

**Dr hab. inż. Gabriela Rutkowska**

Instytut Inżynierii Lądowej

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

**Dr inż. Filip Chyliński**

Instytut Technik Budowlanych, Filtrowa 1, 00-611 Warszawa

**Mgr inż. Michał Musiał**

Kerakoll Polska Sp. z o.o., ul. Katowicka 128, 95-030 Rzgów

## **Beton zwykły z dodatkiem cementu glinowego CAC do elementów prefabrykowanych**

Ordinary concrete with the addition of calcium aluminate cement (CAC) for precast elements.

### **Streszczenie**

Cement glinowy (CAC) to specjalistyczny materiał budowlany, stosowany głównie w betonach ogniotrwałych i niektórych zastosowaniach konstrukcyjnych. Charakteryzuje się szybkim twardnieniem, wysoką wczesną wytrzymałością oraz odpornością na agresję chemiczną. Wady, takie jak wysokie koszty i ryzyko obniżenia wytrzymałości w wyniku konwersji hydratów, ograniczają jego zastosowanie. Układy hybrydowe z cementem portlandzkim (OPC) pozwalają łączyć zalety obu materiałów, co jest szczególnie korzystne w prefabrykacji. Przeprowadzone badania wskazują, że cement glinowy sprawdza się w środowiskach o niskiej temperaturze. Badania wykazują, że cement glinowy może być skutecznie używany jako dodatek do cementu portlandzkiego w niewielkich ilościach. Udział CAC na poziomie 5% korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i trwałość betonu, co sprawia, że jest szczególnie przydatny w aplikacjach wymagających szybkiego uzyskania wytrzymałości oraz odporności na działanie mrozu. Jednakże, wyższe stężenia CAC wymagają ostrożności ze względu na potencjalne obniżenie wytrzymałości i trwałości betonu w dłuższym okresie użytkowania.

**Słowa kluczowe: cement glinowy, wytrzymałość na ściskanie, mikrostruktura betonu**

### **Abstract**

Calcium aluminate cement (CAC) is a specialized construction material primarily used in refractory concretes and certain structural applications. It is characterized by rapid setting, high early strength, and excellent resistance to chemical attack. However, its use is limited by drawbacks such as high cost and the risk of strength reduction over time due to the conversion of hydrates. Hybrid systems combining CAC with ordinary Portland cement (OPC) can merge the benefits of both materials, which is particularly advantageous in precast concrete applications. Research has shown that CAC performs well in low-temperature environments and can be effectively used as an additive to OPC in small quantities. A CAC content of around 5% has a positive effect on the mechanical properties and durability of concrete, making it especially suitable for applications requiring rapid strength gain and resistance to freeze-thaw cycles. Nevertheless, higher concentrations of CAC should be approached with caution due to the potential for reduced long-term strength and durability.

**Keywords: alumina cement, compressive strength, concrete microstructure**

## 1. Wprowadzenie - Hydratacja i konwersja cementu glinowego

Cement glinowy (CAC) to specjalistyczny rodzaj cementu, stanowiący jedynie niewielką część globalnej produkcji cementów. W zależności od zawartości tlenku glinu w składzie wyróżnia się jego różne odmiany, takie jak CAC 40, CAC 50 oraz CAC 70-80. Odmiany o wyższej zawartości  $\text{Al}_2\text{O}_3$  znajdują zastosowanie głównie w materiałach ogniotrwałych, natomiast te o większej zawartości tlenku żelaza mogą być wykorzystywane w konstrukcjach budowlanych. Do kluczowych zalet cementu glinowego należą szybkie twardnienie, wysoka początkowa wytrzymałość, odporność na działanie siarczanów i innych czynników chemicznych oraz właściwości ogniotrwałe. Jego szersze zastosowanie ogranicza jednak wysoka cena oraz ryzyko osłabienia wytrzymałości mechanicznej w wyniku konwersji heksagonalnych hydratów glinianów wapnia. Podczas hydratacji cementu glinowego fazy bezwodne, zwłaszcza glinian jednowapniowy, rozpuszczają się, powodując uwolnienie jonów  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  i  $\text{OH}^-$ . Następnie tworzą się zarodki hydratów, a kolejnym etapem jest masowe wytrącanie produktów hydratacji [1,3]. Charakterystyczną cechą tego cementu jest zależność rodzaju powstających hydratów od temperatury [1-7]. Jak zauważył Bensted [2], w temperaturach poniżej  $15^\circ\text{C}$  głównym produktem hydratacji jest  $\text{CAH}_{10}$ , w zakresie  $15\text{--}25^\circ\text{C}$  powstaje mieszanka  $\text{C}_2\text{AH}_8$  i  $\text{CAH}_{10}$ , a powyżej  $25^\circ\text{C}$  dominują  $\text{C}_2\text{AH}_8$  i żelowy tlenek glinu, który następnie krystalizuje w gibbsyt  $\text{AH}_3$ . W temperaturach przekraczających  $40^\circ\text{C}$ , zwłaszcza  $60^\circ\text{C}$ , zachodzi formowanie hydrogranatu  $\text{C}_3\text{AH}_6$  oraz uwodnionego tlenku glinu, który również przechodzi w gibbsyt. Cement glinowy wykazuje tzw. „nienormalne wiązanie” – w temperaturze powyżej  $20^\circ\text{C}$  czas wiązania wydłuża się do około  $28\text{--}30^\circ\text{C}$ , po czym gwałtownie skraca się przy dalszym wzroście temperatury [7]. Ważnym aspektem jest temperatura wewnętrzna zaczynu, ponieważ cement ten wydziela  $70\text{--}90\%$  ciepła twardnienia ( $460\text{--}500\text{ J/g}$ ) w ciągu pierwszej doby przy  $20^\circ\text{C}$ , co prowadzi do znacznego samonagrzewania. W dużych elementach temperatura w rdzeniu może osiągnąć  $70\text{--}80^\circ\text{C}$  już po  $8\text{--}10$  godzinach hydratacji [1]. Fazy hydratacyjne powstające w niższych temperaturach ( $\text{CAH}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) są nietrwałe – jedyną stabilną fazą uwodnioną w układzie  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  jest  $\text{C}_3\text{AH}_6$  [9]. Proces konwersji, czyli przekształcania faz heksagonalnych w regularny hydrogranat, zachodzi spontanicznie i jest przyspieszany przez wzrost temperatury, wilgotności oraz pH. Skutkuje to zwiększeniem porowatości i przepuszczalności materiału, co prowadzi do osłabienia wytrzymałości i trwałości betonu [2]. W niższych temperaturach metastabilne uwodnione gliniany wapnia mogą pozostawać w strukturze przez dłuższy czas, natomiast w wyższych stabilizują się głównie  $\text{C}_3\text{AH}_6$  i gibbsyt  $\text{AH}_3$  [10]. Badania wykazały, że rozpuszczalność  $\text{C}_3\text{AH}_6$  maleje wraz ze wzrostem temperatury, podczas gdy  $\text{CAH}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_{7,5}$  i  $\text{C}_4\text{AH}_{19}$  stają się bardziej rozpuszczalne. Mechanizm konwersji opiera się na procesie „przez roztwór”, czyli rozpuszczaniu faz heksagonalnych i rekrytalizacji w postaci stabilnych produktów [1,6]. W niektórych badaniach sugeruje się, że pośrednimi etapami tej przemiany mogą być formy  $\alpha\text{-C}_2\text{AH}_8$  i  $\beta\text{-C}_2\text{AH}_8$ , przy czym  $\beta\text{-C}_2\text{AH}_8$  pełni rolę zarodków dla  $\text{C}_3\text{AH}_6$  [9].

Hybrydowe układy, łączące cement portlandzki (OPC) z cementem glinowym (CAC), wykorzystują zalety obu tych materiałów – trwałość i stabilność chemiczną OPC oraz szybkie twardnienie CAC. Takie połączenie jest szczególnie korzystne w prefabrykacji, gdzie kluczowe znaczenie mają krótki czas uzyskania wymaganej wytrzymałości oraz elastyczność technologiczna. Zastosowanie mieszanek CAC-OPC pozwala na optymalizację procesu produkcji elementów betonowych – cement glinowy przyspiesza wiązanie, a cement

portlandzki zapewnia długoterminową trwałość. Dodatkowo ogranicza to koszty, które byłyby znacznie wyższe w przypadku wykorzystania wyłącznie CAC, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiednich parametrów mechanicznych i eksploatacyjnych betonu. Jednak stosowanie hybrydowych układów cementowych wiąże się z pewnymi wyzwaniem, zwłaszcza ryzykiem niższych wytrzymałości końcowych. Interakcje chemiczne pomiędzy spoiwami mogą prowadzić do wzrostu porowatości, co negatywnie wpływa na trwałość betonu. Dodatkowo, konwersja hydratów cementu glinowego może powodować osłabienie mikrostruktury oraz zwiększone ryzyko powstawania spękań w stwardniałym materiale. Problem ten wynika z różnic w gęstości poszczególnych faz hydratacyjnych – metastabilne formy, takie jak  $\text{CAH}_{10}$  ( $1,72 \text{ g/cm}^3$ ) i  $\text{C}_2\text{AH}_8$  ( $1,95 \text{ g/cm}^3$ ), są mniej gęste niż stabilne fazy, takie jak  $\text{C}_3\text{AH}_6$  ( $2,52 \text{ g/cm}^3$ ) i  $\text{AH}_3$  ( $2,44 \text{ g/cm}^3$ ) [1-3]. W wyniku przemiany fazowej zmniejsza się objętość faz stałych i uwalnia się woda, co prowadzi do wzrostu porowatości i przepuszczalności betonu, obniżając jego wytrzymałość i trwałość. Taki beton jest bardziej podatny na przenikanie jonów, działanie wilgoci i agresywnych substancji chemicznych, co przyspiesza jego degradację. Zgodnie z normą PN-EN 14647 [5], aby zminimalizować skutki konwersji, należy stosować współczynnik w/c poniżej 0,40 oraz minimalną zawartość cementu na poziomie  $400 \text{ kg/m}^3$ . Mimo to niektórzy badacze uważają, że te wytyczne są niewystarczające [4].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wykorzystanie cementu glinowego w budownictwie napotyka pewne trudności, choć równolegle prowadzone są badania wskazujące na potencjalne możliwości jego zastosowania w konstrukcjach inżynierskich. Prace [11–13] sugerują, że cement glinowy (CAC) może sprawdzić się w konstrukcjach zlokalizowanych w środowisku morskim, zwłaszcza na dużych głębokościach, gdzie temperatura wynosi od  $2$  do  $4^\circ\text{C}$ . W takich warunkach proces konwersji hydratów w CAC przebiega bardzo powoli, co może pozytywnie wpłynąć na stabilność materiału. Można więc przypuszczać, że układy oparte na CAC są bardziej stabilne niż tradycyjne systemy bazujące na cemencie portlandzkim lub spoiwach trójskładnikowych, co czyni je bardziej odpowiednimi do zastosowań w warunkach głębiny. Obecnie jednak brakuje jeszcze pełnych badań dotyczących trwałości CAC w tak specyficznych warunkach. Zauważono również, że betony na bazie cementu glinowego mogą ograniczać reakcje elektrochemiczne zachodzące na powierzchni stali, co przekłada się na mniejsze ryzyko korozji przy określonym stężeniu chlorków w otoczeniu zbrojenia. Wyniki badań [14] potwierdzają tę obserwację, wskazując jednocześnie, że efekt ten można wzmocnić, stosując domieszki zeolitowe lub łącząc CAC z cementem portlandzkim (OPC) [15,16]. Tego typu mieszanki mogą istotnie obniżyć koszty, które w przypadku zastosowania wyłącznie CAC są relatywnie wysokie. Warto zaznaczyć, że betony na bazie cementu portlandzkiego mogą być stosowane w temperaturze do  $250^\circ\text{C}$ . Przy wyższych temperaturach stosuje się specjalistyczne betony, opracowywane na bazie ogniotrwałych spoiw. Wyróżnia się tu betony żaroodporne – działające w podwyższonych temperaturach (powyżej  $250^\circ\text{C}$ ) oraz ogniotrwałe, które mogą funkcjonować nawet w ekstremalnych warunkach dochodzących do  $2000^\circ\text{C}$ . W literaturze naukowej nie ma jednoznacznej granicy pomiędzy tymi kategoriami – spotyka się wartości progowe takie jak  $1000^\circ\text{C}$ ,  $1200^\circ\text{C}$  czy nawet  $1500^\circ\text{C}$  [17]. Cement glinowy odgrywa istotną rolę w produkcji betonów odpornych na wysokie temperatury, co potwierdzają liczne badania prowadzone w różnych ośrodkach badawczych [18,19].

Celem badań eksperymentalnych było przeprowadzenie szczegółowej analizy układów hybrydowych cementu glinowego i portlandzkiego w zastosowaniach prefabrykacyjnych. Badania skupiono na ocenie właściwości mechanicznych, mikrostrukturalnych oraz trwałości takich układów. Na przykładzie wybranego case study przeanalizowano, jak optymalizować

proporcje i parametry technologiczne, aby minimalizować ryzyko związane z niższymi wytrzymałościami końcowymi. Nowością jest szczegółowe studium przypadku, które dostarcza praktycznych wniosków dotyczących możliwości zastosowania cementu glinowego w prefabrykacji. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które weryfikują wpływ warunków środowiskowych, takich jak temperatura i wilgotność, na wytrzymałość i trwałość układów CAC-OPC. Zidentyfikowano kluczowe parametry umożliwiające maksymalizację korzyści wynikających z zastosowania cementu glinowego, przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka wynikającego z jego specyficznych właściwości hydratacyjnych. W badaniu uwzględniono również mikrostrukturę betonu, co pozwala na lepsze zrozumienie procesów zachodzących w układach hybrydowych i ich wpływu na jakość końcową produktu prefabrykowanego.

## 2. Materiał badawczy i metodyka

Do badań eksperymentalnych zaprojektowano mieszanki betonowej betonu klasy C70/85 o konsystencji SF3 metodą empiryczno-doświadczalną, zgodnie z PN-EN 206+A2:2021-08 [20] dla klasy ekspozycji XC4 - dla standardowych konstrukcji zewnętrznych w klimacie umiarkowanym. Do mieszanek zastosowano cement portlandzki CEM I 52.5 R (Chorula, Poland – tab.1), cement glinowy Ternal White, mączka wapienna Lhoist Bukowa o gęstości  $2,67\text{kg/m}^3$ , kruszywo drobne frakcji 0-2mm o gęstości  $2,65\text{kg/m}^3$ , kruszywo grube granitowe o uziarnieniu 2-8 i 8-16mm o gęstości  $2,79\text{kg/m}^3$  oraz wodę. Cement glinowy spełnia wymogi PN-EN 14647:2016-07 [21] dla cementów glinowych. Cechą charakterystyczną jest normalny czas wiązania i szybki twardnienia oraz wysoka wytrzymałość początkowa. Cement składa się z glinianów wapnia o wysokiej odporności na ścieranie, wysokiej wytrzymałości początkowej, ogniotrwałości oraz odporności na biogeniczne korozyjne działanie kwasu siarkowego (BSAC). Gęstość nasypowa wynosi około  $1.5\text{ g/cm}^3$ , powierzchnia właściwa (wg Blaine'a)  $3900\text{ cm}^2/\text{g}$ , ciężar właściwy  $3.2\text{-}3.3\text{ g/cm}^3$ , ogniotrwałość  $1270^\circ\text{C}$ . Główną fazą mineralną jest CA, fazami towarzyszącymi jest  $\text{C}_4\text{AF}$ ,  $\text{C}_2\text{AS}$  oraz  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ . Tabela 2 przedstawia dane techniczne cementu glinowego.

Tabela 1. Właściwości fizyko-chemiczne i skład fazowy cementu CEM I 52.5% [22]

Table 1. Physico-chemical properties and phase composition of CEM I 52.5% cement [22]

| SiO <sub>2</sub><br>[%]               | Zawartość<br>siarczanów<br>SO <sub>3</sub> [%] | Strata<br>prażenia<br>[%]                         | Zawartość<br>chlorków Cl [%]                       | Zawartość<br>alkaliów<br>Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> [%] |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 20,20                                 | 3,03                                           | 3,20                                              | 0,08                                               | 0,60                                                         |
| CaO                                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    | MgO                                                | CaO <sub>w</sub>                                             |
| 65,21                                 | 4,34                                           | 2,37                                              | 1,51                                               | 1,76                                                         |
|                                       | Początek czasu<br>wiązania [min]               | Wytrzymałość<br>na ściskanie po 2<br>dniach [MPa] | Wytrzymałość<br>na ściskanie po<br>28 dniach [MPa] | Powierzchnia<br>właściwa<br>Blaine'a [cm <sup>2</sup> /g]    |
|                                       | 232                                            | 33,6                                              | 62,6                                               | 4554                                                         |
| Udział faz mineralnych CEM I [5 mass] |                                                |                                                   |                                                    |                                                              |
|                                       | C <sub>3</sub> S - 61,8                        | C <sub>2</sub> S - 12,3                           | C <sub>3</sub> A - 7,6                             | C <sub>4</sub> AF - 4,1                                      |

Tabela 2. Właściwości chemiczne cementu glinowego [23]

Table 2. Chemical properties of calcium aluminate cement [23]

| SiO <sub>2</sub><br>[%] | Zawartość<br>siarczanów<br>SO <sub>3</sub> [%] | CaO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO |
|-------------------------|------------------------------------------------|-----|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| 6.0                     | 0.4                                            | 38  | 40                             | 15                             | 1,5 |

Do badań laboratoryjnych przygotowano następujące rodzaje próbek:

- CON – bez dodatku cementu glinowego,
- ALU – z dodatkiem cementu glinowego.

Cement portlandzki wymieniany był na cement glinowy w ilości od 5 do 20% masy. Skład przygotowanych mieszanek betonowych na 1m<sup>3</sup> przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skład poszczególnych mieszanek na 1m<sup>3</sup>

Table 3. Composition of individual mixes per 1 m<sup>3</sup>

| Składniki                        | Ilość składników mieszanki betonowej [kg] |       |        |        |        |
|----------------------------------|-------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|
|                                  | CON                                       | ALU 5 | ALU 10 | ALU 15 | ALU 20 |
| Cement                           | 408                                       | 393   | 370    | 349    | 324    |
| Woda                             | 182                                       | 185   | 184    | 183    | 181    |
| Mączka wapienna                  | 102                                       | 103   | 103    | 103    | 101    |
| Kruszywo                         | 0-2 mm                                    | 658   | 667    | 664    | 654    |
|                                  | 2-8 mm                                    | 520   | 526    | 524    | 516    |
|                                  | 8-16 mm                                   | 530   | 537    | 535    | 527    |
| Cement glinowy                   | -                                         | 21    | 41     | 62     | 81     |
| Superplastifikator<br>SIKA 99pol | 3.27                                      | 3.31  | 3.30   | 3.30   | 4.72   |

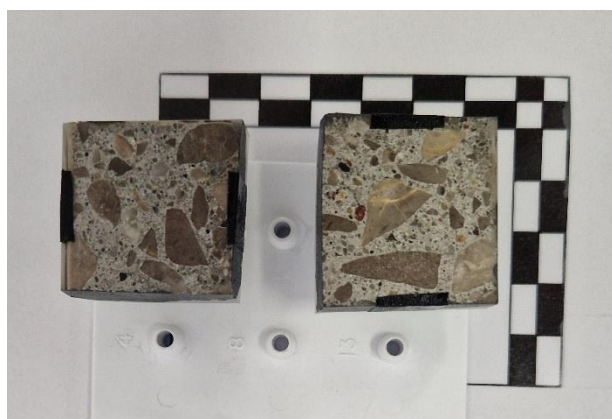
Na mieszance betonowej sprawdzono: konsystencję metodą stożka opadowego (PN-EN 12350-2:2011) [24], lepkość mieszanki metodą T<sub>500</sub> (PN-EN 12350-8:2019-08) [26], gęstość pozorną metodą pomiaru masy i objętości (PN-EN 12350-6:2019-08) [25]. Po 2 i 28 dniach dojrzewania próbek o wymiarach 10x10x10cm zgodnie z PN-EN 12390-3:2019-07 [27] sprawdzono wytrzymałość na ściskanie. Badania mrozoodporności wykonano na próbkach o wymiarach 10x10x10 cm metodą bezpośrednią według procedury opisanej w PN-B-06265:2022-08 [28]. Badanie nasiąkliwości przeprowadzona według PN-B-06265:2022-08 [28] na próbkach 10x10x10cm natomiast badanie głębokości penetracji wody według EN 12390-8:2019-08 [29] na próbkach 15x15x15cm. Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest, a mrozoodporność w komorze firmy Toropol. Wszystkie próbki przeznaczone do badań pielęgnowano w wodzie. Badania przeprowadzono w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w Instytucie Inżynierii Lądowej. Na podstawie otrzymanych średnich wytrzymałości wynik przeliczono na próbki sześciennie o boku 15 cm (wg wzoru 1) i ustalono klasy betonu.

$$f_{c,cub\ 150} = 0.90 \cdot f_{c,cub\ 100} \quad , \quad (1)$$

gdzie:

$f_{c,cub150}$  i  $f_{c,cub100}$  - wytrzymałość na ściskanie obserwowana na próbkach sześciennych o długości krawędzi odpowiednio 15 i 10 cm.

Celem przeprowadzonych analiz mikrostrukturalnych była ocena wpływu dodatku cementu glinowego na zmiany w mikrostrukturze betonu. Badania wykonano w Instytucie Techniki Budowlanej w Warszawie (Polska). Analizie poddano dwie próbki: beton referencyjny oznaczony jako CON, w którym zastosowano wyłącznie cement portlandzki jako spoiwo, oraz próbkę ALU 20, w której 20% cementu portlandzkiego zastąpiono cementem glinowym. Z betonowych sześciątów o wymiarach 100 mm wycięto próbki o rozmiarach około  $25 \times 25 \times 5$  mm. Następnie poddano je procesowi przygotowania, obejmującemu suszenie, impregnację żywicą pod zmniejszonym ciśnieniem, szlifowanie i polerowanie. Szczegółowy opis metodyki przygotowania próbek znajduje się we wcześniejszych publikacjach [30–31]. Na Fot. 1 zaprezentowano zglądy polerowane przygotowane do badań mikroskopowych.



Fot. 1. Przygotowane zglądy polerowane próbek (od lewej CON i ALU 20)

Fig. 1. Prepared polished sections of the samples (from the left: CON and ALU 20)

Badania mikroskopowe przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności mikrostrukturę analizowano za pomocą mikroskopii optycznej w świetle odbitym, wykorzystując stereoskopowy mikroskop ZEISS Stemi 508. Następnie, po napyleniu próbek złotem, wykonano dalsze obserwacje przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego ZEISS Sigma 500 VP, rejestrując obrazy za pomocą detektora BDS. Analizę składu pierwiastkowego w mikroobszarach oraz mapowanie rozkładu pierwiastków przeprowadzono z wykorzystaniem detektora EDX Oxford Instruments UltimMax 40.

### 3. Wyniki i dyskusja

#### Właściwości mieszanki betonowej

W tabeli 4 przedstawiono zbiorcze wyniki właściwości mieszanek betonowych.

Tabela 4. Właściwości mieszanki betonowej

Table 4. Properties of the concrete mix

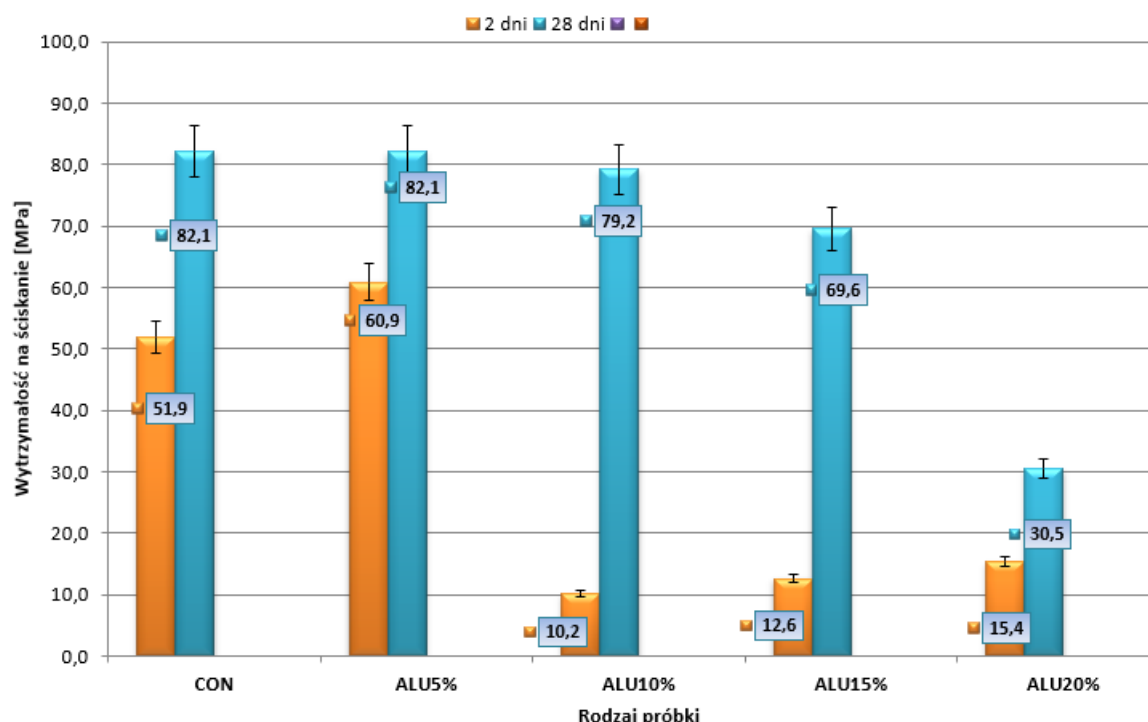
| Właściwości                 | Rodzaj mieszanki betonowej |      |       |       |       |
|-----------------------------|----------------------------|------|-------|-------|-------|
|                             | CON                        | ALU5 | ALU10 | ALU15 | ALU20 |
| Konsystencja [mm]           | 770                        | 625  | 560   | 630   | 725   |
| Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ] | 2404                       | 2435 | 2424  | 2412  | 2389  |
| Lepkość [s]                 | 4.0                        | 11.0 | 13.7  | 7.5   | 5.0   |

Mieszanka referencyjna CON charakteryzuje się największym opadem (770mm), co oznacza, że jest najbardziej płynna i łatwa do aplikacji w porównaniu do pozostałych. Wprowadzenie dodatku cementu glinowego ALU obniża konsystencję, osiągając najniższą wartość dla ALU10 (560 mm). Przy dalszym zwiększaniu zawartości ALU konsystencja wzrasta (ALU15 – 630 mm, ALU20 – 725 mm). Może to sugerować, że przy niższej zawartości ALU mieszanka staje się bardziej sztywna, natomiast większe ilości dodatku poprawiają urabialność. Gęstość mieszanki betonowej odzwierciedla jej ciężar jednostkowy, co może mieć znaczący wpływ na wytrzymałość oraz trwałość materiału. Dla mieszanki referencyjnej CON uzyskano gęstość  $2404 \text{ kg/m}^3$ , co stanowi wartość bazową dla porównań z mieszankami zawierającymi cement glinowy. Dodanie niewielkiej ilości cementu glinowego (próbka ALU5) skutkuje wzrostem gęstości, co może być związane z lepszym zagęszczeniem mieszanki wynikającym ze zmian w mikrostrukturze. Jednak wraz ze zwiększaniem udziału cementu glinowego, obserwuje się stopniowy spadek gęstości. Najniższą wartość, równą  $2389 \text{ kg/m}^3$ , odnotowano dla mieszanki ALU20, co sugeruje, że większy udział cementu glinowego może przyczyniać się do zmniejszenia masy mieszanki, prawdopodobnie w wyniku powstawania mikroporów w strukturze matrycy betonowej. Lepkość określa zdolność mieszanki do oporu wobec płynięcia i związana jest z konsystencją oraz zagęszczeniem. Mieszanka CON uzyskała najniższą lepkość równą 4.0 s, co oznacza jej dużą płynność. Dodatek cementu glinowego w ilości 5 i 10% zwiększa lepkość osiągając maksimum dla ALU10 (13,7 s), co sugeruje, że mieszanka staje się bardziej oporna na przepływ. Przy wyższych zawartościach dodatku lepkość zmniejsza się, co może wynikać z właściwości smarujących ALU przy wyższych dawkach. ALU15 i ALU20 wykazują lepkość zbliżoną do CON.

## Właściwości dojrzałego betonu

### Wytrzymałość na ściskanie

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki wytrzymałości na ściskanie po 2 i 28 dniach dojrzewania.



Rys. 1 Wytrzymałość na ściskanie po 2 (wczesna) i 28 dniach dojrzewania  
Fig. 1. Compressive strength after 2 days (early) and 28 days of curing

Wyniki badań wykazały, że po 2 dniach dojrzewania beton referencyjny (CON) osiągnął wytrzymałość na ściskanie na poziomie 51,9 MPa. Dodanie 5% cementu glinowego (ALU5%) spowodowało wzrost wytrzymałości o około 17% w porównaniu do próbek referencyjnych, co może być związane z przyspieszonym procesem wiązania lub korzystnymi zmianami mikrostruktury we wczesnej fazie dojrzewania. W przypadku wyższych zawartości cementu glinowego zaobserwowano jednak znaczny spadek wytrzymałości. Próbkę ALU10% osiągnęły wartość 10,2 MPa, co oznacza spadek o około 80% względem betonu referencyjnego. Dla ALU15% wytrzymałość wyniosła 12,6 MPa, a dla ALU20% 15,4 MPa. Otrzymane wyniki wskazują, że przekroczenie 5% cementu glinowego prowadzi do istotnego obniżenia wczesnej wytrzymałości, prawdopodobnie z powodu zakłóceń w procesach hydratacji cementu. Po 28 dniach dojrzewania zarówno beton referencyjny (CON), jak i próbki z 5% cementu glinowego (ALU5%) osiągnęły taką samą wytrzymałość na ściskanie, wynoszącą 82,1 MPa. Oznacza to, że dodatek 5% ALU nie ma negatywnego wpływu na długoterminową wytrzymałość betonu i sugeruje prawidłowy rozwój jego mikrostruktury. Dla wyższych zawartości cementu glinowego zaobserwowano spadek wytrzymałości: ALU10% – niewielkie obniżenie o około 3,5% względem betonu referencyjnego, ALU15% – spadek o 15%, ALU20% – znaczące obniżenie o 63%, co wskazuje na negatywny wpływ dużej ilości cementu glinowego na długoterminową wytrzymałość betonu. Gęstość mieszanki betonowej jest istotnym czynnikiem wpływającym na jej wytrzymałość na ściskanie. Wyższa gęstość zwykle oznacza lepsze zagęszczenie matrycy cementowej, mniejszą ilość porów i bardziej zwartą strukturę, co przekłada się na wyższą wytrzymałość mechaniczną. Z kolei mniejsza gęstość (np. w wyniku wprowadzenia lekkich dodatków lub nieprawidłowego zagęszczenia) wiąże się z większą ilością pustek powietrznych, które mogą osłabiać beton i obniżać jego wytrzymałość na ściskanie. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, że próbki betonu

referencyjnego i z najmniejszą zawartością cementu glinowego (CON i ALU5) przy odpowiednich gęstościach zaobserwowano (2404–2435 kg/m<sup>3</sup>) najwyższą wytrzymałość. Wskazuje to na dobrą korelację pomiędzy zwartą strukturą a nośnością. Próbkę betonu ALU 20 pomimo niewielkiego spadku gęstości, wytrzymałość zmniejszyła się w mniejszym stopniu, co sugeruje, że struktura nadal jest wystarczająco zwarta. Znaczący spadek gęstości (dla ALU 15 i ALU20) jest powiązany z dużym obniżeniem wytrzymałości. Wysokie dawki ALU mogą wprowadzać porowatość lub zakłócać rozwój mikrostruktury.

### Nasiąkliwość i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

W tabeli 5 przedstawiono wyniki nasiąkliwości oraz głębokości penetracji wody pod ciśnieniem.

Tabela 5. Wyniki nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem

Table 5. Water absorption and depth of water penetration under pressure results

| Rodzaj mieszanki | Nasiąkliwość [%] | Głębokość penetracji wody [mm] |
|------------------|------------------|--------------------------------|
| CON              | 4.40             | 12.0                           |
| ALU5%            | 5.07             | 14.3                           |
| ALU10%           | 3.98             | 22.0                           |
| ALU15%           | 4.47             | 16.3                           |
| ALU20%           | 4.46             | 22.3                           |

Próbki bazowe CON (bez cementu glinowego) wykazały nasiąkliwość na poziomie 4,40%, co stanowi wartość odniesienia. Dodatek 5% cementu glinowego (ALU5%) spowodował wzrost nasiąkliwości do 5,07%, co może wynikać ze zwiększonej porowatości struktury betonu i wzrostu kapilarności. Natomiast przy 10% zawartości ALU nasiąkliwość zmniejszyła się do 3,98%, co sugeruje, że cement glinowy może działać uszczelniająco na mikrostrukturę betonu. W przypadku próbek ALU15% i ALU20% wartość nasiąkliwości wyniosła odpowiednio 4,47% i 4,46%, co wskazuje, że dalsze zwiększanie ilości cementu glinowego nie wpływa istotnie na tę właściwość. Analiza wyników głębokości penetracji wody pod ciśnieniem wykazała, że beton referencyjny (CON) osiągnął głębokość 12 mm, co świadczy o stosunkowo zwartej strukturze mieszanki z cementem portlandzkim 42,5. W przypadku próbek z 5% cementu glinowego (ALU5%) głębokość ta wzrosła do 14,3 mm, co może być efektem zwiększonej liczby kanałów kapilarnych i wyższej nasiąkliwości. Dla ALU10% zaobserwowano gwałtowny wzrost głębokości penetracji do 22,0 mm, mimo spadku nasiąkliwości, co może wynikać z nierównomiernego rozkładu produktów hydratacji lub obecności większych porów w strukturze betonu. Przy wyższych zawartościach ALU, tj. 15% i 20%, głębokość penetracji nadal utrzymywała się na wysokim poziomie (16,3 mm i 22,3 mm), co może wskazywać na dalsze zmiany w mikrostrukturze betonu, takie jak pojawienie się większych porów lub mikropęknięć. Cement glinowy charakteryzuje się szybszą hydratacją, co prowadzi do intensywnego powstawania produktów reakcji w krótkim czasie. Jednak w dłuższej perspektywie może to skutkować bardziej porowatą strukturą, co tłumaczy zwiększoną głębokość penetracji wody. Przy niskich zawartościach cementu glinowego (5–10%) struktura betonu wydaje się bardziej kapilarna, co objawia się wzrostem nasiąkliwości i głębokości penetracji. Natomiast przy wyższych zawartościach ALU dominują większe pory, które ułatwiają wnikanie wody.

## Mrozoodporność

Tabela 6 przedstawia uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek betonu referencyjnego oraz próbek po 150 cyklach mrożenia. Według normy PN-88/B-06250 próbki poddane zamrażaniu nie powinny mieć pęknięć i uszkodzeń, a ubytek ich masy nie powinien przekroczyć 5%. Dodatkowo spadek wytrzymałości na ściskanie nie powinien być większy niż 20%. [28]

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności

Table 6. Freeze resistance test results

| Próbka | Średnia wytrzymałość<br>na ściskanie |                               | Średni spadek<br>wytrzymałości<br>próbek<br>poddanych<br>mrożeniu | Średnia masa       |                               | Średni<br>ubytek<br>masy |
|--------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|
|        | Świadka                              | po 150<br>cyklach<br>mrożenia |                                                                   | przed<br>mrożeniem | po 150<br>cyklach<br>mrożenia |                          |
|        |                                      |                               |                                                                   |                    |                               |                          |
|        | [MPa]                                | [MPa]                         | [%]                                                               | [g]                | [g]                           | [%]                      |
| CON    | 78.05                                | 65.98                         | - 15.46                                                           | 2440               | 2435                          | - 0.205                  |
| ALU5   | 79.36                                | 76.05                         | - 4.17                                                            | 2467               | 2460                          | -0.284                   |
| ALU10  | 78.98                                | 72.28                         | -8.48                                                             | 2468               | 2459                          | -0.364                   |
| ALU15  | 77.87                                | 70.68                         | - 9.23                                                            | 2448               | 2437                          | -0.449                   |
| ALU20  | 72.83                                | 65.53                         | - 10.02                                                           | 2438               | 2426                          | -0.492                   |

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wszystkie analizowane próbki spełniają wymagania dotyczące ubytku masy — żadna z nich nie przekroczyła dopuszczalnej granicy 5%. Zaobserwowane różnice były niewielkie, a największy ubytek masy odnotowano dla próbki ALU20 (-0,492%), co może świadczyć o jej większej wrażliwości na procesy degradacyjne, choć nadal mieści się to w akceptowalnym zakresie. Również pod względem wytrzymałości wszystkie próbki spełniają kryterium dopuszczalnego spadku, który nie powinien przekraczać 20%. Największy spadek wytrzymałości zanotowano dla próbki referencyjnej COM (-15,46%), co może wynikać z braku cementu glinowego, który poprawia szczelność struktury i zwiększa odporność na działanie cyklicznych zmian temperatury. Najlepsze parametry odporności na działanie mrozu wykazała mieszanka z 5% dodatkiem cementu glinowego (ALU5), charakteryzując się zarówno najmniejszym ubytkiem masy (-0,284%), jak i najniższym spadkiem wytrzymałości (-4,17%). Mieszanki z wyższymi dodatkami cementu glinowego (10% i 15%) również wykazały dobrą odporność na mróz, choć odnotowano nieco większe straty w porównaniu do próbki ALU5. Z kolei przy zawartości 20% cementu glinowego odnotowano najwyższy ubytek masy (-0,492%) oraz spadek wytrzymałości (-10,02%) wśród próbek zawierających ten dodatek — jednakże wynik ten nadal mieści się w granicach wymaganych norm mrozoodporności.

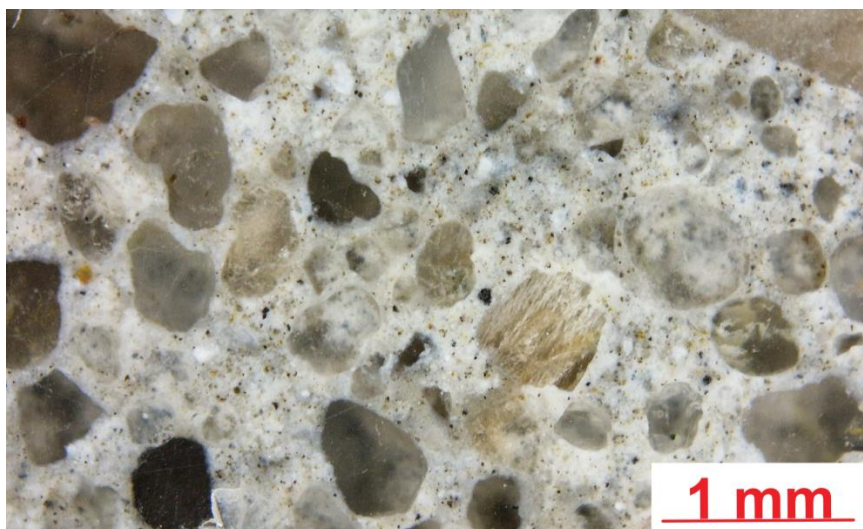
## Mikrostruktura - Mikroskopia optyczna

Na Fot 2 i 3 przedstawiono przykładowe zdjęcie mikrostruktury próbki betonu CON oraz ALU 20 uzyskane z wykorzystaniem mikroskopu optycznego.



Fot. 2. Mikrostruktura próbki CON – mikroskopia optyczna

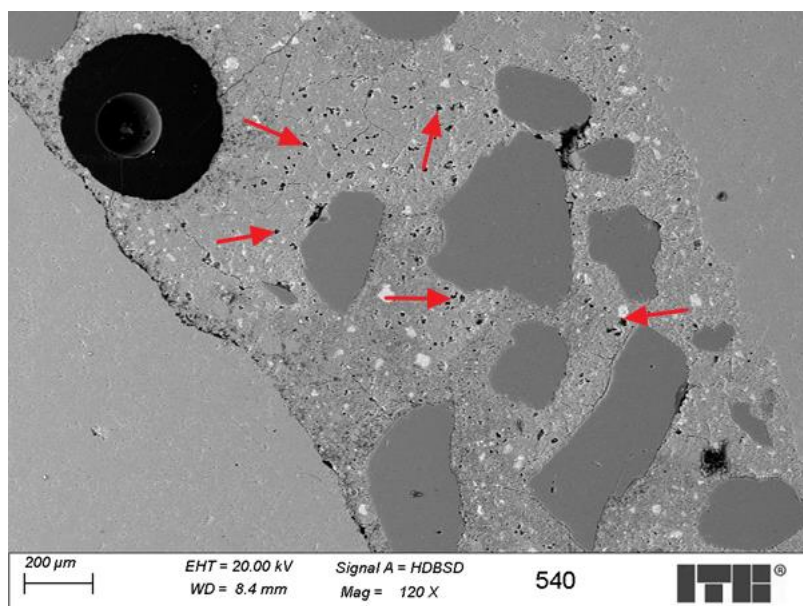
Fig. 2. Microstructure of the CON sample – optical microscopy



Fot. 3. Mikrostruktura próbki ALU 20 – mikroskopia optyczna

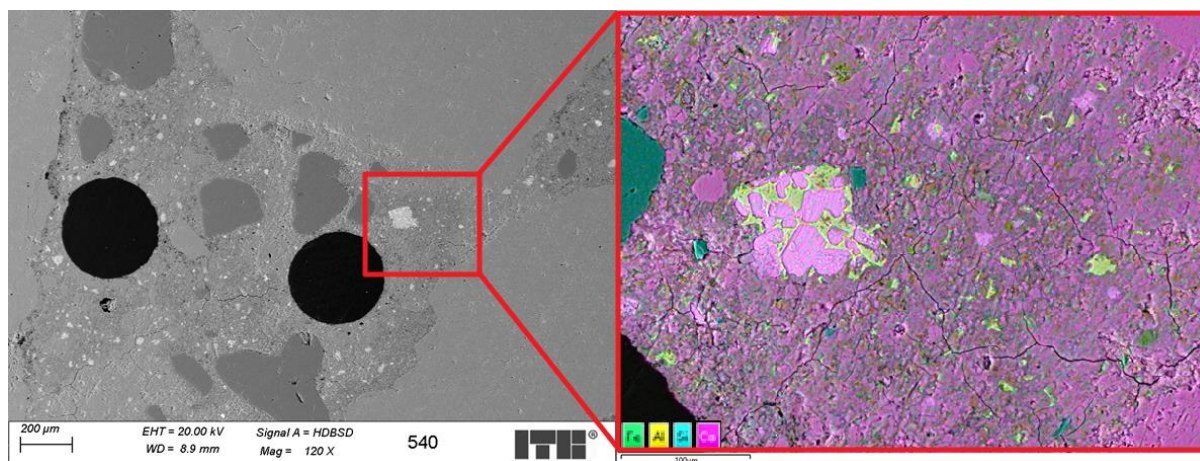
Fig. 3. Microstructure of the ALU 20 sample – optical microscopy

Analiza mikrostruktury betonów CON oraz ALU 20 z wykorzystaniem mikroskopii optycznej nie wykazała istotnych, wzajemnych różnic. Zaczyn w obu betonach był stosunkowo szczelny i zwarty. Obserwowano jedynie nieliczne makropory powietrzne. W zaczynach obserwowano drobne ciemne ziarna niewiadomego pochodzenia lub mikropory. Jaśniejsze obszary zaczynu mogą wynikać ze zwiększonej zawartości mączki wapiennej zastosowanej w betonie. Na Fot. 4 przedstawiono przykładowy obraz mikrostruktury betonu CON.



Fot. 4. Mikrostruktura betonu CON – zaznaczono mikropory  
Fig. 4. Microstructure of CON concrete – micropores highlighted

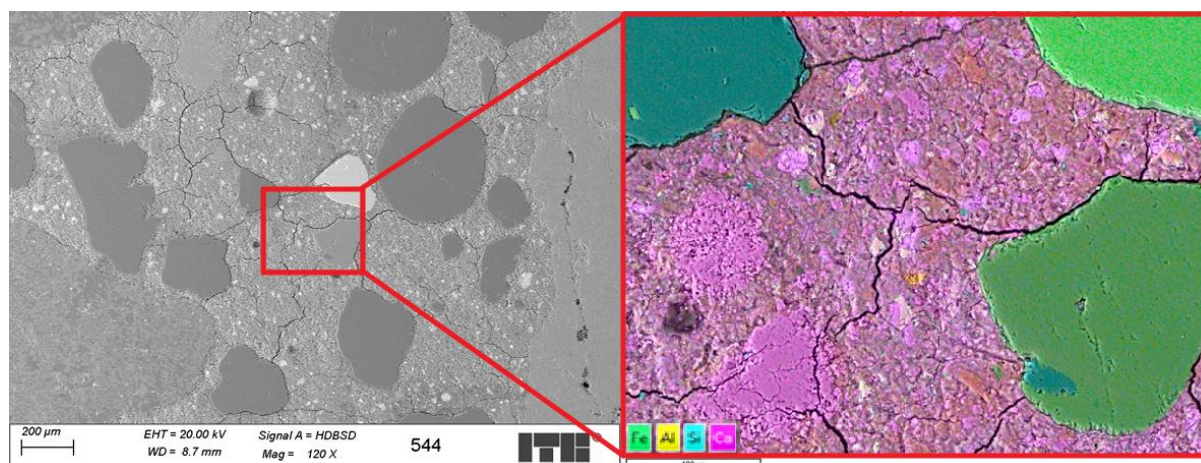
Mikrostruktura betonu CON była szczelna i zwarta. Obserwowano nieliczne makropory. W niektórych obszarach zaczynu cementowego obserwowano skupiska licznych makroporów o średnicach rzędu 10  $\mu\text{m}$  jak przedstawiono na Fot. 4. Fot. 5 przedstawia przykładowy obraz mikrostruktury betonu CON z mapą rozkładu stężenia głównych pierwiastków w fazie C-S-H w otoczeniu reliktu klinkieru.



Fot 5. Mikrostruktura betonu CON  
Fig. 5. Microstructure of CON concrete

Analizowany beton składał się z grubego kruszywa węglanowego oraz drobnego kruszywa kwarcowego. Faza C-S-H w betonie referencyjnym (CON) charakteryzowała się zwartą i szczelną strukturą, co było efektem wysokiej zawartości cementu oraz niskiego stosunku wodno-spoiwowego. W zaczynie zaobserwowano drobne spękania, które najprawdopodobniej powstały podczas przygotowywania próbek. Obecne były również liczne ziarna reliktów klinkieru. Strefa kontaktowa między zaczynem a kruszywem była w większości dobrze związana i zwarta. Jednak po jednej stronie ziaren kruszywa grubego zauważono

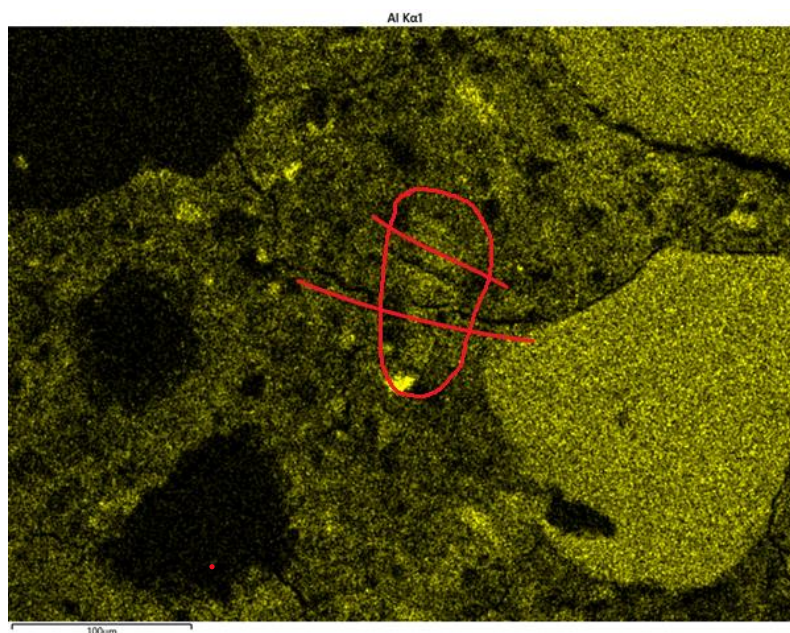
osłabienia tej strefy, co mogło wynikać z procesu formowania mieszanki betonowej. W zaczynie znajdowały się również ziarna wypełniacza wapiennego o średnicy kilkudziesięciu mikrometrów, które były równomiernie rozmieszczone i dobrze wbudowane w strukturę matrycy cementowej. Na Fot. 6 przedstawiono przykładowe zdjęcie mikrostruktury betonu ALU 20 razem z mapą rozkładu stężenia pierwiastków.



Fot 6. Mikrostruktura betonu ALU 20

Fig. 6. Microstructure of ALU 20 concrete

Kruszywa w próbce ALU20 były identyczne jak w próbce kontrolnej. W matrycy cementowej widoczne były liczne ziarna reliktyw klinkieru portlandzkiego, natomiast nie zaobserwowano bezpośrednich pozostałości klinkieru cementu glinowego. Zamiast tego wykryto obszary o podwyższonym stężeniu glinu, które mogły stanowić ślady po ziarnach klinkieru cementu glinowego. Faza C-S-H zachowała zwartą i szczelną strukturę. Porównując mikrostrukturę betonu ALU20 z próbką referencyjną CON, zauważono liczne spękania zaczynu o znacznie większej rozwarości i długości niż typowe rysy powstające podczas przygotowywania próbek. Pęknięcia te mogą być skutkiem zwiększonego skurczu matrycy cementowej, który wynika z wysokiej zawartości cementu glinowego (20%) oraz przyspieszonego procesu twardnienia. Dodatkowo, efekt ten może być potęgowany w warunkach niewystarczającej pielęgnacji próbek. Na Fot. 6 przedstawiono mapę rozkładu stężenia glinu, na której zaznaczono zarówno spękania, jak i pozostałości po ziarnach cementu glinowego.



Fot. 7. Rozkład stężenia glinu w zaczynie – zaznaczono spękania oraz pozostałość po ziarnie cementu glinowego

Fig. 7. Distribution of aluminum concentration in the paste – cracks and remnants of calcium aluminate cement grain highlighted

Analizując przebieg spękań na podstawie mapy stężenia glinu w zaczynie można zaobserwować, że spękania często przebiegają w strefach o zwiększonym stężeniu glinu, co może wskazywać na osłabienie tego obszaru zaczynu.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają, że cement glinowy może być skutecznym dodatkiem do cementu portlandzkiego, jednak tylko w ograniczonych ilościach. Dodatek 5% korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne i trwałość betonu, co czyni go szczególnie przydatnym w aplikacjach wymagających szybkiego uzyskania wytrzymałości oraz zwiększonej odporności na niskie temperatury. Z kolei wyższe zawartości cementu glinowego mogą prowadzić do obniżenia długoterminowej wytrzymałości i trwałości betonu, dlatego ich stosowanie wymaga szczególnej uwagi. Wpływ cementu glinowego na właściwości betonu nie jest liniowy. Przy niskiej zawartości (ALU5%) obserwuje się korzystny balans pomiędzy nasiąkliwością a gęstością, co przekłada się na dobrą wytrzymałość mechaniczną. Jednak dalsze zwiększanie ilości CAC powoduje defekty w mikrostrukturze betonu, prowadząc do wzrostu porowatości i zwiększonej podatności na penetrację wody. Dlatego odpowiednie proporcje cementu glinowego powinny być dostosowane do wymagań dotyczących nasiąkliwości, trwałości i wytrzymałości na ściskanie. Zastosowanie cementu glinowego przyspiesza czas wiązania zaprawy, co może być korzystne w specjalistycznych rozwiązaniach, takich jak zaprawy naprawcze. Jednak mieszanka cementu portlandzkiego i glinowego wykazuje niższą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w porównaniu do betonu wykonanego wyłącznie na bazie cementu portlandzkiego, co może stanowić istotne ograniczenie. Dlatego stosując cement glinowy w kompozytach cementowych, należy zachować ostrożność. Optymalna ilość CAC, która nie wpłynie znacząco na spadek końcowej wytrzymałości, zależy

głównie od zawartości siarczanu(VI) wapnia w cemencie portlandzkim oraz jego formy (anhydryt, hemihydrat, dwuwodny). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

1. Optymalnym dodatkiem cementu glinowego wydaje się być 5% (ALU5%), ponieważ zapewnia wysoką gęstość i wytrzymałość mechaniczną przy umiarkowanym wpływie na nasiąkliwość i głębokość penetracji wody. ALU10% wykazuje najniższą nasiąkliwość, ale kosztem niekorzystnego wzrostu penetracji wody, co może ograniczać jego zastosowanie w betonach narażonych na działanie wody pod ciśnieniem.

2. Wyższe zawartości ALU (15% i 20%) prowadzą do znacznego pogorszenia parametrów mechanicznych i zwiększenia głębokości penetracji wody. Wysokie dawki cementu glinowego wprowadzają defekty w mikrostrukturze, takie jak większe pory i mikrospękania, co negatywnie wpływa na właściwości użytkowe betonu.

3. Gęstość betonu jest kluczowym czynnikiem determinującym wytrzymałość i odporność na penetrację wody. Wyższa gęstość próbek referencyjnych i ALU5% świadczy o zwartym zagęszczeniu mieszanki, co ogranicza liczbę pustek powietrznych i zwiększa nośność.

## 5. Bibliografia

1. W. Kurdowski, (2010): Chemia cementu i betonu. Warszawa: PWN/Polski Cement.
2. J. Bensted, (2004): Naukowe aspekty cementów glinowych, Cement Wapno Beton, vol. 3, 109 – 133.
3. K.L. Scrivener, (1998): Capmas A. Calcium aluminate cements, Chapter 13. In: P.C. Hewlett (Ed.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete, John Wiley & Sons, New York.
4. A.M. Neville, (2000): Właściwości betonu, PWN.
5. EN 14647: 2007- Cement glinowo-wapniowy – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
6. B. Lothenbach, L. Pelletier-Chaignat, (2012): Winnefeld F. Stability in the system CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O. Cement and Concrete Research vol. 42, 1621–1634.
7. S.H. Bushnell-Watson, J.H. Sharp, (1990): On the cause of the anomalous setting behaviour with respect to temperature of calcium aluminate cements, Cement and Concrete Research, vol. 20, 677-686.
8. M. Nowacka, B. Pacewska, (2015): Rozszerzona metoda konduktometryczna w badaniach procesu hydratacji cementu glinowego, Cement Wapno Beton, vol. 4, 225-234.
9. S. Rashid, S. (1994): Conversion of calcium aluminate cement hydrates conversion re-examined with synchrotron energy dispersive diffraction, Journal of Materials Science Letters vol. 13, 1232-1234.
10. B. Pacewska, M. Nowacka, (2014): Studies of conversion progress of calcium aluminate cement hydrates by thermal analysis method, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 117, 653-660, DOI 10.1007/s10973-014-3804-5.
11. Q.Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, D. Deng, (2009): Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review Construction and Building Materials, vol. 23, 1-13 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.004>
12. T. Aye, C. T. Oguchi, Y. Takaya, (2010): Evaluation of sulfate resistance of Portland and high alumina cement mortars using hardness test Construction and Building Materials, vol 24, 1020-1026 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.016>

13. K. Takahashi, T. Akitou, M. Kobayashi, (2023): Changes in the physicochemical properties of calcium aluminate cement paste with high alumina content under deep seas Construction and Building Materials [vol. 398](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132495), 132495 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132495>
14. G.K. Glass, N.R. Buenfeld The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete Corrosion Science, [vol. 42](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9), 2000; 329-344 [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00083-9)
15. K. Y. Ann, H.W. Song, (2007): Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete Corrosion Science [vol. 49](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007), 4113-4133 <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007>
16. K.Y. Ann, T.-S. Kim, J.H. Kim, S.-H. Kim, (2010): The resistance of high alumina cement against corrosion of steel in concrete. Construction and Building Materials [vol. 24](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.022), 1502-1510 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.022>
17. A. Halicka, P. Ogrodnik, B. Zegardlo, (2013): Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate Construction and Building Materials [vol. 48](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.007), 295-305
18. B. Zegardlo, M. Szlag, P. Ogrodnik, (2016): Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The method of production and the interfacial transition zone, Construction and Building Materials. Vol. 122, 736–742.
19. G. Peng, Q. Ma, H. Hu, R. Gao, Q. Yao, Y. Liu, (2007): The effects of air entrainment and pozzolans on frost resistance of 50–60 MPa grade concrete, Construction and Building Materials, vol.21, 1034–1039.
20. PN-EN 206+A2:2021-08 Beton - Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność
21. PN-EN 14647:2016-07 Cement glinowo-wapniowy -- Skład, wymagania i kryteria zgodności
22. Dane producenta cementu portlandzkiego (data dostępu 12 maj 2024)
23. Dane producenta cementu glinowego (data dostępu 12 maj 2024)
24. PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej - Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
25. PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 6: Gęstość
26. PN-EN 12350-8:2019-08 Badania mieszanki betonowej - Część 8: Beton samozagęszczalny -- Badanie konsystencji metodą rozplywu stożka
27. PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
28. PN-B-06265:2022-08 Beton -- Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08
29. PN-EN 12390-8:2019-08 Badania betonu - Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem
30. G. Rutkowska, P. Ogrodnik, A. Powęzka, M. Żółtowski, F. Chyliński, K. Kaszewska, (2024): Effect of cenospheres on the properties of plain concrete exposed to elevated temperature, Clean Technologies and Environmental Policy, 1-15, DOI:10.1007/s10098-024-03034-3
31. F. Chyliński, K. Kuczynski, (2020): Ilmenite Mud Waste as an Additive for Frost Resistance in Sustainable Concrete, Materials [vol. 13](https://doi.org/10.3390/ma13132904), 2904, [doi.org/10.3390/ma13132904](https://doi.org/10.3390/ma13132904)