



JAN-ERIK JONASSON<sup>1)</sup>  
ARNE RETELIUS<sup>2)</sup>

## ZASTOSOWANIE METODY WSKAŹNIKA DOJRZAŁOŚCI DO OCENY ROZWOJU WYTRZYMAŁOŚCI BETONU NA ŚCISKANIE<sup>3)</sup>

**STRESZCZENIE.** Metoda wskaźnika dojrzałości łączy zależność zmiany temperatury dojrzewającego betonu z rozwojem wytrzymałości w czasie. Zastosowania praktyczne podczas wykonywania większości rodzajów konstrukcji z betonu wskazują na przydatność metody wskaźnika dojrzałości, jako sposobu racjonalnego skrócenia czasu wykonania konstrukcji, przy poziomie ufności przewyższającym tradycyjne metody oceny wytrzymałości, takie jak np. badania próbek dojrzewających w warunkach budowy. W artykule przedstawiono podstawy metody i wykazano możliwość skrócenia czasu budowy, ze względu na osiągnięcie przez beton wymaganego poziomu wytrzymałości, o ponad 25% w większości przypadków.

**SŁOWA KLUCZOWE:** rozwój wytrzymałości w czasie, wskaźnik dojrzałości, wytrzymałość na ściskanie

### 1. WPROWADZENIE I KRÓTKI RYS HISTORYCZNY

Wyniki pierwszych badań mających na celu wyznaczenie zależności opisującej związek pomiędzy temperaturą w betonie w czasie dojrzewania a przyrostem jego wytrzymałości zostały opublikowane w Wielkiej Brytanii na przełomie lat czterdziestych

<sup>1)</sup> profesor – Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Szwecja

<sup>2)</sup> inż. bud. – R & D Director, CMT International AB, Szwecja

<sup>3)</sup> rozszerzona wersja referatu przedstawionego w języku angielskim na Konferencji Dni Betonu 2010 – tłumaczenie mgr inż. *G. Adamczewski*

przez McIntosha [1], Nurse'a [2] oraz Saula [3]. Brytyjskie badania obejmowały ocenę wpływu obróbki termicznej parą wodną na skrócenie czasu dojrzewania betonu, a uzyskane wyniki spotkały się z powszechnym zainteresowaniem. Niewiele później obszerny program badań w Skandynawii przeprowadzili Bergström [4] oraz Rastrup [5], analizując dojrzewanie betonu w warunkach obniżonej temperatury, w szczególności podczas betonowania w okresie zimowym.

Kwestia betonowania w okresie zimowym stała się ważnym obszarem badawczym od czasu Pierwszej Międzynarodowej Konferencji RILEM „Betonowanie w warunkach zimowych – Teoria i Praktyka”, które miało miejsce w 1956 roku w Danii. Uczestnicy konferencji zwrócili szczególną uwagę na zagadnienia związane ze zrozumieniem zachowania betonu we wczesnym okresie dojrzewania, wpływu zmiennej temperatury w trakcie dojrzewania oraz uwarunkowań związanych z betonowaniem.

Lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte ubiegłego wieku przyniosły podstawy teoretyczne dojrzewania betonu w warunkach zmiennej temperatury. Dzięki temu można było uwzględnić wpływ obniżonej temperatury na spadek szybkości wiązania spoiwa w betonie oraz sformułować inną miarę przyrostu wytrzymałości betonu. Pomimo coraz lepszej znajomości zagadnienia betonowania w warunkach obniżonej temperatury, w 1963 w Finlandii (Lahti) w trakcie wykonywania betonowego szkieletu nośnego zawalił się dziesięciopiętrowy budynek. Chociaż nie było ofiar w ludziach, katastrofa ta spowodowała w Skandynawii zwiększone zainteresowanie badaniami nad dojrzewaniem betonu w trudnych warunkach klimatycznych. Lata siedemdziesiąte i osiemdziesiąte dwudziestego wieku wzbogaciły ogólną wiedzę na temat betonowania w warunkach obniżonej temperatury. Konferencje w Moskwie oraz w Helsinkach miały na celu lepsze poznanie zachowania betonu, które wyrażałoby się opracowaniem doskonałych modeli opisujących rozwój wytrzymałości w warunkach zmiennej temperatury, ze szczególnym uwzględnieniem warunków zimowych. Dodatkowe trudności wynikały ze stosunkowo niskiej mocy obliczeniowej wykorzystywanych komputerów oraz niewielkiej ich dostępności.

Dwie kolejne tragiczne katastrofy, których przyczynę przypisuje się niedostatecznej wytrzymałości betonu z powodu dojrzewania w obniżonej temperaturze otoczenia, miały miejsce w latach siedemdziesiątych w USA. W roku 1973 w Fairfax County [6] śmierć poniosło 14 robotników, a 34 doznało obrażeń, natomiast w 1978 w Willow Island [7] doszło do największej katastrofy budowlanej w USA, w której zginęło ponad pięćdziesiąt osób. W obydwu przypadkach konstrukcje były wykonywane w obniżonej temperaturze otoczenia, około 7°C - 10°C. Należy przy tym zwrócić uwagę, że zdarzenia miały miejsce w temperaturze powyżej temperatury betonowania zimowego, za którą zazwyczaj uznaje się temperaturę poniżej 5°C.

Te tragiczne katastrofy spowodowały w USA znaczną intensyfikację badań na tematy dojrzewania betonu, a efektem tych prac była pierwsza na świecie norma dotycząca zastosowania metody wskaźnika dojrzałości betonu ASTM C1074, wprowadzona w 1987 roku, zaktualizowana w 2004 roku [8]. W połowie lat dziewięćdziesiątych Generalna Dyrekcja Autostrad w USA zaleciła stosowanie tej metody do oceny rozwoju wytrzymałości betonowych nawierzchni drogowych [9].

Mniej więcej w tym samym okresie w Skandynawii zauważono, że korzystając z zależności opisanej przez funkcję dojrzałości z uwzględnieniem temperatury, oszacowanie wytrzymałości betonu *in situ* można przeprowadzić dokładniej niż tradycyjnie badając próbki o małych wymiarach (cylindryczne lub sześciennie) dojrzewające w warunkach budowy. Powyższe wnioski zostały oparte na około czterdziestoletnich pozytywnych doświadczeniach w wykorzystywaniu metody dojrzałości do oceny wytrzymałości betonu.

W przeciągu kilku lat zniknęły próbki dojrzewające w warunkach budowy, niezależnie od warunków pogodowych. Aktualnie, powszechnie przyjętą procedurą jest pomiar temperatury w wybranych miejscach wykonywanej konstrukcji i obliczenie wytrzymałości betonu na podstawie zebranych danych. Celem takiego monitoringu wytrzymałości jest zapobieganie przemarzania młodego betonu, określenie wymaganego czasu do rozdeskowania, określenie czasu wymaganego do obciążenia ruchem pojazdów czy także określenie czasu, kiedy możliwe jest wykonanie sprężenia. Obecnie oszacowanie rozwoju właściwości betonu, według Eurokodu (EN 13670:2009 [10]), może być przeprowadzone na podstawie metody wskaźnika dojrzałości opartej na pomiarach temperatury betonu, w której obliczenia powinny opierać się na funkcji dojrzałości odpowiedniej dla danego składu betonu. Oznacza to, że metodę wskaźnika dojrzałości można stosować we wszystkich krajach członkowskich CEN.

W niniejszym artykule opisano podstawy naukowe metody wskaźnika dojrzałości, sposób pozyskiwania danych do obliczeń oraz przykłady zastosowania metody w praktyce. Ponadto, przedstawiono koncepcje wykorzystania metody w celu planowania wydajności przy wznoszeniu konstrukcji.

## 2. PODSTAWY METODY WSKAŹNIKA DOJRZAŁOŚCI

### 2.1. FUNKCJE DOJRZAŁOŚCI

Ważną przesłanką w metodzie wskaźnika dojrzałości było stwierdzenie, że wiązanie cementu w betonie może przebiegać w temperaturze nie niższej niż temperatura bazowa [1 - 3], którą zwykle określa się na poziomie  $-10^{\circ}\text{C}$ . Obszar pomiędzy poziomem temperatury bazowej a temperaturą betonu w czasie nazywany jest dojrzałością betonu  $M$  i określany zgodnie ze wzorem (1) oraz rys. 1.

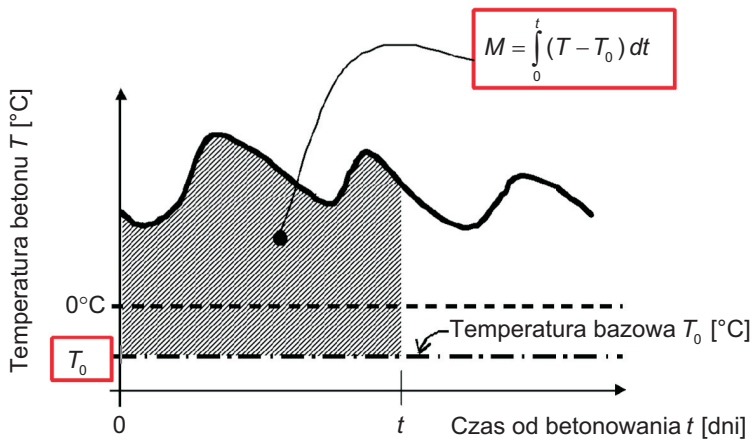
$$M = \int_0^t (T - T_0) dt, \quad (1)$$

gdzie:

$T$  – temperatura betonu ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_0$  – temperatura bazowa ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$t$  – czas od betonowania (wyrażony w dniach lub godzinach).

Rys. 1. Definicja dojrzałości  $M$  na podstawie [1 - 3]Fig. 1. Definition of the maturity  $M$  [1 - 3]

Wartość temperaturowego równoważnika czasu dojrzewania  $t_{eq}$ , wyrażonego w godzinach lub dniach, oblicza się z zależności:

$$t_{eq} = \frac{M}{T_{ref} - T_0} = \int_0^t \beta_T dt, \quad (2)$$

gdzie:

$T_{ref}$  – wybrana temperatura odniesienia [°C],

$\beta_T$  – zależność temperaturowa zwana funkcją dojrzałości jest wyrażona jako:

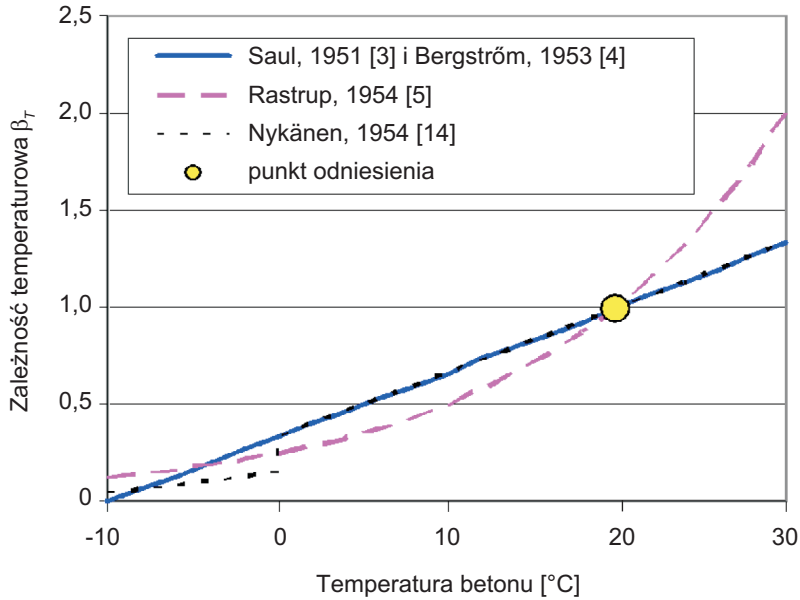
$$\beta_T = \frac{T - T_0}{T_{ref} - T_0}. \quad (3)$$

Najczęściej przyjmowane są wartości  $T_0 = -10^\circ\text{C}$  oraz  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ , co daje:

$$\beta_T = \frac{T + 10}{30}. \quad (4)$$

Wyrażenia (2) oraz (3) były w wielu krajach podstawą do obliczeń dojrzałości betonu, ale ponieważ od początku były to zależności czysto empiryczne, w literaturze spotykane i dyskutowane są różne funkcje dojrzałości. Niektóre z najwcześniej stosowanych funkcji przedstawiono na rys. 2, w tym wzór (3) zaproponowany przez Saula [3] i następnie zweryfikowany przez Bergströma [4]. Drobne zmiany w obszarze temperatury poniżej  $0^\circ\text{C}$  zostały wprowadzone przez Nykänena [11], natomiast Rastrup [5] zaproponował następującą zależność nieliniową:

$$\beta_T = 2^{\frac{T-20}{10}}. \quad (5)$$



Rys. 2. Porównanie wybranych funkcji dojrzałości  
Fig. 2. Comparison of selected maturity functions

Funkcje dojrzałości przedstawione na rysunku 2 były wykorzystywane przez wiele lat, jednak w latach 70-tych zostały zastąpione przez bardziej złożoną zależność, opartą na tzw. energii aktywacji. Autorami tej zależności byli Freiesleben Hansen i Pedersen [12] oraz Byfors [13], a wyrażona została w następującej postaci:

$$\beta_T = \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{T + 293} \right) \right], \quad (6)$$

gdzie:

$E$  – energia aktywacji [J/mol],

$R$  – uniwersalna stała gazowa,  $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .

Zależność (6), jak również równania (4) oraz (5) opierają się na założeniu  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ .

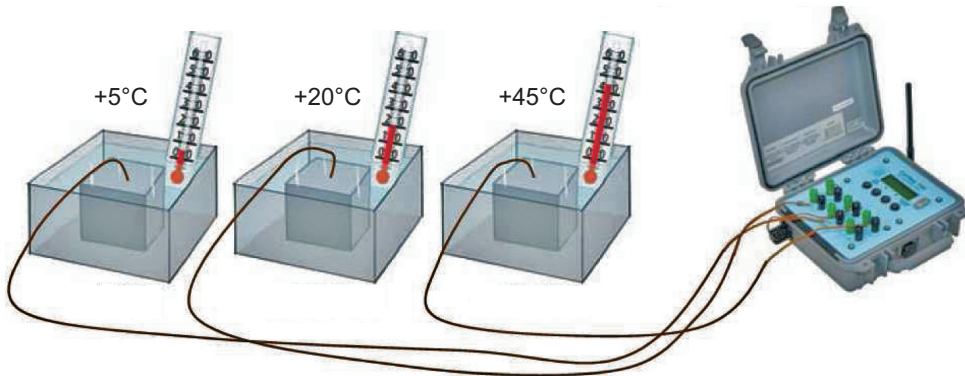
W literaturze spotykanych jest wiele różnych wartości parametru  $E/R$ . Jonasson [14] zaproponował ogólny wzór w postaci:

$$\frac{E}{R} = \Theta_{ref} \left( \frac{30}{T + 10} \right)^{\kappa_3}, \quad (7)$$

gdzie  $\Theta_{ref}$  [K] oraz  $\kappa_3$  [-] są empirycznymi parametrami ustalonymi doświadczalnie.

## 2.2. BADANIA W RÓŻNEJ TEMPERATURZE

Pierwszym etapem przy wyznaczaniu funkcji dojrzałości oraz rozwoju wytrzymałości betonu dojrzewającego w warunkach odniesienia jest określenie rozwoju wytrzymałości przy zmiennych wartościach temperatury. Przykład typowego układu do badań przedstawiony jest na rysunku 3, gdzie widoczne są betonowe próbki (w kształcie kostek lub walców), pielęgnowane w wodzie o różnej temperaturze. Po założonym czasie dojrzewania określana jest wytrzymałość betonu na ściskanie.



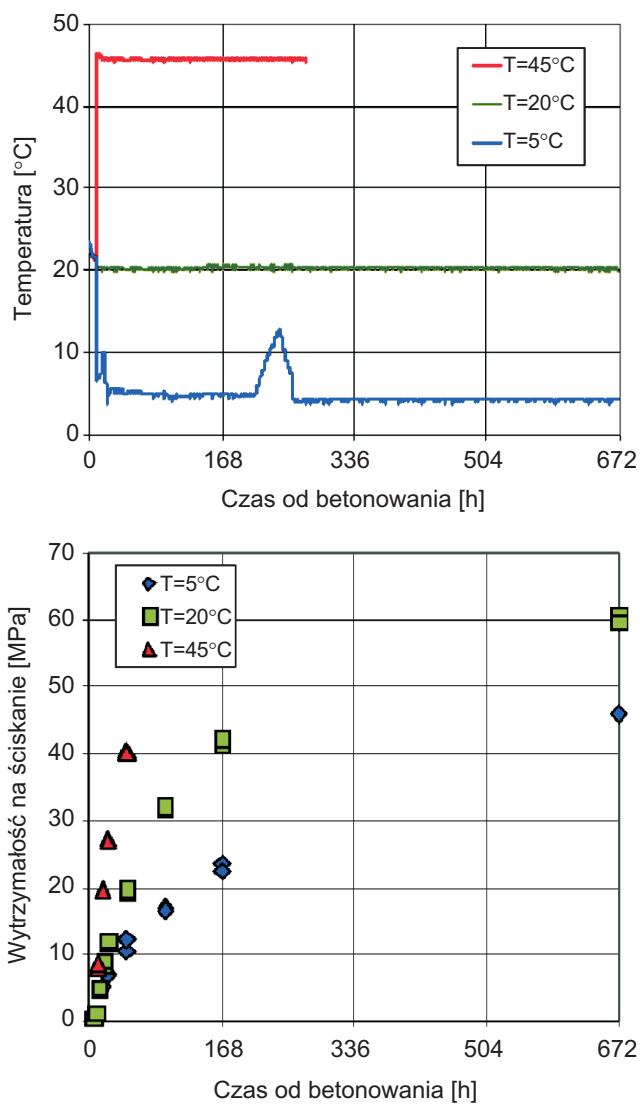
Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego  
Fig. 3. Illustration of the main parts of the test setup

Pomiary temperatury podczas badania na stanowisku pokazanym na rys. 3 oraz wartości odpowiadających wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rys. 4. Do interpretacji wyników przedstawionych na rys. 4 potrzebny jest opis rozwoju wytrzymałości betonu w czasie, do czego stosuje się zmodyfikowany w pracy [15] wzór na podstawie Eurokodu 2:

$$f_{cc} = \exp \left[ s \left( 1 - \sqrt{\frac{672 - t_s}{t_{eq} - t_s}} \right) \right] \cdot f_{cc,28d} \quad (8)$$

gdzie:

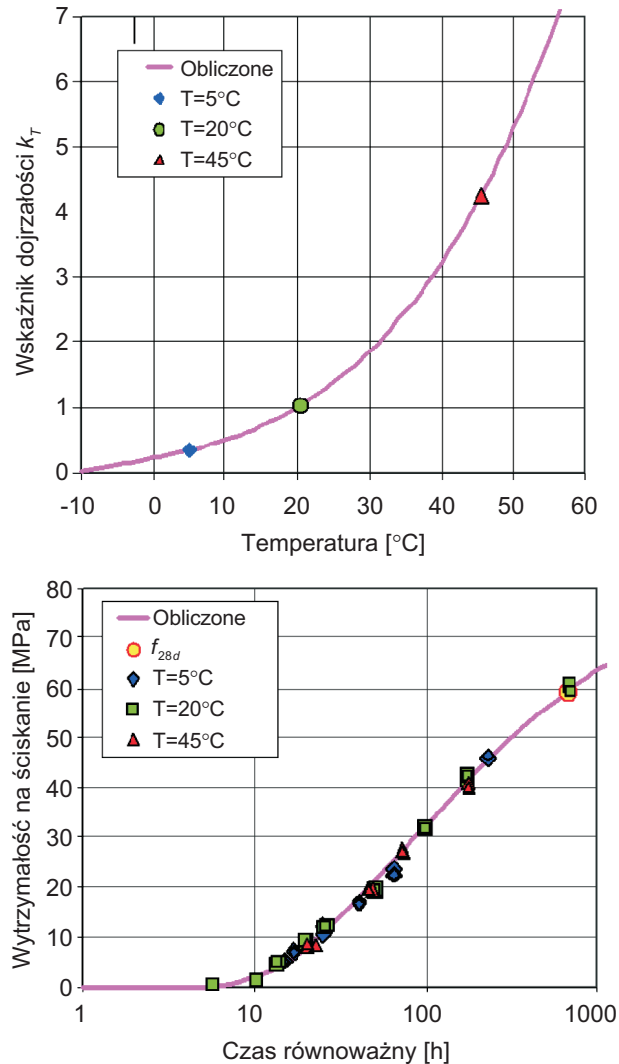
- $f_{cc}$  – wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa],
- $s$  – bezwymiarowy współczynnik zależny od klasy cementu,
- $t_s$  – czas wiązania [h],
- $t_{eq}$  – wiek równoważny betonu [h] zdefiniowany według wzoru (2),
- $f_{cc,28d}$  – wytrzymałość na ściskanie w warunkach odniesienia po 28 dniach [MPa].



Rys. 4. Wyniki pomiaru temperatury oraz wytrzymałości na ściskanie betonu twardniejącego w wodzie o zróżnicowanej temperaturze

Fig. 4. Results of temperature measurements and compressive strength of concrete hardening in water of different temperature

Korzystając z metody najmniejszych kwadratów funkcja dojrzałości przedstawiona w postaci wzoru (7) zostaje dopasowywana do uzyskanych wyników wzrostu wytrzymałości na ściskanie według wzoru (8) i przedstawiona na rysunku 5.



Rys. 5. Dopasowana funkcja dojrzałości oraz rozwój wytrzymałości w betonie na podstawie wyników przedstawionych na rys. 4

Fig. 5. Resulting maturity function and strength growth from test results shown in figure 4

Mając określone funkcje wyrażone za pomocą wzorów (7) i (8) możliwe jest wykorzystanie metody wskaźnika dojrzałości do interpretacji wyników uzyskanych z pomiarów temperatury betonu dojrzewającego w konstrukcji. Możliwe są manualne pomiary temperatury oraz obliczenia wykonywane ręcznie na podstawie wzorów (2), (7) oraz (8). Bardziej praktycznym rozwiązaniem jest zastosowanie automatyzacji pomiarów dojrzałości, aby w sposób ciągły monitorować zmiany temperatury betonu i natychmiast obliczać wskaźniki za pomocą wbudowanego komputera z oprogramowaniem. Dostępne na rynku są różne tego typu urządzenia pomiarowe, m.in. system ConReg wykorzystany do badań przedstawionych w następnym rozdziale.



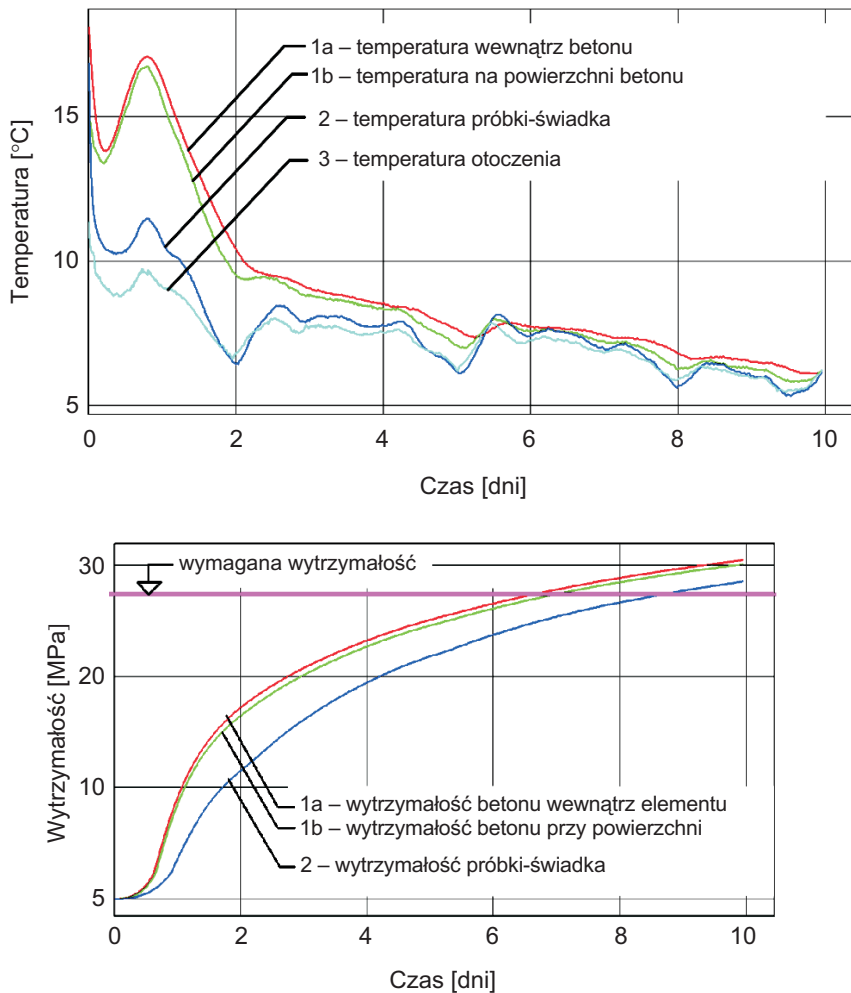
### 3. PRZYKŁAD POMIARÓW TEMPERATURY NA MIEJSCU BUDOWY

Metoda wskaźnika dojrzałości, jako narzędzie do oceny wytrzymałości betonu *in situ*, stosowana jest w Skandynawii od około dwudziestu lat. Do głównych jej zastosowań należy analiza warunków ochrony betonu w przypadku dojrzewania w warunkach obniżonej temperatury, określenie czasu rozdeskowania lub wykonania sprężenia oraz ocena zdolności konstrukcji do przenoszenia innych obciążeń użytkowych.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych podczas naprawy mostu w Sztokholmie w warunkach obniżonej temperatury (temperatura powietrza wynosiła poniżej 10°C) w listopadzie 2009 r. Krzywa „1a” dotyczy odczytów temperatury wewnątrz dojrzewającego betonu, krzywa „2” przedstawia zmiany temperatury w próbce-świadku (kostki 150 mm) na miejscu budowy, natomiast krzywa „3” dotyczy temperatury powietrza. Pozwala to zauważyć, że temperatura zmierzona wewnątrz próbek jest istotnie niższa niż wewnątrz betonu w konstrukcji, nawet pomimo niewielkiego wymiaru betonowanego elementu wynoszącego jedynie 250 mm. Należy mieć na uwadze, że w przypadku betonowania elementu o większych wymiarach, ta różnica temperatury może być jeszcze bardziej wyraźna. Również w przypadku ciepłego klimatu temperatura wewnątrz betonowanego elementu przewyższa temperaturę zmierzoną wewnątrz próbek dojrzewających w warunkach budowy.

Wyniki oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu w konstrukcji oraz w próbkach dojrzewających w warunkach budowy, uzyskane z wykorzystaniem metody wskaźnika dojrzałości, przedstawione zostały na rys. 6. Jak wynika z wykresów, szacowany przyrost wytrzymałości na ściskanie w konstrukcji znacznie przewyższa wytrzymałość próbek referencyjnych. Dzięki zastosowaniu aparatury ConReg szacowany czas do uzyskania niezbędnej wytrzymałości (28 MPa) w celu dopuszczenia mostu do ruchu może ulec skróceniu z 10 dni do 7 dni w odniesieniu do tradycyjnej oceny opartej na pomiarach wytrzymałości próbek dojrzewających w warunkach budowy. Wymagana wytrzymałość próbek na budowie osiągana jest po 9 dniach od betonowania, jednak należy uwzględnić pewien dodatkowy czas konieczny do przetransportowania próbek do laboratorium, wykonania niezbędnych badań i sporządzenia raportu. Takie dodatkowe opóźnienie (wynoszące w tym przypadku 4 lub więcej dni, co stanowi ponad 43% opóźnienia) powoduje straty finansowe bez korzystnego wpływu na zwiększenie bezpieczeństwa.

Ogólnie ocenia się, że zastosowanie metody wskaźnika dojrzałości, opartej na pomiarze temperatury betonu w konstrukcji, pozwala zredukować czas do uzyskania wymaganego poziomu wytrzymałości o ponad 1/3 w stosunku do metod tradycyjnych. Podobne doświadczenia potwierdzające skrócenie czasu realizacji budowy przy zastosowaniu metody wskaźnika dojrzałości, w stosunku do oceny wytrzymałości na podstawie badań próbek dojrzewających w warunkach budowy, zostały opisane w pracy [19]. Stwierdzono, że w trakcie realizacji sześciokondygnacyjnego budynku z dwupoziomym garażem podziemnym, udało się zaoszczędzić po kilka dni na każdym betonowaniu, dzięki określaniu metodą wskaźnika dojrzałości wytrzymałości wymaganej do sprężenia kablobetonu.

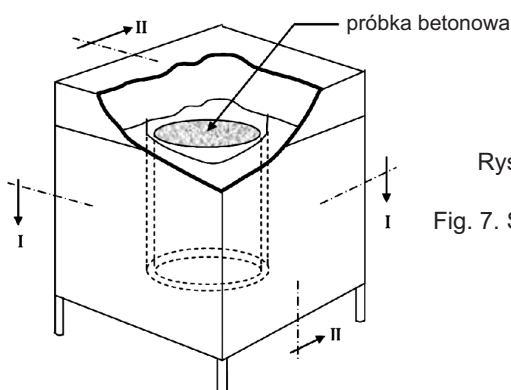


Rys. 6. Przykładowy pomiar temperatury oraz oszacowanie rozwoju wytrzymałości za pomocą systemu ConReg

Fig. 6. Temperature measurements and estimated strength development using the ConReg system

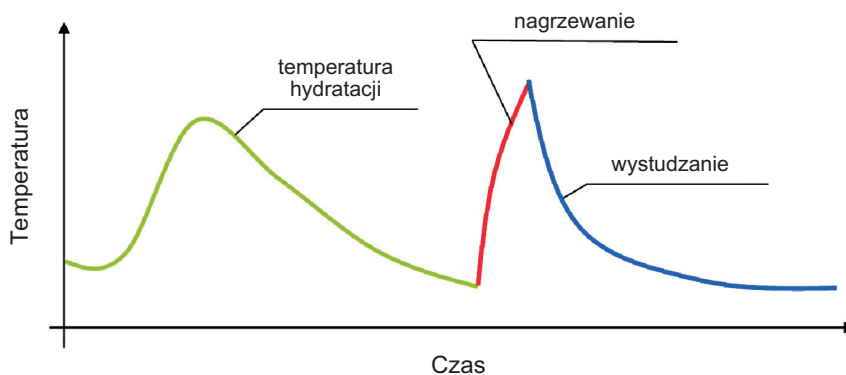
#### 4. PRZEWIDYWANIE TEMPERATURY ORAZ PRZYROSTU WYTRZYMAŁOŚCI

Aby móc przewidzieć rozwój temperatury w betonie oraz przyrost wytrzymałości w konstrukcji należy zczasu znać ilość wydzielanego ciepła hydratacji. Najprostszym sposobem oszacowania wytrzymałości na ściskanie przy różnej temperaturze (rozd. 2.2) [16, 17] jest określenie ilości wydzielonego ciepła przez pomiary temperatury w próbce umieszczonej w izolowanym pojemniku w warunkach semi-adiabacyjnych (rys. 7).



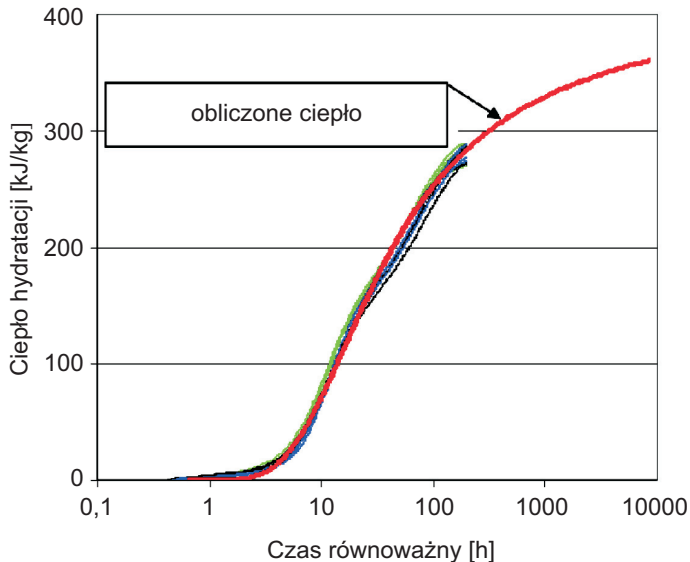
Rys. 7. Schemat naczynia semi-adiabatyku wraz z betonową próbką  
 Fig. 7. Sketch of a semi-adiabat, where the concrete specimen is located inside an insulated box

Próbka betonowa natychmiast po zaformowaniu umieszczana jest w naczyniu semi-adiabatyku, w którym mierzona jest temperatura. Pomiar temperatury prowadzony jest do czasu, kiedy zmiany temperatury będą nieznaczne i temperatura w naczyniu zbliży się do temperatury otoczenia. Następnym etapem jest zewnętrzne nagrzewanie próbki pozostającej w izolowanym naczyniu. Przebieg zmian temperatury przedstawiony został na rysunku 8.



Rys. 8. Przebieg zmian temperatury w warunkach semi-adiabatyku wraz z etapem nagrzewania  
 Fig. 8. Temperature sequence in a semi-adiabat including post-heating period

Ciepło hydratacji w funkcji czasu równoważnego może zostać obliczone na podstawie etapu rozwoju temperatury związanego hydratacją i naturalnym wystudzeniem próbki (rys. 8) w połączeniu ze znaną lub dopasowaną funkcją dojrzałości [17] (punkt 2). Przykład obliczenia ciepła hydratacji w funkcji czasu równoważnego przedstawiono na rysunku 9, na którym znajdują się wykresy tej zależności uzyskane podczas wielu prób adiabatyku.



Rys. 9. Obliczenie ciepła hydratacji na podstawie badania w naczyniu semi-adiabaticznym  
 Fig. 9. Evaluated heat of hydration from semi-adiabatic tests

Znając ciepło hydratacji, funkcje dojrzałości oraz rozwój wytrzymałości w próbkach odniesienia możliwe jest przewidzenie rozkładu temperatury w betonie przy założeniu dowolnych warunków brzegowych. Może to zostać wykorzystane do ogólnego planowania prac związanych ze wznoszeniem konstrukcji z betonu. Przykładowo, możliwe jest określenie czasu niezbędnego do osiągnięcia wymaganego poziomu wytrzymałości rozdeskowania elementu lub sprężenia kablobetonu itp.

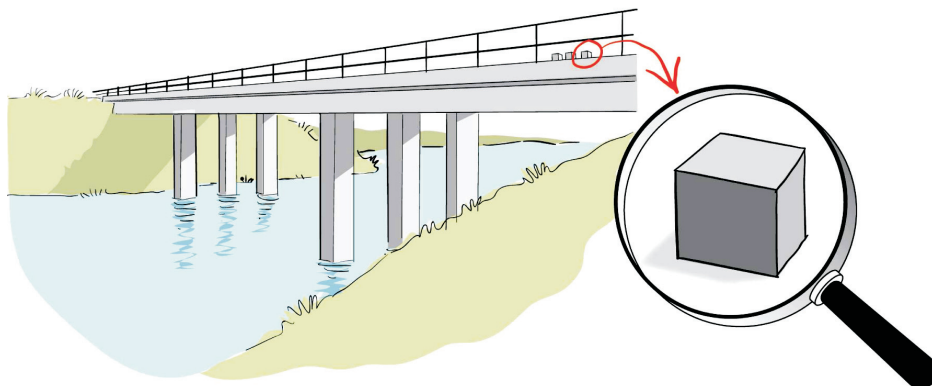
Na podstawie zależności podanych w niniejszym artykule został opracowany program komputerowy ConTeStT [18] w wersji 2D. W przypadku gdy dostępna jest szersza baza danych dotyczących właściwości mechanicznych betonu, możliwe jest zastosowanie systemu ConTeStPro pozwalającego określać rozwój wytrzymałości w dojrzewającym betonie.

## 5. POMIARY *IN SITU*

W wielu krajach normy dotyczące pomiarów przyrostu wytrzymałości betonu w konstrukcji zalecają wykorzystanie próbek dojrzewających w warunkach budowy, najczęściej w postaci kostek sześciennych o wymiarze boku 150 mm. Przykład zastosowania takiego podejścia przedstawiono na rysunku 10.

Głównym założeniem przy wykorzystaniu małych próbek-świadków do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji jest założenie, że rozwój ich wytrzymałości jest taki sam jak w betonie w konstrukcji. Zwykle jednak rozwój wytrzymałości próbek-świadków jest wolniejszy ze względu na możliwe spowolnienie procesu wiązania w silnie narażonych na wychłodzenie małych próbkach. W związku z powyższym, czas do

uzyskania wymaganego poziomu wytrzymałości betonu w konstrukcji, szacowany na podstawie dojrzewających w warunkach budowy próbek, jest niekorzystnie wydłużony.



Rys. 10. Wykorzystanie próbek referencyjnych do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji  
 Fig. 10. Use of reference cubes as representative for concrete strength development in structure

Możliwa jest również sytuacja odwrotna, kiedy próbki dojrzewające w warunkach budowy osiągną wymagany poziom wytrzymałości szybciej niż reprezentowany przez nie beton w konstrukcji. Jest to szczególnie niebezpieczne, ponieważ wytrzymałość betonu w konstrukcji jest wtedy przeszacowana, co może skutkować katastrofą budowlaną (w przypadku zbyt wczesnego rozformowania bądź wykonania sprężeń itp.).

Pomiary temperatury betonu, stanowiące podstawę obliczeń jego wytrzymałości, zaczęto prowadzić w Szwecji w latach pięćdziesiątych, głównie w celu ochrony młodego betonu w warunkach zimowych. Pozytywne doświadczenia w stosowaniu metody wskaźnika dojrzałości sprawiły, że największy właściciel obiektów inżynierskich w Szwecji (Generalna Dyrekcja Dróg) zaleca tę metodę określania wytrzymałości betonu w konstrukcji zamiast metody tradycyjnej, opartej na pomiarze wytrzymałości próbek dojrzewających w warunkach budowy. Stwierdzono, że przy wykorzystaniu metody wskaźnika dojrzałości, pomiary temperatury mogą mieć miejsce w dowolnym, istotnym miejscu konstrukcji. Od czasu upowszechnienia metody wskaźnika dojrzałości w latach dziewięćdziesiątych, w Szwecji praktycznie przestano wykorzystywać na budowie próbki referencyjne w celu określenia wytrzymałości betonu. Wykonywanie próbek na budowie jest natomiast celowe w przypadku kontroli jakości betonu; wówczas próbki powinny dojrzewać w normowych warunkach laboratoryjnych.

## 6. PODSUMOWANIE

Pierwotnym zastosowaniem metody wskaźnika dojrzałości było monitorowanie betonów dojrzewających w warunkach podwyższonej temperatury, a dopiero w późniejszym czasie została ona zaadaptowana do potrzeb wykonywania konstrukcji monolitycznych zimą. W obecnej chwili stanowi ona pewne i niezawodne narzędzie do oceny wytrzymałości betonu w konstrukcji w każdych warunkach.

W stosunku do tradycyjnych metod określania wytrzymałości betonu w konstrukcji na próbkach-świadkach, metoda wskaźnika dojrzałości pozwala na redukcję czasu realizacji robót betoniarских nawet o 1/3, co przekłada się korzystnie na ekonomię. Stan obecnej techniki komputerowej pozwala na szybkie wykonywanie obliczeń temperatury i wytrzymałości, jak również gromadzenie danych pomiarowych.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *McIntosh J.D.*: Electrical curing of concrete. Magazine of Concrete Research, **1**, 1, 1949, 21 - 28
- [2] *Nurse R.W.*: Steam curing of concrete. Magazine of Concrete Research, **1**, 2, 1949, 79 - 88
- [3] *Saul A.G.A.*: Principals underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research, **2**, 6, 1951, 127 - 140
- [4] *Bergström S.G.*: Curing temperature, age and strength of concrete. Magazine of Concrete Research, **5**, 14, 1953, 61 - 66
- [5] *Rastrup E.*: Heat of hydration in concrete. Magazine of Concrete Research, **6**, 17, 1954, 79 - 92
- [6] *Carino N.J., Woodward K.A., Leyendecker E.V., Fattal S.G.*: A Review of the Skyline Plaza Collapse. Concrete International, **5**, 7, 1983, 35 - 42
- [7] *Lew H.S., Fattal S.G., Shaver J.R., Reinhold T.A., Hunt B.J.*: Investigation of construction failure of reinforced concrete cooling tower at Willow Island, West Virginia. Final report. Center for Building Technology, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, Washington D.C. 1979
- [8] *Carino N.J., Lew H.S.*: The Maturity Method: From Theory to Application. Building of Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2001, 1 - 19
- [9] ASTM C 1074: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. ASTM International, West Conshohocken
- [10] BS EN 13670:2009 European Standard: Execution of concrete structures
- [11] *Nykänen A.*: Hardening of Concrete at Different Temperatures, Especially Below the Freezing Point. Proceedings, RILEM Symposium of Winter Concreting: Theory and Practice, Copenhagen 1956

- [12] *Freisleben Hansen P., Pedersen E.J.*: Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete. *Nordisk Betong*, **1**, 19, 1977, 21 - 25
- [13] *Byfors J.*: Plain concrete at early ages. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo/Research 3:80, Stockholm 1980
- [14] *Jonasson J.E.*: Slipform Construction – Calculations for Assessing Protection Against Early Freezing. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Fo/Research 4:84, Stockholm 1984
- [15] *Kanstad T., Hammer T.A., Bjøntegaard Ø., Sellevold E.J.*: Mechanical Properties of Young Concrete - Evaluation of Test Methods for Tensile Strength and Modulus of Elasticity - Determination of Models Parameters. NOR-IPACS Report STF22 A99762, ISBN 82-14-01062-4, Trondheim 1999
- [16] *Jonasson J.E.*: Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete. Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, Doctoral Thesis 1994.153D, Luleå 1994
- [17] *Ekerfors K., Jonasson J.E.*: Maturity Development in Young Concrete - Temperature Sensitivity, Strength and Heat Development. *Nordic Concrete Research No. 25*, 2/2000, 35 - 47
- [18] ConTeSt-T Program for temperature and strength calculations in concrete. JEJMS Concrete AB, Luleå 2008

## APPLICATION OF THE MATURITY CONCEPT FOR ASSESMENT OF DEVELOPMENT OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

### Abstract

The maturity method is a known technique to combine the effect of time and temperature at concrete hardening to evaluate strength growth in structural concretes. The theoretical basis of this technique is known since several decades, but quick and easy systems for effective applications have just recently been developed.

The application of the maturity concept has lately been shown to be very effective for almost all structural concreting, which may be generally summarized as a rational way of gaining construction time with higher safety than old techniques like testing small specimens stored near the actual structure on-site. It is shown that the reduction of construction time to reach required strength demands can be reduced by more than 25% in most application cases.

The modern systems involve both how to test and establish necessary data for arbitrary concrete mixes as well as using easy tools both to predict strength at the planning phase and during construction follow up the strength growth in the structural concrete in-place. As material data easily can be established for any concrete mix, the developed technique can preferably be used for so called green concretes with replacements of Portland cement with supplementary cementitious material to reduce the carbon footprint of the technology.

### Keywords

Compressive strength, concrete maturity, strength development

