

mgr inż. Anna Szwed
Solbet Kolbuszowa S.A.
dr hab. inż., prof. AGH Waldemar Pichór
Akademia Górniczo-Hutnicza

„Optymalizacja cyklu obróbki termicznej betonu w kontekście zrównoważonej produkcji prefabrykatów betonowych”

"Optimizing the thermal treatment cycle of concrete in the context of sustainable precast element manufacturing"

Streszczenie

Stając naprzeciw wyzwaniom związanym z polityką klimatyczną, podjęto próbę zoptymalizowania cyklu obróbki termicznej betonu, co może znacząco wpłynąć na zmniejszenie jego wpływu na środowisko. Celem przeprowadzonych badań było dostosowanie procesu produkcji prefabrykatów betonowych do bardziej zrównoważonych.

Prace badawcze zostały podzielone na dwa etapy, z których pierwszy dotyczył eksperymentalnych cykli naparzania zapraw normowych w temperaturach 50°C i 70°C. Zmiana schematu każdego kolejnego cyklu polegała na systematycznym wydłużaniu czasu wstępnego dojrzewania, od 0 do 120 minut, przy zachowaniu stałego czasu izotermicznego nagrzewu. W dalszej części eksperymentu, po utrzymaniu dwugodzinnego wstępnego dojrzewania w temperaturze 20°C, koncentrowano się na wydłużeniu czasu trzeciej fazy procesu. Tego typu modyfikacje miały na celu wyznaczenie cyklu najbardziej efektywnego, w którym 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie zapraw poddanych obróbce termicznej była zbliżona do wytrzymałości zaprawy referencyjnej, przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii.

W drugiej części pracy przeprowadzono obróbkę termiczną betonu w najbardziej efektywnych cyklach, które zostały wyznaczone w pierwszym etapie. Następnie dokonano porównania zmiany wybranych właściwości fizycznych betonu naparzanego z betonem referencyjnym.

Abstract

Facing to the challenges posed by climate policy, an attempt was made to optimize the thermal treatment cycle of concrete, which could significantly reduce its environmental impact. The aim of the conducted research was to adapt the production process of concrete prefabricates to develop more sustainable methods.

The research work was divided into two stages. The first stage involved experimental curing cycles of standard mortars at temperatures of 50°C and 70°C. The modification of each subsequent cycle involved systematically extending the initial curing time from 0 to 120 minutes while maintaining a constant isothermal heating time. In the next part of the experiment, after maintaining a two-hour initial curing at 20°C, the focus was on extending the third phase of the process. These modifications aimed to identify the most efficient cycle, in which the 28-day compressive strength of the thermally treated mortars was closest to the compressive strength of the reference mortar, while simultaneously reducing energy consumption.

In the second part of the study, thermal treatment of concrete was carried out using the most efficient cycles identified in the first stage. A comparison was then made of the changes in selected physical properties of the thermally treated concrete with those of the reference concrete.

1. Wstęp

Jednym z największych wyzwań dzisiejszego pokolenia jest globalne ocieplenie klimatu powodowane głównie z emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Cały przemysł budowlany odpowiada za 42% światowej emisji CO_{2eq}. Z czego 27,3% pochodzi działalności budowlanej, a najczęściej wykorzystywane materiały budowlane emitują dodatkowe 15% [1]. W związku z tym, poszukiwanie skutecznych metod redukcji zużycia energii i emisji CO₂ w tym sektorze jest istotne dla osiągnięcia celów dekarbonizacji. Inicjatywa wprowadzona przez Unię Europejską zakłada, że do końca 2030 roku zostanie zredukowana emisja CO₂ o 55% w stosunku do wartości emisji gazów cieplarnianych w roku 1990. Celem programu „Fit for 55” jest doprowadzenie do neutralności klimatycznej krajów Unii Europejskiej do 2050 roku.

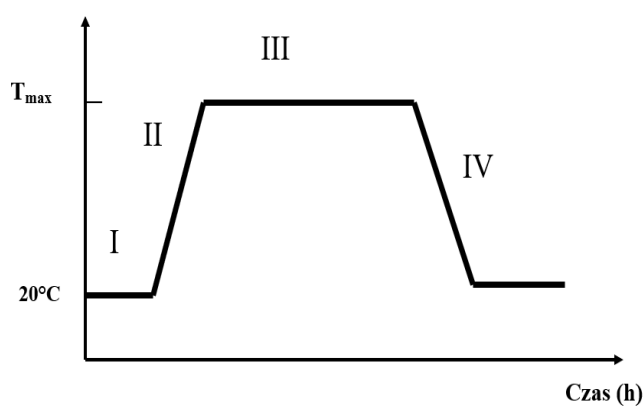
Prefabrykacja jest gałęzią budownictwa, która wykazuje obiecujące wyniki w ograniczeniu emisji i poprawie efektywności energetycznej. Oferuje korzyści w zakresie kontroli jakości, wydajności produkcji, krótsze czasy operacyjne, mniejsze zapotrzebowanie na pracę oraz mniejszą ilość odpadów w porównaniu z tradycyjnymi metodami budowy. Jedną z głównych zalet prefabrykacji jest stosunkowo szybki czas produkcji, dlatego w zakładach stosuje się różne metody, aby jak najszybciej osiągnąć wymaganą wytrzymałość prefabrykatów. Do takich metod zaliczają się: stosowanie cementów wysokich klas o odpowiednim składzie fazowym i wysokiej powierzchni właściwej, domieszki chemiczne i dodatki mineralne, optymalizacja składu receptur oraz podniesienie temperatury pielęgnacji. Z punktu widzenia przyspieszenia dojrzewania betonu duże znaczenie mają również różne rodzaje obróbki termicznej. Zabiegi te pozwalają przyspieszyć hydratację cementu, co skutkuje szybszym przyrostem wytrzymałości i skróceniem czasu potrzebnego do rozformowania elementu. Wybór odpowiedniego rodzaju obróbki cieplnej zależy od wymagań technologicznych, rodzaju prefabrykatów oraz dostępnych urządzeń w zakładzie produkcyjnym. W celu przyspieszenia dojrzewania betonu wdraża się różne procedury termicznego podgrzewania, w tym między innymi:

- Naparzenie pod ciśnieniem atmosferycznym. Polega ona na przeprowadzaniu pielęgnacji w warunkach kontrolowanej temperatury oraz odpowiedniego poziomu wilgotności [2]. Medium grzewczym jest nasycona para wodna o temperaturze 100°C.
- Autoklawizacja, to sposób obróbki materiałów za pomocą gorącej pary wodnej (około 200°C) i podniesionym ciśnieniu. Proces odbywa się w szczelnie zamkniętych urządzeniach zwanych autoklawami.
- Elektronagrzew. Metoda polegająca na przyłożeniu napięcia do pręta zbrojeniowego lub elektrody osadzonej wewnątrz betonu. Źródłem ciepła jest energia elektryczna, która przekształca się w ciepło w wyniku oporu elektrycznego elementów grzejnych.
- Promienie podczerwone. Metoda polega na zewnętrznym ogrzewaniu powierzchni betonu promieniowaniem podczerwonym..

- **Gorące formowanie.** Polega na podniesieniu temperatury świeżego betonu do temperatury powyżej 32°C poprzez wykorzystanie wstępnie podgrzanych surowców produkcyjnych lub wtrysk gorącej pary bezpośrednio do betoniarki [2,3]. W tej metodzie istotne jest izolowanie betonu przed stratami „ciepła technologicznego”[4].

Ze względu na prostotę i łatwość kontroli procesu najbardziej rozpowszechnioną w prefabrykacji metodą przyspieszenia dojrzewania betonu jest obróbka termiczna parą wodną pod ciśnieniem atmosferycznym. Zapewnia ona warunki do kontrolowanego wzrostu temperatury betonu oraz utrzymania stałej wilgotności otoczenia.

Typowy cykl naparzania niskoprężnego składa się z czterech etapów.



Rys.1. Schemat cyklu obróbki cieplnej [2]

I. *Faza opóźnienia.* Jest to czas mierzony od wykończenia powierzchni betonu do czasu kontrolowanego wzrostu temperatury. Ponieważ beton jest kompozytem złożonym z kilku materiałów posiadających różne współczynniki rozszerzalności cieplnej rozpoczęcie nagrzewania zbyt wcześnie może doprowadzić do gradientów temperatury i wilgotności w betonie. Celem tego etapu jest uzyskanie takiego poziomu wytrzymałości na rozciąganie matrycy cementowej aby mogła się przeciwstawić naprężeniom powstającym w porach betonu podczas wzrostu temperatury. Czas trwania tej fazy uzależniony jest od rodzaju cementu, jego czasu wiązania oraz szybkości i ilości wydzielanego ciepła. Wielu badaczy zauważyło, że wydłużenie okresu przed nagrzewaniem prowadzi do uzyskania wyższych wytrzymałości oraz lepszych parametrów trwałościowych. Na podstawie badań wyciągnięto wniosek, że długość okresu opóźnienia powinien być zbliżony do początku czasu wiązania. Często stosowana praktyka skracania czasu wstępnej pielęgnacji prowadzi do powstania bardziej porowatej i zdefektowanej mikrostruktury.

II. *Faza wzrostu temperatury.* Jest to czas potrzebny do podgrzania układu do temperatury docelowej. Tempo wzrostu temperatury zwykle mieści się w przedziale 11–44°C/h. Zależy głównie od konsystencji mieszanki betonowej, modułu powierzchniowego elementu, rodzaju cyklu oraz czasu wstępnego dojrzewania. W licznych badaniach wykazano, że wolniejszy wzrost temperatury pozwala na równomierne rozprowadzenie ciepła i zminimalizowanie uszkodzeń termicznych.

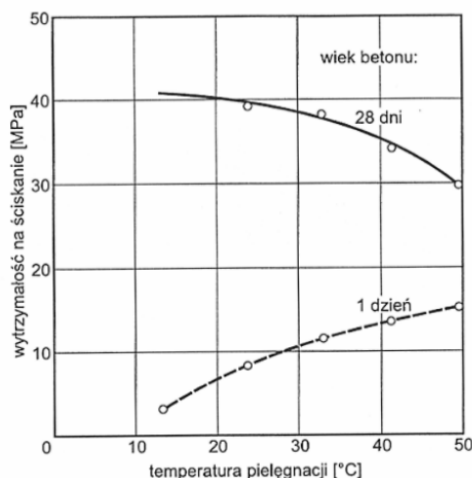
III. *Izotermiczny nagrzew.* Jest to etap pielęgnacji betonu z użyciem pary wodnej przy ustalonej maksymalnej temperaturze. Maksymalna temperatura naparzania mieści się zazwyczaj w przedziale 40°C–100°C. Zarówno temperatura jak i czas trwania tej fazy są zróżnicowane i zależą głównie od oczekiwanej wytrzymałości na ściskanie oraz wymaganych właściwości trwałościowych. Na podstawie badań [6,7] jako optymalny zakres temperaturowy wskazano 50–80°C. Wzrost temperatury naparzania przyspiesza reakcję cementu z wodą oraz intensyfikuje tworzenie się produktów hydratacji, co przekłada się na szybszy przyrost wczesnej wytrzymałości betonu, ale może jednocześnie prowadzić do obniżenia wytrzymałości w późniejszym okresie [5].

IV. *Okres spadku temperatury.* Jest to końcowa faza obróbki termicznej. Tak jak podczas procesu podgrzewania, zaleca się stopniowe i umiarkowane chłodzenie elementów, ponieważ zbyt szybki spadek temperatury może prowadzić do znacznych różnic temperaturowych między wnętrzem a powierzchnią próbki oraz przyspieszonej utraty wilgoci. W efekcie może dochodzić do powstawania spękań w warstwie powierzchniowej, zwłaszcza w przypadku elementów o dużych gabarytach [2]. Zjawisko to sprzyja zwiększeniu współczynnika adsorpcji. Rozformowanie elementu powinno nastąpić po ustaleniu gradientu temperatury, pomiędzy powierzchnią betonu a otoczeniem, nie większym niż 30-40°C [2].

Nie istnieje uniwersalny schemat obróbki termicznej, który byłby odpowiedni dla każdego rodzaju elementów prefabrykowanych. Dobór właściwego cyklu zależy od wielu zmiennych. Warunki, które wspierają szybkie osiągnięcie wysokiej wytrzymałości na wczesnym etapie, często okazują się niekorzystne dla trwałości i parametrów mechanicznych w późniejszym okresie dojrzewania betonu.

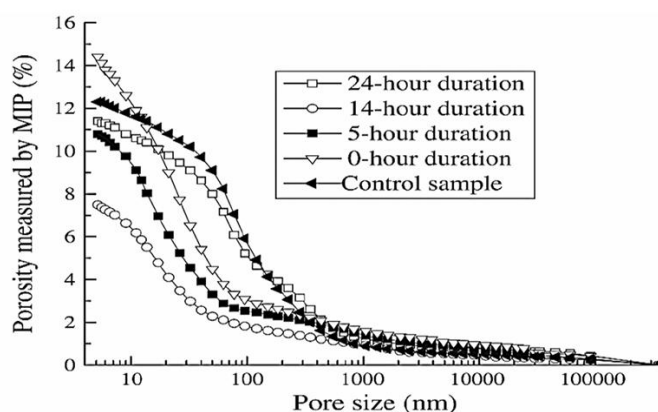
W przemyśle metody przyspieszania dojrzewania poprzez podgrzewanie klasyfikuje się zazwyczaj na podstawie czasu trwania oraz temperatury. Wyróżnia się tu trzy kategorie: krótkie (do 6 godzin), średnie (od 6 do 12 godzin) oraz długie (ponad 12 godzin).

Podniesienie temperatury w początkowej fazie dojrzewania betonu przyczynia się do szybszego wzrostu jego wytrzymałości, co jest rezultatem przyspieszonej reakcji fizyko-chemicznej podczas wiązania zaczynu [2,5,9]. Skutkiem tego zjawiska jest pożądaný, znaczny przyrost wczesnej wytrzymałości na ściskanie, nawet do 70% wytrzymałości projektowanej, po 24 godzinach. Podwyższona temperatura sprzyja szybkiemu formowaniu się mikrostruktury młodego betonu. Związki powstające w wyniku hydratacji wytrącają się intensywnie, lecz nierównomiernie, prowadzi to do powstawania znacznej ilości porów w ich strukturze. Pory stanowią miejsca, w których mogą rozpoczynać się procesy prowadzące do powstania pęknięć, dlatego też w efekcie oddziaływania podwyższonej temperatury we wczesnej fazie dojrzewania, beton osiąga w dłuższym okresie niższą wytrzymałość niż beton, który pielęgnowany był w standardowych warunkach otoczenia.



Rys. 2. Wpływ temperatury pielęgnacji na wytrzymałość betonu [3]

Wykorzystanie pary wodnej jako źródła ciepła sprzyja wzrostowi całkowitej porowatości betonu oraz zwiększeniu udziału porów niekorzystnych co ma negatywny wpływ dla jego trwałości. Dynamiczny transport produktów hydratacji, w połączeniu z ciśnieniem kapilarnym wywołanym przemieszczaniem się pary, skutkuje tworzeniem się porów o rozmiarach większych niż 100nm. Na rys.3 przedstawiono wpływ czasu naparzania na rozkład wielkości porów. Okazuje się, że wydłużenie czasu naparzania z 5 do 14 godzin powoduje zmniejszenie ilości powstawania porów o większej średnicy, z drugiej strony dalsze przedłużenie działania pary wodnej w czasie do 24 godzin sprzyja zwiększeniu udziału porów o większych rozmiarach w strukturze betonu [7].

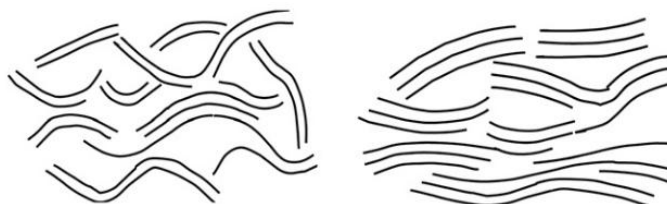


Rys. 3. Charakterystyka porów mierzona za pomocą MIP [7]

Podczas naparzania, powierzchnia betonu zostaje dodatkowo nawilżona, a różnice temperatur powodują dyfuzję wody z cieplejszych stref do chłodniejszych. Proces ten sprzyja przemieszczaniu się wilgoci w głąb betonu oraz jej przejściu w fazę gazową. Tworząca się wewnątrz betonu para wodna, charakteryzująca się znacznie większą objętością niż ciecz, generuje wzrost naprężeń rozciągających w porach kapilarnych, co prowadzi do zapoczątkowania mikropeknięć w matrycy cementowej [8]. Zapobiegać temu zjawisku można poprzez wydłużeniu czasu wstępnego dojrzewania.

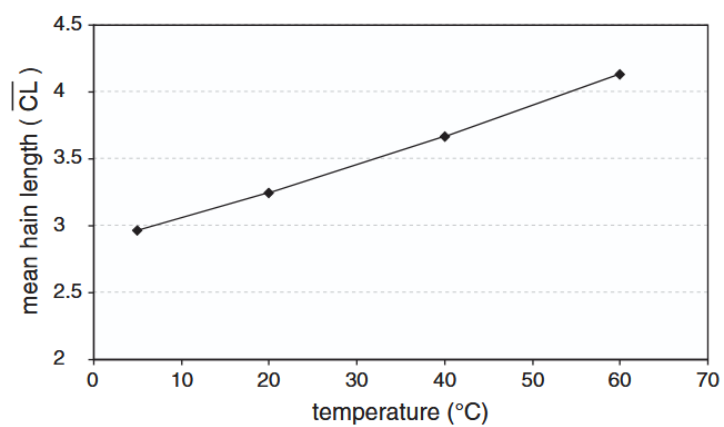
Zmianom ulega również strefa przejściowa na granicy faz kruszywo-zaczyn. W warunkach standardowej pielęgnacji mikrostruktura zaczynu cementowego w strefie przylegającej do kruszywa grubego różni się od tej w pozostałych partiach betonu. W tym obszarze stosunek wody do cementu (w/c) jest znacznie wyższy, co skutkuje mniejszym zagęszczeniem ziaren cementu. Zjawisko to jest zbliżone do tzw. efektu ściany, obecność kruszywa ogranicza koncentrację cementu oraz zdolność do wypełnienia pierwotnych porów produktami hydratacji [3,10]. W warunkach naturalnego dojrzewania ma ona grubość 50µm. Podwyższenie temperatury podczas dojrzewania betonu przyczynia się do intensyfikacji wydzielania produktów hydratacji oraz szybszego rozwoju mikrostruktury również w tym obszarze. Przyspieszona hydratacja prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia produktów reakcji, co skutkuje lokalnym zagęszczeniem mikrostruktury w strefie kontaktowej (ITZ). Jednocześnie zwiększona zawartość wody w tym obszarze sprzyja powstawaniu wyższej porowatości oraz mikropęknięć, które osłabiają właściwości mechaniczne tej strefy. Obróbka termiczna parą wodną ma również wpływ na rozmiar strefy przejściowej – wraz ze wzrostem temperatury dochodzi do jej poszerzenia, które może osiągać nawet 120 µm [11]. Strefa ta, będąca najsłabszym punktem matrycy betonu, w dużej mierze decyduje o jego końcowej wytrzymałości na ściskanie.

C-S-H (uwodniony krzemian wapnia) stanowi podstawowy produkt reakcji hydratacji cementu i w znacznym stopniu odpowiada za rozwój wytrzymałości betonu. Podczas dojrzewania w warunkach standardowych jego struktura przypomina zbiór upakowanych krótkich, cienkich włókien. Jednak w podwyższonej temperaturze morfologia C-S-H ulega istotnej zmianie, przyjmując formę przypominającą plaster miodu. Badania nad strukturą atomową tego żelu, przeprowadzone przez Galluciego [5], wykazały jego dużą wrażliwość na zmiany temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury pielęgnacji zwiększa się jego gęstość pozorna, co oznacza, że zajmuje on mniejszą objętość w matrycy cementowej. W rezultacie prowadzi to do zwiększenia porowatości kapilarnej.

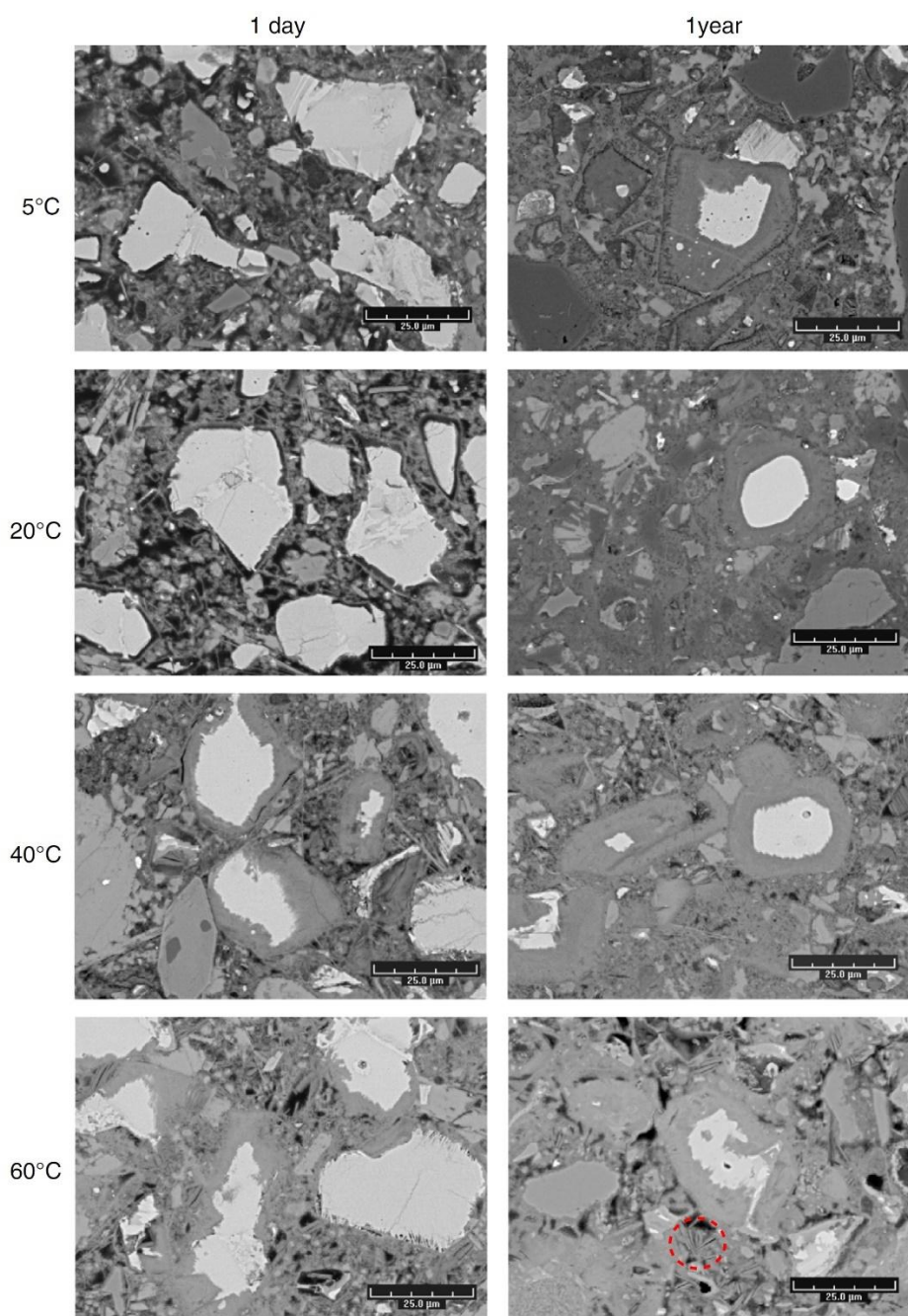


Rys. 4. Schemat przedstawiający C-S-H powstałe w niskiej temperaturze (z lewej) i w wyższej temperaturze (z prawej) [5]

Galluci zaobserwował również, że wyższa temperatura przyczynia się do wzrostu poziomu polimeryzacji struktur C-S-H co skutkuje wyższą wytrzymałością wczesną [5,6].



Rys. 5. Zmiana długości łańcucha C-S-H w funkcji temperatury



Rys. 6. Rozwój mikrostruktury pomiędzy 1 dniem i 1 rokiem w różnych warunkach temperatury 5, 20, 40 i 60°C [5]

W warunkach hydratacji cementu w temperaturze pokojowej, w ciągu pierwszych godzin od kontaktu z wodą, następuje formowanie się fazy AFt. Jej szybkie zarodkowanie oraz wzrost kryształów odgrywają kluczową rolę w zakończeniu reakcji pomiędzy C_3A (glinianem trójwapniowym) a gipsem.

W zaprawach naparzanych w temperaturze 85°C zaobserwowano rozkład etringitu powstałego we wcześniejszym etapie hydratacji. AFt rozpada się na produkty wtórne, takie jak AFm, jony siarczanowe SO_4^{2-} , wapniowe Ca^{2+} oraz $[Al(OH)_4]^-$. Analizy w skali mikro ujawniają, że w zaprawach poddanych działaniu wysokiej temperatury, zewnętrzna warstwa żelu C-S-H tworzy strukturę nanometrycznej mieszaniny

zawierającej fazę monosiarczanową [12]. Obecność AFm (zaznaczony czerwony okrąg na rys. 6) utworzonego w wyniku tej przemiany może prowadzić do powstania tzw. opóźnionego etringitu (DEF – Delayed Ettringite Formation) [7,13,14]. W konsekwencji tego zjawiska następuje jego ekspansja oraz powstawanie licznych mikropęknięć w strukturze betonu. Mikropęknięcia te są wynikiem niskiej wytrzymałości na rozciąganie matrycy cementowej i znacząco wpływają na trwałość elementów betonowych poddanych wysokiej temperaturze podczas dojrzewania.

W warunkach podwyższonej temperatury, przekraczającej 40°C, zachodzi również przemiana nietrwałych hydroglinianów o strukturze heksagonalnej w bardziej stabilną, w krystalizującą układzie regularnym fazę C₃AH₆. Transformacja jej prowadzi do wzrostu porowatości oraz zwiększenia przepuszczalności betonu, co ma bezpośredni wpływ na obniżenie jego trwałości [15].

Cały zespół odkształceń powodowanych gradientem temperatury nazywa się uszkodzeniami termicznymi. Można im zapobiegać lub minimalizować nie tylko poprzez kształtowanie procesu obróbki termicznej ale również wykorzystując dodatki mineralne. W podwyższonej temperaturze czas wiązania cementu ulega znacznemu skróceniu. Na powierzchni ziaren cementu reagującego z wodą szybko osadzają się znaczne ilości produktów hydratacji, co ogranicza przenikanie wody do głębszych warstw materiału i utrudnia dalszy jej przebieg. Dodatki pucolanowe takie jak popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy czy pył krzemionkowy opóźniają wiązanie cementu w wyniku obniżenia jego ciepła hydratacji [13]. Utrzymywanie odpowiedniej wilgotności w podwyższonej temperaturze sprzyja przyspieszeniu powolnej reakcji pucolanowej z Ca(OH)₂ tworząc dodatkowa ilość żelu C-S-H. Przekłada się to na doszczelnienie mikrostruktury i znaczny wzrost wytrzymałości w początkowym etapie dojrzewania materiału [2].

W niniejszym artykule skupimy się na możliwościach optymalizacji procesu pielęgnacji parą w taki sposób aby obniżyć zapotrzebowanie na energię potrzebną do uzyskania odpowiedniej wczesnej wytrzymałości betonu, jednocześnie zachowując jak najlepsze parametry w dłuższym okresie. W praktyce oznacza to, że poprzez odpowiednie dostosowanie procesu obróbki cieplnej można osiągnąć wysoką wytrzymałość w krótkim czasie, co pozwala na maksymalne skrócenie cyklu produkcyjnego i zmniejszenie zużycia energii.

Celem referatu było zbadanie wpływu wybranych parametrów cieplnych (m.in. czasu rozpoczęcia nagrzewania i temperatury izotermicznego nagrzewania) na wczesne przyrosty wytrzymałości kompozytów cementowych, przy zachowaniu kontroli nad innymi zmiennymi. Wykorzystanie w badaniach zapraw normowych pozwala na łatwiejsze wyodrębnienie działania poszczególnych czynników bez wpływów wynikających z różnic geometrii czy zastosowanych technologii.

2. Program i metody badań

2.1. Etap I

Pierwszy etap badań dotyczy eksperymentalnych cykli naparzania zapraw normowych w temperaturach 50°C i 70°C. Zmiana schematu każdego kolejnego cyklu

polegała na systematycznym wydłużaniu czasu wstępnego dojrzewania, od 0 do 120 minut, przy zachowaniu stałego czasu izotermicznego nagrzewu. W dalszej części eksperymentu, po utrzymaniu dwugodzinnego wstępnego dojrzewania w temperaturze 20°C, skupiono się na wydłużeniu czasu trzeciej fazy procesu. Tempo wzrostu temperatury II fazy ustalono na stałe i wynosiło 25°C/h. Tego typu modyfikacje miały na celu wyznaczenie cyklu najbardziej efektywnego, w którym 28-dniowa wytrzymałość na ściskanie zapraw poddanych obróbce termicznej była zbliżona do wytrzymałości zaprawy referencyjnej (nazywana dalej wydajnością procesu), przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii. Parametr służący jako miara zużycia energii dla poszczególnych cykli obróbki cieplnej jest indeks energetyczny. Został określony jako iloczyn czasu trwania danego cyklu naparzenia oraz różnicy temperatury względem temperatury otoczenia, przyjętej jako 20°C. W tabeli 1 przedstawiono eksperymentalne cykle naparzenia.

Tab. 1. Schematy cykli naparzenia

Numer cyklu	Czas wstępnego dojrzewania [h]	Temperatura izotermicznego nagrzewu [°C]	Czas izotermicznego nagrzewu [h]	Indeks energetyczny ·10 ⁴ [min·°C]
1	0	70	4	1,50
2	0,25	70	4	1,50
3	0,5	70	4	1,50
4	0,45	70	4	1,50
5	1	70	4	1,50
6	1,25	70	4	1,50
7	1,5	70	4	1,50
8	1,75	70	4	1,50
9	2	70	4	1,50
10	2	70	4,25	1,58
11	2	70	4,5	1,65
12	2	70	4,75	1,73
13	2	70	5	1,80
14	2	70	5,25	1,88
15	2	70	5,5	1,95
16	2	70	5,75	2,07
17	2	70	6	2,10
18	0	50	6	1,19
19	0,25	50	6	1,19
20	0,5	50	6	1,19
21	0,75	50	6	1,19
22	1	50	6	1,19
23	1,25	50	6	1,19
24	1,5	50	6	1,19
25	1,75	50	6	1,19
26	2	50	6	1,19
27	2	50	6,25	1,24
28	2	50	6,5	1,28
29	2	50	6,75	1,33
30	2	50	7	1,37
31	2	50	7,25	1,42
32	2	50	7,5	1,46
33	2	50	7,75	1,51
34	2	50	8	1,55

Numer cyklu	Czas wstępnego dojrzewania [h]	Temperatura izotermicznego nagrzewu [°C]	Czas izotermicznego nagrzewu [h]	Indeks energetyczny ·10 ⁴ [min·°C]
35	2	50	8,25	1,60
36	2	50	8,5	1,64
37	2	50	8,75	1,69
38	2	50	9	1,73

Do realizacji cykli naparzania wykorzystano specjalnie zaprojektowane i wykonane na terenie zakładu prefabrykacji urządzenie. Składa się ono z zaizolowanej komory, do której para wodna doprowadzana jest z zewnętrznego źródła za pomocą przewodu gumowego. Temperatura wewnątrz komory mierzona jest za pomocą termopary umieszczonej w jej górnej części. Rejestracja temperatury, wyrażonej w stopniach Celsjusza, odbywała się za pomocą elektronicznego rejestratora. Czas trwania poszczególnych faz cyklu naparzania ustalano przy użyciu oprogramowania F&F PCZ Konfigurator.

2.2. Etap II

W drugiej części pracy przeprowadzono obróbkę termiczną betonu w najbardziej efektywnych cyklach, które zostały wyznaczone w pierwszym etapie. Następnie dokonano porównania zmiany wytrzymałości, głębokości penetracji oraz współczynnika migracji chlorków betonu naparzanego z betonem referencyjnym.

3. Materiały

Do badań wykorzystano cement portlandzki z dodatkami CEM II/A-M(S-LL) 52,5R zgodny z normą PN-EN 197-1 [17]. Podstawowe właściwości przedstawiono w tabeli 2.

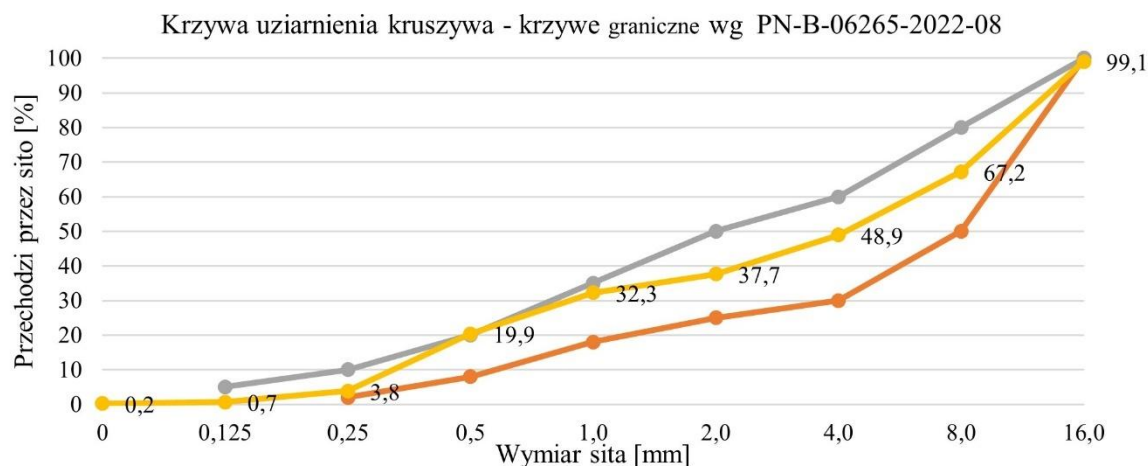
Tab. 2. Właściwości cementu

Parametr		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	24 h	21,1
	7 dni	47,7
	28 dni	55,8
	90 dni	66,9
Początek czasu wiązania [min]		195
Koniec czasu wiązania [min]		210
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a* [cm ² /g]		5314
*w/g producenta		

W pierwszym etapie dla każdego z cykli przygotowano zaprawy według wytycznych normy PN-EN 196-1[18]. Następnie zaformowano cztery serie próbek w formie beleczek o wymiarach 40×40×160 mm, przeznaczonych do badań wytrzymałości na ściskanie po 24 godzinach, 7, 28 oraz 90 dniach. Uformowane próbki

umieszczono w komorze naparzania, gdzie poddano je wcześniej ustalonym cyklom. Następnie beleczki wyjmowano z komory na 20 minut przed upływem 24 godzin od momentu formowania. Na jednym z zestawów wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie po 24 godzinach, natomiast pozostałe próbki przeniesiono na ruszty zanurzone w pojemniku z wodą, gdzie były przechowywane do czasu przeprowadzenia kolejnych badań.

W drugim etapie badań zaprojektowano i przygotowano mieszankę betonową [19], którą następnie poddano wybranym cyklom naparzania. Do jej wykonania zastosowano kruszywa [20] w postaci naturalnego piasku płukanego o uziarnieniu 0–2 mm, pochodzący z lokalnej kopalni. Kruszywo grube stanowiła mieszanina grys dolomitowego o frakcjach 2 – 8 mm oraz 8 – 16 mm, aktualnie wykorzystywana w produkcji elementów prefabrykowanych. Gęstość objętościowa zastosowanego kruszywa wynosiła odpowiednio 2,65 Mg/m³ dla kruszywa drobnego i 2,78 Mg/m³ dla grubego. Na rysunku 7 przedstawiono krzywą uziarnienia całkowitej mieszanki kruszywa zastosowanej w betonie referencyjnym.



Rys. 7. Krzywa uziarnienia mieszaniny kruszywa drobnego i grubego dla mieszanki referencyjnej [21]

Do sporządzenia mieszanki betonowej wykorzystano superplastyfikator o właściwościach upłynniających i znacząco ograniczających zapotrzebowanie na wodę zarobową, a także domieszkę napowietrzającą na bazie anionowych surfaktantów. Obie domieszki spełniają wymagania normy PN-EN 934-2 [22]. W tabeli nr 3 przedstawiono skład receptury betonu referencyjnego.

Tab. 3. Skład betonu referencyjnego

Składnik	[kg]
CEM II/A-M (S-LL) 52,5R	395
Piasek 0-2 mm	681
Grys 2-8 mm	496
Grys 8-16 mm	640
woda	156
Supelplastyfikator 0,65%mc	2,57
Napowietrzacz 0,17%mc	0,67

Proces przygotowania mieszanki betonowej prowadzono w mieszalniku laboratoryjnym, z zachowaniem ścisłego dozowania wagowego wszystkich składników. Każdorazowo stosowano tę samą kolejność dozowania i mieszania, co gwarantowało powtarzalność i porównywalność uzyskiwanych rezultatów.

Z przygotowanych zarobów zaformowano szereg próbek przeznaczonych do badań. Następnie poddano je odpowiednio dobranemu cyklowi obróbki cieplnej. Po upływie 24 godzin dla części próbek wykonano pomiar wytrzymałości na ściskanie. Pozostałe przeniesiono do komory klimatycznej o wilgotności względnej przekraczającej 95% i utrzymywano w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 2$, aż do momentu przeprowadzenia kolejnych badań. Następnie przeprowadzono zaplanowane badania, obejmujące wytrzymałość na ściskanie, przepuszczalność wody przez beton, wyznaczenie współczynnika migracji jonów chlorkowych oraz mrozoodporności F150, w celu porównania ich wyników z właściwościami betonu referencyjnego. W tabeli nr 4 przedstawiono właściwości referencyjnej świeżej mieszanki oraz betonu.

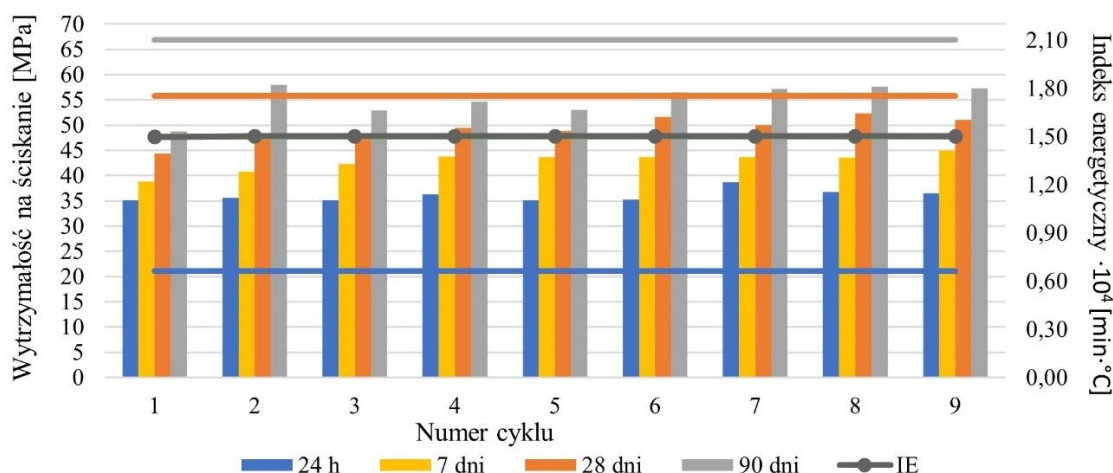
Tab.4. Właściwości referencyjnej mieszanki betonowej [23-26]

Świeża mieszanka	Beton		
Gęstość objętościowa [kg/m ³]	2373	Wytrzymałość na ściskanie	24h 26,3
Opad stożka [mm]	190		7 dni 45,5
Zawartość powietrza [%]	5,8		28 dni 54,8

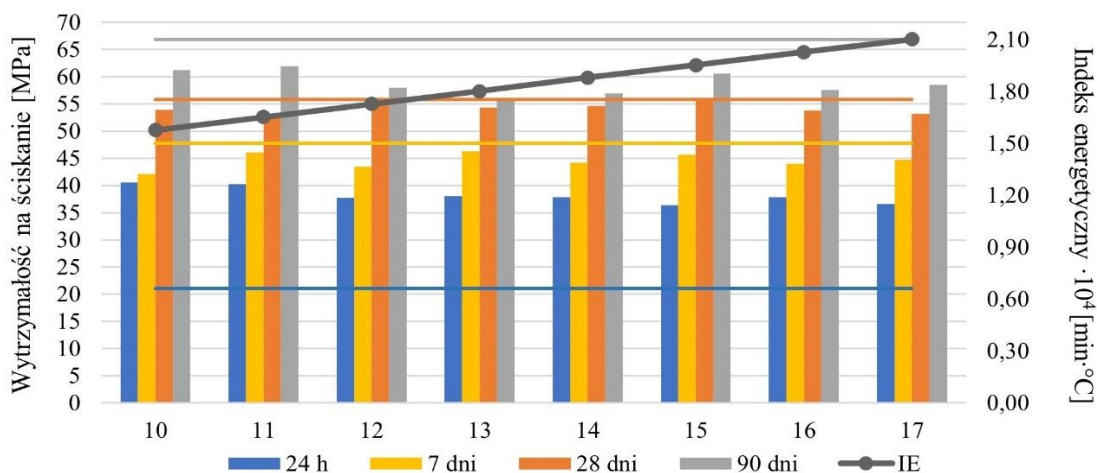
4. Wyniki i dyskusja

4.1. Etap I

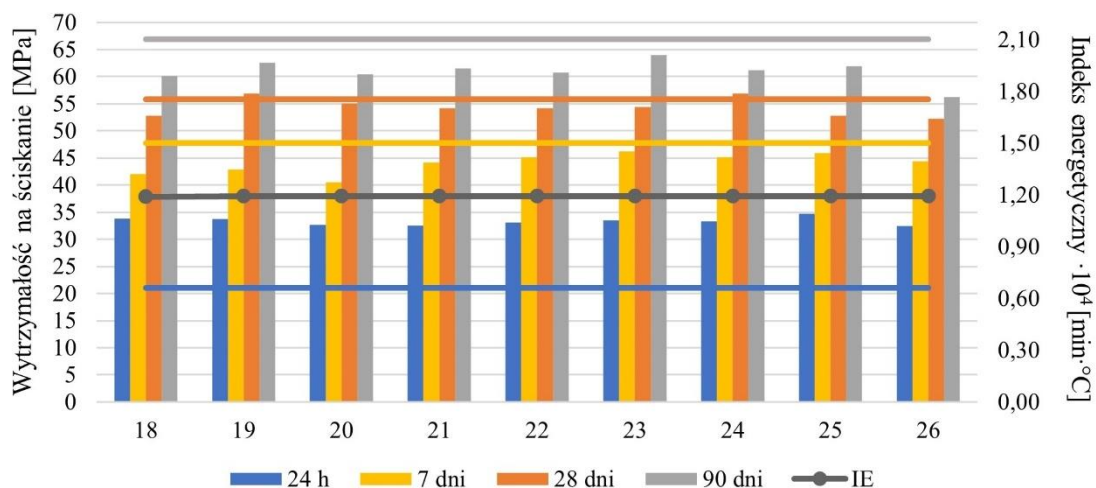
Badania wytrzymałości na ściskanie zapraw przeprowadzono na próbkach w formie beleczek o wymiarach 40×40×160 mm. Pomiar realizowano po każdym zakończonym cyklu naparzania w czterech terminach: po 24 godzinach od momentu zarobienia z wodą, a następnie po 7, 28 oraz 90 dniach dojrzewania. Wyniki przedstawiono na rysunkach 8-11.



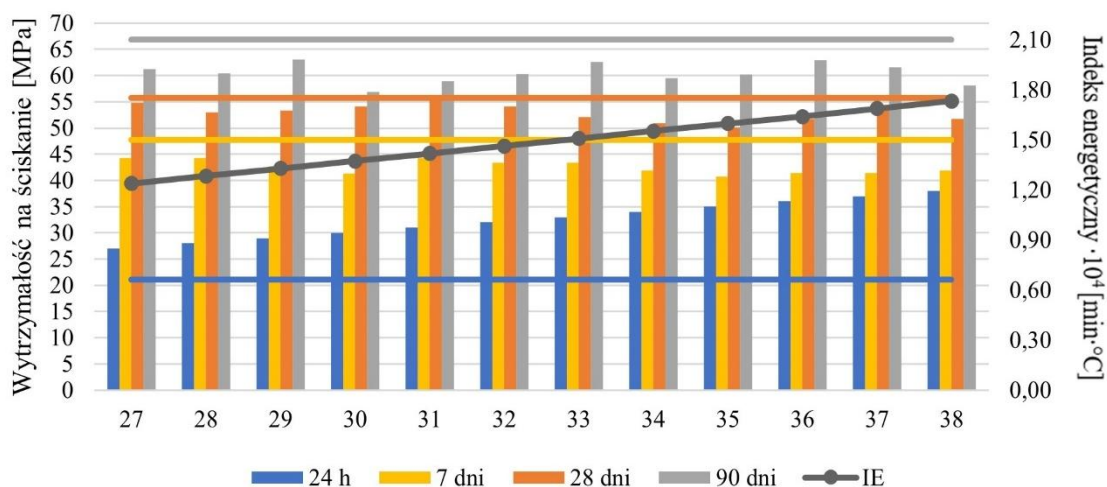
Rys. 8. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 1-9



Rys. 9. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 10-17



Rys. 10. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 18-26



Rys. 11. Przyrost wytrzymałości w czasie dla cykli 27-38

Kryterium doboru cykli naparzania przeznaczonych do drugiego etapu badań opierało się na wyborze takiego schematu obróbki cieplnej, który zapewniał, że wytrzymałość zaprawy normowej po 24 godzinach stanowiła co najmniej 50% wytrzymałości zaprawy referencyjnej po 28 dniach dojrzewania. Dodatkowo brano pod uwagę możliwość maksymalnego skrócenia czasu trwania cyklu, przy jednoczesnym utrzymaniu jego efektywności (wydajności) — określanej stosunkiem R_{ix}/R_{28} możliwie bliskim jedności — oraz przy jak najniższym wskaźniku energetycznym.

Wyniki badań wykazały, że wytrzymałość zapraw mierzona po 24 godzinach była zdecydowanie wyższa dla cykli z izotermiczną temperaturą nagrzewu wynoszącą 70°C, w porównaniu do tych prowadzonych przy 50°C. Jednak w miarę upływu czasu dojrzewania tendencja ta ulegała odwróceniu — w dłuższej perspektywie korzystniejsze okazywały się cykle o niższej temperaturze.

Istotnym czynnikiem wpływającym zarówno na wczesną, jak i późniejszą wytrzymałość okazało się również stopniowe wydłużenie fazy wstępnej pielęgnacji przed rozpoczęciem właściwego naparzania. Wydłużenie tego etapu sprzyjało stabilniejszemu rozwojowi mikrostruktury, co skutkowało wyższą wytrzymałością młodego betonu.

Zaobserwowane zmiany w rozwoju wytrzymałości były bezpośrednio związane ze wzrostem tempa hydratacji. Szybki przebieg reakcji hydratacyjnych powodował intensywne odkładanie się produktów hydratacji, co przekładało się na wysokie wartości wytrzymałości wczesnej. Z drugiej strony, tak dynamiczny i nierównomierny rozwój mikrostruktury prowadził do powstawania porów o większej średnicy, które negatywnie wpływały na gęstość i szczelność struktury zaczynu cementowego, osłabiając tym samym jego wytrzymałość w późniejszym okresie.

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań wybrano cykl nr 15 dla izotermicznego nagrzewu o temperaturze 70°C (Z70-15) o wskaźniku energetycznym $1,95 \cdot 10^4$ [min·°C] oraz cykl nr 19 (Z50-19) dla temperatury 50°C. Dodatkowo, do przeprowadzenia podstawowych badań, uwzględniono cykl nr 24 (Z50-24), w którym wydłużono pierwszą fazę w porównaniu do cyklu nr 19, przy jednoczesnym zachowaniu tej samej temperatury izotermicznego nagrzewu oraz identycznego wskaźnika energetycznego na poziomie $1,19 \cdot 10^4$ [min·°C].

Dla wybranych cykli naparzania zaobserwowano, że wytrzymałość zapraw po 24 godzinach osiągnęła znaczący udział w stosunku do wartości uzyskanej po 28 dniach. W przypadku cyklu nr 19 oraz cyklu nr 24 wytrzymałość 24-godzinna stanowiła 59% wytrzymałości 28-dniowej, natomiast dla cyklu nr 15 osiągnięto najwyższy wynik — 67% wartości referencyjnej po 28 dniach dojrzewania.

4.2. Etap II

4.2.1. Wytrzymałość na ściskanie

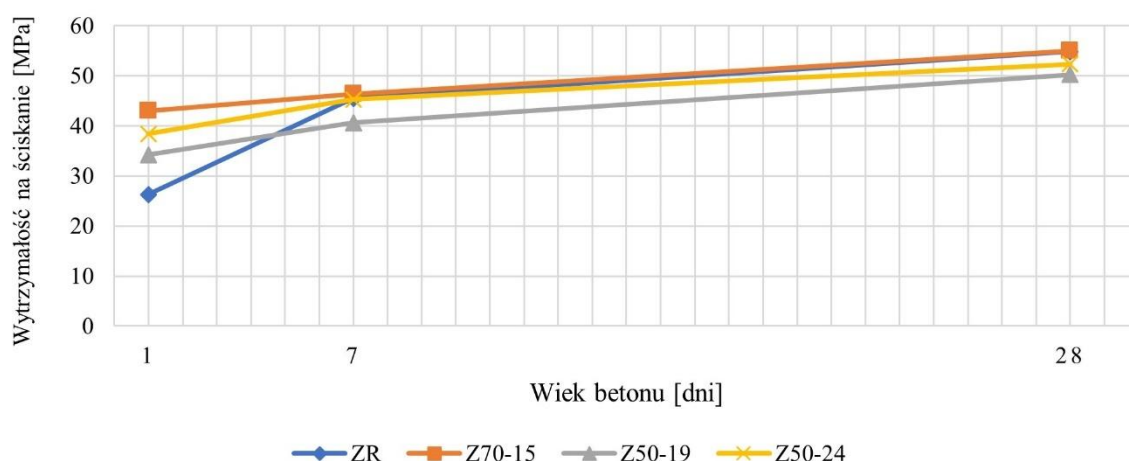
W laboratorium przygotowano cztery zestawy próbek sześciennych 100x100mm do badań wytrzymałości na ściskanie. Pierwszy zestaw pielęgnowano w standardowych warunkach laboratoryjnych, natomiast drugi, trzeci i czwarty zestaw poddano wstępnej pielęgnacji przez pierwsze 24 godziny w komorze naparzalniczej, zgodnie z wymaganiami cykli nr 15, 19 oraz 24. Po rozformowaniu próbek dokonano

pomiarów wytrzymałości na ściskanie zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2019-07 [26]. Próbkę przeznaczoną do badań w dalszych terminach pielęgnowano w komorze klimatycznej o wilgotności powyżej 95% oraz temperaturze laboratoryjnej. Badania wytrzymałości wykonywano po upływie 24 godzin, 7 oraz 28 dni od daty wykonania próbek. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie betonów w funkcji czasu przedstawiono w tabeli nr 5 i rys. 12.

Tab.5. Wytrzymałość na ściskanie betonów w analizowanych cyklach obróbki termicznej

	Wiek betonu	ZR	Z70-15	Z50-19	Z50-26
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	24 h	26,3	44,0	34,2	38,4
	7 dni	45,5	46,4	40,6	45,3
	28 dni	54,8	55,0	50,2	51,3

Zmiany wytrzymałości betonów w czasie wykazują podobne tendencje jak w przypadku zapraw poddanych naparzeniu w analogicznych cyklach. Wraz ze wzrostem temperatury izotermicznego nagrzewu obserwuje się wyraźny wzrost wytrzymałości wczesnej betonu. Dla próbek pielęgnowanych zgodnie z cyklem Z70-15 uzyskano wyższą wytrzymałość po 24 godzinach w porównaniu do próbek betonów dojrzewających według cykli Z50-19 oraz Z50-24. W przypadku betonów naparzanych w temperaturze 50°C zauważono, że wydłużenie okresu opóźnienia przed rozpoczęciem fazy wzrostu temperatury, korzystnie wpływa na rozwój wytrzymałości w czasie. Beton poddany cyklowi Z50-24 osiągnął wyższe wartości wytrzymałości w wieku 1, 7 oraz 28 dni odpowiednio o 12%, 12% i 4% w porównaniu do betonu pielęgnowanego według cyklu Z50-19. Beton poddany obróbce cieplnej według cyklu Z50-19 wykazywał zauważalny spadek wytrzymałości we wszystkich analizowanych terminach dojrzewania.



Rys. 12. Zmiana wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu

4.2.2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Pomiar głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek. Zgodnie z normą PN-EN 12390-8:2019-08, metoda ta służy do oceny przepuszczalności wody przez beton. Procedura polega na oddziaływaniu na próbkę ciśnienia wody wynoszącego 0,5 MPa przez okres 72 godzin. Po zakończeniu ekspozycji beton rozłupuje się w celu zmierzenia głębokości, na jaką ciecz przeniknęła do wnętrza materiału. Otrzymana wartość stanowi wskaźnik zdolności betonu do przeciwdziałania przenikaniu wody pod ciśnieniem i jest istotnym parametrem oceny jego trwałości. Wynik pomiarów przedstawiono w tabeli nr 6.

Na podstawie analizy głębokości penetracji wody pod ciśnieniem można zauważyć, że beton referencyjny (ZR) charakteryzował się najniższą wartością GP (13 mm), co świadczy o jego wysokiej szczelności. W przypadku betonów poddanych obróbce cieplnej zaobserwowano nieco wyższe wartości: dla Z70-15 – 16 mm, Z50-24 – 16,1 mm, a najwyższą dla Z50-19 – 17,33 mm. Wzrost głębokości wnikania wody jest skutkiem działania wysokiej temperatury, która wpływa na rozwój mikrostruktury betonu, zwiększając udział porów kapilarnych.

Pomimo pewnego pogorszenia parametrów w porównaniu z betonem referencyjnym, wszystkie analizowane mieszanki spełniają wymagania normowe głębokości penetracji wody, także dla najbardziej rygorystycznych klas ekspozycji, takich jak XA3, XD3 czy XS4 [16]. Oznacza to, że przy właściwie dobranym cyklu naparzania możliwe jest uzyskanie betonu o dobrej trwałości, nawet w warunkach przyspieszonego dojrzewania.

4.2.3. Odporność na migrację jonów chlorkowych

W ramach oceny trwałości betonów przeprowadzono również test niestacjonarnej migracji jonów chlorkowych zgodnie z PN-EN 12390-18:2021 [28]. Do badań wykorzystano trzy zestawy składające się z trzech próbek sześciennych o boku 150x150x150mm: jeden dla betonu referencyjnego oraz dwa pozostałe odpowiadające betonom dojrzewającym zgodnie z cyklami obróbki termicznej Z70-15 i Z50-19. Badanie współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono po zakończeniu 28-dniowego okresu dojrzewania próbek. Test prowadzono w stałych warunkach – przy napięciu 30 V i czasie trwania 24 godzin. Po zakończeniu próby wyznaczano średni współczynnik migracji chlorków, biorąc pod uwagę takie parametry jak: głębokość wnikania jonów, średnia temperatura obu roztworów testowych, wysokość próbki, napięcie oraz czas trwania badania. Uzyskane wyniki badania współczynnika migracji jonów chlorkowych zestawiono w tabeli nr 6.

Tab. 6. Zestawienie wyników głębokości penetracji i współczynnika migracji chlorków w betonach

	ZR	Z70-15	Z50-19	Z50-24
Głębokość penetracji GP [mm]	13,7	16,0	17,33	16,1
Współczynnik migracji chlorków D [mm ² /s]	$3,94 \cdot 10^{-12}$	$11,2 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-12}$	-
Klasa odporności betonu na migrację chlorków	Wysoka	Niska	Średnia	-

Na podstawie wyników stwierdzono, że obróbka termiczna w początkowym etapie dojrzewania betonu miała niekorzystny wpływ na jego odporność na przenikanie chlorków. Beton referencyjny (ZR), dojrzewający w warunkach laboratoryjnych, charakteryzował się najniższym współczynnikiem migracji jonów chlorkowych, osiągając wartość $3,94 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. W przypadku betonów poddanych naparzeniu w pierwszych 24 godzinach od zarobienia, odnotowano znaczny wzrost wartości współczynnika od $8,00 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dla cyklu Z50-19 do $11,20 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ dla cyklu Z70-15. Zauważono, że w wyższych temperaturach powstaje mikrostruktura charakteryzująca się zwiększoną przepuszczalnością dla jonów chlorkowych. Dla cyklu przeprowadzonego w temperaturze 50°C obserwuje się dwukrotny wzrost przepuszczalności jonów chlorkowych, natomiast w przypadku cyklu prowadzonego w temperaturze 70°C — trzykrotny wzrost, w porównaniu do betonu dojrzewającego w standardowych warunkach laboratoryjnych. Zjawisko to można wytłumaczyć szybszym procesem hydratacji cementu, który zachodzi w podwyższonych temperaturach. Na powierzchni ziaren hydratyzującego cementu dochodzi do intensywnego wytrącania się żelu C-S-H oraz prowadzi do nierównomiernego rozmieszczenia tego żelu, co skutkuje lokalnym zagęszczeniem mikrostruktury. Żel uwodnionych krzemianów wapnia wykazuje dużą podatność na zmiany temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury pielęgnacji zwiększa się gęstość pozorna żelu C-S-H. W efekcie prowadzi to do wzrostu porowatości kapilarnej. Dodatkowo, proces naparzenia sprzyja przemieszczaniu się wilgoci w głąb betonu oraz jej przemianę fazową. Tworząca się para wodna, generuje wzrost naprężeń rozciągających w porach kapilarnych, co prowadzi do inicjacji mikropęknięć w matrycy cementowej. Zjawiska te zwiększają migrację jonów chlorkowych, co negatywnie wpływa na odporność betonu na korozję wywołaną przez chlorki.

Zaplanowano również przeprowadzenie kolejnych badań dotyczących mrozoodporności (oznaczonych jako F150) [21]. Ze względu na długi czas trwania tych badań, ich wyniki nie zostaną przedstawione w niniejszym referacie.

5. Wnioski

Głównym celem referatu było wykazanie, że poprzez modelowanie warunków termicznych możliwe jest osiągnięcie zadowalającą wytrzymałość betonu w krótkim czasie oraz możliwie zbliżone parametry wytrzymałościowe i trwałościowe, w stosunku do betonu referencyjnego, w późniejszym terminie. Dążono do maksymalnego skrócenia cyklu produkcyjnego oraz istotnej redukcji zużycia energii. Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zwiększenie temperatury obróbki termicznej betonu znacząco przyspiesza rozwój jego wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania — już po jednej dobie może osiągnąć nawet 68% wytrzymałości projektowanej oraz zachować taką samą wytrzymałość po 28 dniach pielęgnacji dla cyklu Z70-15 w porównaniu do betonu referencyjnego. Należy jednak zauważyć, że mimo szybkiego przyrostu wczesnej wytrzymałości dla cykli Z50-19 i Z50-24, w dłuższej perspektywie obserwuje się jej obniżenie w porównaniu do betonów referencyjnych.
2. Wzrost temperatury pielęgnacji miał jedynie nieznaczny wpływ na głębokość penetracji wody w porównaniu do betonu referencyjnego. Dla cykli prowadzonych z zachowaniem okresu wstępnej pielęgnacji wynoszącego 1,5 oraz 2 godziny (odpowiednio cykle Z50-24 i Z70-15), zaobserwowano zwiększenie głębokości penetracji wody o 2,33 mm i 2,43 mm. Natomiast w przypadku cyklu Z50-19, w którym okres wstępnej pielęgnacji ograniczono do 15 minut, wzrost głębokości penetracji był bardziej wyraźny i wyniósł 3,66 mm w stosunku do wartości GP uzyskanych dla betonu referencyjnego.
3. Największe różnice w stosunku do betonu referencyjnego zaobserwowano w wartościach współczynnika migracji jonów chlorkowych. Wraz ze wzrostem temperatury obróbki termicznej następował wyraźny spadek odporności betonu na penetrację chlorków. Współczynnik migracji dla betonu referencyjnego wynosił $3,94 \text{ mm}^2/\text{s}$. W przypadku cyklu Z50-19, prowadzonego w temperaturze 50°C , wzrósł on o 103% w stosunku do wartości referencyjnej, natomiast dla temperatury 70°C odnotowano wzrost 184%.
4. Cykl Z50-19 oraz Z50-24, charakteryzujące się identycznym indeksem energetycznym wynoszącym $1,19 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}$, wykazały umiarkowany poziom wytrzymałości betonu w czasie. Z kolei cykl Z70-15, przy wyższym indeksie energetycznym równym $1,95 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}$, cechował się lepszą wydajnością w zakresie uzyskiwanej wytrzymałości, jednak jego trwałość oceniono jako umiarkowaną.

Podwyższony indeks energetyczny cyklu Z70-15, wyższy o 64% względem cykli Z50-9 i Z50-24, świadczy o mniej korzystnym stosunku efektywności energetycznej do trwałości uzyskanego materiału.

5. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że cykle Z50-19 i Z50-24 wykazują duży potencjał do dalszej optymalizacji w kierunku zwiększenia wydajności procesu. Charakteryzują się one obiecującymi wynikami w zakresie trwałości betonu, co czyni je dobrym punktem wyjścia do dalszych modyfikacji technologicznych. Przewiduje się, że ewentualne zmiany będą przede

wszystkim polegały na wydłużeniu czasu trwania cyklu, co może pozwolić na uzyskanie lepszego kompromisu pomiędzy wczesną wytrzymałością a długoterminową trwałością materiału przy zachowaniu względnie niskiego indeksu energetycznego.

6. Literatura

- [1] <https://www.architecture2030.org/why-the-built-environment/>
- [2] ACI Comitette 517 „Acceleratted curing of concrete at atmosferic pressure (ACI 517.2R- revised 1992), Framingam Hills, USA
- [3] A. Nevill, „Właściwości betonu”, Polski Cement, Kraków 2000r.
- [4] A. Rubin, „Obróbka termiczno-wilgotnościowa metodą vaporyzacji”, BrukBiz nr 5, 2012r.
- [5] Galluci E. et all „Effect of temperaturę on the microstructure calcium silicate hydrate (C-S-H)”, Cement and Concrete Reserch 53 (2013)
- [6] Wang L. et all „Effect of curing regime on the mechanical properties and durability of steam curing concrete”, Buildings 2023, 13, 1697r.
- [7] Abdullah M. Zayad et all „Review on effect of steam curing on behavior of concrete”, Cleaner Materials 3 (2022) 100042
- [8] Deja J. i inni „Beton. Technologie i metody badań”, Polski Cement, Kraków 2020r.
- [9] Flaga K. „Funkcja temperatury tężącego betonu i jej zastosowanie do analizy procesu dojrzewania betonu w warunkach podwyższonych temperatur”, Rozprawa doktorska, PK, 1967r.
- [10] Ramezaniapour A.A. et all „Effect os steam curing cycles on strenght and durability of SCC: A case study in precast concrete”, Constructuons and Buildings Materials 49 (2013)
- [11] Wang J. „Influence of rapid curing methods on concreto microstructure and properties: A review”. Case Studies in Construction Materials 17 (2022)
- [12] Kurdowski W. „Opóźniony ettringit-wyzwanie badawcze”, Beton na progu nowego millenium, Dni Betonu, Wisła
- [13] Kurdowski W. „Chemia cementu i betonu”, Polski Cement, Wydawnictwo PWN Kraków, Warszawa 2010r.
- [14] Owsiak Zdzisława „Wewnętrzna korozja siarczanowa Betonu”, Monografie, Studia, Rozprawy M6, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008r.
- [15] Niziurska M. „Wpływ węglanu litu na proces hydratacji cementu glinowego i właściwości zapraw kompozytowych”, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2019r.
- [16] Wzorcowe Warunki Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych (WWiORB) Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad M-13.01.00 v05 „Beton konstrukcyjny w drogowych obiektach inżynierskich”, Warszawa, styczeń 2025r.

- [17] PN-EN 197-1:2012 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- [18] PN-EN 196-1:2016-07 „Metody badania cementu. Część 1. Oznaczanie wytrzymałości”
- [19] PN-EN 206+A2:2021-08 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność”
- [20] PN-EN 12620:2013 „Kruszywa do betonu”
- [21] PN-B-06265:2022-08 „Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność - Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08”
- [22] PN-EN 934-2:2019-08 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu – Definicje, wymagania, zgodność, oznakowanie i etykietowanie”
- [23] PN-EN 12350-6:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 6: Oznaczanie gęstości”
- [24] PN-EN 12350-2:2019-07– „Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka”
- [25] PN-EN 12350-7:2019-08 „Badania mieszanki betonowej – Część 7: Zawartość powietrza - Metody ciśnieniowe”
- [26] PN-EN 12390-3:2019-0707 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań”
- [27] PN-EN 12390-8:2019-08 „Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”
- [28] PN-EN 12390-18:2021-08 „Badania betonu – Część 18: Oznaczenie współczynnika migracji chlorków”