

Wykładnicze równanie Arrheniusa jako funkcja dojrzałości twardniejącego betonu

EXPONENTIAL ARRHENIUS EQUATION AS A FUNCTION OF CONCRETE MATURITY

Streszczenie

Poprawne określenie funkcji dojrzałości dla mieszanki betonowej warunkuje powodzenie szacowania wytrzymałości na ściskanie na bazie pomiarów temperatury in situ. W artykule omówiono zastosowanie równania Arrheniusa do opisu funkcji dojrzewania twardniejącego betonu. Szczególną uwagę zwrócono na zależności szybkości zachodzenia reakcji w odmiennych warunkach temperaturowych. Przedstawiono wyniki własnych badań na kostkach zaprawy i betonowych próbkach walcowych oraz określono eksponentialne krzywe dojrzewania mieszanki na cemencie hutniczym w funkcji wieku ekwiwalentnego. Podjęcie zagadnienia podyktowane jest praktycznymi aspektami wykorzystania metody do oceny wytrzymałości betonu niestandardowych konstrukcji monolitycznych.

Abstract

The success of estimating compressive strength by in situ measurements ensures proper maturity function. The article discusses Arrhenius equation to describe concrete curing function. Particular attention was given to determine the relationship between the rate constant for strength development (k -value) and the curing temperature. In the paper some original results of the laboratory experiments on mortar cubes and concrete cylindrical specimens are presented. The exponential equation of maturity curve on slag cement as a function of equivalent age have been determined. The paper issue is dictated by practical aspects in order to apply the method to assess concrete strength of unconventional monolithic structures.

1. Wstęp

Pozytywne doświadczenia stosowania metody wskaźnika dojrzałości przez kraje Skandynawskie oraz na terenie Stanów Zjednoczonych na potrzeby oceny rzeczywistej wytrzymałości młodego betonu sugerują możliwość implementacji metody także na rynku Polskim. Proponowana metoda może racjonalnie wpłynąć na skrócenie czasu wykonania konstrukcji, a tym samym zredukować koszty procesu budowlanego [1, 2, 3, 4]. Znajomość rzeczywistej wytrzymałości betonu jest szczególnie ważna podczas betonowania w obniżonej temperaturze, najczęściej w warunkach jesienno-zimowych. Takie rozwiązanie z sukcesem sprawdzilo się podczas budowy pylonu Mostu Rędzińskiego [5], gdzie wdrożony system pomiaru aktualnej wytrzymałości umożliwił optymalizację tempa wznoszenia szalunków kroczących. Również w przypadku wykonywania konstrukcji sprężonych, informacja o osiągnięciu przez twardniejący beton wytrzymałości na poziomie 70% wytrzymałości 28-dniowej pozwala wykonawcy na rozpoczęcie procesu sprężania, co przy betonowaniu obiektu segmentami powtarzalnymi bądź kondygnacjami znacznie przyspiesza harmonogram robót.

W pracy omówiono metodę szacowania wytrzymałości betonu na bazie funkcji dojrzałości wynikającej z równania Arrheniusa oraz przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych na próbkach sześciennych i cylindrycznych przechowywanych w trzech różnych temperaturach 9°C, 25°C oraz 40°C. Przeprowadzono ciągły monitoring zmian temperatury w trakcie procesu dojrzewania oraz badania wytrzymałościowe metodą niszczącą. Efektem prac doświadczalnych jest opracowanie krzywych funkcji dojrzałości mieszanki betonowej na bazie cementu hutniczego z domieszkami silnie upłynniającymi zgodnie z normą ASTM C1074-11 (ang. *Maturity Method*) [6].

2. Wskaźnik dojrzałości betonu

Jednym z pierwszych problemów związanych z wyznaczaniem wytrzymałości młodego betonu było określenie harmonogramu rozdeskowania konstrukcji betonowych. Kryterium decydującym o usunięciu deskowań jest osiągnięcie wymaganej wytrzymałości potrzebnej do przeniesienia obciążeń działających tuż po usunięciu deskowań, nieprzekraczając przy tym dopuszczalnych ugięć. Normowe podejście dotyczące terminu rozdeskowania ustala się na podstawie kryterium nośności. Wymaga ono przeprowadzenia analizy sił wewnętrznych w przekroju w chwili rozdeskowania elementu oraz powinno spełniać wymagania normy w zakresie ugięć [7, 8]. Jednakże kryterium to nie określa czasu po jakim element betonowy może być rozdeskowany. Czas ten zależy od warunków ciepłno-wilgotnościowych, w szczególności od temperatury tężenia betonu, gdyż pielęgnacja wilgotnościowa jest zazwyczaj zachowana.

Profesor Flaga [9] zaproponował metodę analitycznego wyznaczenia czasu rozdeskowania konstrukcji z wykorzystaniem funkcji temperatury i wskaźnika dojrzałości dla elementów betonowych małej i średniej masywności. W pracy określono czas potrzebny do rozdeskowania konstrukcji zgodnie ze wzorem:

$$\tau_a^r = \left(\frac{c_2}{\frac{c_2}{\sqrt{28}} - \ln \frac{R_W^r}{R_{W28}}} \right)^2 \quad (1)$$

gdzie stała c_2 zależy od typu cementu, R_w^r to pożądana wytrzymałość betonu, a R_{w28} to wytrzymałość w wieku 28 dni. Funkcje temperatury autor przedstawił, na przykład, w pracy [10] i na podstawie doświadczeń zaproponował następujące wzory:

$$\text{dla } -15^{\circ}\text{C} \leq t < 0^{\circ}\text{C}: f(t) = \frac{t+15}{100} \quad (2)$$

$$\text{dla } 0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 20^{\circ}\text{C}: f(t) = \frac{t+10}{30} \quad (3)$$

$$\text{dla } t > 20^{\circ}\text{C}: \begin{cases} f(t) = 0,1t - 1 : \text{cem. portlandzki "450"} \\ f(t) = 0,2t - 3 : \text{cem. portlandzki "350"} \\ f(t) = \left(\frac{t+15}{35}\right)^3 : \text{cem. hutniczny "250"} \end{cases} \quad (4)$$

Procedura wymaga rejestracji średnich dobowych temperatur na palcu budowy i zastosowania odpowiedniej funkcji temperatury do obliczenia wskaźnika dojrzałości betonu wg następującej zależności:

$$\tau_a = \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(t) dt = \sum_{i=1}^n f(t_i) \Delta \tau_i \quad (5)$$

Gdy wskaźnik dojrzałości osiąga wymaganą wartość równą τ_a^r możliwe jest usunięcie deskowania danego elementu betonowego. Metoda uwzględnia zmienne warunki temperaturowe otoczenia na proces twardnienia betonu, ale ogranicza się do empirycznych stałych i funkcji temperatury nie uwzględniającej zmian fizykochemicznych dojrzewającego betonu. Przy aktualnych możliwościach pomiarowych sugerowany pomiar średniej dobowej temperatury otoczenia można rozwinąć i zaadoptować technologię monitorowania temperatury otoczenia oraz temperatury betonu w sposób ciągły, natomiast proponowane stałe c_2 zależne od typu cementu należy odnieść do cementów aktualnie produkowanych na rynku krajowym i zagranicznym.

2.1. Wykładnicza funkcja dojrzałości betonu

Funkcja opisująca dojrzałość betonu, zastosowana w niniejszym artykule, wykorzystuje wykładnicze równanie Arrheniusa. Funkcja ta bazuje na przeliczeniu przedziału pielęgnacji w określonej temperaturze na równoważny przedział wieku o przyjętej temperaturze, najczęściej $T_s = 20^{\circ}\text{C}$. Wiek równoważny t_e wyznacza się zgodnie z równaniem [6] :

$$t_e = \int_0^t f(T) dt = \int_0^t e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} dt = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t \quad (6)$$

gdzie: t_e – wiek równoważny [dni], [h],
 Q – parametr równy energii aktywacji podzielonej przez stałą gazową [K] ,
 T_a – średnia temperatura betonu podczas przedziału czasowego Δt [K],
 T_s – temperatura referencyjna [K],
 Δt – przedział czasowy [dni], [h].

Wzrost temperatury z reguły powoduje zwiększenie szybkości reakcji, co wiąże się ze wzrostem stałych szybkości k . Wpływ temperatury na stałą szybkości reakcji opisuje równanie:

$$k = A * \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

gdzie: A – czynnik przedwykładniczy [-];
 R – stała gazowa [J/K*mol];
 T – temperatura [K];
 E_a – energia aktywacji [J/mol].

Zgodnie z interpretacją podaną przez Arrheniusa, reagują ze sobą tylko te cząsteczki substratów, które mają dostateczną energię. Energia ta nazywana jest energią aktywacji E_a . Jest to najmniejsza energia potrzebna do zapoczątkowania reakcji, a ustalenie jej wartości możliwe jest przy wykorzystaniu, logarytmicznej postaci równania, dowodzącego, że szybkość reakcji zależy w sposób liniowy od odwrotności temperatury

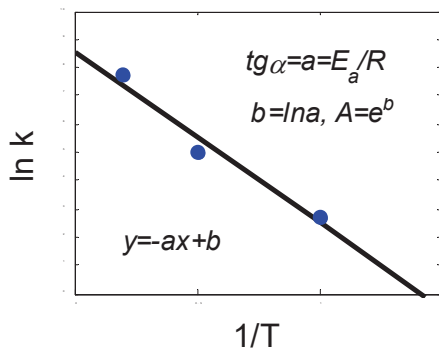
$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

W celu wyznaczenia parametrów E_a i A bada się szybkość reakcji w różnych temperaturach, a znalezione stałe szybkości reakcji k przedstawia się na wykresie w układzie współrzędnych: logarytm naturalny k – odwrotność temperatury wyrażonej w kelwinach.

Podstawiając $x = \frac{1}{T}$; $y = \ln k$; $a = \frac{E_a}{R}$; $b = \ln A$, otrzymamy równanie prostej:

$$y = -ax + b \quad (9)$$

Znajdując doświadczalnie trzy wartości stałej szybkości reakcji w różnych temperaturach i wykreślając zależność $\ln k$ od odwrotności temperatury wyrażonej w kelwinach, znajdujemy wartość wyrazu wolnego równania $b = \ln A$ oraz poszukiwaną energię aktywacji jako $\tan(\alpha) = a = E_a/R$ (rys. 1). Dla większości reakcji chemicznych energie aktywacji wahają się w granicach od kilkudziesięciu do kilkuset kilodżuli na mol.



Rys. 1. Logarytm stałej szybkości reakcji w funkcji odwrotności temperatury

Elementem mającym kluczowe znaczenie na poprawność szacowania wytrzymałości betonu jest przyjęcie wartości energii aktywacji E_a , która zależy przede wszystkim od typu cementu, a także jak podaje J. Bresson [11], maleje w miarę wzrostu wytrzymałości, osiągając wartości od 29,3 kJ/mol dla cementów wysokiej wytrzymałości do 55,7 kJ/mol dla cementów żuźlowych. Kiernożycki [12] proponuje wartość parametru E_a równą 39,8–44,2 kJ/mol dla cementów portlandzkich CEM I, klasy 32,5–42,5, zaś w raporcie RILEM [13] sformułowano wartość energii aktywacji podzielonej przez stałą gazową R w następujący sposób:

$$Q = \frac{E_a}{R} = \left\{ \begin{array}{ll} 4000 [K] & \text{dla } T \geq 20^\circ C \\ 4000 + 175(20 - T) [K] & \text{dla } T < 20^\circ C \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{– cementy portlandzkie} \\ \text{– cementy hutnicze} \end{array} \quad (10)$$

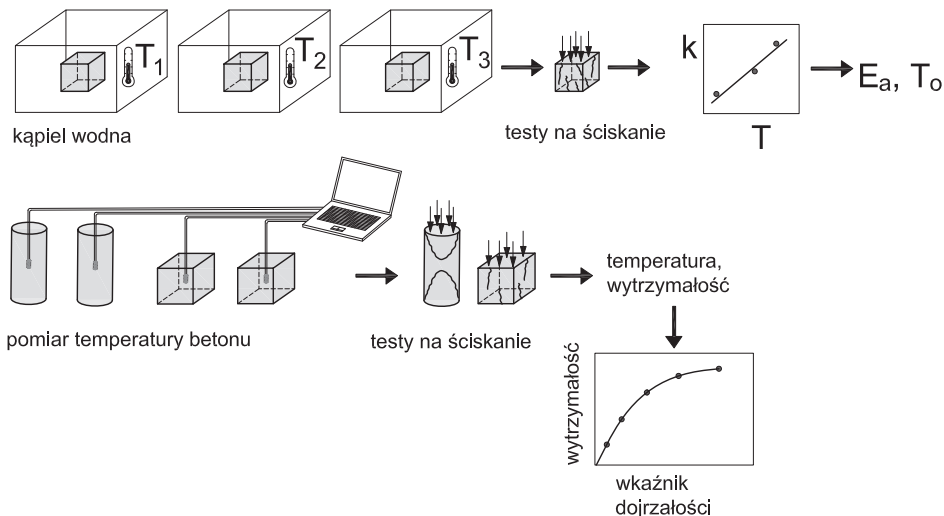
W powyższych rozważaniach zaleca się przyjmować energię aktywacji na podstawie typu stosowanego cementu, natomiast norma ASTM C1074-11 pozwala wyznaczyć tę wartość empirycznie, każdorazowo dla danej mieszanki, wykonując badania na kostkach zaprawy o boku 50 mm. W przypadku elementów betonowych o małych wymiarach wymiana ciepła między zaprawą a otoczeniem zachodzi wystarczająco szybko, tak że temperatura zaprawy może być traktowana za równoznaczną z temperaturą otoczenia [10]. Równanie Arrheniusa wykorzystała w swojej pracy m. in. Kaszyńska [14] prezentując szeroki zakres badań dotyczący opisu wpływu zmian temperatury na wytrzymałości betonów wysokowartościowych.

3. Wiek równoważny wg ASTM C1074 - 11

Metoda określenia wieku równoważnego t_e i opracowania właściwej funkcji dojrzałości bazuje na rejestracji zmian temperatury w trakcie procesu hydratacji betonu z równoległe prowadzonymi badaniami niszczącymi na próbkach sześciennych i cylindrycznych. Procedura opisana w normie ASTM C1074 -11 [6] oraz omówiona w pracach [15, 16], składa się z trzech etapów i zawsze dotyczy konkretnej receptury mieszanki betonowej.

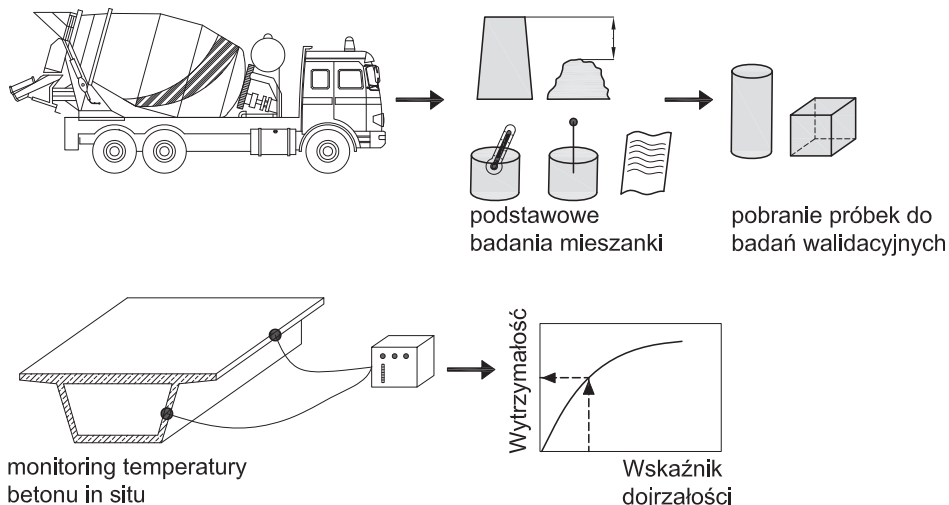
Pierwszy etap stanowią badania laboratoryjne (rys. 2) prowadzone na próbkach zaprawy o takim samym stosunku w/c i takiej samej ilości domieszek jak badana mieszanka. Trzy zestawy próbek sześciennych o boku 50 mm umieszcza się w kąpeli wodnej o temperaturze T_1 , T_2 , T_3 . Temperatury te odpowiadają maksymalnej, minimalnej i średniej temperaturze spodziewanej w danej lokalizacji i danym okresie w miejscu wbudowania. Próbkę poddaje się badaniom niszczącym, po czym wykreślając zależności współczynników stałych szybkości reakcji k od temperatury T wyznacza się parametr zdefiniowany jako temperatura podstawowa T_0 oraz energia aktywacji E_a . Równoległe monitoruje się zmiany temperatury w próbkach pomiarowych i realizuje testy wytrzymałościowe. Znajomość historii termicznej oraz wytrzymałości na ściskanie stanowi podstawę wykreślenia krzywej dojrzenia betonu twardniejącego w warunkach zmiennych temperatur. W pracy [115] autorzy przedstawili szczegółowe rozważania na temat omawianej procedury.

Krzywa dojrzenia opracowana w warunkach laboratoryjnych dostarcza narzędzi do dalszych prac prowadzonych już w miejscu docelowego wbudowania mieszanki. Z uwagi na możliwość rekalkulacji wcześniej wykreślonej krzywej zaleca się pobranie próbek do badań walidacyjnych, które należy przechowywać w warunkach budowy z uwzględnieniem pielęgnacji wilgotnościowej. Czujniki pomiaru temperatury montuje



Rys. 2. I etap – badania laboratoryjne

się w krytycznych punktach konstrukcji tj. elementach narażonych na znaczne zmiany temperatury, miejscach przeprowadzenia kabli sprężających czy fragmentach poddanych wczesnemu obciążeniu. Analiza wpływu czasu i temperatury pozwala na wyznaczenie wskaźnika dojrzałości, który w odniesieniu do wcześniej wykreślonej krzywej pozwala oszacować wytrzymałość betonu tężącego *in situ* (rys. 3). Trzeci etap prac stanowi weryfikacja krzywej dojrzewania na podstawie rezultatów monitoringu temperatury betonu na próbkach walidacyjnych dojrzewających w warunkach budowy.



Rys. 3. II etap – szacowanie wytrzymałości na placu budowy

4. Badania betonu na cemencie hutniczym z domieszkami silnie upłynniającymi

Badania przeprowadzono na betonie klasy C35/45 na cemencie hutniczym CEM III, którego recepturę zestawiono w tabeli 1. Dokonano pomiaru podstawowych właściwości mieszanki t.j. konsystencji, gęstości oraz zawartości powietrza. Przeprowadzono pomiary czasów wiązania zaprawy, testy wytrzymałościowe oraz ciągłą rejestrację temperatury betonu dojrzewającego w 6 próbkach cylindrycznych w temp. $T_1=9^{\circ}\text{C}$, $T_2=25^{\circ}\text{C}$, $T_3=40^{\circ}\text{C}$ (po 2 na każdą temperaturę). Badania eksperymentalne miały na celu wykreślenie i weryfikację krzywych dojrzewania betonu. Podobne prace zostały zrealizowane na cemencie portlandzkim CEM I, a ich efekty opisane w publikacji [15].

Tabela. 1. Receptura mieszanki C35/45

Skład mieszanki betonowej	na 1 m ³ suchych składników	
cement CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA	310,0	[kg]
woda	155,0	[kg]
piasek 0/2	652,0	[kg]
żwir 2/8	471,0	[kg]
żwir 8/16	688,0	[kg]
Pantarhit RC 169 (FM) - 0,6% m. c.	1,86	[kg]
Pantarhit 45 S (BV) - 0,4% m. c.	1,24	[kg]
popiół lotny	60,0	[kg]
ciężar mieszanki	2339	[kg]

Cement CEM III/A 42,5N LH/HSR/NA nadaje się do stosowania we wszystkich klasach ekspozycji, zgodnie z PN-B 06265: 2004 [17]. Jest to cement hutniczy z dodatkiem żużla wielkopieczowego charakteryzujący się wysoką odpornością na agresję chemiczną oraz niską zawartością alkaliów. Niskie ciepło hydratacji oraz umiarkowana dynamika narastania wytrzymałości w początkowym okresie ogranicza ryzyko powstawania rys termiczno-skurczowych, co przy właściwej pielęgnacji sprawia, iż cement ten może być stosowany do betonów na konstrukcje i elementy monolityczne [18].

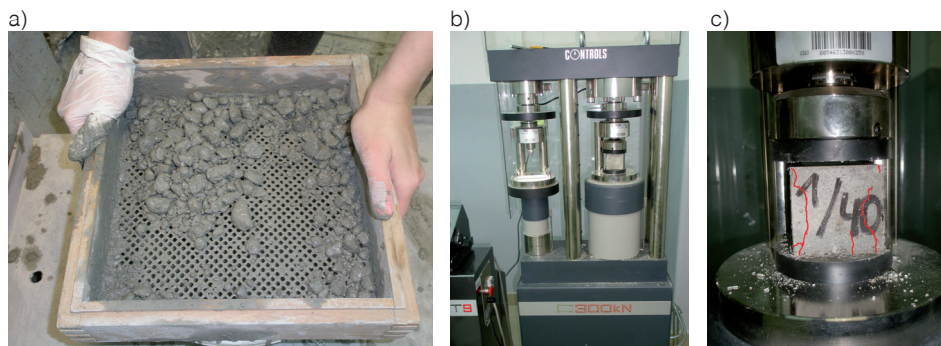
Zaprojektowana mieszanka została wzbogacona dodatkiem popiołu lotnego. Jedną z ważniejszych zalet stosowania popiołu jest spowolnienie procesu hydratacji cementu. Jest to szczególnie ważne przy betonowaniu masywnych konstrukcji, gdzie energia wiązania wydzielana do otoczenia może prowadzić do znacznych gradientów temperatur wewnątrz konstrukcji i powstania uszkodzeń struktury. Właściwości opóźniające wiązanie możemy wykorzystać do regulacji czasu wiązania, w zależności od warunków atmosferycznych w jakich betonujemy.

W skład mieszanki wchodzi dodatkowo dwa rodzaje superplastyfikatorów. Pierwszy z nich Pantarhit RC169 (FM) jest silnie działającą domieszką upłynniającą o wydłużonym czasie urabialności, zapewniającą wysokie wytrzymałości wczesne oraz końcowe. Zalecany zakres dozowania domieszki wynosi od 0,2–3,2% masy cementu. Preparat powoduje zdyspergowanie cementu w betonie, dzięki czemu powstaje jednorodna i płynna dyspersja cementowa, która umożliwi znaczne polepszenie urabialności betonu i jego podatności na zagęszczanie. Drugą użytą domieszką jest Pantarhit 45 S (BV). Jest to domieszka

uplastyczniająca, która przy zachowaniu stałego stosunku w/c umożliwia zwiększenie ciekłości betonu, a przy stałej konsystencji betonu umożliwia obniżenie ilości wody zarobowej, co może być wykorzystane do zwiększenia wytrzymałości betonu. Zakres stosowania to przedział między 0,2 do 1,2% m.c.. Preparat zwiększa urabialność betonu, ułatwia układanie, zagęszczanie oraz pompowanie mieszanki betonowej [19].

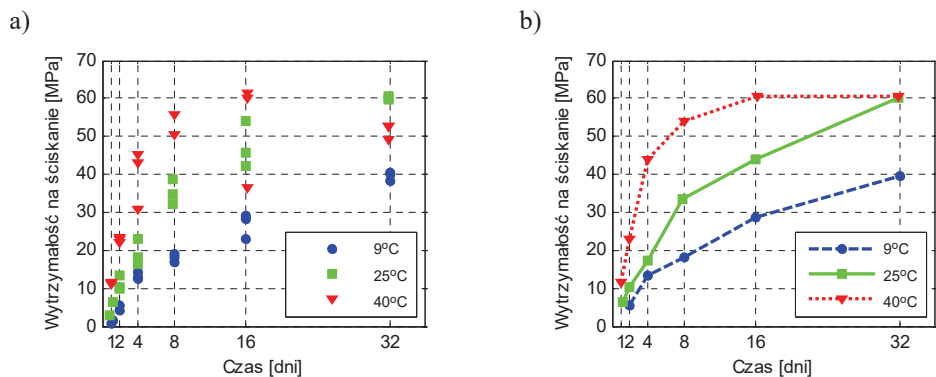
4.1. Badania na kostkach 50 mm

Badania na próbkach sześciennych o boku 50 mm przeprowadza się celem wyznaczenia dwóch parametrów warunkujących poprawność krzywej dojrzewania betonu, tj. temperatury podstawowej T_0 i energii aktywacji E_a . Kostki o boku 50 mm, jak i badania czasu wiązania przeprowadzono na zaprawie przesianej przez sito 4 mm, na mokro z mieszanki betonowej (fot. 1a). Przygotowano trzy zestawy po 18 kostek (łącznie liczba kostek wyniosła 54). Każdy zestaw kostek oraz pierścienie do pomiaru czasów wiązania umieszczono w kąpielii wodnej po godzinie od zaformowania w trzech różnych temperaturach $T_1=9^{\circ}\text{C}$, $T_2=25^{\circ}\text{C}$, $T_3=40^{\circ}\text{C}$. Końcowy czas wiązania zaprawy przechowywanej w temperaturze 9°C wyniósł 24h 20min, w temperaturze 25°C 12h 30min, w temperaturze 40°C 10h 05min.



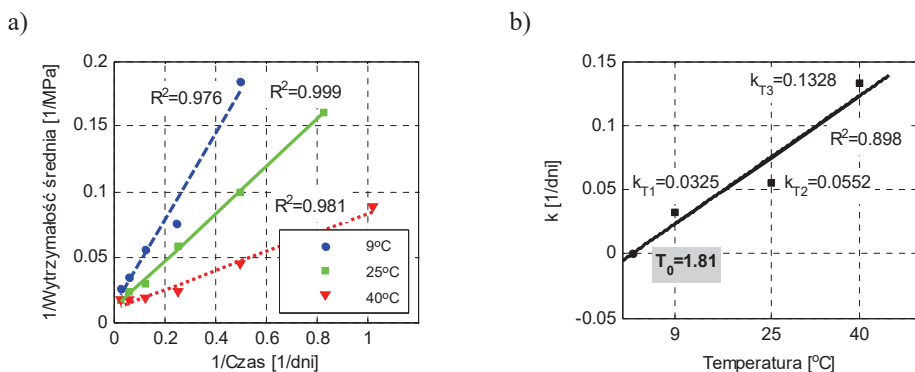
Fot. 1. Badania zaprawy: a) przesiewanie na mokro przez sito 4 mm; b), c) badania wytrzymałości na ściskanie na kostkach o boku 50 mm

Zgodnie z wytycznymi normy ASTM C1074-11 kostki rozpoczęto ścisnąć po czasie dwukrotnie dłuższym niż końcowy czas wiązania. Dodatkowo progową wartością było rozpoczęcie badań na ściskanie gdy próbki osiągnęły min. 4 MPa. Rezultaty badań wytrzymałościowych na kostkach 50 mm przedstawiono na rysunku 4. Z uwagi na fakt, iż próbki przechowywane w temp 40°C wykazały spadek wytrzymałości, do dalszych obliczeń przyjęto wytrzymałość średnią po 32 dniach wytrzymałości średniej osiągniętej po 16 dniach. Analiza zmian wytrzymałościowych dowodzi, iż podwyższona temperatura otoczenia (40°C) zdecydowanie wpływa na większą wytrzymałość krótkoterminową, nie osiągając wcale wyższej wytrzymałości po 28 dniach w stosunku do próbek dojrzewających w temperaturze 25°C . Wyraźnie widoczny jest wpływ obniżonej temperatury (9°C) na twardniejącą zaprawę, co skutkuje osiągnięciem ok. 66% wytrzymałości 28-dniowej.

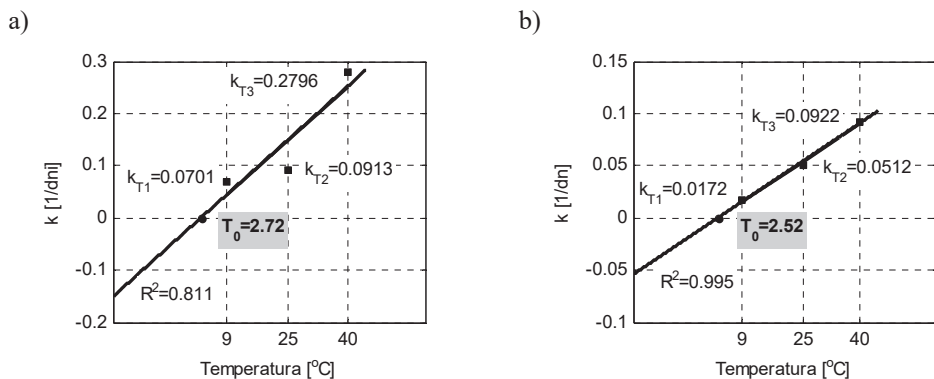


Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie na kostkach o boku 50 mm: a) wartości zarejestrowane; b) wartości średnie

Załącznik normy ASTM C1074-11 [6] podaje trzy procedury wyznaczenia temperatury podstawowej T_0 i energii aktywacji Q , których dokładny opis autorzy przedstawili w pracy [15]. W procedurze nr 1 zaleca się wykreślić zależność odwrotności wytrzymałości średniej w funkcji odwrotności wieku pomniejszonego o końcowy czas wiązania. Doświadczenia autorów wskazują iż pomniejszenie rzeczywistego czasu o końcowy czas wiązania skutkuje zaburzeniem relacji między stałą szybkości k dla poszczególnych temperatur. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta liczba cząsteczek aktywnych oraz liczba zderzeń skutecznych, a zatem wzrasta również szybkość reakcji chemicznej. Stała szybkości reakcji k jest funkcją temperatury, co dowodzi iż musi osiągać najwyższą wartość dla próbek przechowywanych w temperaturze $T_3=40^\circ\text{C}$ i najniższą dla temperatury $T_1=9^\circ\text{C}$. Na rysunku 5a przedstawiono zależność odwrotności wytrzymałości średniej w funkcji odwrotności czasu nie pomniejszając go o końcowy czas wiązania. Efektem procedury nr 1 jest wyznaczenie stałych szybkości reakcji w temperaturach T_1 , T_2 , T_3 , które wynoszą odpowiednio $k_{T_1}=0,0325$, $k_{T_2}=0,0552$, $k_{T_3}=0,1328$, zaś temperatura podstawowa osiąga wartość $T_0=1,81^\circ\text{C}$ (rys. 5b). Analiza dwóch kolejnych procedur prowadzi do ustalenia wartości temperatury podstawowej T_0 na poziomie $2,72^\circ\text{C}$ oraz $2,52^\circ\text{C}$ (rys. 6). Oznacza to, że dla badanej mieszanki gwałtowne spowolnienie procesu hydratacji następuje w temperaturach poniżej 2°C .



Rys. 5. a) Odwrotność wytrzymałości średniej w funkcji odwrotności czasu; b) stałe szybkości reakcji k oraz temperatura podstawowa T_0 wg procedury nr 1

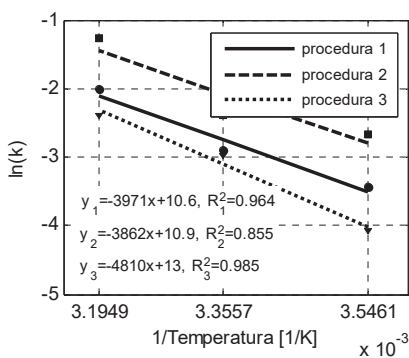


Rys. 6. Stałe szybkości reakcji k oraz temperatura podstawowa T_0 : a) wg procedury nr 2; b) wg procedury nr 3

Rezultaty powyższych procedur zestawiono na rysunku 7. W wyniku aproksymacji liniowej metodą najmniejszych kwadratów, najwyższy współczynnik determinacji $R^2=0,985$ i zarazem najwyższą wartość energii aktywacji otrzymano dla procedury nr 3. Ponadto dla mieszanek na cemencie hutniczym spodziewamy się wyższych energii potrzebnych do zapoczątkowania reakcji, stąd za miarodajne uznaje się wartości obliczone wg procedury 3, dla której wartość Q jako tangens nachylenia prostej $\ln(k) - 1/T$ wynosi:

$$Q = \frac{E_a}{R} \frac{\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}}\right]}{\left[\frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}}\right]} = \frac{39971,1}{8,31} = 4810 \text{ [K]} \quad (11)$$

zaś energia aktywacji równa jest:



$$E_a = 4810 \text{ K} * 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}} = 39971,1 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (12)$$

Rys. 7. Logarytm stałej szybkości reakcji w funkcji odwrotności temperatury

Poszukiwana funkcja dojrzałości wyrażona za pomocą wieku równoważnego przyjmuje zatem postać:

$$t_e = \int_0^t f(T) dt = \int_0^t e^{-Q \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right)} dt = \sum e^{-4810 \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{293} \right)} \Delta t \quad (13)$$

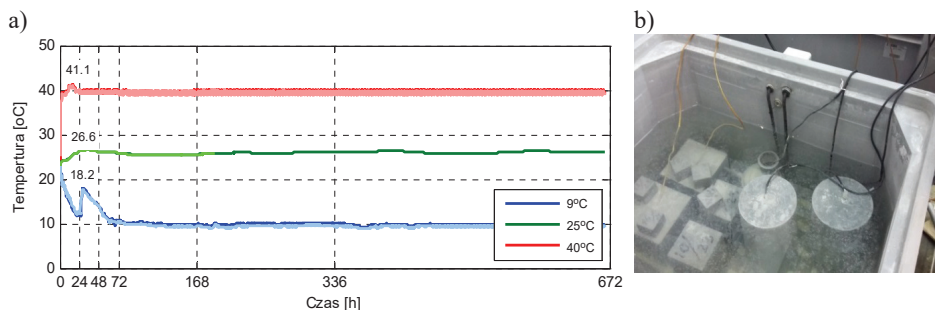
4.2. Badania na próbkach walcowych

Badania przeprowadzono na 45 próbkach walcowych 150 x 300 mm (po 15 na każdą temperaturę) wykonanych z betonu klasy C35/45. Dla każdej z temperatur w dwóch cylindrach w świeżej mieszance umieszczono czujniki pomiaru temperatury.

4.2.1. Rejestracja temperatury

Pomiar temperatury prowadzono równolegle w 6 próbkach cylindrycznych 150 x 300 mm (po 2 na każdą temperaturę $T_1=9^\circ\text{C}$, $T_2=25^\circ\text{C}$, $T_3=40^\circ\text{C}$) umieszczając czujniki centrycznie wewnątrz próbki. Monitorowano także temperatury kąpieli wodnych oraz temperaturę chłodziarki. System pomiarowy składał się z przenośnego komputera wraz z oprogramowaniem oraz wodoodpornych czujników pomiaru temperatury. Odczyt następował z krokiem 10 min, co przez okres 28 dni daje $28 \times 24 \times 6 = 4032$ punkty pomiarowe.

Rejestracja temperatury realizowana była przy użyciu czujników 1-wire pracujących na jednoprzewodowej magistrali. Układ nadzorczy *master* rozpoznaje czujniki na podstawie przydzielonych im na etapie produkcji 16 cyfrowych numerów seryjnych. Bezpieczeństwo wymiany danych jest zapewnione dzięki kontroli CRC. Zastosowany tu wielomian generujący ma postać $x^8+x^5+x^4+1$ [20]. Parametry interfejsu 1-wire pozwalają na budowę połączeń do 300 m, stąd bez przeszkód mogą stanowić składowe systemów pomiarowych wdrażanych na placu budowy. Układ ds18b20 zapewnia pomiar temperatury w zakresie od -55 do $+125^\circ\text{C}$ z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$, co gwarantuje wiarygodność pomiaru w odróżnieniu do powszechnie stosowanych termopar, których sposób łączenia generuje błąd już na etapie montażu.



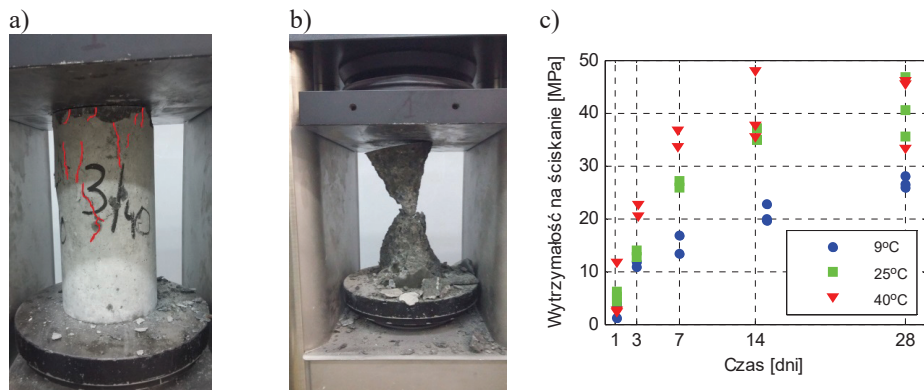
Rys. 8. a) Temperatura wewnątrz próbek betonowych; b) pomiar temperatury w próbkach

Na rysunku 8 zaprezentowano przebiegi temperatur zarejestrowanych w próbkach cylindrycznych w okresie 28 dni (672 h). Każdorazowo temperatura początkowa mieszanki była zbliżona do temperatury otoczenia równej 23°C – 25°C . Maksymalną wartość temperatury ($18,24^\circ\text{C}$) dla cylindrów dojrzewających w temp. 9°C zarejestrowano po 28 h od wykonania zarobu, dla cylindrów dojrzewających w temp. 25°C największą temperaturę ($26,6^\circ\text{C}$) zanotowano po 27 h, natomiast w temp. 40°C maksymalną temperaturę ($41,1^\circ\text{C}$)

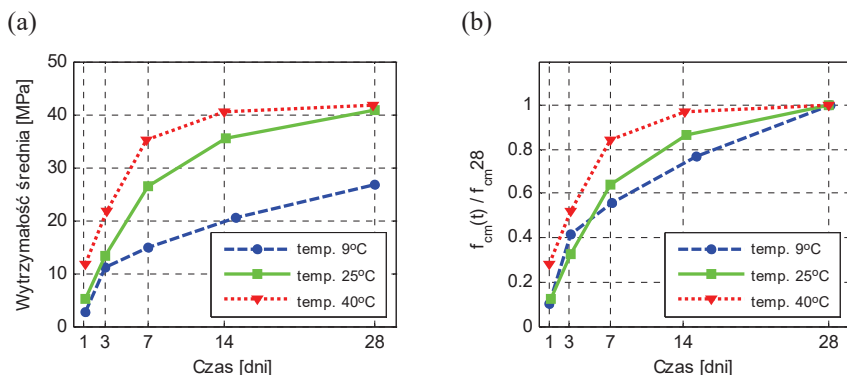
osiągnęła mieszanka po 16 h od wykonania zarobu. W trakcie badań uszkodzeniu uległ czujnik rejestrujący temperaturę w próbce B25 (pomiar zakończył się w 8 dobie) oraz czujnik rejestrujący temperaturę kąpeli wodnej 40°C (pomiar przerwany w 10 dobie).

4.2.2 Badania wytrzymałościowe

Pierwsze testy wytrzymałości betonu w jednoosiowej próbce ściskania przeprowadzono po 24h, kolejne zaś w terminach 3, 7, 14, 28 dni, ustalając przy tym prędkość obciążenia na poziomie 0,25MPa/s (rys. 9a, 9b). Wyniki badań zestawiono na rysunku 9c i 10, odzrucając przy tym wyniki uznane za niemiarodajne.



Rys. 9. a) Badanie wytrzymałości na ściskanie próbki cylindrycznej; b) stożkowe zniszczenie próbki cylindrycznej; c) zarejestrowane wartości wytrzymałości na ściskanie na próbkach walcowych 150 x 300 mm



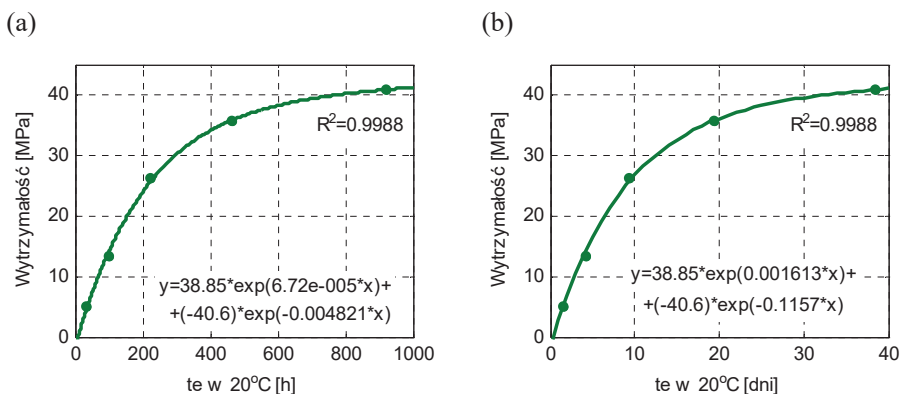
Rys. 10. a) Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie na walcach 150 x 300 mm; b) wzrost względnej wytrzymałości na ściskanie w funkcji czasu

Skutkiem działania podwyższonych temperatur jest wzrost wytrzymałości na ściskanie, zaś działanie obniżonych temperatur powoduje spadek wytrzymałości. Określona nomą 28-dniowa wytrzymałość na próbkach cylindrycznych dla tej klasy

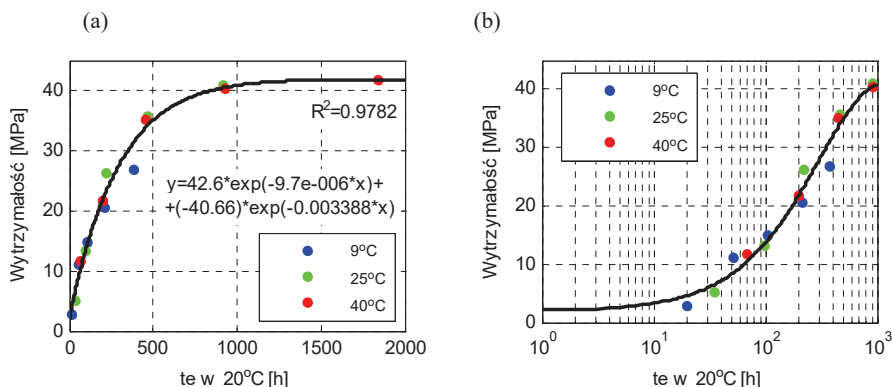
betonu (t.j. C35/45) została osiągnięta dla walców dojrzewających w warunkach normalnych i podwyższonych temperatur. Spełnione zostały kryteria wg PN-EN 206-1:2003 ($f_{cm} \geq f_{ck} + 4$; $f_{ci} \geq f_{ck} - 4$). Z kolei konsekwencją przechowywania cylindrów w kąpeli wodnej o temperaturze 90C było osiągnięcie wytrzymałości na poziomie 26,7 MPa co nie spełnia kryteriów tej klasy betonu.

4.2.3. Krzywa dojrzewania na próbkach walcowych

Na podstawie zarejestrowanej historii termicznej próbek betonowych, przyjętej temperatury referencyjnej $T_s=20^{\circ}\text{C}$ i parametru $Q=4810\text{K}$ wyznaczono wartości wieku ekwiwalentnego t_e zgodnie z funkcją opisaną równaniem (13). Wynikiem przeprowadzonych badań laboratoryjnych jest wykreślenie krzywej obrazującej zmiany wytrzymałości betonu w funkcji dojrzałości. Do opisu dojrzewania posłużono się krzywą eksponentialną dokonując aproksymacji danych pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów. Współczynnik determinacji R^2 kształtuje się na poziomie 0,99, co dowodzi wysokiej dokładności zaproponowanej krzywej. Owe krzywe stanowią narzędzie do szacowania aktualnej wytrzymałości



Rys. 11. Krzywa dojrzewania dla próbek walcowych tężących w temp. 25°C w funkcji wieku równoważnego a) t_e w 20°C [h]; b) t_e w 20°C [dni]



Rys. 12. Krzywa dojrzewania dla próbek walcowych; a) dla wskaźnika t_e ; b) dla wskaźnika t_e skali logarymicznej

młodego betonu dojrzewającego w konstrukcji (rys. 11). Proces dojrzewania przebiegał poprawnie, czego najlepszym dowodem są zbiorcze krzywe przedstawiające tendencję przyrostu wytrzymałości na ściskanie dla badanej klasy betonu (rys. 12).

5. Wnioski

Wyznaczenie poprawnej krzywej dojrzewania, a tym samym przyjęcie właściwej funkcji temperatury wykonane zostało z zastosowaniem wykładniczego równania Arrheniusa. Precyzyjne określenie stałych szybkości reakcji fizykochemicznych k stanowi narzędzie do wyznaczenia parametru temperatury podstawowej i energii aktywacji. Z uwagi na szeroką gamę dodatków i domieszek stosowanych w obecnie projektowanych mieszankach wyznaczenie energii aktywacji w sposób empiryczny stanowi olbrzymią zaletę w stosunku do przyjmowania tego parametru na podstawie danych literaturowych, gdzie jedynym czynnikiem determinującym jego wartość jest typ cementu.

Zaletą identyfikacji stałych k na podstawie normy ASTM C1074-11 jest fakt, iż współczynniki k łączą w sobie zależność nie tylko temperaturową, ale i wytrzymałościową, co nie jest możliwe do uzyskania w badaniach ciepła hydratacji cementu realizowanych w kalorymetrze. Badania przeprowadza się na kosztach zaprawy o boku 50 mm w trzech różnych wskazanych temperaturach. Temperatury te odpowiadają wartościom spodziewanym w danym okresie na placu budowy. Wymiar próbki gwarantuje tutaj równoznaczność temperatury próbki z temperaturą otoczenia t.j. kąpieli wodnej.

Krzywa dojrzewania opracowana na podstawie danych termicznych i wytrzymałościowych dla cylindrów przechowywanych w temperaturze 25°C znajduje swoje potwierdzenie w zbiorczej krzywej, gdzie uwzględniono dane pozyskane z badań cylindrów twardniejących w temperaturach 9°C i 40°C. Charakter przyrostu wytrzymałościowych w czasie jest zgodny dla obu funkcji, co potwierdza tendencje zmian wytrzymałościowych dla próbek tężących w odmiennych warunkach temperaturowych. Pozwala to na określenie krzywej dojrzewania na podstawie tylko jednej partii cylindrów twardniejących w warunkach normowych ($\pm 20^\circ\text{C}$), a szacowanie wytrzymałości betonu będzie możliwe po przeliczeniu danych termicznych odnotowanych w warunkach budowy.

Literatura

- [1] Saul A.G.A., *Principals underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure*. Magazine of Concrete Research, 2, 6, 1951, pp. 127–140.
- [2] Bergström S.G.: *Curing temperature, age and strength of concrete*. Magazine of Concrete Research, 5, 14, 1953, pp. 61–66.
- [3] Jonasson J.E, Retelius A., *Zastosowanie wskaźnika dojrzałości do oceny rozwoju wytrzymałości betonu na ściskanie*, Drogi i Mosty, nr 3, 2011.
- [4] Carino N.J., Lew H.S., *The Maturity Method: From Theory to Application*, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, Editor, 2001, 19 p.
- [5] Barcik W., Sieńko R., Biliszczuk J., *System monitorowania konstrukcji mostu Rędzińskiego we Wrocławiu*, Wrocławskie Dni Mostowe, Aktualne realizacje mostowe, Wrocław, 24-25 listopada, 2011.
- [6] ASTM C1074 - 11, *Practice for Estimating Strength by the Maturity Method*, ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM International, West Conshohocken.
- [7] PN-B-03264:2002, *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*, PKN, 2002
- [8] Biruk S., Budzyński W., *Jak ustalić najkrótszy termin rozdeskowania żelbetowych stropów monolitycznych*

- (I), Budownictwo Technologiczne Architektura, s. 38–41, październik-grudzień 2006.
- [9] Flaga K., *Analityczne określenie terminu rozdeskowania konstrukcji z betonu*, Inżynieria i Budownictwo, nr 12, s. 478–483, 1969.
- [10] Flaga K., *Funkcja temperatury betonu tężącego w warunkach podwyższonych temperatur*, Archiwum Inżynierii Lądowej, zeszyt 1-2, 1969. pp. 339–357.
- [11] Bresson J., Prediction of strength of concrete products. Rilem International conference on Concrete at Early Ages paris, 1982, vol I, s.111–115.
- [12] Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcje masywne*, Polski Cement, Kraków, 2003.
- [13] RILEM TC119-TCE, Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Materials and Structures, Vol.30, 1997, pp. 451–464.
- [14] Kaszyńska M., *Early age properties of high-strength/high performance concrete*, Cement and concrete composites, (24) s. 253–261, 2002.
- [15] Mariak A., Wilde K., *Wyznaczenie wytrzymałości betonu na podstawie funkcji dojrzałości wg amerykańskiej normy ASTM C1074-11*, Materiały Budowlane nr 4, s. 68–71, 2015.
- [16] Mariak A., *Eksperymentalna weryfikacja szacowania wytrzymałości młodego betonu wg normy ASTM C1074*, Współczesny stan wiedzy w Inżynierii Lądowej, s. 233-240, Gliwice, 2015.
- [17] PN-B-06265:2004 - Krajowe uzupełnienie normy PN EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [18] <http://www.lafarge.pl>
- [19] <http://www.ha-be.pl>
- [20] Doliński J., *Zimno, zimno, ciepło czyli Lämpömittari*, Elektronika Praktyczna nr 6, 2003, pp. 77–80.