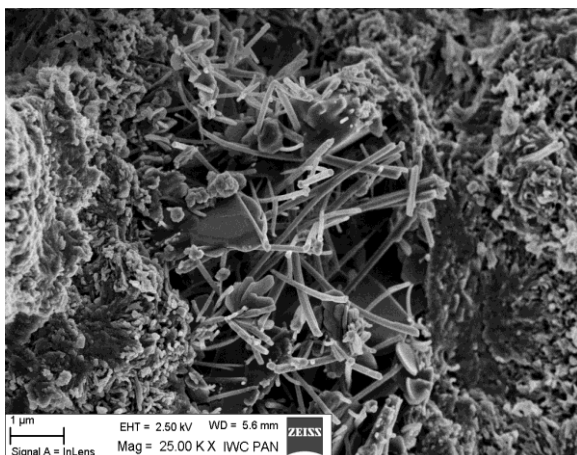
Plansza 1. Wybrane cechy mikrostruktury zaczynu cementowego Z_P-0_CM-9



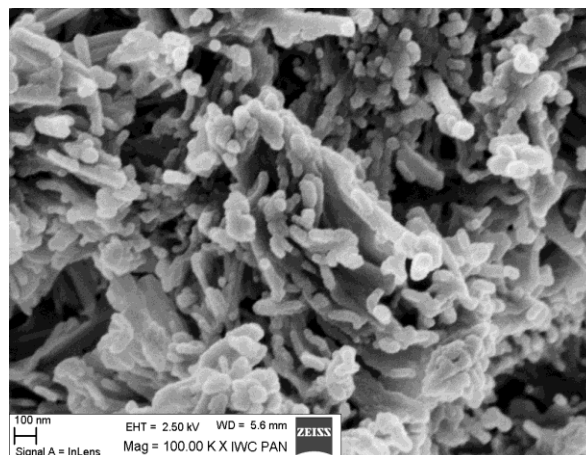
Rys. 1. Zaczyn wzorcowy, struktura zwarta, drobnoporowata i drobnoziarnista



Rys. 2. Drobnoziarnista budowa masy wypełniającej złożonej z *C-S-H*, wśród której tkwią warstwowe kryształy portlandytu

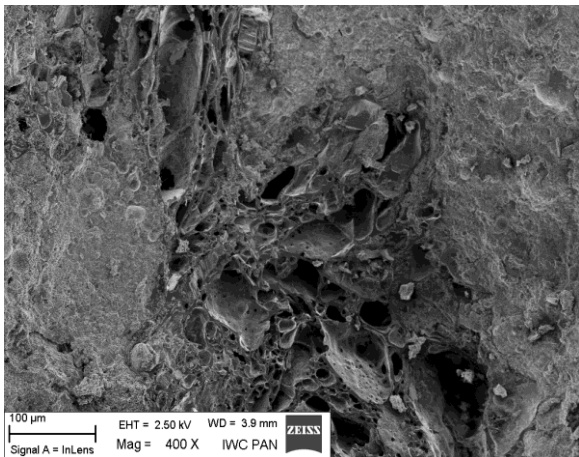


Rys. 3. Drobnoziarnista budowa masy wypełniającej, w której widoczny jest większy por powietrzny wypełniony wydłużonymi kryształami ettringitu i płytkami o pokroju sześciokątnym

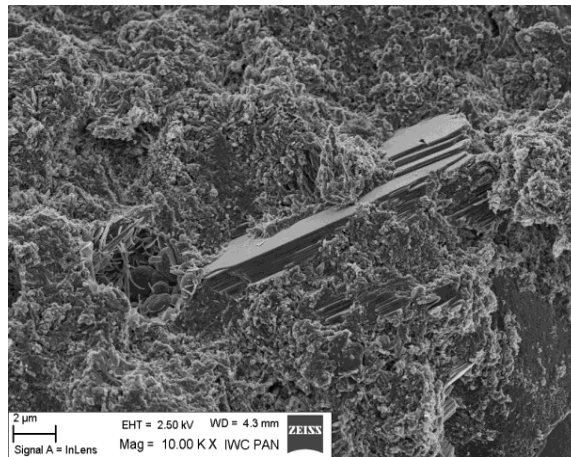


Rys. 4. Drobnoziarnista, gruzelkowa budowa zaczynu, złożonego głównie z *C-S-H* o wyraźnej ziarnistej budowie i wielkości pojedynczych ziaren nie większych niż 200 nm

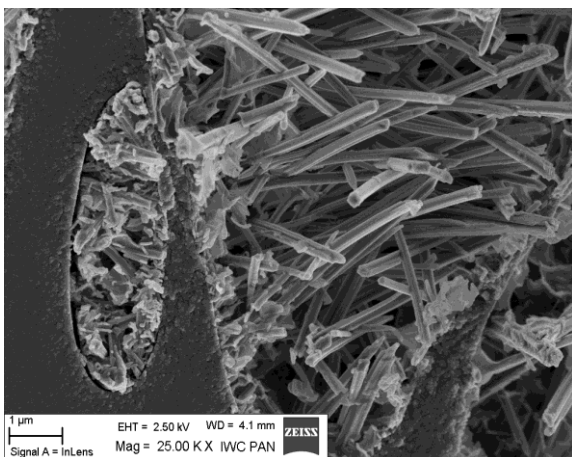
Plansza 2. Wybrane cechy mikrostruktury zaczynu cementowego Z_P1-30_CM-9



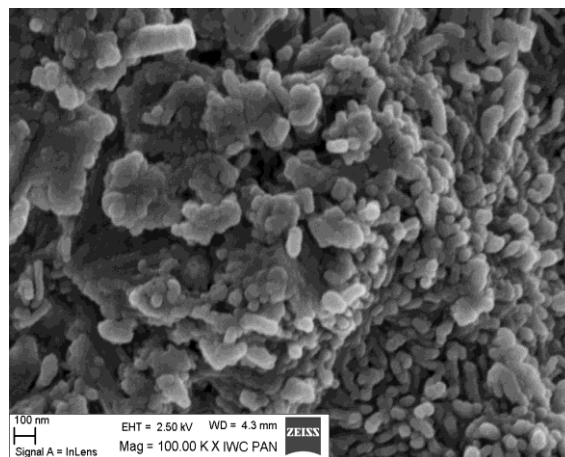
Rys. 1. W zaczynie tkwią stosunkowo liczne, większe okruchy nie spalonego węgla, silnie porowate; często pory te wypełnione są produktami hydratacji cementu



Rys. 2. Droбноziarnista i drobnoporowata mikrostruktura zaczynu, wśród której tkwią warstwowe kryształy portlandytu i pory zarośnięte ettringitem i tabliczkami sześciokątnymi

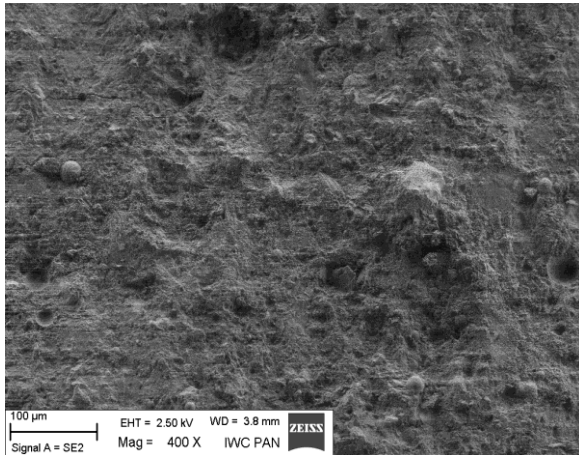


Rys. 3. W porach okruchu nie spalonego węgla widoczne wydłużone kryształy ettringitu

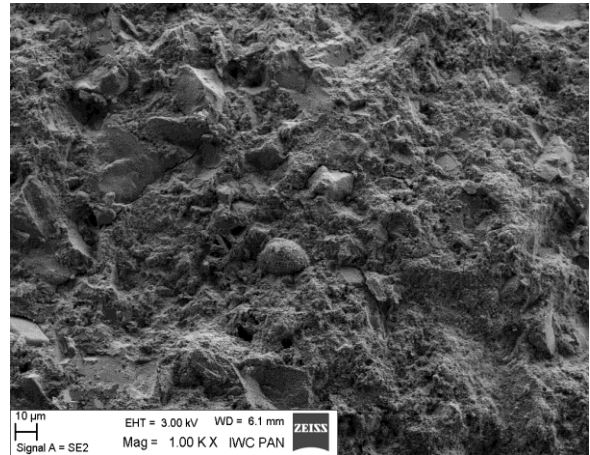


Rys. 4. Droбноziarnista, gruzełkowata budowa zaczynu, złożonego głównie z *C-S-H* o wyraźnie ziarnistej budowie i wielkości od 100 do 300 nm

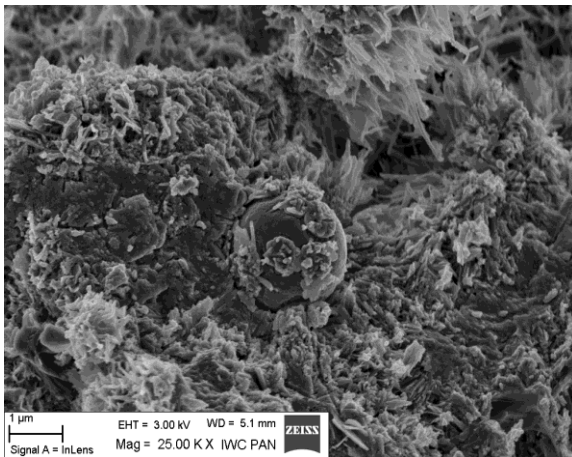
Plansza 3. Wybrane cechy mikrostruktury zaczynu cementowego Z_P2-30_CM-9



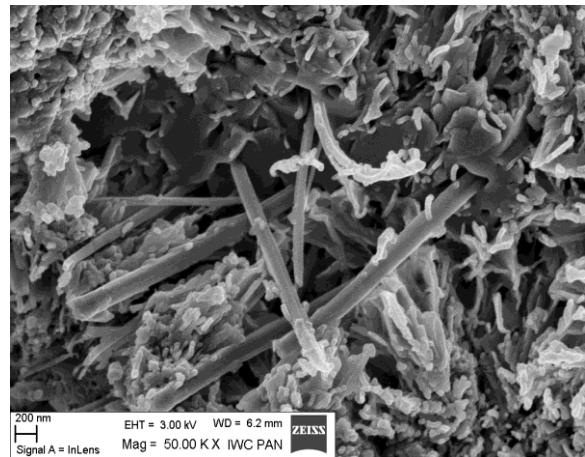
Rys. 1. Zaczyn o strukturze zwartej, drobnoziarnistej, z widocznymi cząstkami kulistymi



Rys. 2. Drobnoziarnista budowa masy wypełniającej złożonej z *C-S-H*, wśród której tkwią ziarna kuliste i ślady po cząstkach

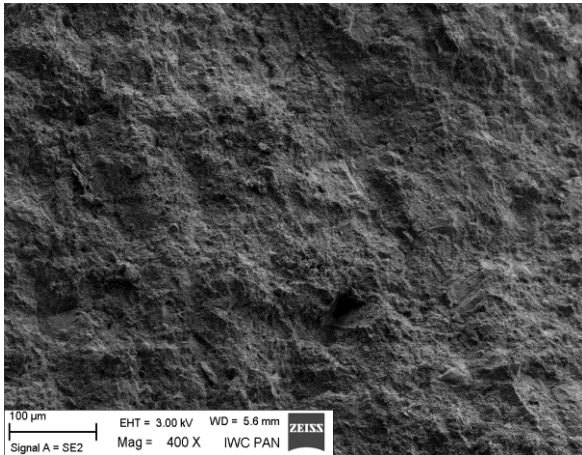


Rys. 3. Powierzchnia aktywnej, kulistej ziarna popiołu lotnego pokrytej produktami hydratacji, tkwiącej w masie *C-S-H* i licznych kryształów ettringitu

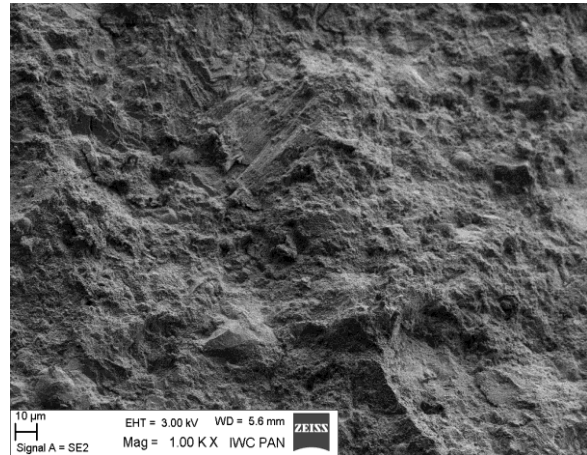


Rys. 4. Drobno płytkowa, gruzełkowata budowa masy wypełniającej, w której tkwią wydłużone kryształy ettringitu i płytki o pokroju sześciokątnym i wielkości do 1 µm

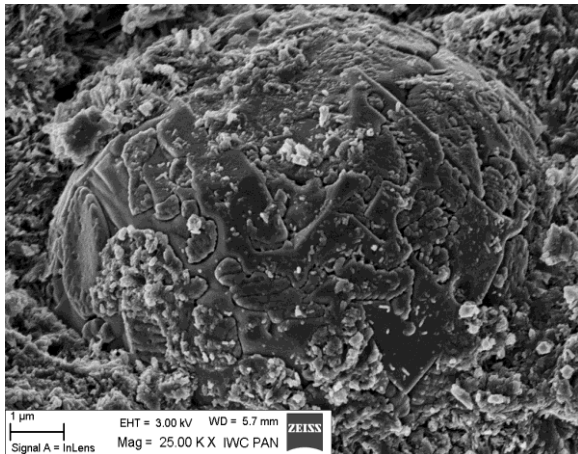
Plansza 4. Wybrane cechy mikrostruktury zaczynu cementowego Z_P3-30_CM-9



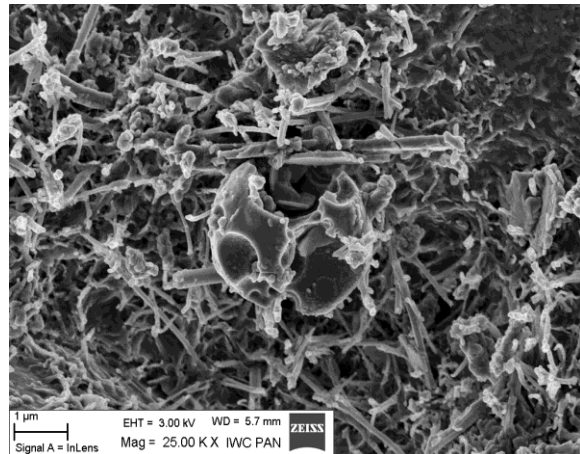
Rys. 1. Zaczyn o strukturze zwartej, drobnoziarnistej, z widocznymi, nielicznymi cząstkami kulistymi



Rys. 2. Drobnoziarnista budowa masy wypełniającej złożonej z *C-S-H*, wśród której tkwią warstwowe kryształy portlandytu, ziarna kuliste i ślady po cząstkach

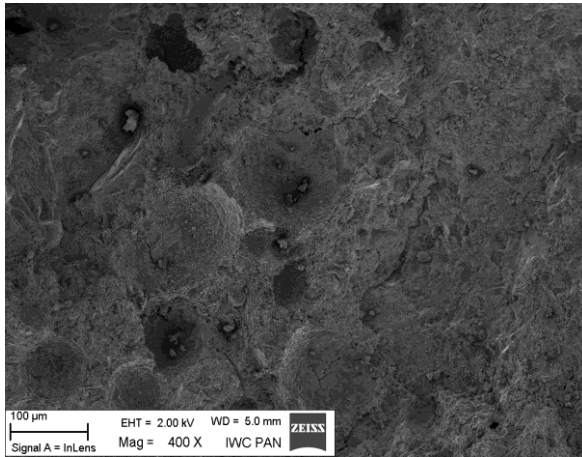


Rys. 3. Powierzchnia ziarna kulistej popiołu lotnego pokryta szczelnie produktami hydratacji

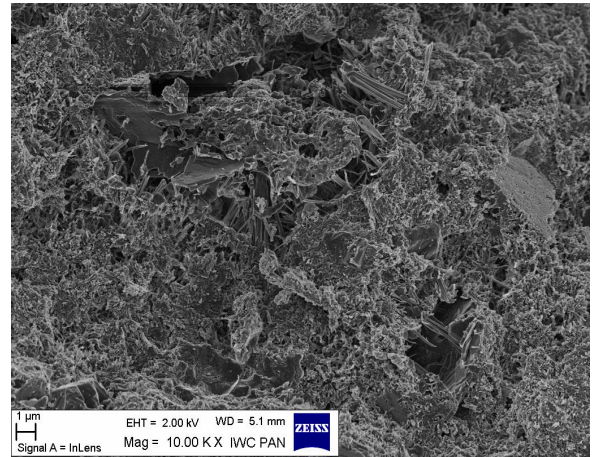


Rys. 4. Wydłużone kryształy ettringitu, *C-S-H* i relikty kulistych, aktywnych ziaren popiołu

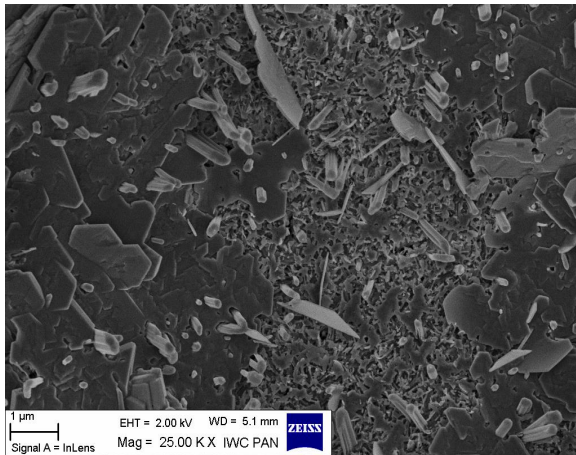
Plansza 5. Wybrane cechy mikrostruktury betonu P3-0_CM-9



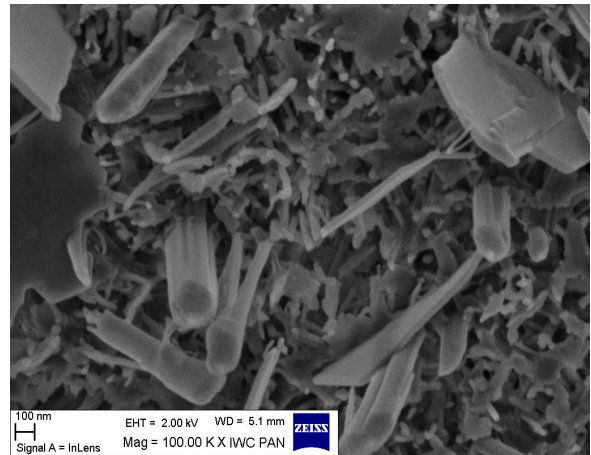
Rys. 1. Pory w matrycy cementowej



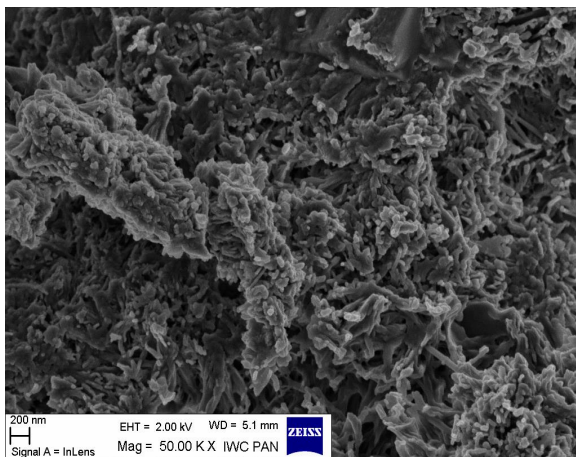
Rys. 2. Widoczne płytkowe kryształy portlandytu, drobnoziarniste *C-S-H* oraz igielki ettringitu w porach



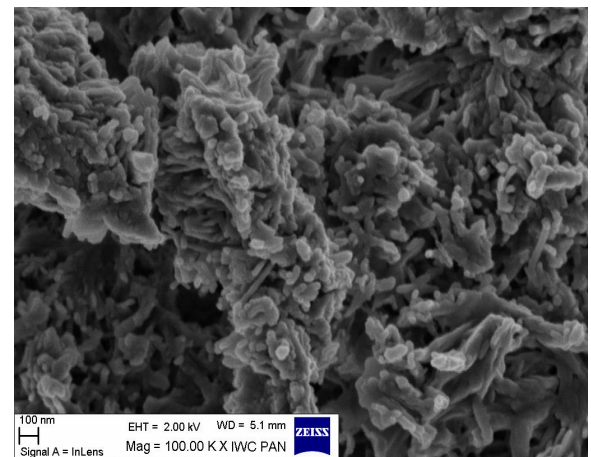
Rys. 3. Płytki portlandytu, ettringit i *C-S-H*



Rys. 4. Powiększony fragment Rys. 3 przedstawiający rurkowe kryształy ettringitu oraz płytki portlandytu i drobnoziarniste *C-S-H*

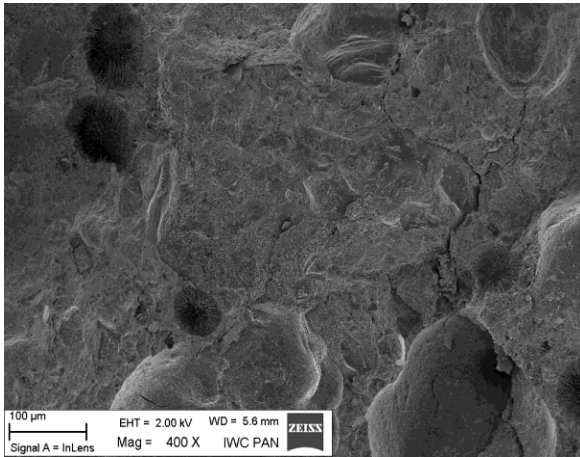


Rys. 5. Drobnoziarniste *C-S-H*

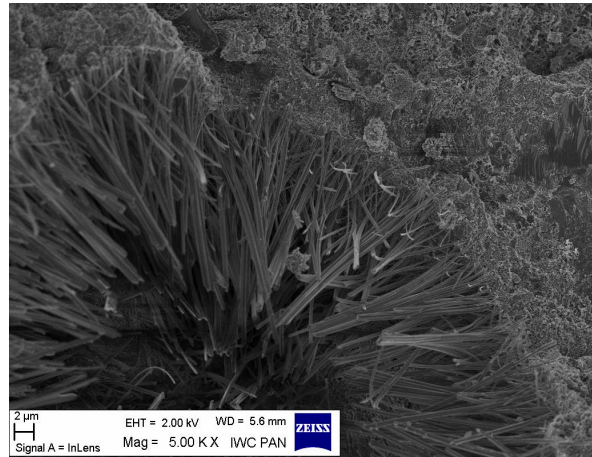


Rys. 6. Powiększony fragment Rys. 5

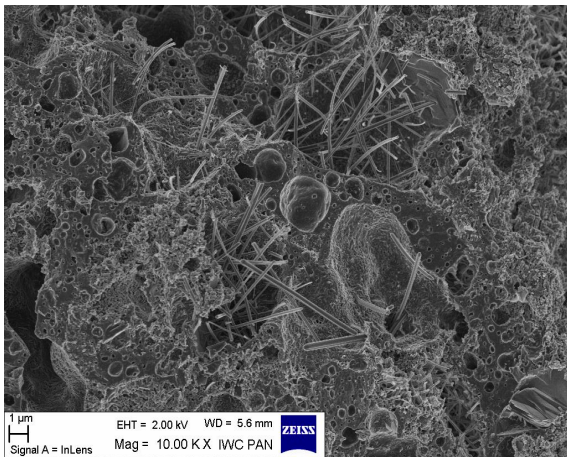
Plansza 6. Wybrane cechy mikrostruktury betonu P3-40_CM-9



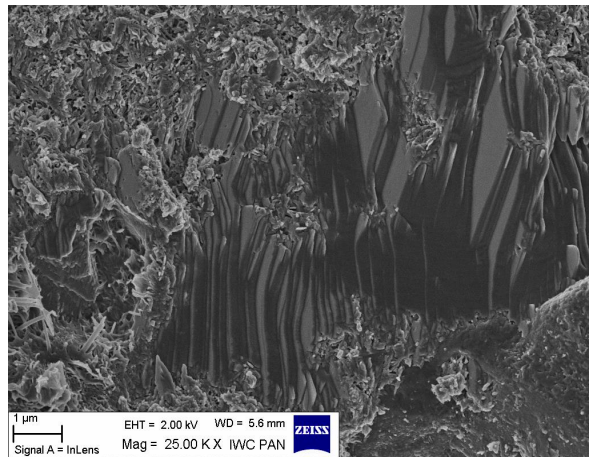
Rys. 1. Pory w matrycy cementowo-popiołowej, częściowo wypełnione ettringitem



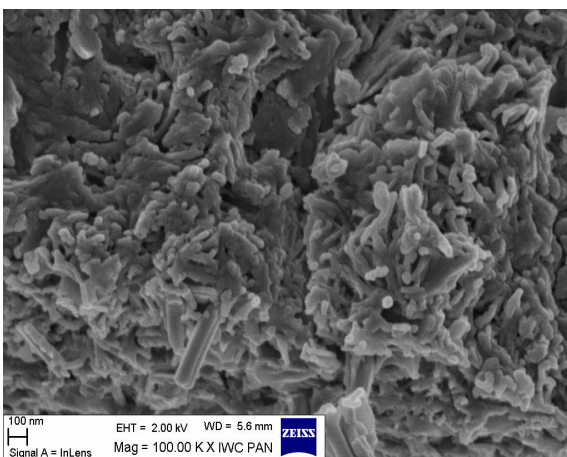
Rys. 2. Powiększony fragment Rys.1; kryształy ettringitu w porze



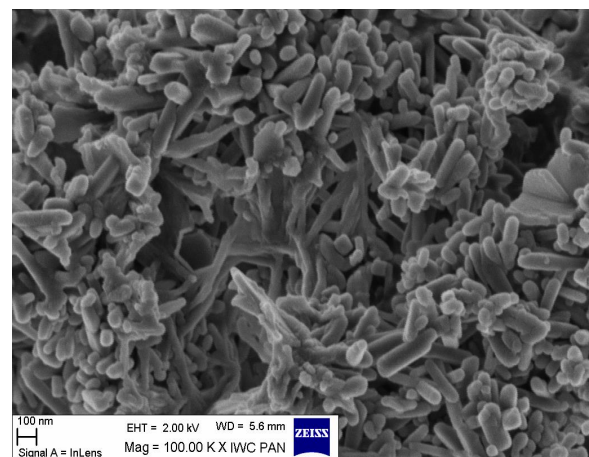
Rys. 3. Ziarna popiołu w matrycy cementowo-popiołowej i kryształy ettringitu



Rys. 4. Warstwowe kryształy portlandytu w matrycy złożonej głównie z fazy C-S-H



Rys. 5. Droбноziarnista matryca złożona głównie z drobnych ziaren C-S-H i większych kryształów ettringitu



Rys. 6. Droбноziarnista faza C-S-H i ettringit

Załącznik VIII. Wyniki badań charakterystyki porów powietrznych**Plansza 1. Charakterystyka porów powietrznych betonów z popiołami P1, P2 oraz cementem CM-9**

Tablica 1. Zestawienie wyników badań charakterystyki porów powietrznych

Oznaczenie	A [%]	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]	A ₃₀₀ [%]
P1-0_CM-9_N	1,33	15,69	0,64	0,23
P1-0_CM-9	5,25	29,62	0,17	2,15
P1-30_CM-9_N	1,37	17,51	0,56	0,21
P1-30_CM-9	4,17	18,64	0,30	1,36
P2-30_CM-9_N	2,25	9,88	0,79	0,12
P2-30_CM-9	3,73	25,82	0,23	1,86

Tablica 2a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_N_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	29,8	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	15,425	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	1,29	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	49	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	12,71	mm^{-1}
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	27,525	
Wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}=$	0,77	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	0,24	%

Tablica 2b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_N_1

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{\text{tot}}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 do 10	5	0,004192453	0,0001178	35,5895865	17,28858998	0,000000524	0,0009	0,00
	2	15 do 20	6	0,005030944	0,0002749	18,3009966	4,714342361	0,000004190	0,0020	0,00
	3	25 do 30	7	0,005869435	0,000432	13,5866542	7,892320348	0,000014100	0,0111	0,01
	4	35 do 40	4	0,003353963	0,000589	5,69433385	3,446670908	0,000033500	0,0115	0,03
	5	45 do 50	2	0,001676981	0,0007461	2,24766294	1,319307469	0,000065400	0,0086	0,03
	6	55 do 60	1	0,000838491	0,0009032	0,92835547	0,192191589	0,000113000	0,0022	0,04
	7	65 do 80	2	0,001676981	0,002278	0,73616388	-0,41798706	0,000268000	-0,0112	0,03
	8	85 do 100	4	0,003353963	0,002906	1,15415094	0,679623121	0,000524000	0,0356	0,06
	9	105 do 120	2	0,001676981	0,003534	0,47452782	0,071697814	0,000905000	0,0065	0,07
	10	125 do 140	2	0,001676981	0,004163	0,40283001	0,052802597	0,001440000	0,0076	0,07
	11	145 do 160	2	0,001676981	0,004791	0,35002741	0,040564166	0,002140000	0,0087	0,08
	12	165 do 180	2	0,001676981	0,005419	0,30946324	0,170814745	0,003050000	0,0521	0,14
	13	185 do 200	1	0,000838491	0,0060476	0,1386485	0,138648498	0,004190000	0,0581	0,19
	14	205 do 220	0	0	0,006676	0	-0,11479883	0,005580000	-0,0641	0,13
	15	225 do 240	1	0,000838491	0,007304	0,11479883	0,114798831	0,007240000	0,0831	0,21
	16	245 do 260	0	0	0,007933	0	-0,09794307	0,009200000	-0,0901	0,12
	17	265 do 280	1	0,000838491	0,008561	0,09794307	0,097943074	0,011500000	0,1126	0,24
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	0	0,014100000	0,0000	0,24
	19	305 do 350	0	0	0,02572	0	0	0,022400000	0,0000	0,24
	20	355 do 400	0	0	0,02965	0	0	0,033500000	0,0000	0,24
	21	405 do 450	0	0	0,03358	0	0	0,047700000	0,0000	0,24
	22	455 do 500	0	0	0,0375	0	-0,00283753	0,065400000	-0,0186	0,22
	23	505 do 1000	2	0,001676981	0,591	0,00283753	0,001985147	0,524000000	0,1040	0,32
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,00085238	-0,00036635	1,770000000	-0,0648	0,26
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,00121874	0,001218736	4,190000000	0,5107	0,77
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	-0,00038783	8,180000000	-0,3172	0,45
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000235434	14,100000000	0,3320	0,78
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,0001524		33,500000000	0,0000	0,78

Tablica 3a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_N_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29,8	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	16,281	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	1,37	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	76	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	18,67	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	26,078	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,51	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	0,22	%

Tablica 3b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_N_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =		1192,62	mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	11	0,009223397	0,0001178	78,2970904	38,64493118	0,00000524	0,0020	0,00
	2	15 do 20	13	0,010900379	0,0002749	39,6521592	18,30170261	0,000004190	0,0077	0,01
	3	25 do 30	11	0,009223397	0,000432	21,3504566	11,38537236	0,000014100	0,0161	0,03
	4	35 do 40	7	0,005869435	0,000589	9,96508423	3,222095418	0,000033500	0,0108	0,04
	5	45 do 50	6	0,005030944	0,0007461	6,74298881	3,957922408	0,000065400	0,0259	0,06
	6	55 do 60	3	0,002515472	0,0009032	2,7850664	0,208492826	0,000113000	0,0024	0,06
	7	65 do 80	7	0,005869435	0,002278	2,57657358	1,999498108	0,000268000	0,0536	0,12
	8	85 do 100	2	0,001676981	0,002906	0,57707547	-0,37198017	0,000524000	-0,0195	0,10
	9	105 do 120	4	0,003353963	0,003534	0,94905564	0,546225634	0,000905000	0,0494	0,15
	10	125 do 140	2	0,001676981	0,004163	0,40283001	0,402830007	0,001440000	0,0580	0,21
	11	145 do 160	0	0	0,004791	0	-0,15473162	0,002140000	-0,0331	0,17
	12	165 do 180	1	0,000838491	0,005419	0,15473162	0,154731622	0,003050000	0,0472	0,22
	13	185 do 200	0	0	0,0060476	0	0	0,004190000	0,0000	0,22
	14	205 do 220	0	0	0,006676	0	0	0,005580000	0,0000	0,22
	15	225 do 240	0	0	0,007304	0	0	0,007240000	0,0000	0,22
	16	245 do 260	0	0	0,007933	0	0	0,009200000	0,0000	0,22
	17	265 do 280	0	0	0,008561	0	0	0,011500000	0,0000	0,22
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	0	0,014100000	0,0000	0,22
	19	305 do 350	0	0	0,02572	0	-0,02827962	0,022400000	-0,0633	0,16
	20	355 do 400	1	0,000838491	0,02965	0,02827962	0,028279617	0,033500000	0,0947	0,25
	21	405 do 450	0	0	0,03358	0	0	0,047700000	0,0000	0,25
	22	455 do 500	0	0	0,0375	0	-0,00567506	0,065400000	-0,0371	0,21
	23	505 do 1000	4	0,003353963	0,591	0,00567506	0,004822679	0,524000000	0,2527	0,47
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,00085238	0,000852385	1,770000000	0,1509	0,62
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	0	4,190000000	0,0000	0,62
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	-0,00038783	8,180000000	-0,3172	0,30
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	8,30362E-05	14,100000000	0,1171	0,42
	28	3005 do 4000	2	0,001676981	5,502	0,00030479	0	33,500000000	0,0000	0,42

Tablica 4a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	57,546	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	4,83	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	449	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	31,21	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	6,342	
Wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}=$	0,17	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	2,16	%

Tablica 4b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_1

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	29	0,024316229	0,0001178	206,419602	81,36279212	0,000000524	0,0043	0,00
	2	15 do 20	41	0,034378117	0,0002749	125,056881	72,65114361	0,000004190	0,0304	0,03
	3	25 do 30	27	0,022639248	0,000432	52,4056662	-24,4678407	0,000014100	-0,0345	0,00
	4	35 do 40	54	0,045278496	0,000589	76,8735069	44,28239433	0,000033500	0,1483	0,15
	5	45 do 50	29	0,024316229	0,0007461	32,5911126	-4,54310613	0,000065400	-0,0297	0,12
	6	55 do 60	40	0,033539626	0,0009032	37,1342187	23,88326889	0,000113000	0,2699	0,39
	7	65 do 80	36	0,030185664	0,002278	13,2509498	0,843827214	0,000268000	0,0226	0,41
	8	85 do 100	43	0,036055098	0,002906	12,4071226	2,442038388	0,000524000	0,1280	0,54
	9	105 do 120	42	0,035216608	0,003534	9,96508423	6,541029174	0,000905000	0,5920	1,13
	10	125 do 140	17	0,014254341	0,004163	3,42405506	0,973863192	0,001440000	0,1402	1,27
	11	145 do 160	14	0,011738869	0,004791	2,45019186	1,831265377	0,002140000	0,3919	1,66
	12	165 do 180	4	0,003353963	0,005419	0,61892649	-0,62891	0,003050000	-0,1918	1,47
	13	185 do 200	9	0,007546416	0,0060476	1,24783649	0,619847676	0,004190000	0,2597	1,73
	14	205 do 220	5	0,004192453	0,006676	0,62798881	0,053994657	0,005580000	0,0301	1,76
	15	225 do 240	5	0,004192453	0,007304	0,57399415	-0,06018509	0,007240000	-0,0436	1,72
	16	245 do 260	6	0,005030944	0,007933	0,63417925	-0,3452515	0,009200000	-0,3176	1,40
	17	265 do 280	10	0,008384907	0,008561	0,97943074	0,79693196	0,011500000	0,9165	2,32
	18	285 do 300	2	0,001676981	0,009189	0,18249878	-0,11090775	0,014100000	-0,1564	2,16
	19	305 do 350	9	0,007546416	0,02572	0,29340653	0,180288059	0,022400000	0,4038	2,56
	20	355 do 400	4	0,003353963	0,02965	0,11311847	0,063178586	0,033500000	0,2116	2,78
	21	405 do 450	2	0,001676981	0,03358	0,04993988	0,005220383	0,047700000	0,0249	2,80
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,0447195	0,027694311	0,065400000	0,1811	2,98
	23	505 do 1000	12	0,010061888	0,591	0,01702519	0,013615653	0,524000000	0,7135	3,70
	24	1005 do 1500	4	0,003353963	0,9837	0,00340954	0,00280017	1,770000000	0,4956	4,19
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,00060937	0,000135377	4,190000000	0,0567	4,25
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,00047399	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	4,32
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000387831	14,100000000	0,5468	4,86
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	4,86

Tablica 5a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	67,633	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	5,67	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	474	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	28,03	mm^{-1}
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	5,396	
Wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}=$	0,17	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	2,13	%

Tablica 5b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-0_CM-9_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{\text{tot}}=$			1192,62		mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza		
Jednostki		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%		
	1	0 do 10	35	0,029347173	0,0001178	249,127106	99,66896723	0,00000524	0,0052	0,01		
	2	15 do 20	49	0,041086042	0,0002749	149,458139	62,11536157	0,000004190	0,0260	0,03		
	3	25 do 30	45	0,03773208	0,000432	87,342777	14,74002042	0,000014100	0,0208	0,05		
	4	35 do 40	51	0,042763024	0,000589	72,6027565	31,02099219	0,000033500	0,1039	0,16		
	5	45 do 50	37	0,031024154	0,0007461	41,5817643	13,7311003	0,000065400	0,0898	0,25		
	6	55 do 60	30	0,02515472	0,0009032	27,850664	7,974239296	0,000113000	0,0901	0,34		
	7	65 do 80	54	0,045278496	0,002278	19,8764247	9,777604012	0,000268000	0,2620	0,60		
	8	85 do 100	35	0,029347173	0,002906	10,0988207	5,116278621	0,000524000	0,2681	0,87		
	9	105 do 120	21	0,017608304	0,003534	4,98254212	1,357072055	0,000905000	0,1228	0,99		
	10	125 do 140	18	0,015092832	0,004163	3,62547006	1,3502919	0,001440000	0,1944	1,18		
	11	145 do 160	13	0,010900379	0,004791	2,27517816	1,037325185	0,002140000	0,2220	1,41		
	12	165 do 180	8	0,006707925	0,005419	1,23785297	-0,42592901	0,003050000	-0,1299	1,28		
	13	185 do 200	12	0,010061888	0,0060476	1,66378198	0,784597647	0,004190000	0,3287	1,60		
	14	205 do 220	7	0,005869435	0,006676	0,87918433	0,19039135	0,005580000	0,1062	1,71		
	15	225 do 240	6	0,005030944	0,007304	0,68879298	0,371703361	0,007240000	0,2691	1,98		
	16	245 do 260	3	0,002515472	0,007933	0,31708962	0,0232604	0,009200000	0,0214	2,00		
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,29382922	0,020081048	0,011500000	0,0231	2,02		
	18	285 do 300	3	0,002515472	0,009189	0,27374817	0,078143822	0,014100000	0,1102	2,13		
	19	305 do 350	6	0,005030944	0,02572	0,19560435	-0,03063259	0,022400000	-0,0686	2,07		
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,126357171	0,033500000	0,4233	2,49		
	21	405 do 450	4	0,003353963	0,03358	0,09987977	0,032800516	0,047700000	0,1565	2,65		
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,06707925	0,052891594	0,065400000	0,3459	2,99		
	23	505 do 1000	10	0,008384907	0,591	0,01418766	0,008220968	0,524000000	0,4308	3,42		
	24	1005 do 1500	7	0,005869435	0,9837	0,00596669	0,005357323	1,770000000	0,9482	4,37		
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,00060937	-0,0012866	4,190000000	-0,5391	3,83		
	26	2005 do 2500	4	0,003353963	1,769	0,00189597	0,001508134	8,180000000	1,2337	5,06		
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000387831	14,100000000	0,5468	5,61		
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	5,61		

Tablica 6a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_N_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	31,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	14,862	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	1,25	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	75	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	20,19	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	28,568	
Wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}=$	0,49	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	0,30	%

Tablica 6b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_N_1

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	5	0,004192453	0,0001178	35,5895865	2,03775952	0,00000524	0,0001	0,00
	2	15 do 20	11	0,009223397	0,0002749	33,551827	10,26041983	0,000004190	0,0043	0,00
	3	25 do 30	12	0,010061888	0,000432	23,2914072	14,74990642	0,000014100	0,0208	0,03
	4	35 do 40	6	0,005030944	0,000589	8,54150077	5,170006363	0,000033500	0,0173	0,04
	5	45 do 50	3	0,002515472	0,0007461	3,37149441	0,586428002	0,000065400	0,0038	0,05
	6	55 do 60	3	0,002515472	0,0009032	2,7850664	1,312738645	0,000113000	0,0148	0,06
	7	65 do 80	4	0,003353963	0,002278	1,47232776	0,606714553	0,000268000	0,0163	0,08
	8	85 do 100	3	0,002515472	0,002906	0,86561321	0,153821475	0,000524000	0,0081	0,09
	9	105 do 120	3	0,002515472	0,003534	0,71179173	0,107546721	0,000905000	0,0097	0,10
	10	125 do 140	3	0,002515472	0,004163	0,60424501	0,429231305	0,001440000	0,0618	0,16
	11	145 do 160	1	0,000838491	0,004791	0,1750137	0,020282083	0,002140000	0,0043	0,16
	12	165 do 180	1	0,000838491	0,005419	0,15473162	-0,12256537	0,003050000	-0,0374	0,12
	13	185 do 200	2	0,001676981	0,0060476	0,277297	0,151699235	0,004190000	0,0636	0,19
	14	205 do 220	1	0,000838491	0,006676	0,12559776	0,125597762	0,005580000	0,0701	0,26
	15	225 do 240	0	0	0,007304	0	-0,21139308	0,007240000	-0,1530	0,10
	16	245 do 260	2	0,001676981	0,007933	0,21139308	0,211393082	0,009200000	0,1945	0,30
	17	265 do 280	0	0	0,008561	0	0	0,011500000	0,0000	0,30
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	0	0,014100000	0,0000	0,30
	19	305 do 350	0	0	0,02572	0	-0,08483885	0,022400000	-0,1900	0,11
	20	355 do 400	3	0,002515472	0,02965	0,08483885	-0,01504092	0,033500000	-0,0504	0,06
	21	405 do 450	4	0,003353963	0,03358	0,09987977	0,099879769	0,047700000	0,4764	0,54
	22	455 do 500	0	0	0,0375	0	-0,00567506	0,065400000	-0,0371	0,50
	23	505 do 1000	4	0,003353963	0,591	0,00567506	0,00311791	0,524000000	0,1634	0,66
	24	1005 do 1500	3	0,002515472	0,9837	0,00255715	0,002557154	1,770000000	0,4526	1,11
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	-0,00047399	4,190000000	-0,1986	0,92
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,00047399	0,000473991	8,180000000	0,3877	1,30
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	1,30
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	1,30

Tablica 7a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_N_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	17,796	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	1,49	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	66	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	14,83	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	23,857	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,62	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	0,12	%

Tablica 7b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_N_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm				
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	3	0,002515472	0,0001178	21,3537519	-6,09774291	0,00000524	-0,0003	0,00
	2	15 do 20	9	0,007546416	0,0002749	27,4514948	25,51054423	0,000004190	0,0107	0,01
	3	25 do 30	1	0,000838491	0,000432	1,9409506	-8,02413363	0,000014100	-0,0113	0,00
	4	35 do 40	7	0,005869435	0,000589	9,96508423	5,469758355	0,000033500	0,0183	0,02
	5	45 do 50	4	0,003353963	0,0007461	4,49532587	0,781904002	0,000065400	0,0051	0,02
	6	55 do 60	4	0,003353963	0,0009032	3,71342187	1,504930234	0,000113000	0,0170	0,04
	7	65 do 80	6	0,005030944	0,002278	2,20849164	1,631416168	0,000268000	0,0437	0,08
	8	85 do 100	2	0,001676981	0,002906	0,57707547	0,10254765	0,000524000	0,0054	0,09
	9	105 do 120	2	0,001676981	0,003534	0,47452782	-0,33113219	0,000905000	-0,0300	0,06
	10	125 do 140	4	0,003353963	0,004163	0,80566001	0,630646309	0,001440000	0,0908	0,15
	11	145 do 160	1	0,000838491	0,004791	0,1750137	0,175013705	0,002140000	0,0375	0,19
	12	165 do 180	0	0	0,005419	0	-0,277297	0,003050000	-0,0846	0,10
	13	185 do 200	2	0,001676981	0,0060476	0,277297	0,277296997	0,004190000	0,1162	0,22
	14	205 do 220	0	0	0,006676	0	0	0,005580000	0,0000	0,22
	15	225 do 240	0	0	0,007304	0	-0,10569654	0,007240000	-0,0765	0,14
	16	245 do 260	1	0,000838491	0,007933	0,10569654	0,007753467	0,009200000	0,0071	0,15
	17	265 do 280	1	0,000838491	0,008561	0,09794307	0,097943074	0,011500000	0,1126	0,26
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	-0,09780218	0,014100000	-0,1379	0,12
	19	305 do 350	3	0,002515472	0,02572	0,09780218	0,041242941	0,022400000	0,0924	0,22
	20	355 do 400	2	0,001676981	0,02965	0,05655923	0,006619351	0,033500000	0,0222	0,24
	21	405 do 450	2	0,001676981	0,03358	0,04993988	0,005220383	0,047700000	0,0249	0,26
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,0447195	0,036206906	0,065400000	0,2368	0,50
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,0085126	0,008512596	0,524000000	0,4461	0,95
	24	1005 do 1500	0	0	0,9837	0	-0,0018281	1,770000000	-0,3236	0,62
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,0018281	0,001354113	4,190000000	0,5674	1,19
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	0,000473991	8,180000000	0,3877	1,58
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	1,58
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	1,58

Tablica 8a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	47,493	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	3,98	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	241	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	20,30	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	7,659	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,28	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	1,54	%

Tablica 8b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	12	0,010061888	0,0001178	85,41500769	18,31135365	0,000000524	0,0010	0,00
	2	15 do 20	22	0,018446794	0,0002749	67,10365403	45,75319744	0,000004190	0,0192	0,02
	3	25 do 30	11	0,009223397	0,000432	21,35045669	-0,00329533	0,000014100	0,0000	0,02
	4	35 do 40	15	0,01257736	0,000589	21,35375192	12,36310017	0,000033500	0,0414	0,06
	5	45 do 50	8	0,006707925	0,0007461	8,99065175	-1,2212584	0,000065400	-0,0080	0,05
	6	55 do 60	11	0,009223397	0,0009032	10,21191015	3,586435233	0,000113000	0,0405	0,09
	7	65 do 80	18	0,015092832	0,002278	6,625474916	0,566182474	0,000268000	0,0152	0,11
	8	85 do 100	21	0,017608304	0,002906	6,059292441	1,551278147	0,000524000	0,0813	0,19
	9	105 do 120	19	0,015931323	0,003534	4,508014295	0,882544235	0,000905000	0,0799	0,27
	10	125 do 140	18	0,015092832	0,004163	3,62547006	2,400374127	0,001440000	0,3457	0,62
	11	145 do 160	7	0,005869435	0,004791	1,225095932	-0,16748866	0,002140000	-0,0368	0,58
	12	165 do 180	9	0,007546416	0,005419	1,392584597	0,144748111	0,003050000	0,0441	0,62
	13	185 do 200	9	0,007546416	0,0060476	1,247836485	-0,38493442	0,004190000	-0,1613	0,46
	14	205 do 220	13	0,010900379	0,006676	1,632770905	0,59958143	0,005580000	0,3346	0,80
	15	225 do 240	9	0,007546416	0,007304	1,033189476	0,610403312	0,007240000	0,4419	1,24
	16	245 do 260	4	0,003353963	0,007933	0,422786164	0,226900015	0,009200000	0,2087	1,45
	17	265 do 280	2	0,001676981	0,008561	0,195886149	0,195886149	0,011500000	0,2253	1,67
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	-0,09780218	0,014100000	-0,1379	1,54
	19	305 do 350	3	0,002515472	0,02572	0,097802176	-0,04359591	0,022400000	-0,0977	1,44
	20	355 do 400	5	0,004192453	0,02965	0,141398087	-0,00842157	0,033500000	-0,0282	1,41
	21	405 do 450	6	0,005030944	0,03358	0,149819653	0,038020899	0,047700000	0,1814	1,59
	22	455 do 500	5	0,004192453	0,0375	0,111798755	0,104704925	0,065400000	0,6848	2,28
	23	505 do 1000	5	0,004192453	0,591	0,00709383	0,005389061	0,524000000	0,2824	2,56
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	-0,0007327	1,770000000	-0,1297	2,43
	25	1505 do 2000	4	0,003353963	1,376	0,002437473	0,001015499	4,190000000	0,4255	2,85
	26	2005 do 2500	3	0,002515472	1,769	0,001421974	0,001421974	8,180000000	1,1632	4,02
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	4,02
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	4,02

Tablica 9a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	31,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	52,045	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	4,36	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	221	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	16,99	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	6,989	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,32	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	1,18	%

Tablica 9b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P1-30_CM-9_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62		mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza		
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%		
	1	0 do 10	8	0,006707925	0,0001178	56,94333846	14,24101316	0,000000524	0,0007	0,00		
	2	15 do 20	14	0,011738869	0,0002749	42,70232529	23,2928193	0,000004190	0,0098	0,01		
	3	25 do 30	10	0,006384907	0,000432	19,40950599	-3,36782939	0,000014100	-0,0047	0,01		
	4	35 do 40	16	0,013415851	0,000589	22,77733538	7,043694821	0,000033500	0,0236	0,03		
	5	45 do 50	14	0,011738869	0,0007461	15,73364056	1,80830854	0,000065400	0,0118	0,04		
	6	55 do 60	15	0,01257736	0,0009032	13,92533202	7,667939045	0,000113000	0,0866	0,13		
	7	65 do 80	17	0,014254341	0,002278	6,257392976	1,929326947	0,000268000	0,0517	0,18		
	8	85 do 100	15	0,01257736	0,002906	4,32606603	2,429954748	0,000524000	0,1273	0,31		
	9	105 do 120	8	0,006707925	0,003634	1,898111282	-1,52594377	0,000905000	-0,1381	0,17		
	10	125 do 140	17	0,014254341	0,004163	3,424055056	2,198959124	0,001440000	0,3167	0,49		
	11	145 do 160	7	0,005869435	0,004791	1,225095932	-1,0958784	0,002140000	-0,2345	0,25		
	12	165 do 180	15	0,01257736	0,005419	2,320974328	0,37989535	0,003050000	0,1159	0,37		
	13	185 do 200	14	0,011738869	0,0060476	1,941078977	1,313090168	0,004190000	0,5502	0,92		
	14	205 do 220	5	0,004192453	0,006676	0,62798881	0,513189979	0,005680000	0,2864	1,20		
	15	225 do 240	1	0,000838491	0,007304	0,114798831	-0,30798733	0,007240000	-0,2230	0,98		
	16	245 do 260	4	0,003353963	0,007933	0,422786164	-0,16487228	0,009200000	-0,1517	0,83		
	17	265 do 280	6	0,005030944	0,008561	0,587658446	0,587658446	0,011500000	0,6758	1,50		
	18	285 do 300	0	0	0,009189	0	-0,22820508	0,014100000	-0,3218	1,18		
	19	305 do 350	7	0,005869435	0,02572	0,228205078	0,143366226	0,022400000	0,3211	1,50		
	20	355 do 400	3	0,002515472	0,02965	0,084838852	0,009929026	0,033500000	0,0333	1,54		
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	0,007830574	0,047700000	0,0374	1,57		
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,067079253	0,057147891	0,065400000	0,3737	1,95		
	23	505 do 1000	7	0,005869435	0,591	0,009931361	0,005669439	0,524000000	0,2971	2,25		
	24	1005 do 1500	5	0,004192453	0,9837	0,004261923	0,003043186	1,770000000	0,5386	2,78		
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000744745	4,190000000	0,3120	3,10		
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	-0,00107733	8,180000000	-0,8813	2,21		
	27	2505 do 3000	4	0,003353963	2,162	0,001551324	0,001551324	14,100000000	2,1874	4,40		
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	4,40		

Tablica 10a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_N_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	32,1	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	25,122	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	2,11	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	65	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	10,35	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	16,900	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,77	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	0,14	%

Tablica 10b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_N_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	3	0,002515472	0,0001178	21,3537519	-9,147909	0,000000524	-0,0005	0,00
	2	15 do 20	10	0,008384907	0,0002749	30,5016609	18,85595733	0,000004190	0,0079	0,01
	3	25 do 30	6	0,005030944	0,000432	11,6457036	5,951369749	0,000014100	0,0084	0,02
	4	35 do 40	4	0,003353963	0,000589	5,69433385	3,446670908	0,000033500	0,0115	0,03
	5	45 do 50	2	0,001676981	0,0007461	2,24766294	1,319307469	0,000065400	0,0086	0,04
	6	55 do 60	1	0,000838491	0,0009032	0,92835547	-2,01630005	0,000113000	-0,0228	0,01
	7	65 do 80	8	0,006707925	0,002278	2,94465552	2,367580048	0,000268000	0,0635	0,08
	8	85 do 100	2	0,001676981	0,002906	0,57707547	-0,13471626	0,000524000	-0,0071	0,07
	9	105 do 120	3	0,002515472	0,003534	0,71179173	0,711791731	0,000905000	0,0644	0,13
	10	125 do 140	0	0	0,004163	0	-0,1750137	0,001440000	-0,0252	0,11
	11	145 do 160	1	0,000838491	0,004791	0,1750137	-0,13444954	0,002140000	-0,0288	0,08
	12	165 do 180	2	0,001676981	0,005419	0,30946324	0,309463244	0,003050000	0,0944	0,17
	13	185 do 200	0	0	0,0060476	0	-0,12559776	0,004190000	-0,0526	0,12
	14	205 do 220	1	0,000838491	0,006676	0,12559776	0,010798931	0,005580000	0,0060	0,13
	15	225 do 240	1	0,000838491	0,007304	0,11479883	0,114798831	0,007240000	0,0831	0,21
	16	245 do 260	0	0	0,007933	0	0	0,009200000	0,0000	0,21
	17	265 do 280	0	0	0,008561	0	-0,09124939	0,011500000	-0,1049	0,11
	18	285 do 300	1	0,000838491	0,009189	0,09124939	0,026047941	0,014100000	0,0367	0,14
	19	305 do 350	2	0,001676981	0,02572	0,06520145	0,065201451	0,022400000	0,1461	0,29
	20	355 do 400	0	0	0,02965	0	0	0,033500000	0,0000	0,29
	21	405 do 450	0	0	0,03358	0	-0,0447195	0,047700000	-0,2133	0,08
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,0447195	0,036206906	0,065400000	0,2368	0,31
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,0085126	0,003398288	0,524000000	0,1781	0,49
	24	1005 do 1500	6	0,005030944	0,9837	0,00511431	0,003895571	1,770000000	0,6895	1,18
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,00121874	0,000744745	4,190000000	0,3120	1,49
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,00047399	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	1,56
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000387831	14,100000000	0,5468	2,11
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	2,11

Tablica 11a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_N_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	32,1	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	28,504	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	2,39	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	67	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	9,40	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	14,895	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,80	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	0,09	%

Tablica 11b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_N_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm				
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	5	0,004192453	0,0001178	35,5895865	20,33875607	0,00000524	0,0011	0,00
	2	15 do 20	5	0,004192453	0,0002749	15,2508305	3,605126868	0,000004190	0,0015	0,00
	3	25 do 30	6	0,005030944	0,000432	11,6457036	3,104202826	0,000014100	0,0044	0,01
	4	35 do 40	6	0,005030944	0,000589	8,54150077	7,4176693	0,000033500	0,0248	0,03
	5	45 do 50	1	0,000838491	0,0007461	1,12383147	0,195476001	0,000065400	0,0013	0,03
	6	55 do 60	1	0,000838491	0,0009032	0,92835547	-0,17589035	0,000113000	-0,0020	0,03
	7	65 do 80	3	0,002515472	0,002278	1,10424582	0,815708084	0,000268000	0,0219	0,05
	8	85 do 100	1	0,000838491	0,002906	0,28853774	-0,423254	0,000524000	-0,0222	0,03
	9	105 do 120	3	0,002515472	0,003534	0,71179173	0,510376727	0,000905000	0,0462	0,08
	10	125 do 140	1	0,000838491	0,004163	0,201415	0,026401299	0,001440000	0,0038	0,08
	11	145 do 160	1	0,000838491	0,004791	0,1750137	0,175013705	0,002140000	0,0375	0,12
	12	165 do 180	0	0	0,005419	0	-0,1386485	0,003050000	-0,0423	0,08
	13	185 do 200	1	0,000838491	0,0060476	0,1386485	0,138648498	0,004190000	0,0581	0,13
	14	205 do 220	0	0	0,006676	0	0	0,005580000	0,0000	0,13
	15	225 do 240	0	0	0,007304	0	0	0,007240000	0,0000	0,13
	16	245 do 260	0	0	0,007933	0	-0,09794307	0,009200000	-0,0901	0,04
	17	265 do 280	1	0,000838491	0,008561	0,09794307	-0,35830388	0,011500000	-0,4120	-0,37
	18	285 do 300	5	0,004192453	0,009189	0,45624696	0,325844056	0,014100000	0,4594	0,09
	19	305 do 350	4	0,003353963	0,02572	0,1304029	0,073843667	0,022400000	0,1654	0,26
	20	355 do 400	2	0,001676981	0,02965	0,05655923	0,031589293	0,033500000	0,1058	0,36
	21	405 do 450	1	0,000838491	0,03358	0,02496994	-0,01974956	0,047700000	-0,0942	0,27
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,0447195	0,031950609	0,065400000	0,2090	0,48
	23	505 do 1000	9	0,007546416	0,591	0,01276889	0,011064124	0,524000000	0,5798	1,06
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,00170477	-0,00134207	1,770000000	-0,2375	0,82
	25	1505 do 2000	5	0,004192453	1,376	0,00304684	0,00257285	4,190000000	1,0780	1,90
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,00047399	0,000473991	8,180000000	0,3877	2,29
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	-0,0001524	14,100000000	-0,2149	2,07
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,0001524		33,500000000	0,0000	2,07

Tablica 12a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	32,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	46,010	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	3,86	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	324	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	28,17	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	7,906	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,20	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,02	%

Tablica 12b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porow zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porow w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%	
	1	0 do 10	10	0,008384907	0,0001178	71,17917307	16,27618341	0,000000524	0,0009	0,00	
	2	15 do 20	18	0,015092832	0,0002749	54,90298966	35,49348367	0,000004190	0,0149	0,02	
	3	25 do 30	10	0,008384907	0,000432	19,40950599	-23,2979979	0,000014100	-0,0329	-0,02	
	4	35 do 40	30	0,02515472	0,000589	42,70750384	16,85938006	0,000033500	0,0565	0,04	
	5	45 do 50	23	0,019285285	0,0007461	25,84812378	10,06608082	0,000065400	0,0658	0,11	
	6	55 do 60	17	0,014254341	0,0009032	15,78204296	2,531093126	0,000113000	0,0286	0,13	
	7	65 do 80	36	0,030185664	0,002278	13,25094983	4,306280037	0,000268000	0,1154	0,25	
	8	85 do 100	31	0,02599321	0,002906	8,944669794	2,538544218	0,000524000	0,1330	0,38	
	9	105 do 120	27	0,022639248	0,003534	6,406125576	2,176410507	0,000905000	0,1970	0,58	
	10	125 do 140	21	0,017608304	0,004163	4,22971507	1,779523205	0,001440000	0,2563	0,84	
	11	145 do 160	14	0,011738869	0,004791	2,450191865	-0,33497733	0,002140000	-0,0717	0,76	
	12	165 do 180	18	0,015092832	0,005419	2,785169193	0,705441718	0,003050000	0,2152	0,98	
	13	185 do 200	15	0,01257736	0,0060476	2,079727476	0,698152094	0,004190000	0,2925	1,27	
	14	205 do 220	11	0,009223397	0,006676	1,381575381	0,922380059	0,005580000	0,5147	1,79	
	15	225 do 240	4	0,003353963	0,007304	0,459195322	-0,59777009	0,007240000	-0,4328	1,35	
	16	245 do 260	10	0,008384907	0,007933	1,056965409	0,469306963	0,009200000	0,4318	1,79	
	17	265 do 280	6	0,005030944	0,008561	0,587658446	0,496409054	0,011500000	0,5709	2,36	
	18	285 do 300	1	0,000838491	0,009189	0,091249392	-0,23475786	0,014100000	-0,3310	2,02	
	19	305 do 350	10	0,008384907	0,02572	0,326007255	0,26944802	0,022400000	0,6036	2,63	
	20	355 do 400	2	0,001676981	0,02965	0,056559235	0,056559235	0,033500000	0,1895	2,82	
	21	405 do 450	0	0	0,03358	0	-0,0447195	0,047700000	-0,2133	2,60	
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,044719502	0,039044438	0,065400000	0,2554	2,86	
	23	505 do 1000	4	0,003353963	0,591	0,005675064	0,004822679	0,524000000	0,2527	3,11	
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,000852385	0,000852385	1,770000000	0,1509	3,26	
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	-0,00094798	4,190000000	-0,3972	2,87	
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000947983	8,180000000	0,7754	3,64	
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	-0,0001524	14,100000000	-0,2149	3,43	
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	3,43	

Tablica 13a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	32,0	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	42,949	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	3,60	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	252	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	23,47	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	8,469	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,25	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	1,70	%

Tablica 13b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P2-30_CM-9_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%	
	1	0 do 10	10	0,008384907	0,0001178	71,17917307	34,57717996	0,000000524	0,0018	0,00	
	2	15 do 20	12	0,010061888	0,0002749	36,60199311	24,95628951	0,000004190	0,0105	0,01	
	3	25 do 30	6	0,005030944	0,000432	11,64570359	-12,5552153	0,000014100	-0,0177	-0,01	
	4	35 do 40	17	0,014254341	0,000589	24,20091884	6,219615345	0,000033500	0,0208	0,02	
	5	45 do 50	16	0,013415851	0,0007461	17,9813035	9,626104286	0,000065400	0,0630	0,08	
	6	55 do 60	9	0,007546416	0,0009032	8,355199213	-2,31917704	0,000113000	-0,0262	0,05	
	7	65 do 80	29	0,024316229	0,002278	10,67437625	2,595319665	0,000268000	0,0696	0,12	
	8	85 do 100	28	0,023477738	0,002906	8,079056588	4,045570114	0,000524000	0,2120	0,33	
	9	105 do 120	17	0,014254341	0,003534	4,033486474	0,408016414	0,000905000	0,0369	0,37	
	10	125 do 140	18	0,015092832	0,004163	3,62547006	1,700319309	0,001440000	0,2448	0,62	
	11	145 do 160	11	0,009223397	0,004791	1,925150751	0,068371289	0,002140000	0,0146	0,63	
	12	165 do 180	12	0,010061888	0,005419	1,856779462	0,886239974	0,003050000	0,2703	0,90	
	13	185 do 200	7	0,005869435	0,0060476	0,970539489	0,342550679	0,004190000	0,1435	1,04	
	14	205 do 220	5	0,004192453	0,006676	0,62798881	0,053994657	0,005680000	0,0301	1,07	
	15	225 do 240	5	0,004192453	0,007304	0,573994153	-0,48297126	0,007240000	-0,3497	0,72	
	16	245 do 260	10	0,008384907	0,007933	1,056965409	0,371363889	0,009200000	0,3417	1,07	
	17	265 do 280	7	0,005869435	0,008561	0,68560152	0,229354562	0,011500000	0,2638	1,33	
	18	285 do 300	5	0,004192453	0,009189	0,456246958	0,260642605	0,014100000	0,3675	1,70	
	19	305 do 350	6	0,005030944	0,02572	0,195604353	0,082485883	0,022400000	0,1848	1,88	
	20	355 do 400	4	0,003353963	0,02965	0,11311847	-0,03670118	0,033500000	-0,1229	1,76	
	21	405 do 450	6	0,005030944	0,03358	0,149819653	0,105100151	0,047700000	0,5013	2,26	
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,044719502	0,036206906	0,065400000	0,2368	2,50	
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,008512596	0,006807826	0,524000000	0,3567	2,85	
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	0,001704769	1,770000000	0,3017	3,16	
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	0	4,190000000	0,0000	3,16	
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	-0,00038783	8,180000000	-0,3172	2,84	
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	3,17	
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	3,17	

Plansza 2. Charakterystyka porów powietrznych betonów z popiołem P3 oraz cementami CM-9 i CM-2

Tablica 1. Zestawienie wyników badań charakterystyki porów powietrznych

Oznaczenie	A [%]	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]	A ₃₀₀ [%]
P3-0_CM_9	5,55	36,66	0,13	2,77
P3-20_CM_9	5,67	31,42	0,15	2,94
P3-40_CM_9	5,99	19,38	0,25	2,10
P3-0_CM_2	5,47	26,08	0,18	2,59
P3-20_CM_2	4,53	34,15	0,16	2,11
P3-40_CM_2	7,05	23,32	0,19	2,71

Tablica 2a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-0_CM_9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	65,678	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,51	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	575	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	35,02	mm ⁻¹
Stosunek zaczynu/powietrze R=	5,193	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,13	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,77	%

Tablica 2b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-0_CM_9_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	41	0,034378117	0,0001178	291,83461	84,42331532	0,00000524	0,0044	0,00
	2	15 do 20	68	0,057017365	0,0002749	207,411294	85,13140654	0,000004190	0,0357	0,04
	3	25 do 30	63	0,052824912	0,000432	122,279888	61,0657989	0,000014100	0,0861	0,13
	4	35 do 40	43	0,036055098	0,000589	61,2140888	19,6323245	0,000033500	0,0658	0,19
	5	45 do 50	37	0,031024154	0,0007461	41,5817643	7,232612022	0,000065400	0,0473	0,24
	6	55 do 60	37	0,031024154	0,0009032	34,3491523	6,743006837	0,000113000	0,0762	0,32
	7	65 do 80	75	0,062886799	0,002278	27,6061455	12,02510778	0,000268000	0,3223	0,64
	8	85 do 100	54	0,045278496	0,002906	15,5810377	7,514064758	0,000524000	0,3937	1,03
	9	105 do 120	34	0,028508682	0,003534	8,06697295	1,823107845	0,000905000	0,1650	1,20
	10	125 do 140	31	0,02599321	0,004163	6,2438651	4,843755466	0,001440000	0,6975	1,89
	11	145 do 160	8	0,006707925	0,004791	1,40010964	0,626451528	0,002140000	0,1341	2,03
	12	165 do 180	5	0,004192453	0,005419	0,77365811	-0,61282687	0,003050000	-0,1869	1,84
	13	185 do 200	10	0,008384907	0,0060476	1,38648498	-0,37188368	0,004190000	-0,1558	1,69
	14	205 do 220	14	0,011738869	0,006676	1,75836867	1,299173345	0,005580000	0,7249	2,41
	15	225 do 240	4	0,003353963	0,007304	0,45919532	-0,28068046	0,007240000	-0,2032	2,21
	16	245 do 260	7	0,005869435	0,007933	0,73987579	0,250160415	0,009200000	0,2301	2,44
	17	265 do 280	5	0,004192453	0,008561	0,48971537	0,307216588	0,011500000	0,3533	2,79
	18	285 do 300	2	0,001676981	0,009189	0,18249878	-0,01310557	0,014100000	-0,0185	2,77
	19	305 do 350	6	0,005030944	0,02572	0,19560435	0,1107655	0,022400000	0,2481	3,02
	20	355 do 400	3	0,002515472	0,02965	0,08483885	-0,04001086	0,033500000	-0,1340	2,89
	21	405 do 450	5	0,004192453	0,03358	0,12484971	0,035410707	0,047700000	0,1689	3,05
	22	455 do 500	4	0,003353963	0,0375	0,089439	0,07667011	0,065400000	0,5014	3,56
	23	505 do 1000	9	0,007546416	0,591	0,01276889	0,007654586	0,524000000	0,4011	3,96
	24	1005 do 1500	6	0,005030944	0,9837	0,00511431	0,004504939	1,770000000	0,7974	4,75
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,00060937	-0,00081261	4,190000000	-0,3405	4,41
	26	2005 do 2500	3	0,002515472	1,769	0,001421974	0,001421974	8,180000000	1,1632	5,58
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	5,58
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	5,58

Tablica 3a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-0_CM_9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	66,548	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,58	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	637	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	38,29	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,125	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,12	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,76	%

Tablica 3b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-0_CM_9_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	53	0,044440005	0,0001178	377,249617	111,8851672	0,000000524	0,0059	0,01
	2	15 do 20	87	0,072948687	0,0002749	265,36445	143,0845623	0,000004190	0,0600	0,07
	3	25 do 30	63	0,052824912	0,000432	122,279888	16,93471159	0,000014100	0,0239	0,09
	4	35 do 40	74	0,062048309	0,000589	105,345176	49,15360271	0,000033500	0,1647	0,25
	5	45 do 50	50	0,041924533	0,0007461	56,1915734	17,20064377	0,000065400	0,1125	0,37
	6	55 do 60	42	0,035216608	0,0009032	38,9909297	14,3294397	0,000113000	0,1619	0,53
	7	65 do 80	67	0,056178874	0,002278	24,66149	12,54290508	0,000268000	0,3361	0,86
	8	85 do 100	42	0,035216608	0,002906	12,1185849	5,000667576	0,000524000	0,2620	1,13
	9	105 do 120	30	0,02515472	0,003534	7,11791731	2,888202238	0,000905000	0,2614	1,39
	10	125 do 140	21	0,017608304	0,004163	4,22971507	2,479578023	0,001440000	0,3571	1,75
	11	145 do 160	10	0,008384907	0,004791	1,75013705	-1,49922701	0,002140000	-0,3208	1,42
	12	165 do 180	21	0,017608304	0,005419	3,24936406	2,27882457	0,003050000	0,6950	2,12
	13	185 do 200	7	0,005869435	0,0060476	0,97053949	-0,15984037	0,004190000	-0,0670	2,05
	14	205 do 220	9	0,007546416	0,006676	1,13037986	-0,01760845	0,005580000	-0,0098	2,04
	15	225 do 240	10	0,008384907	0,007304	1,14798831	0,830898683	0,007240000	0,6016	2,64
	16	245 do 260	3	0,002515472	0,007933	0,31708962	0,0232604	0,009200000	0,0214	2,67
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,29382922	-0,34491652	0,011500000	-0,3967	2,27
	18	285 do 300	7	0,005869435	0,009189	0,63874574	0,345339212	0,014100000	0,4869	2,76
	19	305 do 350	9	0,007546416	0,02572	0,29340653	0,123728824	0,022400000	0,2772	3,03
	20	355 do 400	6	0,005030944	0,02965	0,1696777	0,094767878	0,033500000	0,3175	3,35
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,07490983	0,007830574	0,047700000	0,0374	3,39
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,06707925	0,055729125	0,065400000	0,3645	3,75
	23	505 do 1000	8	0,006707925	0,591	0,01135013	0,007940589	0,524000000	0,4161	4,17
	24	1005 do 1500	4	0,003353963	0,9837	0,00340954	0,002190802	1,770000000	0,3878	4,56
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,00121874	0,000270754	4,190000000	0,1134	4,67
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,00094798	0,000560152	8,180000000	0,4582	5,13
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000387831	14,100000000	0,5468	5,67
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	5,67

Tablica 4a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-20_CM_9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	30,2	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T _a =	66,192	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,55	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	516	
Powierzchnia właściwa systemu porów α=	31,18	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,405	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,15	mm
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ =	3,02	%

Tablica 4b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-20_CM_9_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T _{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	28	0.023477738	0.0001178	199.3016846	101.6963696	0.00000524	0.0053	0.01
	2	15 do 20	32	0.026831701	0.0002749	97.60531496	39.37679698	0.000004190	0.0165	0.02
	3	25 do 30	30	0.02515472	0.000432	58.22851797	-18.6449889	0.000014100	-0.0263	0.00
	4	35 do 40	54	0.045278496	0.000589	76.87350692	22.92959642	0.000033500	0.0768	0.07
	5	45 do 50	48	0.040247552	0.0007461	53.9439105	27.02160192	0.000065400	0.1767	0.25
	6	55 do 60	29	0.024316229	0.0009032	26.92230857	9.254375466	0.000113000	0.1046	0.35
	7	65 do 80	48	0.040247552	0.002278	17.66793311	4.972272756	0.000268000	0.1333	0.49
	8	85 do 100	44	0.036893589	0.002906	12.69566035	6.289534777	0.000524000	0.3296	0.82
	9	105 do 120	27	0.022639248	0.003534	6.406125576	1.7735805	0.000905000	0.1605	0.98
	10	125 do 140	23	0.019285285	0.004163	4.632545076	0.432216166	0.001440000	0.0622	1.04
	11	145 do 160	24	0.020123776	0.004791	4.200328911	1.724622961	0.002140000	0.3691	1.41
	12	165 do 180	16	0.013415851	0.005419	2.47570595	0.118681477	0.003050000	0.0362	1.44
	13	185 do 200	17	0.014254341	0.0060476	2.357024472	0.598655805	0.004190000	0.2508	1.70
	14	205 do 220	14	0.011738869	0.006676	1.758368667	0.725179192	0.005580000	0.4046	2.10
	15	225 do 240	9	0.007546416	0.007304	1.033189476	-0.76365172	0.007240000	-0.5529	1.55
	16	245 do 260	17	0.014254341	0.007933	1.796841195	1.013296601	0.009200000	0.9322	2.48
	17	265 do 280	8	0.006707925	0.008561	0.783544594	0.053549462	0.011500000	0.0616	2.54
	18	285 do 300	8	0.006707925	0.009189	0.729995132	0.338786427	0.014100000	0.4777	3.02
	19	305 do 350	12	0.010061888	0.02572	0.391208706	0.278090236	0.022400000	0.6229	3.64
	20	355 do 400	4	0.003353963	0.02965	0.11311847	-0.08664107	0.033500000	-0.2902	3.35
	21	405 do 450	8	0.006707925	0.03358	0.199759538	0.132680285	0.047700000	0.6329	3.98
	22	455 do 500	3	0.002515472	0.0375	0.067079253	0.058566657	0.065400000	0.3830	4.37
	23	505 do 1000	6	0.005030944	0.591	0.008512596	0.003398288	0.524000000	0.1781	4.55
	24	1005 do 1500	6	0.005030944	0.9837	0.005114307	0.004504939	1.770000000	0.7974	5.34
	25	1505 do 2000	1	0.000838491	1.376	0.000609368	0.000609368	4.190000000	0.2553	5.60
	26	2005 do 2500	0	0	1.769	0	0	8.180000000	0.0000	5.60
	27	2505 do 3000	0	0	2.162	0	0	14.100000000	0.0000	5.60
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	5.60

Tablica 5a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-20_CM_9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	30,2	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	68,991	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,78	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	546	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	31,66	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,186	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,15	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,85	%

Tablica 5b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-20_CM_9_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	37	0.031024154	0.0001178	263.3629404	43.75098172	0.000000524	0.0023	0.00
	2	15 do 20	72	0.060371327	0.0002749	219.6119587	159.4424901	0.000004190	0.0668	0.07
	3	25 do 30	31	0.02599321	0.000432	60.16946857	-13.8568714	0.000014100	-0.0195	0.05
	4	35 do 40	52	0.043601514	0.000589	74.02634	24.57775537	0.000033500	0.0823	0.13
	5	45 do 50	44	0.036893589	0.0007461	49.44858462	21.59792058	0.000065400	0.1413	0.27
	6	55 do 60	30	0.02515472	0.0009032	27.85066404	13.86355033	0.000113000	0.1567	0.43
	7	65 do 80	38	0.031862645	0.002278	13.98711371	3.311217505	0.000268000	0.0887	0.52
	8	85 do 100	37	0.031024154	0.002906	10.67589621	0.473548066	0.000524000	0.0248	0.54
	9	105 do 120	43	0.036055098	0.003534	10.20234814	5.368388061	0.000905000	0.4858	1.03
	10	125 do 140	24	0.020123776	0.004163	4.83396008	1.858727101	0.001440000	0.2677	1.30
	11	145 do 160	17	0.014254341	0.004791	2.975232978	-0.11939946	0.002140000	-0.0256	1.27
	12	165 do 180	20	0.016769813	0.005419	3.094632437	1.569498955	0.003050000	0.4787	1.75
	13	185 do 200	11	0.009223397	0.0060476	1.525133482	0.77154691	0.004190000	0.3233	2.07
	14	205 do 220	6	0.005030944	0.006676	0.753586572	-0.96839589	0.005580000	-0.5404	1.53
	15	225 do 240	15	0.01257736	0.007304	1.721982459	0.66501705	0.007240000	0.4815	2.01
	16	245 do 260	10	0.008384907	0.007933	1.056965409	0.371363889	0.009200000	0.3417	2.36
	17	265 do 280	7	0.005869435	0.008561	0.68560152	0.046855779	0.011500000	0.0539	2.41
	18	285 do 300	7	0.005869435	0.009189	0.638745741	0.312738486	0.014100000	0.4410	2.85
	19	305 do 350	10	0.008384907	0.02572	0.326007255	0.184609167	0.022400000	0.4135	3.26
	20	355 do 400	5	0.004192453	0.02965	0.141398087	-0.00842157	0.033500000	-0.0282	3.24
	21	405 do 450	6	0.005030944	0.03358	0.149819653	0.0827404	0.047700000	0.3947	3.63
	22	455 do 500	3	0.002515472	0.0375	0.067079253	0.045797764	0.065400000	0.2995	3.93
	23	505 do 1000	15	0.01257736	0.591	0.021281489	0.018724335	0.524000000	0.9812	4.91
	24	1005 do 1500	3	0.002515472	0.9837	0.002557154	0.001338417	1.770000000	0.2369	5.15
	25	1505 do 2000	2	0.001676981	1.376	0.001218736	0.000744745	4.190000000	0.3120	5.46
	26	2005 do 2500	1	0.000838491	1.769	0.000473991	0.000473991	8.180000000	0.3877	5.85
	27	2505 do 3000	0	0	2.162	0	0	14.100000000	0.0000	5.85
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	5.85

Tablica 6a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-40_CM_9_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T _a =	70,443	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,91	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	361	
Powierzchnia właściwa systemu porów α=	20,50	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,282	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,23	mm
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ =	2,11	%

Tablica 6b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-40_CM_9_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T _{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	7	0.005869435	0.0001178	49.82542115	1.022763673	0.000000524	0.0001	0.00
	2	15 do 20	16	0.013415851	0.0002749	48.80265748	13.86554669	0.000004190	0.0058	0.01
	3	25 do 30	18	0.015092832	0.000432	34.93711078	-3.49964268	0.000014100	-0.0049	0.00
	4	35 do 40	27	0.022639248	0.000589	38.43675346	9.217135273	0.000033500	0.0309	0.03
	5	45 do 50	26	0.021800757	0.0007461	29.21961819	18.07935257	0.000065400	0.1182	0.15
	6	55 do 60	12	0.010061888	0.0009032	11.14026562	0.833971304	0.000113000	0.0094	0.16
	7	65 do 80	28	0.023477738	0.002278	10.30629431	0.496011313	0.000268000	0.0133	0.17
	8	85 do 100	34	0.028508682	0.002906	9.810283	5.776796526	0.000524000	0.3027	0.48
	9	105 do 120	17	0.014254341	0.003534	4.033486474	0.609431418	0.000905000	0.0552	0.53
	10	125 do 140	17	0.014254341	0.004163	3.424055056	0.973863192	0.001440000	0.1402	0.67
	11	145 do 160	14	0.011738869	0.004791	2.450191865	0.593412402	0.002140000	0.1270	0.80
	12	165 do 180	12	0.010061888	0.005419	1.856779462	0.054348983	0.003050000	0.0166	0.81
	13	185 do 200	13	0.010900379	0.0060476	1.802430479	0.169659574	0.004190000	0.0711	0.89
	14	205 do 220	13	0.010900379	0.006676	1.632770905	0.369983769	0.005580000	0.2065	1.09
	15	225 do 240	11	0.009223397	0.007304	1.262787137	0.522911351	0.007240000	0.3786	1.47
	16	245 do 260	7	0.005869435	0.007933	0.739875786	-0.43544111	0.009200000	-0.4006	1.07
	17	265 do 280	12	0.010061888	0.008561	1.175316891	0.080324193	0.011500000	0.0924	1.16
	18	285 do 300	12	0.010061888	0.009189	1.094992698	0.671183267	0.014100000	0.9464	2.11
	19	305 do 350	13	0.010900379	0.02572	0.423809431	0.056174403	0.022400000	0.1258	2.23
	20	355 do 400	13	0.010900379	0.02965	0.367635027	-0.03188405	0.033500000	-0.1068	2.13
	21	405 do 450	16	0.013415851	0.03358	0.399519075	0.332439822	0.047700000	1.5857	3.71
	22	455 do 500	3	0.002515472	0.0375	0.067079253	0.04721653	0.065400000	0.3088	4.02
	23	505 do 1000	14	0.011738869	0.591	0.019862723	0.017305569	0.524000000	0.9068	4.93
	24	1005 do 1500	3	0.002515472	0.9837	0.002557154	0.001947785	1.770000000	0.3448	5.27
	25	1505 do 2000	1	0.000838491	1.376	0.000609368	0.000609368	4.190000000	0.2553	5.53
	26	2005 do 2500	0	0	1.769	0	-0.00038783	8.180000000	-0.3172	5.21
	27	2505 do 3000	1	0.000838491	2.162	0.000387831	0.000235434	14.100000000	0.3320	5.54
	28	3005 do 4000	1	0.000838491	5.502	0.000152397		33.500000000	0.0000	5.54

Tablica 7a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-40_CM_9_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	72,331	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,06	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	330	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	18,25	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,144	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,26	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,09	%

Tablica 7b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-40_CM_9_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	8	0.006707925	0.0001178	56.94333846	-4.05998339	0.000000524	-0.0002	0.00
	2	15 do 20	20	0.016769813	0.0002749	61.00332185	31.88906286	0.000004190	0.0134	0.01
	3	25 do 30	15	0.01257736	0.000432	29.11425899	6.336923603	0.000014100	0.0089	0.02
	4	35 do 40	16	0.013415851	0.000589	22.77733538	5.919863353	0.000033500	0.0198	0.04
	5	45 do 50	15	0.01257736	0.0007461	16.85747203	10.35898375	0.000065400	0.0677	0.11
	6	55 do 60	7	0.005869435	0.0009032	6.498488277	-1.5993144	0.000113000	-0.0181	0.09
	7	65 do 80	22	0.018446794	0.002278	8.097802675	0.884359292	0.000268000	0.0237	0.12
	8	85 do 100	25	0.020962266	0.002906	7.213443383	2.468165178	0.000524000	0.1293	0.24
	9	105 do 120	20	0.016769813	0.003534	4.745278205	1.321223148	0.000905000	0.1196	0.36
	10	125 do 140	17	0.014254341	0.004163	3.424056056	-0.07621904	0.001440000	-0.0110	0.35
	11	145 do 160	20	0.016769813	0.004791	3.500274092	0.250910033	0.002140000	0.0537	0.41
	12	165 do 180	21	0.017608304	0.005419	3.249364059	2.140176072	0.003050000	0.6528	1.06
	13	185 do 200	8	0.006707925	0.0060476	1.109187987	-0.27238739	0.004190000	-0.1141	0.95
	14	205 do 220	11	0.009223397	0.006676	1.381575381	-0.45520591	0.005580000	-0.2540	0.69
	15	225 do 240	16	0.013415851	0.007304	1.83678129	0.991208963	0.007240000	0.7176	1.41
	16	245 do 260	8	0.006707925	0.007933	0.845572327	-0.52563071	0.009200000	-0.4836	0.93
	17	265 do 280	14	0.011738869	0.008561	1.37120304	0.641207907	0.011500000	0.7374	1.66
	18	285 do 300	8	0.006707925	0.009189	0.729995132	0.306185701	0.014100000	0.4317	2.09
	19	305 do 350	13	0.010900379	0.02572	0.423809431	0.027894786	0.022400000	0.0625	2.16
	20	355 do 400	14	0.011738869	0.02965	0.395914645	0.196155107	0.033500000	0.6571	2.81
	21	405 do 450	8	0.006707925	0.03358	0.199759538	0.132680285	0.047700000	0.6329	3.45
	22	455 do 500	3	0.002515472	0.0375	0.067079253	0.051472828	0.065400000	0.3366	3.78
	23	505 do 1000	11	0.009223397	0.591	0.015606425	0.013049272	0.524000000	0.6838	4.47
	24	1005 do 1500	3	0.002515472	0.9837	0.002557154	0.001338417	1.770000000	0.2369	4.70
	25	1505 do 2000	2	0.001676981	1.376	0.001218736	-0.00020324	4.190000000	-0.0852	4.62
	26	2005 do 2500	3	0.002515472	1.769	0.001421974	0.000646312	8.180000000	0.5287	5.15
	27	2505 do 3000	2	0.001676981	2.162	0.000775662	0.000775662	14.100000000	1.0937	6.24
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	6.24

Tablica 8a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-0_CM_2_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	72,436	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,07	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	457	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	25,24	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,478	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,17	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,68	%

Tablica 8b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-0_CM_2_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%	
	1	0 do 10	16	0,013415851	0,0001178	113,886677	22,38169414	0,00000524	0,0012	0,00	
	2	15 do 20	30	0,02515472	0,0002749	91,5049828	42,98121779	0,000004190	0,0180	0,02	
	3	25 do 30	25	0,020962266	0,000432	48,523765	-14,1139073	0,000014100	-0,0199	0,00	
	4	35 do 40	44	0,036893589	0,000589	62,6376723	19,93207649	0,000033500	0,0668	0,07	
	5	45 do 50	38	0,031862645	0,0007461	42,7055958	11,14150989	0,000065400	0,0729	0,14	
	6	55 do 60	34	0,028508682	0,0009032	31,5640859	14,63231669	0,000113000	0,1653	0,30	
	7	65 do 80	46	0,03857057	0,002278	16,9317692	2,504882464	0,000268000	0,0671	0,37	
	8	85 do 100	50	0,041924533	0,002906	14,4268868	7,546233368	0,000524000	0,3954	0,77	
	9	105 do 120	29	0,024316229	0,003534	6,8806534	1,643863311	0,000905000	0,1488	0,92	
	10	125 do 140	26	0,021800757	0,004163	5,23679009	1,911529699	0,001440000	0,2753	1,19	
	11	145 do 160	19	0,015931323	0,004791	3,32526039	1,777944169	0,002140000	0,3805	1,57	
	12	165 do 180	10	0,008384907	0,005419	1,54731622	-0,11646576	0,003050000	-0,0355	1,54	
	13	185 do 200	12	0,010061888	0,0060476	1,66378198	0,156608837	0,004190000	0,0656	1,60	
	14	205 do 220	12	0,010061888	0,006676	1,50717314	0,588782499	0,005580000	0,3285	1,93	
	15	225 do 240	8	0,006707925	0,007304	0,91839064	0,178514859	0,007240000	0,1292	2,06	
	16	245 do 260	7	0,005869435	0,007933	0,73987579	0,543989638	0,009200000	0,5005	2,56	
	17	265 do 280	2	0,001676981	0,008561	0,19588615	-0,62535838	0,011500000	-0,7192	1,84	
	18	285 do 300	9	0,007546416	0,009189	0,82124452	0,593039446	0,014100000	0,8362	2,68	
	19	305 do 350	7	0,005869435	0,02572	0,22820508	0,143366226	0,022400000	0,3211	3,00	
	20	355 do 400	3	0,002515472	0,02965	0,08483885	0,034898968	0,033500000	0,1169	3,11	
	21	405 do 450	2	0,001676981	0,03358	0,04993988	-0,08421862	0,047700000	-0,4017	2,71	
	22	455 do 500	6	0,005030944	0,0375	0,13415851	0,11855208	0,065400000	0,7753	3,49	
	23	505 do 1000	11	0,009223397	0,591	0,01560643	0,013049272	0,524000000	0,6838	4,17	
	24	1005 do 1500	3	0,002515472	0,9837	0,00255715	0,000729049	1,770000000	0,1290	4,30	
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,0018281	0,000406131	4,190000000	0,1702	4,47	
	26	2005 do 2500	3	0,002515472	1,769	0,00142197	0,001034143	8,180000000	0,8459	5,32	
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,00038783	0,000235434	14,100000000	0,3320	5,65	
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,0001524		33,500000000	0,0000	5,65	

Tablica 9a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-0_CM_2_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29,7	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	57,974	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	4,86	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	390	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	26,91	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	5,595	
Wskaźnik rozmieszczenia \bar{L} =	0,18	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,50	%

Tablica 9b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-0_CM_2_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	11	0,009223397	0,0001178	78,2970904	-13,2078924	0,000000524	-0,0007	0,00
	2	15 do 20	30	0,02515472	0,0002749	91,5049828	52,68597079	0,000004190	0,0221	0,02
	3	25 do 30	20	0,016769813	0,000432	38,819012	-5,31207532	0,000014100	-0,0075	0,01
	4	35 do 40	31	0,02599321	0,000589	44,1310873	3,673154432	0,000033500	0,0123	0,03
	5	45 do 50	36	0,030185664	0,0007461	40,4579329	16,3206907	0,000065400	0,1067	0,13
	6	55 do 60	26	0,021800757	0,0009032	24,1372422	11,25437428	0,000113000	0,1272	0,26
	7	65 do 80	35	0,029347173	0,002278	12,8828679	0,475745274	0,000268000	0,0127	0,27
	8	85 do 100	43	0,036055098	0,002906	12,4071226	7,424580503	0,000524000	0,3890	0,66
	9	105 do 120	21	0,017608304	0,003534	4,98254212	1,155657052	0,000905000	0,1046	0,77
	10	125 do 140	19	0,015931323	0,004163	3,82688506	0,326610971	0,001440000	0,0470	0,81
	11	145 do 160	20	0,016769813	0,004791	3,50027409	0,715104899	0,002140000	0,1530	0,97
	12	165 do 180	18	0,015092832	0,005419	2,78516919	1,121387213	0,003050000	0,3420	1,31
	13	185 do 200	12	0,010061888	0,0060476	1,66378198	0,658999885	0,004190000	0,2761	1,58
	14	205 do 220	8	0,006707925	0,006676	1,0047821	0,430787943	0,005580000	0,2404	1,83
	15	225 do 240	5	0,004192453	0,007304	0,57399415	-0,06018509	0,007240000	-0,0436	1,78
	16	245 do 260	6	0,005030944	0,007933	0,63417925	0,0465208	0,009200000	0,0428	1,82
	17	265 do 280	6	0,005030944	0,008561	0,58765845	0,222660879	0,011500000	0,2561	2,08
	18	285 do 300	4	0,003353963	0,009189	0,36499757	0,299796115	0,014100000	0,4227	2,50
	19	305 do 350	2	0,001676981	0,02572	0,06520145	-0,16103549	0,022400000	-0,3607	2,14
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,101387229	0,033500000	0,3396	2,48
	21	405 do 450	5	0,004192453	0,03358	0,12484971	-0,00930879	0,047700000	-0,0444	2,44
	22	455 do 500	6	0,005030944	0,0375	0,13415851	0,114295783	0,065400000	0,7475	3,19
	23	505 do 1000	14	0,011738869	0,591	0,01986272	0,018157954	0,524000000	0,9515	4,14
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,00170477	0,001095401	1,770000000	0,1939	4,33
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,00060937	0,000609368	4,190000000	0,2553	4,59
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	0	8,180000000	0,0000	4,59
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	-0,0001524	14,100000000	-0,2149	4,37
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,0001524		33,500000000	0,0000	4,37

Tablica 10a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-20_CM_2_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	30,1	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	51,567	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	4,32	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	461	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	35,76	mm^{-1}
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	6,938	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,15	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	2,21	%

Tablica 10b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-20_CM_2_1

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{\text{tot}}=$			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^{-3}	mm^{-3}	mm^3	%	%
	1	0 do 10	31	0.02599321	0.0001178	220.6554365	4.093643966	0.00000524	0.0002	0.00
	2	15 do 20	71	0.059532837	0.0002749	216.5617926	133.1009168	0.000004190	0.0558	0.06
	3	25 do 30	43	0.036055098	0.000432	83.46087576	16.55245307	0.000014100	0.0233	0.08
	4	35 do 40	47	0.039409061	0.000589	66.90842269	27.57432128	0.000033500	0.0924	0.17
	5	45 do 50	35	0.029347173	0.0007461	39.3341014	18.91028111	0.000065400	0.1237	0.30
	6	55 do 60	22	0.018446794	0.0009032	20.4238203	6.436706587	0.000113000	0.0727	0.37
	7	65 do 80	38	0.031862645	0.002278	13.98711371	4.176830711	0.000268000	0.1119	0.48
	8	85 do 100	34	0.028508682	0.002906	9.810283	4.115949155	0.000524000	0.2157	0.70
	9	105 do 120	24	0.020123776	0.003534	5.694333846	1.867448783	0.000905000	0.1690	0.86
	10	125 do 140	19	0.015931323	0.004163	3.826885063	1.376893198	0.001440000	0.1982	1.06
	11	145 do 160	14	0.011738869	0.004791	2.450191865	0.438680781	0.002140000	0.0939	1.16
	12	165 do 180	13	0.010900379	0.005419	2.011511084	1.179620094	0.003050000	0.3598	1.52
	13	185 do 200	6	0.005030944	0.0060476	0.83189099	-0.29848887	0.004190000	-0.1251	1.39
	14	205 do 220	9	0.007546416	0.006676	1.130379858	0.326788043	0.005580000	0.1823	1.57
	15	225 do 240	7	0.005869435	0.007304	0.803591814	0.063716028	0.007240000	0.0461	1.62
	16	245 do 260	7	0.005869435	0.007933	0.739875786	0.250160415	0.009200000	0.2301	1.85
	17	265 do 280	5	0.004192453	0.008561	0.489715371	-0.14903037	0.011500000	-0.1714	1.68
	18	285 do 300	7	0.005869435	0.009189	0.638745741	0.377939937	0.014100000	0.5329	2.21
	19	305 do 350	8	0.006707925	0.02572	0.260805804	0.147687334	0.022400000	0.3308	2.54
	20	355 do 400	4	0.003353963	0.02965	0.11311847	0.038208643	0.033500000	0.1280	2.67
	21	405 do 450	3	0.002515472	0.03358	0.074909827	0.052550076	0.047700000	0.2507	2.92
	22	455 do 500	1	0.000838491	0.0375	0.022359751	0.009590858	0.065400000	0.0627	2.98
	23	505 do 1000	9	0.007546416	0.591	0.012768893	0.011064124	0.524000000	0.5798	3.56
	24	1005 do 1500	2	0.001676981	0.9837	0.001704769	0.001095401	1.770000000	0.1939	3.76
	25	1505 do 2000	1	0.000838491	1.376	0.000609368	0.000609368	4.190000000	0.2553	4.01
	26	2005 do 2500	0	0	1.769	0	0	8.180000000	0.0000	4.01
	27	2505 do 3000	0	0	2.162	0	-0.0001524	14.100000000	-0.2149	3.80
	28	3005 do 4000	1	0.000838491	5.502	0.000152397		33.500000000	0.0000	3.80

Tablica 11a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-20_CM_2_2

Zawartość zączynu cementowego w betonie P=	30,1	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	56,434	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	4,73	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	459	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	32,53	mm ⁻¹
Stosunek zączyn/powietrze R=	6,340	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,16	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,01	%

Tablica 11b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-20_CM_2_2

Całkowita dlugosc lini pomiarowej, T_{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cieciv zarejestrowana w klasie	Czestosc wystepowania cieciv	Udzial porow zliczonych	Potencjalna liczba cieciv	Liczba porow w klasie	Objetosc pojedynczego pora	Zawartosc powietrza	Skumulowana zawartosc powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	35	0.029347173	0.0001178	249.1271058	96.61880113	0.000000524	0.0051	0.01
	2	15 do 20	50	0.041924533	0.0002749	152.5083046	72.92933006	0.000004190	0.0306	0.04
	3	25 do 30	41	0.034378117	0.000432	79.57897456	1.281884182	0.000014100	0.0018	0.04
	4	35 do 40	55	0.046116986	0.000589	78.29709038	49.07747219	0.000033500	0.1644	0.20
	5	45 do 50	26	0.021800757	0.0007461	29.21961819	8.795797888	0.000065400	0.0575	0.26
	6	55 do 60	22	0.018446794	0.0009032	20.4238203	5.332460768	0.000113000	0.0603	0.32
	7	65 do 80	41	0.034378117	0.002278	15.09135953	4.992538795	0.000268000	0.1338	0.45
	8	85 do 100	35	0.029347173	0.002906	10.09882074	3.929959069	0.000524000	0.2059	0.66
	9	105 do 120	26	0.021800757	0.003534	6.168861666	3.147636617	0.000905000	0.2849	0.94
	10	125 do 140	15	0.01257736	0.004163	3.02122505	-0.65406275	0.001440000	-0.0942	0.85
	11	145 do 160	21	0.017608304	0.004791	3.675287797	2.127971578	0.002140000	0.4554	1.31
	12	165 do 180	10	0.008384907	0.005419	1.547316218	0.57677673	0.003050000	0.1759	1.48
	13	185 do 200	7	0.005869435	0.0060476	0.970539489	-0.41103589	0.004190000	-0.1722	1.31
	14	205 do 220	11	0.009223397	0.006676	1.381575381	0.807581228	0.005580000	0.4506	1.76
	15	225 do 240	5	0.004192453	0.007304	0.573994153	0.25690453	0.007240000	0.1860	1.95
	16	245 do 260	3	0.002515472	0.007933	0.317089623	-0.27056882	0.009200000	-0.2489	1.70
	17	265 do 280	6	0.005030944	0.008561	0.587658446	0.222660879	0.011500000	0.2561	1.95
	18	285 do 300	4	0.003353963	0.009189	0.364997566	0.038990312	0.014100000	0.0550	2.01
	19	305 do 350	10	0.008384907	0.02572	0.326007255	0.014931462	0.022400000	0.0334	2.04
	20	355 do 400	11	0.009223397	0.02965	0.311075792	0.086346313	0.033500000	0.2893	2.33
	21	405 do 450	9	0.007546416	0.03358	0.22472948	0.135290476	0.047700000	0.6453	2.98
	22	455 do 500	4	0.003353963	0.0375	0.089439004	0.079507642	0.065400000	0.5200	3.50
	23	505 do 1000	7	0.005869435	0.591	0.009931361	0.008226592	0.524000000	0.4311	3.93
	24	1005 do 1500	2	0.001676981	0.9837	0.001704769	0.001095401	1.770000000	0.1939	4.12
	25	1505 do 2000	1	0.000838491	1.376	0.000609368	0.000135377	4.190000000	0.0567	4.18
	26	2005 do 2500	1	0.000838491	1.769	0.000473991	8.61603E-05	8.180000000	0.0705	4.25
	27	2505 do 3000	1	0.000838491	2.162	0.000387831	0.000387831	14.100000000	0.5468	4.79
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	4.79

Tablica 12a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-40_CM_2_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,4	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T _a =	84,466	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	7,08	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	473	
Powierzchnia właściwa systemu porów α=	22,40	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,405	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,20	mm
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ =	2,71	%

Tablica 12b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-40_CM_2_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T _{tot} =			1192.62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	15	0.01257736	0.0001178	106.7687596	24.41427511	0.000000524	0.0013	0.00
	2	15 do 20	27	0.022639248	0.0002749	82.35448449	39.65357131	0.000004190	0.0166	0.02
	3	25 do 30	22	0.018446794	0.000432	42.70091318	-25.631093	0.000014100	-0.0361	-0.02
	4	35 do 40	48	0.040247552	0.000589	68.33200615	42.48388237	0.000033500	0.1423	0.12
	5	45 do 50	23	0.019285285	0.0007461	25.84812378	7.281014418	0.000065400	0.0476	0.17
	6	55 do 60	20	0.016769813	0.0009032	18.56710936	0.163012374	0.000113000	0.0018	0.17
	7	65 do 80	50	0.041924533	0.002278	18.40409699	6.285512106	0.000268000	0.1685	0.34
	8	85 do 100	42	0.035216608	0.002906	12.11858488	6.186987127	0.000524000	0.3242	0.67
	9	105 do 120	25	0.020962266	0.003534	5.931597756	-0.51368235	0.000905000	-0.0465	0.62
	10	125 do 140	32	0.026831701	0.004163	6.445280106	2.4199649	0.001440000	0.3485	0.97
	11	145 do 160	23	0.019285285	0.004791	4.025315206	0.466487904	0.002140000	0.0998	1.07
	12	165 do 180	23	0.019285285	0.005419	3.558827302	0.924505833	0.003050000	0.2820	1.35
	13	185 do 200	19	0.015931323	0.0060476	2.634321469	1.755137136	0.004190000	0.7354	2.09
	14	205 do 220	7	0.005869435	0.006676	0.879184334	0.19039135	0.005580000	0.1062	2.19
	15	225 do 240	6	0.005030944	0.007304	0.688792984	-0.47386897	0.007240000	-0.3431	1.85
	16	245 do 260	11	0.009223397	0.007933	1.16266195	0.085288133	0.009200000	0.0785	1.93
	17	265 do 280	11	0.009223397	0.008561	1.077373817	0.347378685	0.011500000	0.3995	2.33
	18	285 do 300	8	0.006707925	0.009189	0.729995132	0.273584976	0.014100000	0.3858	2.71
	19	305 do 350	14	0.011738869	0.02572	0.456410156	0.230173216	0.022400000	0.5156	3.23
	20	355 do 400	8	0.006707925	0.02965	0.22623694	0.126357171	0.033500000	0.4233	3.65
	21	405 do 450	4	0.003353963	0.03358	0.099879769	-0.03427874	0.047700000	-0.1635	3.49
	22	455 do 500	6	0.005030944	0.0375	0.134158505	0.114295783	0.065400000	0.7475	4.24
	23	505 do 1000	14	0.011738869	0.591	0.019862723	0.011338878	0.524000000	0.5942	4.83
	24	1005 do 1500	10	0.008384907	0.9837	0.008523845	0.006086372	1.770000000	1.0773	5.91
	25	1505 do 2000	4	0.003353963	1.376	0.002437473	0.002437473	4.190000000	1.0213	6.93
	26	2005 do 2500	0	0	1.769	0	-0.00038783	8.180000000	-0.3172	6.61
	27	2505 do 3000	1	0.000838491	2.162	0.000387831	0.000387831	14.100000000	0.5468	7.16
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	7.16

Tablica 13a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P3-40_CM_2_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	31,4	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	83,668	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	7,02	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	507	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	24,24	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,447	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,18	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,70	%

Tablica 13. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P3-40_CM_2_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192.62	mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%	
	1	0 do 10	13	0.010900379	0.0001178	92.53292499	-38.624217	0.000000524	-0.0020	0.00	
	2	15 do 20	43	0.036055098	0.0002749	131.157142	72.928624	0.000004190	0.0306	0.03	
	3	25 do 30	30	0.02515472	0.000432	58.22851797	1.285179514	0.000014100	0.0018	0.03	
	4	35 do 40	40	0.033539626	0.000589	56.94333846	7.494753835	0.000033500	0.0251	0.06	
	5	45 do 50	44	0.036893589	0.0007461	49.44858462	33.66654166	0.000065400	0.2202	0.28	
	6	55 do 60	17	0.014254341	0.0009032	15.78204296	-2.25397209	0.000113000	-0.0255	0.25	
	7	65 do 80	49	0.041086042	0.002278	18.03601505	6.205967901	0.000268000	0.1663	0.42	
	8	85 do 100	41	0.034378117	0.002906	11.83004715	4.94939375	0.000524000	0.2593	0.68	
	9	105 do 120	29	0.024316229	0.003534	6.880653397	1.241033304	0.000905000	0.1123	0.79	
	10	125 do 140	28	0.023477738	0.004163	5.639620093	1.614304887	0.001440000	0.2325	1.02	
	11	145 do 160	23	0.019285285	0.004791	4.025315206	0.311756282	0.002140000	0.0667	1.09	
	12	165 do 180	24	0.020123776	0.005419	3.713558924	2.465722439	0.003050000	0.7520	1.84	
	13	185 do 200	9	0.007546416	0.0060476	1.247836485	0.24305439	0.004190000	0.1018	1.94	
	14	205 do 220	8	0.006707925	0.006676	1.004782096	-0.14320621	0.005580000	-0.0799	1.86	
	15	225 do 240	10	0.008384907	0.007304	1.147988306	0.302415979	0.007240000	0.2189	2.08	
	16	245 do 260	8	0.006707925	0.007933	0.845572327	0.062027733	0.009200000	0.0571	2.14	
	17	265 do 280	8	0.006707925	0.008561	0.783544594	-0.03769993	0.011500000	-0.0434	2.09	
	18	285 do 300	9	0.007546416	0.009189	0.821244524	0.430035818	0.014100000	0.6064	2.70	
	19	305 do 350	12	0.010061888	0.02572	0.391208706	-0.17438364	0.022400000	-0.3906	2.31	
	20	355 do 400	20	0.016769813	0.02965	0.56559235	0.34086287	0.033500000	1.1419	3.45	
	21	405 do 450	9	0.007546416	0.03358	0.22472948	0.090570974	0.047700000	0.4320	3.88	
	22	455 do 500	6	0.005030944	0.0375	0.134158505	0.107201953	0.065400000	0.7011	4.58	
	23	505 do 1000	19	0.015931323	0.591	0.026966552	0.025251783	0.524000000	1.3232	5.91	
	24	1005 do 1500	2	0.001676981	0.9837	0.001704769	-0.0007327	1.770000000	-0.1297	5.78	
	25	1505 do 2000	4	0.003353963	1.376	0.002437473	0.00148949	4.190000000	0.6241	6.40	
	26	2005 do 2500	2	0.001676981	1.769	0.000947983	0.000947983	8.180000000	0.7754	7.18	
	27	2505 do 3000	0	0	2.162	0	0	14.100000000	0.0000	7.18	
	28	3005 do 4000	0	0	5.502	0	0	33.500000000	0.0000	7.18	

Plansza 3. Charakterystyka porów powietrznych betonów z aktywowanym PLW

Tablica 1. Zestawienie wyników badań charakterystyki porów powietrznych

Oznaczenie	A [%]	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]	A ₃₀₀ [%]
P4-0	3,7	27,31	0,20	1,69
P4-30	5,45	20,93	0,23	2,15
P4-30M	3,75	36,86	0,15	2,50
P4-30S	3,67	24,14	0,23	1,62

Tablica 2a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-0_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,3	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	45,654	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	3,83	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	302	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	26,46	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	6,870	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,20	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	1,67	%

Tablica 2b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-0_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	14	0,011738869	0,0001178	99,6508423	26,44685608	0,00000524	0,0014	0,00
	2	15 do 20	24	0,020123776	0,0002749	73,20398622	36,32592483	0,000004190	0,0152	0,02
	3	25 do 30	19	0,015931323	0,000432	36,87806138	-1,55869208	0,000014100	-0,0022	0,01
	4	35 do 40	27	0,022639248	0,000589	38,43675346	10,34096674	0,000033500	0,0346	0,05
	5	45 do 50	25	0,020962266	0,0007461	28,09578672	10,45703282	0,000065400	0,0684	0,12
	6	55 do 60	19	0,015931323	0,0009032	17,63875389	6,964377641	0,000113000	0,0787	0,20
	7	65 do 80	29	0,024316229	0,002278	10,67437625	2,8838574	0,000268000	0,0773	0,27
	8	85 do 100	27	0,022639248	0,002906	7,790518853	2,570712828	0,000524000	0,1347	0,41
	9	105 do 120	22	0,018446794	0,003534	5,219806025	2,802825986	0,000905000	0,2537	0,66
	10	125 do 140	12	0,010061888	0,004163	2,41698004	0,316815584	0,001440000	0,0456	0,71
	11	145 do 160	12	0,010061888	0,004791	2,100164455	0,088653371	0,002140000	0,0190	0,73
	12	165 do 180	13	0,010900379	0,005419	2,011511084	1,040971595	0,003050000	0,3175	1,04
	13	185 do 200	7	0,005869435	0,0060476	0,970539489	-0,03424261	0,004190000	-0,0143	1,03
	14	205 do 220	8	0,006707925	0,006676	1,004782096	0,430787943	0,005580000	0,2404	1,27
	15	225 do 240	5	0,004192453	0,007304	0,573994153	-0,06018509	0,007240000	-0,0436	1,23
	16	245 do 260	6	0,005030944	0,007933	0,634179245	0,634179245	0,009200000	0,5834	1,81
	17	265 do 280	0	0	0,008561	0	-0,36499757	0,011500000	-0,4197	1,39
	18	285 do 300	4	0,003353963	0,009189	0,364997566	0,201993939	0,014100000	0,2848	1,67
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	0,106444392	0,022400000	0,2384	1,91
	20	355 do 400	2	0,001676981	0,02965	0,056559235	-0,01835059	0,033500000	-0,0615	1,85
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	0,007830574	0,047700000	0,0374	1,89
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,067079253	0,052891594	0,065400000	0,3459	2,24
	23	505 do 1000	10	0,008384907	0,591	0,014187659	0,01248289	0,524000000	0,6541	2,89
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	0,000486033	1,770000000	0,0860	2,98
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000744745	4,190000000	0,3120	3,29
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	3,36
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000387831	14,100000000	0,5468	3,90
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	3,90

Tablica 3a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-0_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,3	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	42,472	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	3,56	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	299	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	28,16	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	7,385	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,20	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	1,71	%

Tablica 3b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-0_2

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$		1192,62		mm							
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza	
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%	
	1	0 do 10	8	0,006707925	0,0001178	56,94333846	-22,3609799	0,000000524	-0,0012	0,00	
	2	15 do 20	26	0,021800757	0,0002749	79,3043184	44,36720762	0,000004190	0,0186	0,02	
	3	25 do 30	18	0,015092832	0,000432	34,93711078	6,465441554	0,000014100	0,0091	0,03	
	4	35 do 40	20	0,016769813	0,000589	28,47166923	-6,3671063	0,000033500	-0,0213	0,01	
	5	45 do 50	31	0,02599321	0,0007461	34,83877553	16,27166617	0,000065400	0,1064	0,11	
	6	55 do 60	20	0,016769813	0,0009032	18,56710936	8,260815049	0,000113000	0,0933	0,20	
	7	65 do 80	28	0,023477738	0,002278	10,30629431	1,93869999	0,000268000	0,0520	0,26	
	8	85 do 100	29	0,024316229	0,002906	8,367594324	4,096843939	0,000524000	0,2147	0,47	
	9	105 do 120	18	0,015092832	0,003534	4,270750384	1,853770345	0,000905000	0,1678	0,64	
	10	125 do 140	12	0,010061888	0,004163	2,41698004	0,491829289	0,001440000	0,0708	0,71	
	11	145 do 160	11	0,009223397	0,004791	1,925150751	0,068371289	0,002140000	0,0146	0,72	
	12	165 do 180	12	0,010061888	0,005419	1,856779462	0,33164598	0,003050000	0,1012	0,83	
	13	185 do 200	11	0,009223397	0,0060476	1,525133482	0,520351387	0,004190000	0,2180	1,04	
	14	205 do 220	8	0,006707925	0,006676	1,004782096	0,315989112	0,005580000	0,1763	1,22	
	15	225 do 240	6	0,005030944	0,007304	0,688792984	0,160310279	0,007240000	0,1161	1,34	
	16	245 do 260	5	0,004192453	0,007933	0,528482704	0,234653482	0,009200000	0,2159	1,55	
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,293829223	0,11133044	0,011500000	0,1280	1,68	
	18	285 do 300	2	0,001676981	0,009189	0,182498783	0,019495156	0,014100000	0,0275	1,71	
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	0,13472401	0,022400000	0,3018	2,01	
	20	355 do 400	1	0,000838491	0,02965	0,028279617	-0,07160015	0,033500000	-0,2399	1,77	
	21	405 do 450	4	0,003353963	0,03358	0,099879769	0,055160267	0,047700000	0,2631	2,03	
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,044719502	0,020600481	0,065400000	0,1347	2,17	
	23	505 do 1000	17	0,014254341	0,591	0,024119021	0,022414252	0,524000000	1,1745	3,34	
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	0,001704769	1,770000000	0,3017	3,64	
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	0	4,190000000	0,0000	3,64	
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	0	8,180000000	0,0000	3,64	
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	3,64	
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	3,64	

Tablica 4a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	71,737	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,02	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	332	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	18,51	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,472	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,24	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,29	%

Tablica 4b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-30_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstość występowania cięciw	Udział porow zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porow w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	7	0,005869435	0,0001178	49,82542115	4,072929765	0,00000524	0,0002	0,00
	2	15 do 20	15	0,01257736	0,0002749	45,75249139	16,6382324	0,000004190	0,0070	0,01
	3	25 do 30	15	0,01257736	0,000432	29,11425899	3,48975668	0,000014100	0,0049	0,01
	4	35 do 40	18	0,015092832	0,000589	25,62450231	2,024041463	0,000033500	0,0068	0,02
	5	45 do 50	21	0,017608304	0,0007461	23,60046084	9,675128821	0,000065400	0,0633	0,08
	6	55 do 60	15	0,01257736	0,0009032	13,92533202	3,987119648	0,000113000	0,0451	0,13
	7	65 do 80	27	0,022639248	0,002278	9,938212374	2,147693521	0,000268000	0,0576	0,18
	8	85 do 100	27	0,022639248	0,002906	7,790518853	2,096185007	0,000524000	0,1098	0,29
	9	105 do 120	24	0,020123776	0,003534	5,694333846	0,860373766	0,000905000	0,0779	0,37
	10	125 do 140	24	0,020123776	0,004163	4,83396008	2,55878192	0,001440000	0,3685	0,74
	11	145 do 160	13	0,010900379	0,004791	2,27517816	-0,66472266	0,002140000	-0,1423	0,60
	12	165 do 180	19	0,015931323	0,005419	2,939900815	1,276118835	0,003050000	0,3892	0,99
	13	185 do 200	12	0,010061888	0,0060476	1,663781981	-0,34578221	0,004190000	-0,1449	0,84
	14	205 do 220	16	0,013415851	0,006676	2,009564191	0,631978224	0,005580000	0,3526	1,20
	15	225 do 240	12	0,010061888	0,007304	1,377585967	0,214924018	0,007240000	0,1556	1,35
	16	245 do 260	11	0,009223397	0,007933	1,16266195	0,575003504	0,009200000	0,5290	1,88
	17	265 do 280	6	0,005030944	0,008561	0,587658446	-0,14233669	0,011500000	-0,1637	1,72
	18	285 do 300	8	0,006707925	0,009189	0,729995132	0,403987878	0,014100000	0,5696	2,29
	19	305 do 350	10	0,008384907	0,02572	0,326007255	0,099770315	0,022400000	0,2235	2,51
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,151327113	0,033500000	0,5069	3,02
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	-0,01452918	0,047700000	-0,0693	2,95
	22	455 do 500	4	0,003353963	0,0375	0,089439004	0,078088876	0,065400000	0,5107	3,46
	23	505 do 1000	8	0,006707925	0,591	0,011350127	0,010497743	0,524000000	0,5501	4,01
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,000852385	0,000243016	1,770000000	0,0430	4,05
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,000609368	-0,00033861	4,190000000	-0,1419	3,91
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000172321	8,180000000	0,1410	4,05
	27	2505 do 3000	2	0,001676981	2,162	0,000775662	0,00031847	14,100000000	0,4490	4,50
	28	3005 do 4000	3	0,002515472	5,502	0,000457192		33,500000000	0,0000	4,50

Tablica 5a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	58,090	Mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	4,87	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	339	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	23,34	mm^{-1}
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	5,523	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,21	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	1,98	%

Tablica 5b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-30_2

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 do 10	12	0,010061888	0,0001178	85,41500769	15,26118756	0,000000524	0,0008	0,00
	2	15 do 20	23	0,019285285	0,0002749	70,15382012	35,21670934	0,000004190	0,0148	0,02
	3	25 do 30	18	0,015092832	0,000432	34,93711078	5,041858093	0,000014100	0,0071	0,02
	4	35 do 40	21	0,017608304	0,000589	29,89525269	4,04712891	0,000033500	0,0136	0,04
	5	45 do 50	23	0,019285285	0,0007461	25,84812378	14,70785816	0,000065400	0,0962	0,13
	6	55 do 60	12	0,010061888	0,0009032	11,14026562	-0,27027452	0,000113000	-0,0031	0,13
	7	65 do 80	31	0,02599321	0,002278	11,41054013	2,177332603	0,000268000	0,0584	0,19
	8	85 do 100	32	0,026831701	0,002906	9,23320753	4,250665415	0,000524000	0,2227	0,41
	9	105 do 120	21	0,017608304	0,003534	4,982542115	1,759902062	0,000905000	0,1593	0,57
	10	125 do 140	16	0,013415851	0,004163	3,222640053	0,422420779	0,001440000	0,0608	0,63
	11	145 do 160	16	0,013415851	0,004791	2,800219274	1,098171433	0,002140000	0,2350	0,87
	12	165 do 180	11	0,009223397	0,005419	1,70204784	-0,10038264	0,003050000	-0,0306	0,83
	13	185 do 200	13	0,010900379	0,0060476	1,802430479	0,295257335	0,004190000	0,1237	0,96
	14	205 do 220	12	0,010061888	0,006676	1,507173143	0,244386007	0,005580000	0,1364	1,10
	15	225 do 240	11	0,009223397	0,007304	1,262787137	-0,42835752	0,007240000	-0,3101	0,78
	16	245 do 260	16	0,013415851	0,007933	1,691144654	1,397315431	0,009200000	1,2855	2,07
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,293829223	-0,16241773	0,011500000	-0,1868	1,88
	18	285 do 300	5	0,004192453	0,009189	0,456246958	0,065038252	0,014100000	0,0917	1,98
	19	305 do 350	12	0,010061888	0,02572	0,391208706	0,221531001	0,022400000	0,4962	2,47
	20	355 do 400	6	0,005030944	0,02965	0,169677705	0,094767878	0,033500000	0,3175	2,79
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	-0,03688893	0,047700000	-0,1760	2,61
	22	455 do 500	5	0,004192453	0,0375	0,111798755	0,096192329	0,065400000	0,6291	3,24
	23	505 do 1000	11	0,009223397	0,591	0,015606425	0,013901656	0,524000000	0,7284	3,97
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	-0,00012334	1,770000000	-0,0218	3,95
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,001828105	0,001354113	4,190000000	0,5674	4,52
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	0,000473991	8,180000000	0,3877	4,90
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	4,90
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	4,90

Tablica 6a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30M_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	46,124	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	3,87	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	413	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	35,82	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	6,956	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,15	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	2,42	%

Tablica 6b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-30M_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	23	0,019285285	0,0001178	163,7120981	32,55495609	0,00000524	0,0017	0,00
	2	15 do 20	43	0,036055098	0,0002749	131,157142	78,7514758	0,000004190	0,0330	0,03
	3	25 do 30	27	0,022639248	0,000432	52,40566617	9,698162331	0,000014100	0,0137	0,05
	4	35 do 40	30	0,02515472	0,000589	42,70750384	1,125739502	0,000033500	0,0038	0,05
	5	45 do 50	37	0,031024154	0,0007461	41,58176434	23,94301045	0,000065400	0,1566	0,21
	6	55 do 60	19	0,015931323	0,0009032	17,63875389	-0,39726115	0,000113000	-0,0045	0,20
	7	65 do 80	49	0,041086042	0,002278	18,03601505	4,186203754	0,000268000	0,1122	0,32
	8	85 do 100	48	0,040247552	0,002906	13,84981129	7,206421808	0,000524000	0,3776	0,69
	9	105 do 120	28	0,023477738	0,003534	6,643389487	2,61508942	0,000905000	0,2367	0,93
	10	125 do 140	20	0,016769813	0,004163	4,028300066	0,703039679	0,001440000	0,1012	1,03
	11	145 do 160	19	0,015931323	0,004791	3,325260388	-0,38829854	0,002140000	-0,0831	0,95
	12	165 do 180	24	0,020123776	0,005419	3,713558924	2,604370937	0,003050000	0,7943	1,74
	13	185 do 200	8	0,006707925	0,0060476	1,109187987	0,481199177	0,004190000	0,2016	1,94
	14	205 do 220	5	0,004192453	0,006676	0,62798881	-0,29040184	0,005580000	-0,1620	1,78
	15	225 do 240	8	0,006707925	0,007304	0,918390645	0,495604481	0,007240000	0,3588	2,14
	16	245 do 260	4	0,003353963	0,007933	0,422786164	0,128956941	0,009200000	0,1186	2,26
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,293829223	0,11133044	0,011500000	0,1280	2,39
	18	285 do 300	2	0,001676981	0,009189	0,182498783	0,019495156	0,014100000	0,0275	2,42
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	0,049885157	0,022400000	0,1117	2,53
	20	355 do 400	4	0,003353963	0,02965	0,11311847	0,088148528	0,033500000	0,2953	2,82
	21	405 do 450	1	0,000838491	0,03358	0,024969942	0,024969942	0,047700000	0,1191	2,94
	22	455 do 500	0	0	0,0375	0	-0,00283753	0,065400000	-0,0186	2,92
	23	505 do 1000	2	0,001676981	0,591	0,002837532	0,001132763	0,524000000	0,0594	2,98
	24	1005 do 1500	2	0,001676981	0,9837	0,001704769	0,001704769	1,770000000	0,3017	3,28
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	0	4,190000000	0,0000	3,28
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	-0,00038783	8,180000000	-0,3172	2,97
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	3,30
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397	0	33,500000000	0,0000	3,30

Tablica 7a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30M_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	43,280	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	3,63	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	410	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	37,89	mm^{-1}
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	7,412	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,15	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	2,58	%

Tablica 7b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce SEP-V-30M_2

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm				
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm^{-1}	mm^2	mm^3	mm^3	mm^3	%	%
	1	0 do 10	18	0,015092832	0,0001178	128,1225115	30,51719657	0,000000524	0,0016	0,00
	2	15 do 20	32	0,026831701	0,0002749	97,60531496	37,43584638	0,000004190	0,0157	0,02
	3	25 do 30	31	0,02599321	0,000432	60,16946857	17,46196473	0,000014100	0,0246	0,04
	4	35 do 40	30	0,02515472	0,000589	42,70750384	-4,49341784	0,000033500	-0,0151	0,03
	5	45 do 50	42	0,035216608	0,0007461	47,20092169	17,49354671	0,000065400	0,1144	0,14
	6	55 do 60	32	0,026831701	0,0009032	29,70737498	14,61601545	0,000113000	0,1652	0,31
	7	65 do 80	41	0,034378117	0,002278	15,09135953	3,261312383	0,000268000	0,0874	0,39
	8	85 do 100	41	0,034378117	0,002906	11,83004715	2,814018558	0,000524000	0,1475	0,54
	9	105 do 120	38	0,031862645	0,003534	9,016028589	3,174993493	0,000905000	0,2873	0,83
	10	125 do 140	29	0,024316229	0,004163	5,841035096	2,340761004	0,001440000	0,3371	1,17
	11	145 do 160	20	0,016769813	0,004791	3,500274092	1,64349463	0,002140000	0,3517	1,52
	12	165 do 180	12	0,010061888	0,005419	1,856779462	0,33164598	0,003050000	0,1012	1,62
	13	185 do 200	11	0,009223397	0,0060476	1,525133482	0,645949148	0,004190000	0,2707	1,89
	14	205 do 220	7	0,005869435	0,006676	0,879184334	0,419989011	0,005580000	0,2344	2,12
	15	225 do 240	4	0,003353963	0,007304	0,459195322	-0,17498392	0,007240000	-0,1267	2,00
	16	245 do 260	6	0,005030944	0,007933	0,634179245	0,340350022	0,009200000	0,3131	2,31
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,293829223	0,202579831	0,011500000	0,2330	2,54
	18	285 do 300	1	0,000838491	0,009189	0,091249392	0,026047941	0,014100000	0,0367	2,58
	19	305 do 350	2	0,001676981	0,02572	0,065201451	0,036921833	0,022400000	0,0827	2,66
	20	355 do 400	1	0,000838491	0,02965	0,028279617	0,003309675	0,033500000	0,0111	2,67
	21	405 do 450	1	0,000838491	0,03358	0,024969942	0,002610191	0,047700000	0,0125	2,69
	22	455 do 500	1	0,000838491	0,0375	0,022359751	0,016684687	0,065400000	0,1091	2,80
	23	505 do 1000	4	0,003353963	0,591	0,005675064	0,005675064	0,524000000	0,2974	3,09
	24	1005 do 1500	0	0	0,9837	0	-0,00060937	1,770000000	-0,1079	2,98
	25	1505 do 2000	1	0,000838491	1,376	0,000609368	0,000135377	4,190000000	0,0567	3,04
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	3,11
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000387831	14,100000000	0,5468	3,66
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	3,66

Tablica 8a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30S_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	39,744	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	3,33	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	257	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	25,87	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	8,072	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,22	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	1,68	%

Tablica 8b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-30S_1

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	9	0,007546416	0,0001178	64,06125576	3,057933918	0,000000524	0,0002	0,00
	2	15 do 20	20	0,016769813	0,0002749	61,00332185	35,77096406	0,000004190	0,0150	0,02
	3	25 do 30	13	0,010900379	0,000432	25,23235779	-1,81572798	0,000014100	-0,0026	0,01
	4	35 do 40	19	0,015931323	0,000589	27,04808577	5,695287862	0,000033500	0,0191	0,03
	5	45 do 50	19	0,015931323	0,0007461	21,35279791	7,427465884	0,000065400	0,0486	0,08
	6	55 do 60	15	0,01257736	0,0009032	13,92533202	3,250955768	0,000113000	0,0367	0,12
	7	65 do 80	29	0,024316229	0,002278	10,67437625	4,038008341	0,000268000	0,1082	0,23
	8	85 do 100	23	0,019285285	0,002906	6,636367912	3,077409258	0,000524000	0,1613	0,39
	9	105 do 120	15	0,01257736	0,003534	3,558958654	1,746223624	0,000905000	0,1580	0,54
	10	125 do 140	9	0,007546416	0,004163	1,81273503	-0,46244313	0,001440000	-0,0666	0,48
	11	145 do 160	13	0,010900379	0,004791	2,27517816	0,108935454	0,002140000	0,0233	0,50
	12	165 do 180	14	0,011738869	0,005419	2,166242706	1,057054719	0,003050000	0,3224	0,82
	13	185 do 200	8	0,006707925	0,0060476	1,109187987	0,104405891	0,004190000	0,0437	0,87
	14	205 do 220	8	0,006707925	0,006676	1,004782096	0,545586773	0,005580000	0,3044	1,17
	15	225 do 240	4	0,003353963	0,007304	0,459195322	-0,06928738	0,007240000	-0,0502	1,12
	16	245 do 260	5	0,004192453	0,007933	0,528482704	-0,15711882	0,009200000	-0,1445	0,98
	17	265 do 280	7	0,005869435	0,008561	0,68560152	0,503102737	0,011500000	0,5786	1,56
	18	285 do 300	2	0,001676981	0,009189	0,182498783	0,084696607	0,014100000	0,1194	1,68
	19	305 do 350	3	0,002515472	0,02572	0,097802176	-0,04359591	0,022400000	-0,0977	1,58
	20	355 do 400	5	0,004192453	0,02965	0,141398087	0,066488261	0,033500000	0,2227	1,80
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	0,030190325	0,047700000	0,1440	1,94
	22	455 do 500	2	0,001676981	0,0375	0,044719502	0,031950609	0,065400000	0,2090	2,15
	23	505 do 1000	9	0,007546416	0,591	0,012768893	0,011916509	0,524000000	0,6244	2,78
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,000852385	0,000852385	1,770000000	0,1509	2,83
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	-0,00047399	4,190000000	-0,1986	2,73
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	2,80
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000387831	14,100000000	0,5468	3,35
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	3,35

Tablica 9a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce P4-30S_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,9	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	47,832	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	4,01	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	268	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	22,41	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	6,707	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,24	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	1,56	%

Tablica 9b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce P4-30S_2

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	20	0,016769813	0,0001178	142,3583461	72,20452602	0,000000524	0,0038	0,00
	2	15 do 20	23	0,019285285	0,0002749	70,15382012	48,80336353	0,000004190	0,0204	0,02
	3	25 do 30	11	0,009223397	0,000432	21,35045659	-8,5447961	0,000014100	-0,0120	0,01
	4	35 do 40	21	0,017608304	0,000589	29,89525269	10,79011772	0,000033500	0,0361	0,05
	5	45 do 50	17	0,014254341	0,0007461	19,10513497	6,108158414	0,000065400	0,0399	0,09
	6	55 do 60	14	0,011738869	0,0009032	12,99697655	6,003419698	0,000113000	0,0678	0,16
	7	65 do 80	19	0,015931323	0,002278	6,993556856	-0,50842426	0,000268000	-0,0136	0,14
	8	85 do 100	26	0,021800757	0,002906	7,501981118	3,943022464	0,000524000	0,2066	0,35
	9	105 do 120	15	0,01257736	0,003534	3,558958654	1,141978614	0,000905000	0,1033	0,45
	10	125 do 140	12	0,010061888	0,004163	2,41698004	-0,20822553	0,001440000	-0,0300	0,42
	11	145 do 160	15	0,01257736	0,004791	2,625205569	0,768426107	0,002140000	0,1644	0,59
	12	165 do 180	12	0,010061888	0,005419	1,856779462	0,608942977	0,003050000	0,1857	0,77
	13	185 do 200	9	0,007546416	0,0060476	1,247836485	0,8710432	0,004190000	0,3650	1,14
	14	205 do 220	3	0,002515472	0,006676	0,376793286	-0,19720087	0,005580000	-0,1100	1,03
	15	225 do 240	5	0,004192453	0,007304	0,573994153	-0,27157817	0,007240000	-0,1966	0,83
	16	245 do 260	8	0,006707925	0,007933	0,845572327	0,45380003	0,009200000	0,4175	1,25
	17	265 do 280	4	0,003353963	0,008561	0,391772297	0,026774731	0,011500000	0,0308	1,28
	18	285 do 300	4	0,003353963	0,009189	0,364997566	0,201993939	0,014100000	0,2848	1,56
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	-0,0349537	0,022400000	-0,0783	1,49
	20	355 do 400	7	0,005869435	0,02965	0,197957322	0,098077554	0,033500000	0,3286	1,81
	21	405 do 450	4	0,003353963	0,03358	0,099879769	0,032800516	0,047700000	0,1565	1,97
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,067079253	0,058566657	0,065400000	0,3830	2,35
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,008512596	0,008512596	0,524000000	0,4461	2,80
	24	1005 do 1500	0	0	0,9837	0	0	1,770000000	0,0000	2,80
	25	1505 do 2000	0	0	1,376	0	0	4,190000000	0,0000	2,80
	26	2005 do 2500	0	0	1,769	0	-0,00077566	8,180000000	-0,6345	2,17
	27	2505 do 3000	2	0,001676981	2,162	0,000775662	0,00031847	14,100000000	0,4490	2,61
	28	3005 do 4000	3	0,002515472	5,502	0,000457192		33,500000000	0,0000	2,61

Plansza 4. Charakterystyka porów powietrznych betonów z cementami wieloskładnikowymi

Tablica 1. Zestawienie wyników badań charakterystyki porów powietrznych

Oznaczenie	A [%]	α [mm ⁻¹]	\bar{L} [mm]	A ₃₀₀ [%]
C-I	6,03	29,52	0,12	3,09
C-II(W)	6,64	33,82	0,11	3,81
C-II(V-W)	6,47	37,83	0,09	4,15
C-V(S-W)	5,98	35,06	0,11	2,99

Tablica 2a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-I_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	71,280	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	5,98	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	528	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	29,63	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	4,451	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,11	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	3,34	%

Tablica 2b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-I_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62		mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza		
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%		
	1	0 do 10	46	0,03857057	0,0001178	327,4241961	156,614895	0,000000524	0,0082	0,01		
	2	15 do 20	56	0,046955477	0,0002749	170,8093012	104,8169808	0,000004190	0,0439	0,05		
	3	25 do 30	34	0,028508682	0,000432	65,99232037	-9,45760309	0,000014100	-0,0133	0,04		
	4	35 do 40	53	0,044440005	0,000589	75,44992346	42,85881086	0,000033500	0,1436	0,18		
	5	45 do 50	29	0,024316229	0,0007461	32,59111259	-14,7550163	0,000065400	-0,0965	0,09		
	6	55 do 60	51	0,042763024	0,0009032	47,34612887	31,15052352	0,000113000	0,3520	0,44		
	7	65 do 80	44	0,036893589	0,002278	16,19560535	3,788482732	0,000268000	0,1015	0,54		
	8	85 do 100	43	0,036055098	0,002906	12,40712262	4,10288576	0,000524000	0,2150	0,75		
	9	105 do 120	35	0,029347173	0,003534	8,304236858	2,664616766	0,000905000	0,2411	1,00		
	10	125 do 140	28	0,023477738	0,004163	5,639620093	2,48937341	0,001440000	0,3585	1,35		
	11	145 do 160	18	0,015092832	0,004791	3,150246683	0,519809112	0,002140000	0,1112	1,47		
	12	165 do 180	17	0,014254341	0,005419	2,630437571	0,134764601	0,003050000	0,0411	1,51		
	13	185 do 200	18	0,015092832	0,0060476	2,495672971	1,239695351	0,004190000	0,5194	2,03		
	14	205 do 220	10	0,008384907	0,006676	1,25597762	-0,46600484	0,005580000	-0,2600	1,77		
	15	225 do 240	15	0,01257736	0,007304	1,721982459	0,770713591	0,007240000	0,5580	2,32		
	16	245 do 260	9	0,007546416	0,007933	0,951268868	-0,12610495	0,009200000	-0,1160	2,21		
	17	265 do 280	11	0,009223397	0,008561	1,077373817	0,438628076	0,011500000	0,5044	2,71		
	18	285 do 300	7	0,005869435	0,009189	0,638745741	0,443141388	0,014100000	0,6248	3,34		
	19	305 do 350	6	0,005030944	0,02572	0,195604353	-0,03063259	0,022400000	-0,0686	3,27		
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,076417287	0,033500000	0,2560	3,52		
	21	405 do 450	6	0,005030944	0,03358	0,149819653	-0,02905835	0,047700000	-0,1386	3,39		
	22	455 do 500	8	0,006707925	0,0375	0,178878007	0,171784178	0,065400000	1,1235	4,51		
	23	505 do 1000	5	0,004192453	0,591	0,00709383	0,003684291	0,524000000	0,1931	4,70		
	24	1005 do 1500	4	0,003353963	0,9837	0,003409538	0,002190802	1,770000000	0,3878	5,09		
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000744745	4,190000000	0,3120	5,40		
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	0,000473991	8,180000000	0,3877	5,79		
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	5,79		
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	5,79		

Tablica 3a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-I_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T _a =	72,497	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,08	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	533	
Powierzchnia właściwa systemu porów α=	29,41	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,376	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,13	mm
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ =	2,83	%

Tablica 3b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-I_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T _{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	24	0,020123776	0,0001178	170,8300154	61,02403605	0,000000524	0,0032	0,00
	2	15 do 20	36	0,030185664	0,0002749	109,8059793	24,40415297	0,000004190	0,0102	0,01
	3	25 do 30	44	0,036893589	0,000432	85,40182636	9,951902902	0,000014100	0,0140	0,03
	4	35 do 40	53	0,044440005	0,000589	75,44992346	37,23965352	0,000033500	0,1248	0,15
	5	45 do 50	34	0,028508682	0,0007461	38,21026994	15,00138323	0,000065400	0,0981	0,25
	6	55 do 60	25	0,020962266	0,0009032	23,2088867	6,645199413	0,000113000	0,0751	0,33
	7	65 do 80	45	0,03773208	0,002278	16,56368729	0,694111848	0,000268000	0,0186	0,34
	8	85 do 100	55	0,046116986	0,002906	15,86957544	11,36156115	0,000524000	0,5953	0,94
	9	105 do 120	19	0,015931323	0,003534	4,508014295	1,285374242	0,000905000	0,1163	1,06
	10	125 do 140	16	0,013415851	0,004163	3,222640053	0,247407075	0,001440000	0,0356	1,09
	11	145 do 160	17	0,014254341	0,004791	2,975232978	0,654258651	0,002140000	0,1400	1,23
	12	165 do 180	15	0,01257736	0,005419	2,320974328	0,518543849	0,003050000	0,1582	1,39
	13	185 do 200	13	0,010900379	0,0060476	1,802430479	0,169659574	0,004190000	0,0711	1,46
	14	205 do 220	13	0,010900379	0,006676	1,632770905	0,369983769	0,005580000	0,2065	1,67
	15	225 do 240	11	0,009223397	0,007304	1,262787137	0,205821728	0,007240000	0,1490	1,82
	16	245 do 260	10	0,008384907	0,007933	1,056965409	-0,02040841	0,009200000	-0,0188	1,80
	17	265 do 280	11	0,009223397	0,008561	1,077373817	0,438628076	0,011500000	0,5044	2,30
	18	285 do 300	7	0,005869435	0,009189	0,638745741	0,377939937	0,014100000	0,5329	2,83
	19	305 do 350	8	0,006707925	0,02572	0,260805804	0,119407716	0,022400000	0,2675	3,10
	20	355 do 400	5	0,004192453	0,02965	0,141398087	0,041518319	0,033500000	0,1391	3,24
	21	405 do 450	4	0,003353963	0,03358	0,099879769	-0,01191899	0,047700000	-0,0569	3,18
	22	455 do 500	5	0,004192453	0,0375	0,111798755	0,103286159	0,065400000	0,6755	3,86
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,008512596	0,004250673	0,524000000	0,2227	4,08
	24	1005 do 1500	5	0,004192453	0,9837	0,004261923	0,000605713	1,770000000	0,1072	4,19
	25	1505 do 2000	6	0,005030944	1,376	0,003656209	0,002708227	4,190000000	1,1347	5,32
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000560152	8,180000000	0,4582	5,78
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	6,11
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	6,11

Tablica 4a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-II(W)_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	79,934	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	6,70	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	652	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	32,63	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	3,969	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,12	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	3,85	%

Tablica 4b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-II(W)_1

Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	34	0,028508682	0,0001178	242,0091884	37,64806026	0,000000524	0,0020	0,00
	2	15 do 20	67	0,056178874	0,0002749	204,3611282	99,54979584	0,000004190	0,0417	0,04
	3	25 do 30	54	0,045278496	0,000432	104,8113323	5,160490048	0,000014100	0,0073	0,05
	4	35 do 40	70	0,058694346	0,000589	99,6508423	29,97329124	0,000033500	0,1004	0,15
	5	45 do 50	62	0,051986421	0,0007461	69,67755106	21,40306672	0,000065400	0,1400	0,29
	6	55 do 60	52	0,043601514	0,0009032	48,27448434	17,3556014	0,000113000	0,1961	0,49
	7	65 do 80	84	0,070433215	0,002278	30,91888294	12,16393015	0,000268000	0,3260	0,81
	8	85 do 100	65	0,054501893	0,002906	18,75495279	7,840812924	0,000524000	0,4109	1,22
	9	105 do 120	46	0,03857057	0,003534	10,91413987	4,267444762	0,000905000	0,3862	1,61
	10	125 do 140	33	0,027670192	0,004163	6,646695109	2,446366199	0,001440000	0,3523	1,96
	11	145 do 160	24	0,020123776	0,004791	4,200328911	0,950964852	0,002140000	0,2035	2,17
	12	165 do 180	21	0,017608304	0,005419	3,249364059	0,476394091	0,003050000	0,1453	2,31
	13	185 do 200	20	0,016769813	0,0060476	2,772969968	0,889003538	0,004190000	0,3725	2,68
	14	205 do 220	15	0,01257736	0,006676	1,883966429	0,276782801	0,005580000	0,1544	2,84
	15	225 do 240	14	0,011738869	0,007304	1,607183629	1,078700924	0,007240000	0,7810	3,62
	16	245 do 260	5	0,004192453	0,007933	0,528482704	-0,05917574	0,009200000	-0,0544	3,57
	17	265 do 280	6	0,005030944	0,008561	0,587658446	0,131411488	0,011500000	0,1511	3,72
	18	285 do 300	5	0,004192453	0,009189	0,456246958	0,097638978	0,014100000	0,1377	3,85
	19	305 do 350	11	0,009223397	0,02572	0,35860798	0,13237104	0,022400000	0,2965	4,15
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,151327113	0,033500000	0,5069	4,66
	21	405 do 450	3	0,002515472	0,03358	0,074909827	-0,01452918	0,047700000	-0,0693	4,59
	22	455 do 500	4	0,003353963	0,0375	0,089439004	0,082345174	0,065400000	0,5385	5,13
	23	505 do 1000	5	0,004192453	0,591	0,00709383	0,006241445	0,524000000	0,3271	5,45
	24	1005 do 1500	1	0,000838491	0,9837	0,000852385	-0,00097572	1,770000000	-0,1727	5,28
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,001828105	0,000880122	4,190000000	0,3688	5,65
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000947983	8,180000000	0,7754	6,43
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	6,43
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	6,43

Tablica 5a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-II(W)_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	78,498	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,58	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	687	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	35,01	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,041	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,10	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	3,77	%

Tablica 5b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-II(W)_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	66	0,055340383	0,0001178	469,7825423	292,8729089	0,000000524	0,0153	0,02
	2	15 do 20	58	0,048632458	0,0002749	176,9096334	85,6849552	0,000004190	0,0359	0,05
	3	25 do 30	47	0,039409061	0,000432	91,22467816	-1,30824684	0,000014100	-0,0018	0,05
	4	35 do 40	65	0,054501893	0,000589	92,53292499	1,50257603	0,000033500	0,0050	0,05
	5	45 do 50	81	0,067917743	0,0007461	91,03034896	52,0394193	0,000065400	0,3403	0,39
	6	55 do 60	42	0,035216608	0,0009032	38,99092966	14,69752164	0,000113000	0,1661	0,56
	7	65 do 80	66	0,055340383	0,002278	24,29340802	1,2103892	0,000268000	0,0324	0,59
	8	85 do 100	80	0,067079253	0,002906	23,08301882	11,45708722	0,000524000	0,6004	1,19
	9	105 do 120	49	0,041086042	0,003534	11,6259316	3,569331469	0,000905000	0,3230	1,52
	10	125 do 140	40	0,033539626	0,004163	8,056600133	6,131449382	0,001440000	0,8829	2,40
	11	145 do 160	11	0,009223397	0,004791	1,925150751	-0,08636033	0,002140000	-0,0185	2,38
	12	165 do 180	13	0,010900379	0,005419	2,011511084	0,763674599	0,003050000	0,2329	2,61
	13	185 do 200	9	0,007546416	0,0060476	1,247836485	0,24305439	0,004190000	0,1018	2,72
	14	205 do 220	8	0,006707925	0,006676	1,004782096	0,315989112	0,005580000	0,1763	2,89
	15	225 do 240	6	0,005030944	0,007304	0,688792984	-0,15677934	0,007240000	-0,1135	2,78
	16	245 do 260	8	0,006707925	0,007933	0,845572327	0,159970807	0,009200000	0,1472	2,93
	17	265 do 280	7	0,005869435	0,008561	0,68560152	-0,2268924	0,011500000	-0,2609	2,66
	18	285 do 300	10	0,008384907	0,009189	0,912493915	0,782091013	0,014100000	1,1027	3,77
	19	305 do 350	4	0,003353963	0,02572	0,130402902	-0,15239327	0,022400000	-0,3414	3,43
	20	355 do 400	10	0,008384907	0,02965	0,282796175	0,132976522	0,033500000	0,4455	3,87
	21	405 do 450	6	0,005030944	0,03358	0,149819653	0,06038065	0,047700000	0,2880	4,16
	22	455 do 500	4	0,003353963	0,0375	0,089439004	0,079507642	0,065400000	0,5200	4,68
	23	505 do 1000	7	0,005869435	0,591	0,009931361	0,006521823	0,524000000	0,3417	5,02
	24	1005 do 1500	4	0,003353963	0,9837	0,003409538	0,001581433	1,770000000	0,2799	5,30
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,001828105	0,001354113	4,190000000	0,5674	5,87
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	8,61603E-05	8,180000000	0,0705	5,94
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	6,27
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	6,27

Tablica 6a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-II(V-W)_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie $P=$	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory $T_a=$	78,256	mm
Całkowita zawartość powietrza $A=$	6,56	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw $N=$	726	
Powierzchnia właściwa systemu porów $\alpha=$	37,11	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze $R=$	4,054	
Wskaźnik rozmieszczenia $L=$	0,09	mm
Zawartość mikroporów $A_{300}=$	4,21	%

Tablica 6b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-II(V-W)_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, $T_{tot}=$			1192,62		mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza		
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%		
	1	0 do 10	91	0,07630265	0,0001178	647,730475	391,5165232	0,000000524	0,0205	0,02		
	2	15 do 20	84	0,070433215	0,0002749	256,2139518	110,6426568	0,000004190	0,0464	0,07		
	3	25 do 30	75	0,062886799	0,000432	145,5712949	24,56670071	0,000014100	0,0346	0,10		
	4	35 do 40	85	0,071271706	0,000589	121,0045942	37,84106554	0,000033500	0,1268	0,23		
	5	45 do 50	74	0,062048309	0,0007461	83,16352868	39,53082168	0,000065400	0,2585	0,49		
	6	55 do 60	47	0,039409061	0,0009032	43,632707	27,43710165	0,000113000	0,3100	0,80		
	7	65 do 80	44	0,036893589	0,002278	16,19560535	5,808246879	0,000268000	0,1557	0,95		
	8	85 do 100	36	0,030185664	0,002906	10,38735847	1,371329882	0,000524000	0,0719	1,02		
	9	105 do 120	38	0,031862645	0,003534	9,016028589	2,36933348	0,000905000	0,2144	1,24		
	10	125 do 140	33	0,027670192	0,004163	6,646695109	0,171188039	0,001440000	0,0247	1,26		
	11	145 do 160	37	0,031024154	0,004791	6,475507071	2,297753281	0,002140000	0,4917	1,76		
	12	165 do 180	27	0,022639248	0,005419	4,17775379	1,543432321	0,003050000	0,4707	2,23		
	13	185 do 200	19	0,015931323	0,0060476	2,634321469	0,499159516	0,004190000	0,2091	2,44		
	14	205 do 220	17	0,014254341	0,006676	2,135161953	0,413179494	0,005580000	0,2306	2,67		
	15	225 do 240	15	0,01257736	0,007304	1,721982459	0,55932051	0,007240000	0,4049	3,07		
	16	245 do 260	11	0,009223397	0,007933	1,16266195	0,281174281	0,009200000	0,2587	3,33		
	17	265 do 280	9	0,007546416	0,008561	0,881487668	0,516490102	0,011500000	0,5940	3,92		
	18	285 do 300	4	0,003353963	0,009189	0,364997566	0,201993939	0,014100000	0,2848	4,21		
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	-0,09151293	0,022400000	-0,2050	4,00		
	20	355 do 400	9	0,007546416	0,02965	0,254516557	0,079726962	0,033500000	0,2671	4,27		
	21	405 do 450	7	0,005869435	0,03358	0,174789595	0,062990841	0,047700000	0,3005	4,57		
	22	455 do 500	5	0,004192453	0,0375	0,111798755	0,107542457	0,065400000	0,7033	5,27		
	23	505 do 1000	3	0,002515472	0,591	0,004256298	0,001699144	0,524000000	0,0890	5,36		
	24	1005 do 1500	3	0,002515472	0,9837	0,002557154	0,001338417	1,770000000	0,2369	5,60		
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000270754	4,190000000	0,1134	5,71		
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000560152	8,180000000	0,4582	6,17		
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	6,50		
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	6,50		

Tablica 7a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-II(V-W)_2

Zawartość zączynu cementowego w betonie P=	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a =	76,103	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	6,38	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	734	
Powierzchnia właściwa systemu porów α =	38,55	mm ⁻¹
Stosunek zączyn/powietrze R=	4,169	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,09	mm
Zawartość mikroporów A_{300} =	4,09	%

Tablica 7b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-II(V-W)_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	66	0,055340383	0,0001178	469,7825423	192,2174279	0,00000524	0,0101	0,01
	2	15 do 20	91	0,07630265	0,0002749	277,5651144	143,6395231	0,000004190	0,0602	0,07
	3	25 do 30	69	0,057855855	0,000432	133,9255913	24,3096648	0,000014100	0,0343	0,10
	4	35 do 40	77	0,064563781	0,000589	109,6159265	32,07155519	0,000033500	0,1074	0,21
	5	45 do 50	69	0,057855855	0,0007461	77,54437134	11,6311331	0,000065400	0,0761	0,29
	6	55 do 60	71	0,059532837	0,0009032	65,91323824	48,98146901	0,000113000	0,5535	0,84
	7	65 do 80	46	0,03857057	0,002278	16,93176923	5,967335288	0,000268000	0,1599	1,00
	8	85 do 100	38	0,031862645	0,002906	10,96443394	2,422933173	0,000524000	0,1270	1,13
	9	105 do 120	36	0,030185664	0,003534	8,541500769	2,096220663	0,000905000	0,1897	1,32
	10	125 do 140	32	0,026831701	0,004163	6,445280106	1,369882672	0,001440000	0,1973	1,52
	11	145 do 160	29	0,024316229	0,004791	5,075397434	0,897643644	0,002140000	0,1921	1,71
	12	165 do 180	27	0,022639248	0,005419	4,17775379	0,988838327	0,003050000	0,3016	2,01
	13	185 do 200	23	0,019285285	0,0060476	3,188915463	1,304949033	0,004190000	0,5468	2,56
	14	205 do 220	15	0,01257736	0,006676	1,883966429	0,621179293	0,005580000	0,3466	2,90
	15	225 do 240	11	0,009223397	0,007304	1,262787137	0,205821728	0,007240000	0,1490	3,05
	16	245 do 260	10	0,008384907	0,007933	1,056965409	0,17547774	0,009200000	0,1614	3,21
	17	265 do 280	9	0,007546416	0,008561	0,881487668	0,333991319	0,011500000	0,3841	3,60
	18	285 do 300	6	0,005030944	0,009189	0,547496349	0,351891996	0,014100000	0,4962	4,09
	19	305 do 350	6	0,005030944	0,02572	0,195604353	-0,0589122	0,022400000	-0,1320	3,96
	20	355 do 400	9	0,007546416	0,02965	0,254516557	0,104696904	0,033500000	0,3507	4,31
	21	405 do 450	6	0,005030944	0,03358	0,149819653	0,0827404	0,047700000	0,3947	4,71
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,067079253	0,055729125	0,065400000	0,3645	5,07
	23	505 do 1000	8	0,006707925	0,591	0,011350127	0,008792974	0,524000000	0,4608	5,53
	24	1005 do 1500	3	0,002515472	0,9837	0,002557154	0,001338417	1,770000000	0,2369	5,77
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000744745	4,190000000	0,3120	6,08
	26	2005 do 2500	1	0,000838491	1,769	0,000473991	0,000473991	8,180000000	0,3877	6,47
	27	2505 do 3000	0	0	2,162	0	0	14,100000000	0,0000	6,47
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	6,47

Tablica 8a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-V(S-W)_1

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P_v	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T_a	72,313	mm
Całkowita zawartość powietrza A_v	6,06	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N_v	632	
Powierzchnia właściwa systemu porów α_v	34,96	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R_v	4,387	
Wskaźnik rozmieszczenia L_v	0,11	mm
Zawartość mikroporów A_{300}	3,02	%

Tablica 8b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-V(S-W)_1

		Całkowita długość linii pomiarowej, T_{tot}			mm					
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstota występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki		μm		mm ⁻¹	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	59	0,049470949	0,0001178	419,9571211	218,646159	0,000000524	0,0115	0,01
	2	15 do 20	66	0,055340383	0,0002749	201,3109621	90,67677795	0,000004190	0,0380	0,05
	3	25 do 30	57	0,047793968	0,000432	110,6341841	-27,4534116	0,000014100	-0,0387	0,01
	4	35 do 40	97	0,081333594	0,000589	138,0875958	72,90537058	0,000033500	0,2442	0,25
	5	45 do 50	58	0,048632458	0,0007461	65,18222518	8,55254163	0,000065400	0,0559	0,31
	6	55 do 60	61	0,05114793	0,0009032	56,62968355	33,80860329	0,000113000	0,3820	0,69
	7	65 do 80	62	0,051986421	0,002278	22,82108027	8,682731236	0,000268000	0,2327	0,93
	8	85 do 100	49	0,041086042	0,002906	14,13834903	5,596848261	0,000524000	0,2933	1,22
	9	105 do 120	36	0,030185664	0,003534	8,541500769	4,513200702	0,000905000	0,4084	1,63
	10	125 do 140	20	0,016769813	0,004163	4,028300066	1,228080792	0,001440000	0,1768	1,80
	11	145 do 160	16	0,013415851	0,004791	2,800219274	0,943439812	0,002140000	0,2019	2,01
	12	165 do 180	12	0,010061888	0,005419	1,856779462	0,608942977	0,003050000	0,1857	2,19
	13	185 do 200	9	0,007546416	0,0060476	1,247836485	0,117456628	0,004190000	0,0492	2,24
	14	205 do 220	9	0,007546416	0,006676	1,130379858	0,441586874	0,005580000	0,2464	2,49
	15	225 do 240	6	0,005030944	0,007304	0,688792984	0,26600682	0,007240000	0,1926	2,68
	16	245 do 260	4	0,003353963	0,007933	0,422786164	0,128956941	0,009200000	0,1186	2,80
	17	265 do 280	3	0,002515472	0,008561	0,293829223	0,020081048	0,011500000	0,0231	2,82
	18	285 do 300	3	0,002515472	0,009189	0,273748175	0,143345273	0,014100000	0,2021	3,02
	19	305 do 350	4	0,003353963	0,02572	0,130402902	0,045564049	0,022400000	0,1021	3,13
	20	355 do 400	3	0,002515472	0,02965	0,084838852	-0,11492069	0,033500000	-0,3850	2,74
	21	405 do 450	8	0,006707925	0,03358	0,199759538	0,132680285	0,047700000	0,6329	3,37
	22	455 do 500	3	0,002515472	0,0375	0,067079253	0,057147891	0,065400000	0,3737	3,75
	23	505 do 1000	7	0,005869435	0,591	0,009931361	0,005669439	0,524000000	0,2971	4,04
	24	1005 do 1500	5	0,004192453	0,9837	0,004261923	0,003043186	1,770000000	0,5386	4,58
	25	1505 do 2000	2	0,001676981	1,376	0,001218736	0,000270754	4,190000000	0,1134	4,70
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000560152	8,180000000	0,4582	5,15
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000387831	14,100000000	0,5468	5,70
	28	3005 do 4000	0	0	5,502	0	0	33,500000000	0,0000	5,70

Tablica 9a. Zestawienie wyników analizy porów powietrznych w próbce C-V(S-W)_2

Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	26,6	%
Całkowita długość cięciw przypadająca na pory T _a =	70,209	mm
Całkowita zawartość powietrza A=	5,89	%
Całkowita liczba mierzonych cięciw N=	617	
Powierzchnia właściwa systemu porów α=	35,16	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	4,518	
Wskaźnik rozmieszczenia L=	0,11	mm
Zawartość mikroporów A ₃₀₀ =	2,96	%

Tablica 9b. Oznaczanie rozkładu porów powietrznych w próbce C-V(S-W)_2

Całkowita długość linii pomiarowej, T _{tot} =			1192,62	mm						
Kolumna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przedmiot	Klasa	Granice klasy	Liczba cięciw zarejestrowana w klasie	Częstotliwość występowania cięciw	Udział porów zliczonych	Potencjalna liczba cięciw	Liczba porów w klasie	Objętość pojedynczego pora	Zawartość powietrza	Skumulowana zawartość powietrza
Jednostki	μm			mm ⁻¹	mm ²	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%
	1	0 do 10	99	0,083010575	0,0001178	704,6738134	436,2591973	0,000000524	0,0229	0,02
	2	15 do 20	88	0,073787178	0,0002749	268,4146161	101,4928646	0,000004190	0,0425	0,07
	3	25 do 30	86	0,072110197	0,000432	166,9217515	72,96524306	0,000014100	0,1029	0,17
	4	35 do 40	66	0,055340383	0,000589	93,95650846	31,02194621	0,000033500	0,1039	0,27
	5	45 do 50	56	0,046955477	0,0007461	62,93456225	15,58843337	0,000065400	0,1019	0,37
	6	55 do 60	51	0,042763024	0,0009032	47,34612887	32,25476934	0,000113000	0,3645	0,74
	7	65 do 80	41	0,034378117	0,002278	15,09135953	3,838387854	0,000268000	0,1029	0,84
	8	85 do 100	39	0,032701136	0,002906	11,25297168	4,60958219	0,000524000	0,2415	1,08
	9	105 do 120	28	0,023477738	0,003534	6,643389487	2,212259414	0,000905000	0,2002	1,28
	10	125 do 140	22	0,018446794	0,004163	4,431130073	1,28088339	0,001440000	0,1844	1,47
	11	145 do 160	18	0,015092832	0,004791	3,150246683	0,519809112	0,002140000	0,1112	1,58
	12	165 do 180	17	0,014254341	0,005419	2,630437571	1,243952588	0,003050000	0,3794	1,96
	13	185 do 200	10	0,008384907	0,0060476	1,386484984	0,256105126	0,004190000	0,1073	2,07
	14	205 do 220	9	0,007546416	0,006676	1,130379858	0,326788043	0,005580000	0,1823	2,25
	15	225 do 240	7	0,005869435	0,007304	0,803591814	0,169412569	0,007240000	0,1227	2,37
	16	245 do 260	6	0,005030944	0,007933	0,634179245	0,144463874	0,009200000	0,1329	2,50
	17	265 do 280	5	0,004192453	0,008561	0,489715371	0,033468414	0,011500000	0,0385	2,54
	18	285 do 300	5	0,004192453	0,009189	0,456246958	0,29324333	0,014100000	0,4135	2,96
	19	305 do 350	5	0,004192453	0,02572	0,163003627	-0,06323331	0,022400000	-0,1416	2,81
	20	355 do 400	8	0,006707925	0,02965	0,22623694	0,026477402	0,033500000	0,0887	2,90
	21	405 do 450	8	0,006707925	0,03358	0,199759538	0,02088153	0,047700000	0,0996	3,00
	22	455 do 500	8	0,006707925	0,0375	0,178878007	0,170365412	0,065400000	1,1142	4,12
	23	505 do 1000	6	0,005030944	0,591	0,008512596	0,005955442	0,524000000	0,3121	4,43
	24	1005 do 1500	3	0,002515472	0,9837	0,002557154	0,000729049	1,770000000	0,1290	4,56
	25	1505 do 2000	3	0,002515472	1,376	0,001828105	0,000880122	4,190000000	0,3688	4,93
	26	2005 do 2500	2	0,001676981	1,769	0,000947983	0,000560152	8,180000000	0,4582	5,38
	27	2505 do 3000	1	0,000838491	2,162	0,000387831	0,000235434	14,100000000	0,3320	5,72
	28	3005 do 4000	1	0,000838491	5,502	0,000152397		33,500000000	0,0000	5,72

Załącznik IX. Wyniki badań współczynnika migracji jonów chlorkowych**Plansza 1. Współczynnik migracji jonów chlorkowych betonów z popiołami P1, P2, P3**

Tablica 1. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9

Oznaczenie	Średnia wartość współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]			
	Czas dojrzewania			
	28 dni	Odch. Stand.	90 dni	Odch. Stand.
P1-0_N	9,0	0,8	9,2	1,1
P1-30_CM-9_N	7,9	0,6	6,6	0,8
P2-30_CM-9_N	3,5	1,0	3,3	0,3
P1-0	9,4	1,1	8,8	0,5
P1-30_CM-9	7,9	1,1	7,1	0,6
P2-30_CM-9	3,1	0,4	2,8	1,0

Tablica 2. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym napowietrzonych betonów z popiołem P3 oraz cementami CM-9 i CM-2

Oznaczenie	Średnia wartość współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]			
	Czas dojrzewania			
	28 dni	Odch. Stand.	90 dni	Odch. Stand.
P3-0_CM_9	10,0	1,3	9,7	0,9
P3-20_CM_9	10,1	0,6	8,6	0,8
P3-40_CM_9	4,7	0,2	3,6	0,6
P3-0_CM_2	17,2	1,8	14,3	1,6
P3-20_CM_2	13,6	1,5	9,5	1,2
P3-40_CM_2	10,2	0,9	6,2	0,9

Plansza 2. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym betonów z aktywowanymi PLW

Tablica 1. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym betonów z aktywowanymi PLW

Oznaczenie	Średnia wartość współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym [$\times 10^{-12}$ m ² /s]			
	Czas dojrzewania			
	28 dni	Odch. Stand.	90 dni	Odch. Stand.
P4-0	9,9	0,6	10,9	1,1
P4-30	13,8	0,8	8,2	1,4
P4-30M	8,2	0,9	4,6	0,5
P4-30S	8,5	0,5	3,7	0,6
P4-0_P	13,7	1,8	10,5	1,1
P4-30_P	19,6	1,4	11,9	0,9
P4-30M_P	13,1	0,7	8,0	1,0
P4-30S_P	11,0	0,3	7,5	0,6

Tablica 2. Współczynnik migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym betonów z cementami wieloskładnikowymi z PLW

Oznaczenie	Średnia wartość współczynnika migracji jonów chlorkowych w stanie nieustalonym [$\times 10^{-12}$ m ² /s]			
	Czas dojrzewania			
	28 dni	Odch. Stand.	90 dni	Odch. Stand.
C-I	12,4	1,1	9,9	1,9
C-II(W)	10,4	1,8	4,2	0,4
C-II(V-W)	11,3	1,9	4,3	0,5
C-V(S-W)	12,3	0,9	3,6	1,1
C-I_P	12,3	0,7	12,0	2,1
C-II(W)_P	16,1	1,9	8,0	0,7
C-II(V-W)_P	11,4	0,6	7,8	0,8
C-V(S-W)_P	14,8	2,1	11,5	1,7

Załącznik X. Wyniki badań mrozoodporności i powierzchniowego luszczenia

Plansza 1. Mrozoodporność wewnętrzna betonów z popiołami P1, P2, P3

Tablica 1. Pomiary dynamicznego modułu sprężystości podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9

Oznaczenie	Średnia wartość dynamicznego modułu sprężystości [GPa]					
	Liczba cykli					
	0	Odch. Stand.	100	Odch. Stand.	150	Odch. Stand.
P1-0_N	51,6	0,8	48,5	0,7	46,8	1,0
P1-30_CM-9_N	44,1	1,2	40,2	1,6	37,9	1,8
P2-30_CM-9_N	44,8	1,2	39,5	1,5	35,2	1,7
P1-0	48,8	0,6	48,6	1,5	49,1	1,1
P1-30_CM-9	41,7	1,6	40,7	1,3	40,3	1,4
P2-30_CM-9	40,3	1,0	39,4	1,0	40,0	1,0

Tablica 2. Pomiary dynamicznego modułu sprężystości podczas cyklicznego zamrażania i rozmrażania betonów z popiołem P3 oraz cementami CM-9 i CM-2

Oznaczenie	Średnia wartość dynamicznego modułu sprężystości [GPa]					
	Liczba cykli					
	0	Odch. Stand.	100	Odch. Stand.	150	Odch. Stand.
P3-0_CM_9	46,3	1,0	43,7	0,9	42,9	0,4
P3-20_CM_9	47,9	0,5	45,8	0,8	46,6	0,8
P3-40_CM_9	44,0	0,9	41,7	0,6	42,6	0,8
P3-0_CM_2	44,1	0,5	42,6	0,1	42,8	0,8
P3-20_CM_2	42,7	0,1	40,9	0,7	40,9	0,7
P3-40_CM_2	39,8	0,1	38,7	0,1	38,9	0,3

Plansza 2. Powierzchniowe łuszczenie w obecności środków odladzających betonów z popiołami P1, P2, P3

Tablica 1. Powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających betonów z popiołami P1 i P2 oraz cementem CM-9 (* kompozyty nienapowietrzone)

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Liczba cykli zamrażania i rozmrażania					m ₅₆ /m ₂₈
			7	14	28	42	56	
P1-0*	cięta	28	0,52	0,88	1,536	2,03	2,39	1,6
P1-30_CM-9*	cięta	28	0,40	0,69	1,13	1,51	1,75	1,5
P2-30_CM-9*	cięta	28	0,46	0,82	1,09	1,21	1,34	1,2
P1-0	cięta	28	0,006	0,013	0,017	0,019	0,02	1,2
P1-30_CM-9	cięta	28	0,09	0,16	0,19	0,21	0,23	1,2
P2-30_CM-9	cięta	28	0,23	0,33	0,36	0,39	0,44	1,2
P1-0*	formowana	28	0,12	0,28	0,53	1,12	1,77	3,3
P1-30_CM-9*	formowana	28	0,05	0,13	0,28	0,92	1,33	4,8
P2-30_CM-9*	formowana	28	0,23	0,31	0,43	0,85	1,10	2,6
P1-0	formowana	28	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	1,4
P1-30_CM-9	formowana	28	0,01	0,03	0,04	0,10	0,11	3,2
P2-30_CM-9	formowana	28	0,00	0,01	0,02	0,21	0,33	20,6
P1-0	cięta	90	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	1,2
P1-30_CM-9	cięta	90	0,06	0,10	0,12	0,15	0,17	1,4
P2-30_CM-9	cięta	90	0,17	0,24	0,28	0,33	0,36	1,3
P1-0	formowana	90	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	1,7
P1-30_CM-9	formowana	90	0,01	0,03	0,08	0,26	0,35	4,4
P2-30_CM-9	formowana	90	0,01	0,04	0,31	0,48	0,59	1,9

Tablica 2. Powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających napowietrzonych betonów z popiołem P3 oraz cementem CM-9 i CM-2

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Liczba cykli zamrażania i rozmrażania					
			7	14	28	42	56	m_{56}/m_2 8
P3-0_CM_9	cięta	90	0,08	0,13	0,17	0,19	0,23	1,4
P3-20_CM_9	cięta	90	0,12	0,22	0,31	0,35	0,39	1,0
P3-40_CM_9	cięta	90	0,03	0,05	0,07	0,11	0,17	2,5
P3-0_CM_2	cięta	90	0,09	0,15	0,21	0,26	0,30	1,4
P3-20_CM_2	cięta	90	0,21	0,48	0,93	1,21	1,33	1,4
P3-40_CM_2	cięta	90	0,36	0,68	1,22	1,55	1,76	1,4

Plansza 3. Powierzchniowe łuszczenie w obecności środków odladzających betonów z aktywowanymi PLW

Tablica 1. Powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających betonów z aktywowanymi PLW

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Rodzaj dojrzewania	Liczba cykli zamrażania i rozmrażania					
				7	14	28	42	56	m_{56}/m_{28}
P4-0	cięta	28	woda	0,04	0,08	0,13	0,17	0,20	1,5
P4-30	cięta	28	woda	0,18	0,32	0,44	0,49	0,53	1,3
P4-30M	cięta	28	woda	0,12	0,17	0,20	0,23	0,26	1,2
P4-30S	cięta	28	woda	0,15	0,24	0,32	0,36	0,41	1,1
P4-0	cięta	90	woda	0,06	0,08	0,12	0,16	0,18	1,3
P4-30	cięta	90	woda	0,16	0,30	0,36	0,38	0,43	1,3
P4-30M	cięta	90	woda	0,16	0,24	0,27	0,30	0,32	1,3
P4-30S	cięta	90	woda	0,09	0,15	0,30	0,32	0,33	1,1
P4-0_P	cięta	28	powietrze	0,04	0,09	0,16	0,23	0,24	1,5
P4-30_P	cięta	28	powietrze	0,24	0,48	0,77	0,95	0,97	1,3
P4-30M_P	cięta	28	powietrze	0,13	0,23	0,36	0,43	0,44	1,2
P4-30S_P	cięta	28	powietrze	0,17	0,32	0,43	0,46	0,47	1,1
P4-0_P	cięta	90	powietrze	0,03	0,07	0,12	0,14	0,16	1,3
P4-30_P	cięta	90	powietrze	0,22	0,36	0,48	0,56	0,60	1,3
P4-30M_P	cięta	90	powietrze	0,11	0,18	0,30	0,36	0,40	1,3
P4-30S_P	cięta	90	powietrze	0,15	0,25	0,32	0,34	0,35	1,1

Tablica 2. Powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających betonów z cementami wieloskładnikowymi z PLW

Oznaczenie	Badana powierzchnia	Czas dojrzewania	Rodzaj dojrzewania	Liczba cykli zamrażania i rozmrażania					
				7	14	28	42	56	m_{56}/m_{28}
C-I	ciężta	28	woda	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,1
C-II(W)	ciężta	28	woda	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	1,2
C-II(V-W)	ciężta	28	woda	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,2
C-V(S-W)	ciężta	28	woda	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	1,1
C-I	ciężta	90	woda	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	1,1
C-II(W)	ciężta	90	woda	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	1,1
C-II(V-W)	ciężta	90	woda	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	1,2
C-V(S-W)	ciężta	90	woda	0,02	0,03	0,05	0,06	0,06	1,2
C-I_P	ciężta	28	powietrze	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14	1,2
C-II(W)_P	ciężta	28	powietrze	0,18	0,25	0,32	0,36	0,40	1,3
C-II(V-W)_P	ciężta	28	powietrze	0,18	0,28	0,39	0,49	0,58	1,5
C-V(S-W)_P	ciężta	28	powietrze	0,15	0,19	0,27	0,35	0,43	1,6
C-I_P	ciężta	90	powietrze	0,08	0,13	0,15	0,17	0,17	1,1
C-II(W)_P	ciężta	90	powietrze	0,05	0,10	0,12	0,15	0,17	1,4
C-II(V-W)_P	ciężta	90	powietrze	0,10	0,14	0,17	0,20	0,23	1,4
C-V(S-W)_P	ciężta	90	powietrze	0,03	0,06	0,07	0,09	0,10	1,3

Załącznik XI. Wyniki badań porozymetrii ręcionej

Tablica 1. Wskaźniki wyznaczone na podstawie badań porozymetrii ręcionej betonów z aktywowanymi PLW

	Przedziały porowatości kapilarnej						Wartości charakterystyczne		
	<0,01 [μm]	0,01 -0,1 [μm]	0,1-1 [μm]	1-10 [μm]	10-100 [μm]	100 -1000 [μm]	r _k [nm]	r _{sr} [nm]	V _t [cm ³ /g]
P4-0	4,5	36,2	50,6	5,8	1,2	1,6	145	140	0,024
P4-30	20,1	63,7	9,0	0,7	3,1	3,5	24	30	0,029
P4-30M	20,0	53,6	21,2	1,2	1,2	2,8	42	49	0,025
P4-30S	15,3	74,1	5,6	0,5	1,9	2,8	17	25	0,022

Tablica 2. Wskaźniki wyznaczone na podstawie badań porozymetrii ręcionej betonów z cementami wieloskładnikowymi

	Przedziały porowatości kapilarnej						Wartości charakterystyczne		
	<0,01 [μm]	0,01 -0,1 [μm]	0,1-1 [μm]	1-10 [μm]	10-100 [μm]	100 -1000 [μm]	r _k [nm]	r _{sr} [nm]	V _t [cm ³ /g]
C-I	0,0	16,8	64,9	14,3	1,7	2,3	463	402	0,048
C-II(W)	5,5	47,8	41,3	2,6	1,8	1,0	71	96	0,038
C-II(V-W)	8,2	41,3	41,6	1,7	2,7	4,4	89	103	0,029
C-V(S-W)	6,2	37,2	56,3	1,0	2,4	3,1	44	49	0,041

Tablica 3. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii ręcionej kompozytu P4-0

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm ³ /g]	Przyrost objętości [cm ³ /g]	Objętość [%]	Dv(d) [cm ³ /(μm-g)]	-dV/d(log d) [cm ³ /g]
5,596	262,8	0	0	0	1,67E-06	0,001041
8,772	167,7	0,0002	0,0002	0,73	2,56E-06	0,001036
12,116	121,4	0,0004	0,0002	1,46	3,68E-06	0,001011
14,782	99,5	0,0004	0,0001	1,67	2,45E-06	0,000583
19,176	76,7	0,0005	0,0001	2,01	3,12E-06	0,000537
22,657	64,92	0,0005	0	2,04	0	0
27,476	53,53	0,0005	0	2,04	2,08E-06	0,000266
31,56	46,6	0,0005	0	2,16	2,5E-06	0,000261
36,438	40,36	0,0005	0	2,17	7,7E-07	7,66E-05
42,432	34,66	0,0005	0	2,25	4,99E-06	0,000398
48,43	30,37	0,0006	0	2,33	5,04E-06	0,000362
55,25	26,62	0,0006	0	2,43	3,06E-06	0,00018
62,829	23,41	0,0006	0	2,47	7,78E-06	0,000426

71,247	20,64	0,0006	0	2,55	3,03E-06	0,000138
79,737	18,45	0,0006	0	2,55	0	0
89,152	16,5	0,0006	0	2,55	0	0
98,994	14,86	0,0006	0	2,55	0	0
108,664	13,54	0,0006	0	2,55	0	0
120,36	12,22	0,0006	0	2,55	0	0
133,082	11,05	0,0006	0	2,61	2,43E-05	0,000625
145,163	10,13	0,0007	0	2,68	1,49E-05	0,00035
158,353	9,288	0,0007	0	2,78	2,91E-05	0,000619
172,644	8,519	0,0007	0	2,81	0	0
188,211	7,815	0,0007	0	2,81	0	0
204,397	7,196	0,0007	0	2,81	0	0
217,269	6,77	0,0007	0	2,81	0	0
231,074	6,365	0,0007	0	2,81	0	0
247,165	5,951	0,0007	0	2,81	0	0
267,347	5,502	0,0007	0	2,88	0,000125	0,001608
287,907	5,109	0,0008	0,0001	3,19	0,000106	0,001227
308,477	4,768	0,0008	0	3,19	0	0
327,91	4,485	0,0008	0	3,19	1,34E-05	0,000154
792,555	1,856	0,0012	0,0004	4,97	0,000401	0,002279
3010,79	0,4885	0,0043	0,0031	17,85	0,008123	0,009774
6481,88	0,2269	0,0089	0,0046	36,81	0,02963	0,01557
11175,6	0,1316	0,0126	0,0037	51,92	0,04997	0,01524
17140,5	0,08581	0,0155	0,0029	63,96	0,08063	0,01603
23994,5	0,0613	0,0178	0,0023	73,24	0,1023	0,01448
31419	0,04681	0,0194	0,0016	79,81	0,1204	0,01303
39316,7	0,03741	0,0206	0,0012	84,69	0,1287	0,01111
47717,8	0,03082	0,0214	0,0008	88,04	0,1198	0,008512
56552,9	0,02601	0,0219	0,0005	90,27	0,1074	0,006438
65754	0,02237	0,0223	0,0004	91,77	0,09839	0,005083
75267,8	0,01954	0,0226	0,0003	92,87	0,08778	0,00395
85134,8	0,01728	0,0227	0,0002	93,59	0,07317	0,002918
95327,6	0,01543	0,0229	0,0001	94,14	0,0757	0,002702
105794	0,0139	0,023	0,0001	94,63	0,06945	0,002218
116565	0,01262	0,023	0,0001	94,87	0,03455	0,001007
127816	0,01151	0,0231	0,0001	95,09	0,06559	0,00175
139527	0,01054	0,0232	0,0001	95,35	0,04417	0,001062
151565	0,009704	0,0232	0	95,4	0,006551	0,000148
163969	0,00897	0,0232	0	95,46	0,03163	0,000658
176721	0,008323	0,0232	0	95,52	0,0105	0,000198
189760	0,007751	0,0232	0	95,56	0,04097	0,000743
203024	0,007245	0,0232	0	95,71	0,08075	0,001349
216436	0,006796	0,0233	0	95,84	0,06568	0,001031
229969	0,006396	0,0233	0	95,98	0,1177	0,001744
244080	0,006026	0,0234	0,0001	96,21	0,169	0,002355

259649	0,005665	0,0234	0,0001	96,54	0,2834	0,003716
275864	0,005332	0,0235	0,0001	96,96	0,2755	0,003384
293703	0,005008	0,0236	0,0001	97,33	0,3057	0,003548
318784	0,004614	0,0238	0,0001	97,91	0,4169	0,004461
351942	0,004179	0,024	0,0002	98,79	0,5313	0,005138
388177	0,003789	0,0242	0,0002	99,66	0,4856	0,004238
388177	0,003789	0,0242	0,0002	99,66	0,4856	0,004238

Tablica 4. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu P4-30

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
6,061	2,43E+02	0	0	0	3,95E-06	2,37E-03
9,502	1,55E+02	0,0006	0,0006	2,03	8,56E-06	3,04E-03
12,51	1,18E+02	0,0009	0,0003	3,15	6,73E-06	1,83E-03
17,192	8,56E+01	0,0011	0,0002	3,86	6,84E-06	1,34E-03
20,508	7,17E+01	0,0012	0,0001	4,16	5,42E-06	8,98E-04
25,018	5,88E+01	0,0013	0,0001	4,44	8,04E-06	1,10E-03
28,827	5,10E+01	0,0014	0,0001	4,68	7,30E-06	8,59E-04
34,133	4,31E+01	0,0014	0	4,85	8,57E-06	8,64E-04
38,747	3,80E+01	0,0015	0,0001	5,04	8,33E-06	7,16E-04
44,531	3,30E+01	0,0015	0	5,07	2,10E-06	1,68E-04
50,854	2,89E+01	0,0015	0	5,16	7,36E-06	4,93E-04
57,84	2,54E+01	0,0015	0	5,27	1,20E-05	7,13E-04
64,903	2,27E+01	0,0016	0,0001	5,63	8,27E-05	4,43E-03
73,134	2,01E+01	0,0019	0,0003	6,71	7,13E-05	3,22E-03
82,097	1,79E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
92,24	1,60E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
102,798	1,43E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
114,635	1,28E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
125,921	1,17E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
138,049	1,07E+01	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
150,612	9,77E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
163,034	9,02E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
177,143	8,30E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
191,468	7,68E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
206,391	7,13E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
221,332	6,65E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
236,045	6,23E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
253,74	5,80E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
270,288	5,44E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
287,759	5,11E+00	0,0019	0	6,73	0,00E+00	0,00E+00
308,31	4,77E+00	0,0019	0	6,73	7,46E-07	9,42E-06
793,123	1,85E+00	0,002	0,0001	6,96	6,35E-05	3,98E-04
3577,35	4,11E-01	0,0027	0,0007	9,35	1,93E-03	1,96E-03

8402,98	1,75E-01	0,0038	0,0011	12,99	8,64E-03	3,55E-03
14523,3	1,01E-01	0,0047	0,001	16,38	1,99E-02	4,74E-03
21484,4	6,85E-02	0,0058	0,0011	20,07	5,60E-02	9,11E-03
28489,3	5,16E-02	0,0074	0,0016	25,69	1,45E-01	1,75E-02
35460,5	4,15E-02	0,0096	0,0021	33,03	2,73E-01	2,65E-02
42577,7	3,45E-02	0,012	0,0025	41,6	4,43E-01	3,56E-02
49943,4	2,95E-02	0,0148	0,0028	51,22	6,23E-01	4,26E-02
57770	2,55E-02	0,0175	0,0027	60,57	6,84E-01	4,02E-02
66305,7	2,22E-02	0,0196	0,0021	67,84	5,90E-01	3,01E-02
75511,3	1,95E-02	0,0209	0,0013	72,33	3,68E-01	1,64E-02
85335	1,72E-02	0,0215	0,0005	74,2	2,00E-01	7,95E-03
95610,9	1,54E-02	0,0218	0,0004	75,42	1,92E-01	6,83E-03
106213	1,39E-02	0,0221	0,0003	76,45	1,99E-01	6,37E-03
117118	1,26E-02	0,0224	0,0003	77,37	2,19E-01	6,35E-03
128340	1,15E-02	0,0226	0,0003	78,24	2,34E-01	6,19E-03
139884	1,05E-02	0,0229	0,0002	79,02	2,53E-01	6,14E-03
151815	9,69E-03	0,0231	0,0002	79,81	2,91E-01	6,52E-03
164137	8,96E-03	0,0233	0,0002	80,58	3,24E-01	6,71E-03
176794	8,32E-03	0,0235	0,0002	81,33	3,43E-01	6,58E-03
189663	7,76E-03	0,0237	0,0002	82,04	4,33E-01	7,77E-03
202805	7,25E-03	0,024	0,0003	82,97	5,71E-01	9,56E-03
216308	6,80E-03	0,0243	0,0003	83,88	6,27E-01	9,85E-03
230082	6,39E-03	0,0246	0,0003	84,87	7,57E-01	1,12E-02
244354	6,02E-03	0,0249	0,0003	85,98	9,48E-01	1,32E-02
259472	5,67E-03	0,0252	0,0003	87,16	9,42E-01	1,23E-02
274930	5,35E-03	0,0255	0,0003	88,23	1,11E+00	1,37E-02
291046	5,05E-03	0,0259	0,0004	89,53	1,35E+00	1,57E-02
311825	4,72E-03	0,0264	0,0005	91,23	1,58E+00	1,73E-02
342201	4,30E-03	0,0272	0,0008	93,83	2,04E+00	2,03E-02
377227	3,90E-03	0,0281	0,001	97,13	2,59E+00	2,33E-02

Tablica 5. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu P4-30M

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
5,682	2,59E+02	0,0001	0,0001	0,23	2,39E-06	1,51E-03
9,57	1,54E+02	0,0004	0,0004	1,76	4,57E-06	1,61E-03
13,763	1,07E+02	0,0006	0,0002	2,57	2,73E-06	6,67E-04
18,118	8,12E+01	0,0007	0,0001	2,88	3,44E-06	6,52E-04
23,251	6,33E+01	0,0008	0,0001	3,18	6,31E-06	9,24E-04
27,308	5,39E+01	0,0008	0	3,37	5,38E-06	6,83E-04
32,384	4,54E+01	0,0009	0,0001	3,71	1,07E-05	1,12E-03
38,503	3,82E+01	0,001	0	3,85	2,24E-06	1,97E-04
44,122	3,33E+01	0,001	0	3,95	7,58E-06	5,90E-04
51,028	2,88E+01	0,001	0	4,08	3,31E-06	2,14E-04

58,983	2,49E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
67,56	2,18E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
77,115	1,91E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
87,064	1,69E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
98,13	1,50E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
109,059	1,35E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
119,771	1,23E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
131,989	1,11E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
144,428	1,02E+01	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
156,789	9,38E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
169,428	8,68E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
182,882	8,04E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
195,949	7,51E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
209,005	7,04E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
225,124	6,53E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
240,242	6,12E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
254,679	5,78E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
271,77	5,41E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
289,579	5,08E+00	0,001	0	4,08	0,00E+00	0,00E+00
416,445	3,53E+00	0,001	0	4,12	1,46E-05	1,94E-04
2036,88	7,22E-01	0,0016	0,0006	6,59	1,10E-03	2,18E-03
5841,25	2,52E-01	0,0035	0,0018	13,97	9,63E-03	5,74E-03
10858	1,36E-01	0,0054	0,0019	21,78	2,71E-02	8,65E-03
16929	8,69E-02	0,0075	0,002	29,9	6,36E-02	1,30E-02
23407,6	6,28E-02	0,0098	0,0024	39,43	1,43E-01	2,10E-02
30033,6	4,90E-02	0,0125	0,0027	50,22	2,33E-01	2,65E-02
37156,1	3,96E-02	0,0149	0,0024	59,7	2,45E-01	2,24E-02
45106,2	3,26E-02	0,0163	0,0014	65,46	1,73E-01	1,29E-02
53706,9	2,74E-02	0,0171	0,0008	68,47	1,46E-01	9,24E-03
62744,3	2,34E-02	0,0177	0,0006	70,88	1,53E-01	8,26E-03
72160,7	2,04E-02	0,0181	0,0005	72,7	1,53E-01	7,22E-03
81925,3	1,80E-02	0,0185	0,0004	74,28	1,66E-01	6,89E-03
92111,6	1,60E-02	0,0189	0,0003	75,58	1,66E-01	6,13E-03
102634	1,43E-02	0,0191	0,0003	76,7	1,75E-01	5,80E-03
113428	1,30E-02	0,0194	0,0003	77,71	1,96E-01	5,86E-03
124497	1,18E-02	0,0196	0,0002	78,62	1,90E-01	5,19E-03
135864	1,08E-02	0,0198	0,0002	79,35	1,89E-01	4,73E-03
147614	9,96E-03	0,02	0,0002	80,02	1,85E-01	4,24E-03
159780	9,21E-03	0,0201	0,0001	80,5	1,41E-01	3,00E-03
172323	8,54E-03	0,0202	0,0001	80,88	1,65E-01	3,27E-03
185156	7,94E-03	0,0203	0,0001	81,36	2,41E-01	4,43E-03
198200	7,42E-03	0,0205	0,0002	82,02	3,89E-01	6,69E-03
211689	6,95E-03	0,0207	0,0002	82,91	5,14E-01	8,25E-03
225527	6,52E-03	0,0209	0,0002	83,83	5,78E-01	8,71E-03
239572	6,14E-03	0,0212	0,0003	84,87	7,57E-01	1,07E-02

254637	5,78E-03	0,0215	0,0003	86,08	8,94E-01	1,19E-02
271392	5,42E-03	0,0218	0,0003	87,43	9,81E-01	1,23E-02
290201	5,07E-03	0,0222	0,0004	88,97	1,22E+00	1,43E-02
311672	4,72E-03	0,0227	0,0005	90,91	1,53E+00	1,68E-02
342657	4,29E-03	0,0234	0,0007	93,84	1,81E+00	1,80E-02
377704	3,89E-03	0,0242	0,0008	96,93	2,16E+00	1,95E-02

Tablica 6. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu P4-30S

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
7,173	2,05E+02	0	0	0	2,98E-06	1,51E-03
10,87	1,35E+02	0,0004	0,0004	1,76	6,87E-06	2,14E-03
14,063	1,05E+02	0,0006	0,0002	2,72	5,21E-06	1,25E-03
17,509	8,40E+01	0,0007	0,0001	3,03	2,05E-06	3,89E-04
23,156	6,35E+01	0,0007	0	3,19	3,79E-06	5,68E-04
27,613	5,33E+01	0,0007	0,0001	3,44	5,15E-06	6,36E-04
34,257	4,29E+01	0,0008	0,0001	3,71	5,28E-06	5,18E-04
39,546	3,72E+01	0,0008	0	3,82	4,96E-06	4,31E-04
45,855	3,21E+01	0,0009	0	3,95	6,38E-06	4,77E-04
52,773	2,79E+01	0,0009	0	4,16	1,22E-05	7,82E-04
61,435	2,39E+01	0,0009	0	4,27	1,29E-06	6,69E-05
69,038	2,13E+01	0,0009	0	4,27	0,00E+00	0,00E+00
77,978	1,89E+01	0,0009	0	4,29	7,14E-06	3,20E-04
87,482	1,68E+01	0,0009	0	4,4	1,06E-05	4,09E-04
96,47	1,53E+01	0,001	0	4,5	1,58E-05	5,54E-04
106,43	1,38E+01	0,001	0	4,61	2,55E-05	8,22E-04
116,692	1,26E+01	0,001	0	4,76	2,11E-05	6,07E-04
127,634	1,15E+01	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
138,952	1,06E+01	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
151,058	9,74E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
164,568	8,94E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
178,954	8,22E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
192,054	7,66E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
203,66	7,22E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
216,066	6,81E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
231,23	6,36E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
246,411	5,97E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
261,664	5,62E+00	0,001	0	4,8	0,00E+00	0,00E+00
282,389	5,21E+00	0,001	0	4,8	3,28E-07	5,16E-06
942,137	1,56E+00	0,0011	0,0001	5,08	5,63E-05	2,85E-04
4136,85	3,56E-01	0,0015	0,0004	6,94	1,12E-03	9,23E-04
9300,97	1,58E-01	0,0019	0,0004	8,8	3,86E-03	1,45E-03
15789	9,32E-02	0,0024	0,0005	10,93	1,31E-02	2,93E-03
22986,1	6,40E-02	0,0031	0,0008	14,45	4,51E-02	6,83E-03

30243,4	4,86E-02	0,0042	0,0011	19,66	1,05E-01	1,19E-02
37604,7	3,91E-02	0,0057	0,0014	26,24	1,96E-01	1,79E-02
45185,6	3,26E-02	0,0074	0,0017	34,16	3,23E-01	2,45E-02
52975,6	2,78E-02	0,0093	0,0019	42,97	4,60E-01	2,96E-02
61056,6	2,41E-02	0,0112	0,002	52,12	6,03E-01	3,37E-02
69498,6	2,12E-02	0,0132	0,002	61,31	7,34E-01	3,60E-02
78327	1,88E-02	0,0151	0,0019	69,93	7,87E-01	3,42E-02
87702,9	1,68E-02	0,0166	0,0015	76,77	6,40E-01	2,47E-02
97794,1	1,50E-02	0,0174	0,0008	80,58	3,42E-01	1,18E-02
108463	1,36E-02	0,0177	0,0003	81,95	1,39E-01	4,33E-03
119492	1,23E-02	0,0178	0,0002	82,7	1,53E-01	4,37E-03
130876	1,12E-02	0,018	0,0002	83,56	1,68E-01	4,35E-03
142577	1,03E-02	0,0182	0,0001	84,19	1,51E-01	3,61E-03
154661	9,51E-03	0,0183	0,0001	84,89	2,25E-01	4,96E-03
167067	8,80E-03	0,0185	0,0002	85,74	2,59E-01	5,25E-03
179815	8,18E-03	0,0186	0,0001	86,39	2,09E-01	3,94E-03
192836	7,63E-03	0,0187	0,0001	86,93	2,10E-01	3,70E-03
206226	7,13E-03	0,0188	0,0001	87,41	2,05E-01	3,37E-03
219869	6,69E-03	0,0189	0,0001	87,83	2,16E-01	3,34E-03
233776	6,29E-03	0,019	0,0001	88,32	3,29E-01	4,78E-03
248092	5,93E-03	0,0192	0,0001	89	4,98E-01	6,83E-03
262604	5,60E-03	0,0194	0,0002	89,98	7,57E-01	9,81E-03
278160	5,29E-03	0,0197	0,0003	91,21	8,25E-01	1,01E-02
294879	4,99E-03	0,0199	0,0002	92,22	7,01E-01	8,08E-03
316801	4,64E-03	0,0202	0,0003	93,6	1,01E+00	1,09E-02
348768	4,22E-03	0,0207	0,0005	95,89	1,24E+00	1,21E-02
384188	3,83E-03	0,0212	0,0005	98,28	1,38E+00	1,22E-02

Tablica 7. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu C-I

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
5,9	2,49E+02	0	0	0	2,56E-06	1,66E-03
11,164	1,32E+02	0,0007	0,0007	1,49	1,01E-05	3,09E-03
15,431	9,53E+01	0,0012	0,0005	2,45	1,33E-05	2,91E-03
18,761	7,84E+01	0,0014	0,0002	2,85	9,57E-06	1,76E-03
23,821	6,17E+01	0,0015	0,0002	3,21	9,02E-06	1,26E-03
28,842	5,10E+01	0,0016	0,0001	3,32	5,03E-06	5,95E-04
34,488	4,27E+01	0,0016	0,0001	3,45	1,48E-05	1,47E-03
40,517	3,63E+01	0,0018	0,0001	3,68	1,45E-05	1,21E-03
46,854	3,14E+01	0,0018	0,0001	3,79	9,68E-06	7,08E-04
54,451	2,70E+01	0,0019	0,0001	3,93	1,60E-05	9,96E-04
63,998	2,30E+01	0,0019	0	4	3,08E-06	1,55E-04
72,995	2,02E+01	0,0019	0	4	0,00E+00	0,00E+00
83,029	1,77E+01	0,0019	0	4	0,00E+00	0,00E+00

93,122	1,58E+01	0,0019	0	4	1,66E-06	6,36E-05
102,755	1,43E+01	0,0019	0	4,04	2,13E-05	7,05E-04
113,942	1,29E+01	0,0019	0	4,07	2,25E-06	6,39E-05
125,144	1,18E+01	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
138,8	1,06E+01	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
151,926	9,68E+00	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
165,534	8,89E+00	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
179,027	8,22E+00	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
193,034	7,62E+00	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
207,295	7,10E+00	0,0019	0	4,07	0,00E+00	0,00E+00
223,137	6,59E+00	0,0019	0	4,07	1,23E-05	1,93E-04
237,943	6,18E+00	0,002	0	4,12	1,13E-04	1,62E-03
252,974	5,81E+00	0,002	0	4,21	5,37E-05	7,12E-04
270,014	5,45E+00	0,002	0	4,21	0,00E+00	0,00E+00
287,517	5,12E+00	0,002	0	4,25	3,86E-04	4,66E-03
308,013	4,78E+00	0,0024	0,0004	5,11	1,07E-03	1,18E-02
736,581	2,00E+00	0,0043	0,0019	9,07	1,61E-03	9,12E-03
2046,56	7,19E-01	0,0131	0,0087	27,44	1,88E-02	3,29E-02
4230,46	3,48E-01	0,026	0,0129	54,58	4,77E-02	3,74E-02
8363,65	1,76E-01	0,0342	0,0082	71,83	5,59E-02	2,22E-02
13984,9	1,05E-01	0,0391	0,0049	82,12	9,85E-02	2,42E-02
20518,3	7,17E-02	0,0432	0,0041	90,64	1,32E-01	2,16E-02
27692,8	5,31E-02	0,0454	0,0022	95,35	1,12E-01	1,36E-02
35350	4,16E-02	0,0465	0,0011	97,61	8,37E-02	7,98E-03
43530,7	3,38E-02	0,047	0,0005	98,75	5,91E-02	4,57E-03
52171,9	2,82E-02	0,0473	0,0003	99,29	4,00E-02	2,59E-03
61179,8	2,40E-02	0,0474	0,0001	99,59	3,13E-02	1,73E-03
70583,7	2,08E-02	0,0475	0,0001	99,77	2,33E-02	1,12E-03
80342,8	1,83E-02	0,0476	0	99,87	1,55E-02	6,51E-04
90476,4	1,63E-02	0,0476	0	99,92	8,28E-03	3,11E-04
100960	1,46E-02	0,0476	0	99,94	6,56E-03	2,20E-04
111739	1,32E-02	0,0476	0	99,97	1,37E-02	4,19E-04
122856	1,20E-02	0,0476	0	100	4,25E-03	1,14E-04
134317	1,10E-02	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
146188	1,01E-02	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
158406	9,29E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
170988	8,60E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
183870	8,00E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
197047	7,46E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
210682	6,98E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
224731	6,55E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
239146	6,15E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
253761	5,80E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
269294	5,46E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
287329	5,12E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00

313566	4,69E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
346748	4,24E-03	0,0476	0	100	0,00E+00	0,00E+00
381989	3,85E-03	0,0476	0	100	1,75E-05	1,62E-07

Tablica 8. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu C-II(W)

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
6,485	2,27E+02	0,0001	0,0001	0,17	8,95E-07	5,02E-04
9,583	1,54E+02	0,0002	0,0001	0,56	3,03E-06	1,10E-03
13,003	1,13E+02	0,0004	0,0002	0,96	4,17E-06	1,08E-03
16,718	8,80E+01	0,0005	0,0001	1,21	4,60E-06	9,52E-04
20,694	7,11E+01	0,0006	0,0001	1,5	6,27E-06	1,02E-03
25,831	5,69E+01	0,0007	0,0001	1,69	8,35E-06	1,12E-03
30,232	4,87E+01	0,0007	0,0001	1,89	8,17E-06	9,13E-04
35,999	4,09E+01	0,0008	0	2,01	2,84E-06	2,55E-04
41,875	3,51E+01	0,0008	0	2,05	8,02E-06	6,70E-04
48,264	3,05E+01	0,0008	0,0001	2,19	5,99E-06	4,05E-04
55,608	2,65E+01	0,0008	0	2,19	0,00E+00	0,00E+00
63,513	2,32E+01	0,0009	0	2,21	8,26E-06	4,49E-04
71,79	2,05E+01	0,0009	0	2,27	1,01E-05	4,83E-04
79,386	1,85E+01	0,0009	0	2,38	2,96E-05	1,26E-03
88,375	1,66E+01	0,0009	0	2,45	0,00E+00	0,00E+00
98,367	1,50E+01	0,0009	0	2,45	0,00E+00	0,00E+00
108,574	1,36E+01	0,0009	0	2,45	3,82E-06	1,25E-04
119,691	1,23E+01	0,001	0	2,53	4,84E-05	1,39E-03
130,366	1,13E+01	0,001	0,0001	2,72	8,69E-05	2,27E-03
143,179	1,03E+01	0,0011	0,0001	2,88	2,63E-05	6,10E-04
157,628	9,33E+00	0,0011	0	2,88	0,00E+00	0,00E+00
171,497	8,58E+00	0,0011	0	2,88	1,14E-05	2,32E-04
186,579	7,88E+00	0,0011	0	2,95	3,62E-05	6,54E-04
203,792	7,22E+00	0,0011	0	2,97	0,00E+00	0,00E+00
218,762	6,72E+00	0,0011	0	2,97	0,00E+00	0,00E+00
234,56	6,27E+00	0,0011	0	2,97	0,00E+00	0,00E+00
252,008	5,84E+00	0,0011	0	2,97	2,75E-05	3,80E-04
268,659	5,48E+00	0,0012	0	3,04	6,75E-05	8,45E-04
286,967	5,13E+00	0,0012	0	3,11	1,19E-04	1,42E-03
307,884	4,78E+00	0,0012	0	3,23	6,80E-05	7,33E-04
326,911	4,50E+00	0,0012	0	3,23	1,17E-05	1,39E-04
885,561	1,66E+00	0,0016	0,0004	4,24	3,88E-04	1,99E-03
3295,09	4,46E-01	0,0044	0,0028	11,49	8,47E-03	9,44E-03
6890,16	2,14E-01	0,0091	0,0047	23,7	3,88E-02	1,96E-02
11209	1,31E-01	0,0144	0,0053	37,42	9,84E-02	3,05E-02
16480,5	8,93E-02	0,0206	0,0062	53,61	2,01E-01	4,18E-02
22814,7	6,45E-02	0,0265	0,0059	68,97	2,42E-01	3,56E-02

30154,5	4,88E-02	0,0298	0,0032	77,36	1,93E-01	2,17E-02
38104,3	3,86E-02	0,0317	0,0019	82,33	1,94E-01	1,73E-02
46499,7	3,16E-02	0,033	0,0013	85,74	1,80E-01	1,31E-02
55340,6	2,66E-02	0,0338	0,0008	87,91	1,61E-01	9,88E-03
64490,7	2,28E-02	0,0344	0,0006	89,46	1,58E-01	8,35E-03
74016,6	1,99E-02	0,0349	0,0005	90,66	1,61E-01	7,39E-03
83914,8	1,75E-02	0,0353	0,0004	91,65	1,62E-01	6,54E-03
94177,6	1,56E-02	0,0356	0,0003	92,41	1,47E-01	5,30E-03
104809	1,40E-02	0,0358	0,0002	93,02	1,56E-01	5,06E-03
115787	1,27E-02	0,036	0,0002	93,57	1,55E-01	4,54E-03
127186	1,16E-02	0,0362	0,0002	94	1,38E-01	3,67E-03
138931	1,06E-02	0,0363	0,0001	94,31	1,12E-01	2,73E-03
151030	9,74E-03	0,0364	0,0001	94,51	6,99E-02	1,56E-03
163532	8,99E-03	0,0364	0,0001	94,65	1,07E-01	2,25E-03
176380	8,34E-03	0,0365	0,0001	94,86	8,52E-02	1,63E-03
189505	7,76E-03	0,0366	0	94,95	6,48E-02	1,16E-03
202812	7,25E-03	0,0366	0	95,06	1,56E-01	2,64E-03
216360	6,80E-03	0,0367	0,0001	95,29	1,12E-01	1,73E-03
230330	6,39E-03	0,0367	0	95,37	1,80E-01	2,68E-03
244719	6,01E-03	0,0368	0,0001	95,71	4,60E-01	6,41E-03
259344	5,67E-03	0,037	0,0002	96,21	5,63E-01	7,36E-03
275190	5,35E-03	0,0372	0,0001	96,57	3,73E-01	4,61E-03
292685	5,03E-03	0,0373	0,0001	96,96	5,51E-01	6,40E-03
312134	4,71E-03	0,0375	0,0002	97,44	6,23E-01	6,80E-03
342954	4,29E-03	0,0378	0,0003	98,18	6,76E-01	6,69E-03
378461	3,89E-03	0,0381	0,0003	98,93	9,32E-01	8,43E-03

Tablica 9. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii ręciovowej kompozytu C-II(V-W)

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
4,828	3,05E+02	0	0	0	2,64E-06	2,06E-03
8,046	1,83E+02	0,0007	0,0007	2,43	7,90E-06	3,31E-03
11,154	1,32E+02	0,0011	0,0004	3,78	6,56E-06	2,02E-03
15,656	9,39E+01	0,0014	0,0003	4,73	8,23E-06	1,76E-03
18,64	7,89E+01	0,0015	0,0001	5,09	6,32E-06	1,16E-03
22,992	6,40E+01	0,0016	0,0001	5,43	6,81E-06	1,01E-03
26,76	5,50E+01	0,0017	0,0001	5,67	9,25E-06	1,18E-03
32,045	4,59E+01	0,0017	0,0001	5,92	8,59E-06	9,16E-04
36,792	4,00E+01	0,0018	0,0001	6,12	9,19E-06	8,50E-04
44,049	3,34E+01	0,0018	0,0001	6,3	7,59E-06	5,79E-04
49,426	2,98E+01	0,0019	0	6,44	1,50E-05	1,03E-03
56,833	2,59E+01	0,0019	0,0001	6,63	1,60E-05	9,62E-04
64,263	2,29E+01	0,002	0	6,75	3,68E-06	1,85E-04
72,465	2,03E+01	0,002	0	6,75	0,00E+00	0,00E+00

80,968	1,82E+01	0,002	0	6,75	0,00E+00	0,00E+00
90,679	1,62E+01	0,002	0	6,75	3,85E-06	1,52E-04
101,67	1,45E+01	0,002	0	6,83	1,57E-05	5,19E-04
112,411	1,31E+01	0,002	0	6,9	1,78E-05	5,44E-04
124,018	1,19E+01	0,002	0	7	2,52E-05	6,90E-04
135,911	1,08E+01	0,0021	0	7,08	1,65E-05	4,09E-04
148,269	9,92E+00	0,0021	0	7,15	3,18E-05	7,27E-04
160,75	9,15E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
174,046	8,45E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
189,742	7,75E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
205,028	7,17E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
219,336	6,71E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
233,124	6,31E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
248,472	5,92E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
265,795	5,53E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
281,974	5,22E+00	0,0021	0	7,19	0,00E+00	0,00E+00
301,638	4,88E+00	0,0021	0	7,19	6,55E-07	8,18E-06
666,128	2,21E+00	0,0022	0,0001	7,58	1,20E-04	9,41E-04
2875,61	5,12E-01	0,0042	0,002	14,34	5,27E-03	6,92E-03
6555,9	2,24E-01	0,0082	0,004	27,96	2,72E-02	1,43E-02
11102,3	1,33E-01	0,0122	0,004	41,61	6,74E-02	2,11E-02
16580,4	8,87E-02	0,0165	0,0043	56,45	1,28E-01	2,64E-02
23038,8	6,38E-02	0,0201	0,0035	68,52	1,42E-01	2,07E-02
30375,9	4,84E-02	0,022	0,002	75,18	1,27E-01	1,41E-02
38249,5	3,85E-02	0,0233	0,0013	79,59	1,34E-01	1,19E-02
46612,4	3,16E-02	0,0242	0,0009	82,7	1,32E-01	9,58E-03
55429,9	2,65E-02	0,0248	0,0006	84,9	1,28E-01	7,82E-03
64638,1	2,28E-02	0,0253	0,0005	86,48	1,16E-01	6,10E-03
74227,8	1,98E-02	0,0256	0,0003	87,59	1,14E-01	5,23E-03
84192	1,75E-02	0,0259	0,0003	88,54	1,20E-01	4,84E-03
94486,2	1,56E-02	0,0261	0,0002	89,32	1,24E-01	4,47E-03
105110	1,40E-02	0,0263	0,0002	90,01	1,28E-01	4,14E-03
116060	1,27E-02	0,0265	0,0002	90,57	1,23E-01	3,59E-03
127361	1,16E-02	0,0267	0,0001	91,08	1,39E-01	3,71E-03
139042	1,06E-02	0,0268	0,0001	91,45	7,79E-02	1,89E-03
151066	9,74E-03	0,0268	0,0001	91,65	1,05E-01	2,38E-03
163485	9,00E-03	0,027	0,0001	92,13	2,96E-01	6,19E-03
176249	8,35E-03	0,0272	0,0003	93	3,28E-01	6,28E-03
189234	7,77E-03	0,0273	0,0001	93,3	8,19E-02	1,47E-03
202401	7,27E-03	0,0274	0,0001	93,49	1,63E-01	2,74E-03
215685	6,82E-03	0,0274	0,0001	93,78	1,80E-01	2,84E-03
229139	6,42E-03	0,0275	0,0001	93,98	1,25E-01	1,86E-03
243087	6,05E-03	0,0276	0,0001	94,2	2,65E-01	3,72E-03
258389	5,69E-03	0,0277	0,0001	94,63	3,72E-01	4,89E-03
274646	5,36E-03	0,0278	0,0001	95,11	4,80E-01	5,94E-03

293209	5,02E-03	0,028	0,0002	95,78	6,25E-01	7,24E-03
313329	4,69E-03	0,0282	0,0002	96,4	5,21E-01	5,65E-03
340534	4,32E-03	0,0285	0,0002	97,22	7,77E-01	7,80E-03
375743	3,91E-03	0,0288	0,0004	98,54	1,11E+00	1,00E-02
412655	3,56E-03	0,0293	0,0004	100	1,29E+00	1,04E-02

Tablica 10. Wyniki pomiarów metodą porozymetrii rtęciowej kompozytu C-V(S-W)

Ciśnienie [kPa]	Średnica porów [μm]	Objętość [cm^3/g]	Przyrost objętości [cm^3/g]	Objętość [%]	Dv(d) [$\text{cm}^3/(\mu\text{m}\cdot\text{g})$]	-dV/d(log d) [cm^3/g]
5,212	2,82E+02	0	0	0	2,14E-06	1,51E-03
8,145	1,81E+02	0,0005	0,0005	1,13	6,77E-06	2,94E-03
12,588	1,17E+02	0,0011	0,0006	2,66	1,15E-05	3,05E-03
14,807	9,93E+01	0,0013	0,0002	3,11	9,77E-06	2,27E-03
20,647	7,12E+01	0,0016	0,0003	3,76	1,13E-05	1,84E-03
23,67	6,21E+01	0,0016	0,0001	3,94	4,78E-06	6,90E-04
29,247	5,03E+01	0,0017	0,0001	4,14	9,11E-06	1,06E-03
33,664	4,37E+01	0,0018	0,0001	4,34	1,46E-05	1,48E-03
39,558	3,72E+01	0,0019	0,0001	4,49	6,38E-06	5,38E-04
45,776	3,21E+01	0,0019	0	4,56	6,61E-06	4,94E-04
51,923	2,83E+01	0,0019	0	4,65	1,27E-05	8,36E-04
59,479	2,47E+01	0,002	0,0001	4,78	1,52E-05	8,61E-04
66,358	2,22E+01	0,002	0	4,83	7,92E-06	4,12E-04
74,403	1,98E+01	0,0021	0,0001	4,97	4,10E-05	1,90E-03
84,214	1,75E+01	0,0022	0,0001	5,21	2,35E-05	9,16E-04
94,751	1,55E+01	0,0022	0	5,21	0,00E+00	0,00E+00
106,181	1,39E+01	0,0022	0	5,24	2,22E-05	7,28E-04
117,424	1,25E+01	0,0022	0,0001	5,4	4,99E-05	1,43E-03
128,989	1,14E+01	0,0023	0	5,45	1,24E-05	3,28E-04
142,133	1,04E+01	0,0023	0	5,51	2,49E-05	5,91E-04
156,155	9,42E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
169,547	8,68E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
185,118	7,95E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
197,802	7,44E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
210,735	6,98E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
223,471	6,58E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
238,188	6,18E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
253,753	5,80E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
269,925	5,45E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
287,38	5,12E+00	0,0023	0	5,53	0,00E+00	0,00E+00
307,206	4,79E+00	0,0023	0	5,53	6,59E-07	8,01E-06
648,963	2,27E+00	0,0024	0,0001	5,79	9,87E-05	7,62E-04
2954,59	4,98E-01	0,0038	0,0014	9,16	3,16E-03	3,90E-03
7249,76	2,03E-01	0,006	0,0022	14,44	1,51E-02	7,21E-03
12586,2	1,17E-01	0,0083	0,0023	20,04	4,91E-02	1,37E-02

18491,5	7,95E-02	0,0116	0,0033	28,03	1,43E-01	2,69E-02
24497,6	6,00E-02	0,016	0,0044	38,63	3,24E-01	4,56E-02
30624,9	4,80E-02	0,0216	0,0056	52,23	6,13E-01	6,86E-02
37307	3,94E-02	0,028	0,0063	67,53	7,28E-01	6,60E-02
45117,8	3,26E-02	0,0318	0,0038	76,64	3,91E-01	2,90E-02
53864,5	2,73E-02	0,0331	0,0013	79,78	2,10E-01	1,32E-02
63028,9	2,33E-02	0,0338	0,0008	81,6	1,81E-01	9,73E-03
72548,6	2,03E-02	0,0344	0,0005	82,89	1,78E-01	8,32E-03
82444,4	1,78E-02	0,0348	0,0004	83,94	1,78E-01	7,32E-03
92738,2	1,59E-02	0,0351	0,0003	84,73	1,58E-01	5,80E-03
103347	1,42E-02	0,0354	0,0003	85,36	1,72E-01	5,66E-03
114268	1,29E-02	0,0356	0,0003	86	2,20E-01	6,57E-03
125469	1,17E-02	0,0359	0,0003	86,65	2,20E-01	5,94E-03
137059	1,07E-02	0,0361	0,0002	87,19	2,77E-01	6,88E-03
149041	9,87E-03	0,0364	0,0003	87,86	3,28E-01	7,49E-03
161449	9,11E-03	0,0367	0,0003	88,48	3,60E-01	7,59E-03
174184	8,44E-03	0,0369	0,0003	89,14	4,65E-01	9,08E-03
187216	7,86E-03	0,0372	0,0003	89,87	5,32E-01	9,65E-03
200474	7,34E-03	0,0375	0,0003	90,53	5,26E-01	8,90E-03
213950	6,88E-03	0,0378	0,0002	91,13	5,66E-01	9,00E-03
227631	6,46E-03	0,038	0,0003	91,76	6,83E-01	1,02E-02
242769	6,06E-03	0,0384	0,0003	92,53	9,14E-01	1,28E-02
258196	5,70E-03	0,0387	0,0003	93,37	9,11E-01	1,20E-02
274071	5,37E-03	0,039	0,0003	94,07	8,89E-01	1,10E-02
293900	5,00E-03	0,0393	0,0003	94,87	9,81E-01	1,14E-02
317412	4,63E-03	0,0397	0,0004	95,89	1,32E+00	1,42E-02
348431	4,22E-03	0,0404	0,0006	97,4	1,57E+00	1,53E-02
383817	3,83E-03	0,041	0,0006	98,94	1,73E+00	1,53E-02

Załącznik XII. Wyniki badań podciągania kapilarnego

Tablica 1. Współczynnik absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonów dojrzewających 28 dni w wodzie – powierzchnia cięta

Czas podciągania kapilarnego [h]	Absorpcja [g/mm ²]			
	P4-0	P4-30	P4-30M	P4-30S
1	1,12	0,84	0,75	0,67
2	1,56	1,16	1,04	0,93
3	1,86	1,48	1,33	1,18
4	2,14	1,64	1,47	1,31
5	2,37	1,81	1,63	1,45
6	2,56	1,94	1,75	1,55
7	2,79	2,06	1,82	1,65
8	3,02	2,18	1,88	1,74
24	4,70	2,98	2,51	2,38
48	5,25	3,47	3,12	2,85
72	5,59	3,90	3,62	3,12
96	5,89	4,26	4,06	3,46
168	6,31	5,01	4,88	4,37

Tablica 2. Współczynnik absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonów dojrzewających 90 dni w wodzie – powierzchnia cięta

Czas podciągania kapilarnego [h]	Absorpcja [g/mm ²]			
	P4-0	P4-30	P4-30M	P4-30S
1	0,95	0,54	0,34	0,30
2	1,33	0,75	0,47	0,42
3	1,58	0,96	0,60	0,53
4	1,82	1,06	0,66	0,59
5	2,01	1,18	0,73	0,65
6	2,13	1,26	0,79	0,70
7	2,31	1,34	0,82	0,74
8	2,46	1,42	0,85	0,78
24	3,65	2,11	1,23	1,07
48	4,21	2,60	1,69	1,35
72	4,47	2,93	1,96	1,59
96	4,71	3,20	2,32	1,79
168	5,02	3,45	2,93	2,21

Tablica 3. Współczynnik absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonów dojrzewających 28 dni w powietrzu – powierzchnia cięta

Czas podciągania kapilarnego [h]	Absorpcja [g/mm ²]			
	P4-0	P4-30	P4-30M	P4-30S
1	1,29	1,58	1,24	1,31
2	1,80	2,19	1,72	1,81
3	2,14	2,79	2,19	2,30
4	2,46	3,10	2,43	2,56
5	2,72	3,42	2,69	2,83
6	2,95	3,66	2,88	3,03
7	3,21	3,82	3,11	3,21
8	3,47	3,95	3,23	3,40
24	6,19	4,96	4,14	4,64
48	6,95	5,77	5,15	5,56
72	7,22	6,33	5,97	6,29
96	7,46	6,89	6,52	7,02
168	7,87	8,02	7,77	8,33

Tablica 4. Współczynnik absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego betonów dojrzewających 90 dni w powietrzu – powierzchnia cięta

Czas podciągania kapilarnego [h]	Absorpcja [g/mm ²]			
	P4-0	P4-30	P4-30M	P4-30S
1	1,20	1,06	0,93	0,85
2	1,67	1,46	1,29	1,18
3	1,99	1,86	1,64	1,50
4	2,29	2,07	1,82	1,66
5	2,53	2,29	2,02	1,84
6	2,74	2,45	2,16	1,97
7	2,99	2,64	2,33	2,09
8	3,23	2,75	2,42	2,21
24	5,03	3,86	2,99	3,32
48	5,80	4,62	3,71	3,99
72	6,11	5,08	4,25	4,26
96	6,34	5,32	4,78	4,56
168	6,82	5,89	5,53	5,22