

# Wpływ warunków pielęgnacji na ocenę wytrzymałości betonu na ściskanie

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dotyczących wpływu warunków przechowywania na wynik wytrzymałości betonu na ściskanie.

Jednym z wielu celów wprowadzenia norm europejskich była standaryzacja metod badawczych w taki sposób, aby wyniki badań uzyskanych z badanych partii materiałów były wiarygodne (porównywalne). Normy te określają dokładnie sposób pobierania próbek i postępowanie z nimi od momentu ich pobrania aż do chwili ich badania oraz dokładnie opisują wszystkie czynności związane z samym badaniem. Wiarygodne wyniki powinny być porównywalne w przypadku pobierania prób przez większą liczbę jednostek badawczych, niezależnie od tego, czy próbki pobierane są przez laboratorium na zlecenie inwestora, klienta, inspektora nadzoru budowlanego czy też samego producenta wyrobu. Niejednokrotnie okazuje się jednak, iż wyniki uzyskane przez kilka jednostek badawczych znacznie się od siebie różnią, co może być przyczyną nieporozumień, a w skrajnych przypadkach nawet może doprowadzić do postępowań reklamacyjnych.

Badanie wytrzymałości na ściskanie jest najbardziej rozpowszechnionym badaniem stwardniałego betonu. Jest to powiązane w dużej mierze z tym, iż liczne, aczkolwiek nie wszystkie, pożądane właściwości betonu są jakościowo związane z jego wytrzymałością. Właściwości betonu, w tym wytrzymałość, są funkcją czasu oraz wilgotności zewnętrznej, dlatego badania na tym materiale należy przeprowadzać w ściśle określonych warunkach [2].

Jednymi z najczęściej spotykanych na placu budowy niezgodności z normą już na początku „życia” próbki są sposób jej transportu i rodzaj przechowywania w pierwszym dniu po jej zafornowaniu. Norma *PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu - Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych* [3] wyraźnie nakazuje pozostawienie próbek w formach przez co najmniej 16 godzin (maksymalnie 3 dni) po zabezpieczeniu ich przed wstrząsami, wibracją oraz utratą wody, w temperaturze  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Próbki ze świeżą mieszanką betonową podczas przewożenia z miejsca budowy do laboratorium (gdzie mają być przechowywane zgodnie z normą) są narażone na segregację zaistniałą w wyniku wstrząsów w trakcie transportu. Z drugiej strony pozostawienie próbek na placu budowy w okresie letnim może narazić beton na nadmierną utratę wody, co w konsekwencji doprowadzi do przesuszenia próbek. W zimie natomiast możemy narazić beton na działanie mrozu jeszcze przed jego związaniem. W obu przypadkach ma to wpływ na zaniżenie wyników wytrzymałości.

Problem nieprawidłowej pielęgnacji próbek może pojawić się nie tylko z powodu braku możliwości zagwarantowania na terenie budowy warunków przechowywania wymaganych przez normę europejską w pierwszych chwilach po zafornowaniu próbek. Wciąż jeszcze można spotkać inspektorów nadzoru oraz kierowników budów, którzy sięgają do zapisów nieaktualnej już normy *PN/B-06250 Beton zwykły* [1], mówiących o konieczności przechowywania pobranych próbek „w warunkach zbliżonych do warun-



Fot. 1. Przykład nieprawidłowego przechowywania próbek betonowych w jednej z wytwórni betonu towarowego

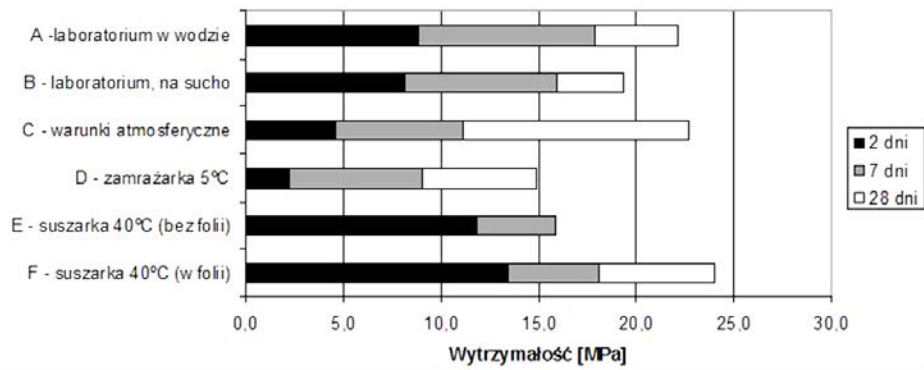
ków dojrzewania betonu w wyrobie, elemencie lub konstrukcji”. Pomijając to, iż dokument ten został wycofany z użytku przez Polski Komitet Normalizacyjny w 2004 roku, należy zwrócić uwagę, iż wytrzymałość próbek przechowywanych w pobliżu elementu będzie zupełnie inna niż wytrzymałość betonu w konstrukcji. Probka betonowa ma dużo niższą objętość w stosunku do betonu w konstrukcji, dlatego jest bardziej narażona na zmiany warunków atmosferycznych. W praktyce zapewnienie próbce sześcienniej warunków „zbliżonych” do tych, które panują w zabetonowanym elemencie, jest zwykle niemożliwe do uzyskania.

Często z powodu braku środków, miejsca w laboratorium, wapien do przechowywania lub pojemników z wodą próbki trafiają do miejsc, gdzie wilgotność jest inna niż wymagane przez normę minimum 95% w komorze klimatycznej lub w wodzie. W skrajnych przypadkach próbki przechowywane na zewnątrz narażone są na oddziaływanie promieniowania słonecznego, wiatru i mrozu [fot. 1]. Oczywiście są to przykłady marginalne. Niemniej jednak należy zwrócić uwagę, iż wciąż możemy napotkać takie przykłady zaniedbań na terenie Polski.

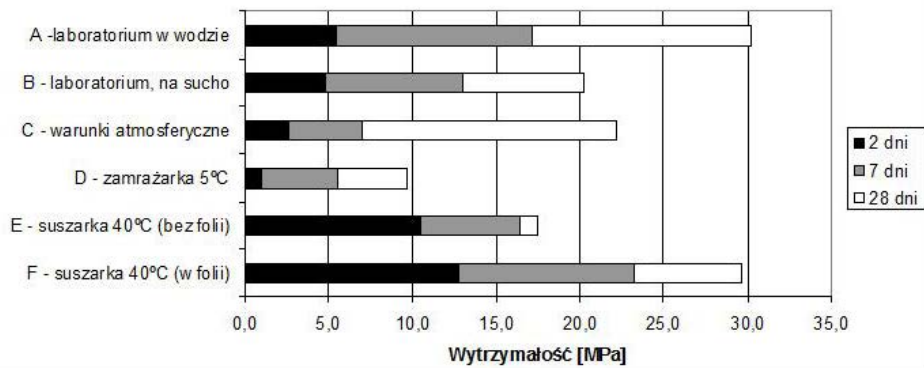
## Wpływ warunków przechowywania na wynik gęstości i wytrzymałości betonu na ściskanie – badania laboratoryjne

Celem podjętych badań była ocena wpływu warunków dojrzewania próbek betonowych na wytrzymałość na ściskanie stwardniałego betonu.

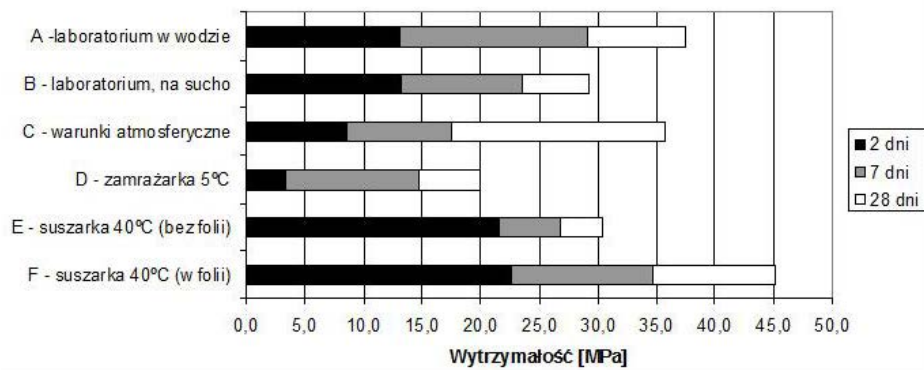
Beton jest materiałem, którego tempo narastania wytrzymałości jest uzależnione od wielu czynników. Oprócz warunków dojrzewania istotny jest również skład mieszanki betonowej. Aby nie ograniczyć badań tylko do jednego szczególnego przypadku, wykonano zaroby dla czterech różnych receptur (tab. 1), z zastosowaniem różnych ilości różnych spoiw i kilku typów domieszek chemicznych. Składy receptur zostały tak dobrane, aby opad stożka wynosił 150-180 mm (dolna granica konsystencji S4, często spotykana na placu budowy), przy jednoczesnym zachowaniu wa-



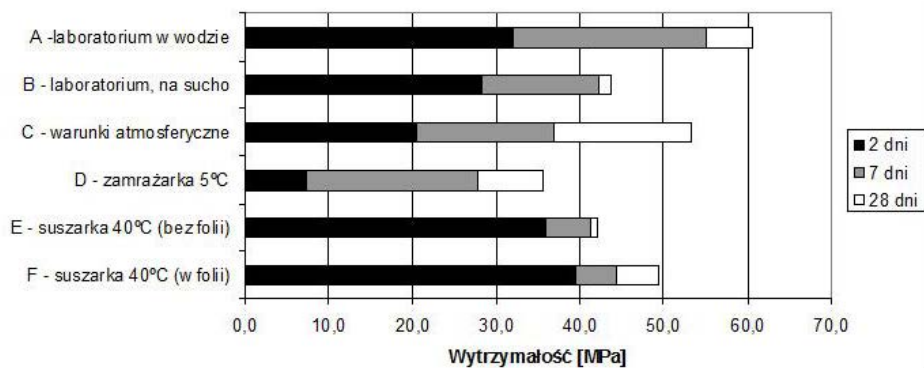
Rys. 1. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie w zależności od warunków przechowywania (receptura 1 – CEM I 42,5 R 200 kg, W/C = 0,9)



Rys. 2. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie w zależności od warunków przechowywania (receptura 2 – CEM III/A 32,5 N HSR/NA/LH 290 kg, W/C = 0,63)



Rys. 3. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie w zależności od warunków przechowywania (receptura 3 – CEM I 42,5 R 230 kg + popiół lotny 100 kg, W/C = 0,62)



Rys. 4. Zestawienie wyników badania wytrzymałości na ściskanie w zależności od warunków przechowywania (receptura 4 – CEM I 42,5 R 350 kg, W/C = 0,47)

Składniki	Ilości [kg/m <sup>3</sup> ]			
	Receptura 1	Receptura 2	Receptura 3	Receptura 4
Piasek 0/2	776	706	701	687
Wapień 2/8	536	513	490	512
Wapień 8/16	656	665	679	638
CEM I 42,5 R	200	–	230	350
CEM III/A 32,5 HSR/NA/LH	–	290	–	–
Popiół lotny krzemionkowy typ A	–	–	100	–
W/C	0,9	0,63	0,62	0,47
Woda	180	183	162	165
Plastyfikator BV (LM)	1,4 kg (0,7% mc.)	–	–	–
Superplastyfikator FM (SNF)	–	2,61 kg (0,9% mc.)	2,07 kg (0,9% mc.)	–
Superplastyfikator FM (PC)	–	–	–	2,45 kg (0,7% mc.)

Tab. 1. Skład mieszanek betonowych

Oznaczenie próbek	Warunki dojrzewania	Temperatura dojrzewania [°C]	Wilgotność [%]
A	Próbki przechowywane w wodzie zgodnie z normą PN-EN 12390-2	20°C ± 2°C	100% (woda)
B	Próbki przechowywane w laboratorium, poza wannami do przechowywania próbek	20°C ± 5°C	~40%
C	Próbki poddane działaniom warunków atmosferycznych – przechowywane na zewnątrz (przełom kwietnia i maja 2016 r.)	średnia 10°C, minimalna 0°C, maksymalna 23°C	średnia 67%, minimalna 30%, maksymalna 98%
D	Próbki przechowywane w zamrażarce	5°C	~40%
E	Próbki przechowywane w suszarce niechronione przed utratą wilgoci	40°C	~20%
F	Próbki przechowywane w suszarce chronione przed utratą wilgoci w workach foliowych	40°C	~95%

Tab. 2. Warunki dojrzewania próbek

runku dobrej urabialności, bez oznak segregacji oraz bleedingu mieszanki betonowej. Probki formowane były w formach o wymiarach 100 x 100 x 100 mm (po trzy próbki na każde badanie), a następnie zagęszczane na stoliku wibracyjnym.

Wszystkie próbki od razu po zaformowaniu trafiły w odpowiednie dla siebie miejsce dojrzewania. Wyjątek stanowiła seria oznaczona jako „A”. Probki, które do czasu badania miały być przechowywane w wodzie, zgodnie z normą PN-EN 12390-2 umieszczono w wannach po 24 godzinach. Przez ten czas przechowywane były w laboratorium w temperaturze 20°C i wilgotności około 40%. Po 24 godzinach od zaformowania wszystkie kostki zostały rozformowane i trafiły ponownie w wyznaczone miejsce. Warunki dojrzewania próbek przedstawiono w tab. 2. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano po 2, 7 i 28 dniach dojrzewania betonu. Zgodnie z zapisem normy [6] do obliczania wytrzymałości zastosowano współczynnik przeliczeniowy 0,95.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można wysnuć wnioski, iż przechowywanie próbek w inny sposób, niż określono w normie PN-EN 12390-1, będzie miało wpływ na zmianę wartości wytrzymałości badanego betonu.

Przechowywanie prób przez cały okres dojrzewania w stosunkowo niskiej wilgotności (w tym przypadku pomieszczenie laboratoryjne) we wszystkich przypadkach miało wpływ na obniżenie wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu. Jest to spowodowane odparowaniem części wody z próbek, co powoduje zwiększenie porowatości betonu oraz zmniejszenie ilości wody mogącej wiązać się w strukturze betonu.

Najniższe wyniki wytrzymałości uzyskano dla serii D – próbki były przechowywane w temperaturze 5°C. Spowodowane było to spowolnieniem procesu hydratacji w obniżonej temperaturze. Szczególnie narażony na działanie niskiej temperatury okazał się beton oparty o cement hutniczy o niskim ciepłe hydratacji (LH),

który po 28 dniach dojrzewania uzyskał zaledwie 30% wytrzymałości w stosunku do próbek przechowywanych w wannach z wodą.

Kolejną składową badań było umieszczenie próbek w temperaturze 40°C. Szybkość hydratacji rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Wytrzymałość betonu rośnie natomiast wraz z postępem hydratacji. Z danych literaturowych wynika, iż wyższa temperatura w czasie wiązania betonu powoduje wzrost wytrzymałości młodego betonu, ale może ostatecznie wpływać ujemnie na wytrzymałość betonu powyżej 7 dni [9, 10]. Jest to spowodowane bardzo szybką początkową hydratacją cementu, która przyczynia się do powstania słabej, prawdopodobnie bardziej porowatej mikrostruktury betonu. Mikrostruktura powstaje w taki sposób, że duża część porów nigdy nie zostanie wypełniona [2, 10]. Zjawisko to można zaobserwować na podstawie wyników wytrzymałości na ściskanie próbek przechowywanych w temperaturze 40°C bez folii chroniącej przed odparowaniem wody. Ponieważ tempo narastania wytrzymałości zwiększa się wraz ze zwiększoną szybkością hydratacji cementu, po pierwszych dwóch dniach zaobserwowano wzrost wytrzymałości o 13-91% w stosunku do próbek przechowywanych w 20°C w wodzie. Wraz z upływem czasu odparowało coraz więcej wilgoci i pomimo przyspieszonego procesu hydratacji zaczęło brakować wody do powstania żelu cementowego potrzebnego do wypełnienia pustych przestrzeni. Zmniejszenie ilości produktów hydratacji skutkowało obniżeniem wytrzymałości o 19-42% po 28 dniach w stosunku do próbek przechowywanych w wodzie. Probki te charakteryzowały się najniższą gęstością, a w związku z tym największą porowatością spośród wszystkich badanych próbek. Podobne zjawisko mogące mieć wpływ na obniżenie wytrzymałości, ale w mniejszej skali, może mieć miejsce w okresie letnim. Pozostawienie próbek w wysokiej temperaturze w ciepły leni dzień w miejscu nieosłoniętym przed działaniem promieniowania słonecznego i/lub narażonym na działanie wiatru może doprowadzić do przesuszenia próbek i powstania słabszej, bardziej porowatej mikrostruktury

betonu. Odparowanie wody z próbek opartych o recepturę 1 spowodowało, iż między 7. a 28. dniem nie zaobserwowano przyrostu wytrzymałości, natomiast dla pozostałych trzech receptur wzrost wytrzymałości na ściskanie wynosił zaledwie od 2% do 10%.

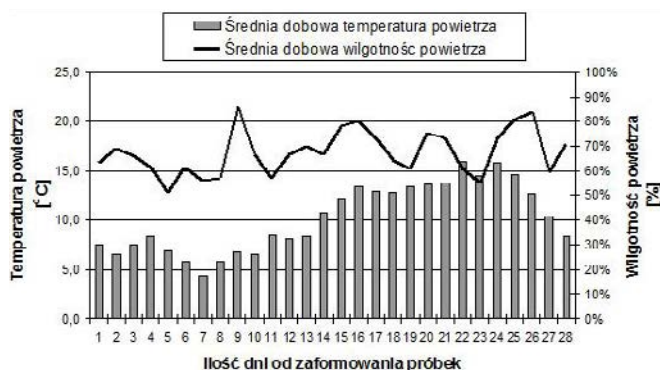
W przypadku prób przechowywanych w podwyższonej temperaturze, ale pielęgnowanych w foliach wszystkie wyniki wytrzymałości, niezależnie od terminu, były wyższe niż wyniki uzyskane z prób przechowywanych bez folii, a dla receptur 1 i 3 wytrzymałości próbek po 28 dniach dojrzewania były nawet wyższe od wytrzymałości próbek przechowywanych w wodzie.

W przypadku próbek przechowywanych w warunkach atmosferycznych (seria C) zaobserwowano spadek wytrzymałości badanej po 2 i 7 dniach dojrzewania w stosunku do próbek przechowywanych w laboratorium i w wodzie. Zaroby zostały zaformowane w połowie kwietnia, a uzyskane wyniki były ściśle związane z warunkami atmosferycznymi, w jakich były przechowywane próbki (rys. 5). Przez pierwszy tydzień od zaformowania średnia temperatura dobową wynosiła 6,7°C, a średnia wilgotność – około 60% [5]. Ponieważ hydratacja cementu jest procesem egzotermicznym, obniżona temperatura miała istotny wpływ na spowolnienie tego procesu, a w konsekwencji zmniejszenie przyrostu wytrzymałości. Pomiędzy 7. a 28. dniem średnia temperatura dobową wzrosła do 11,4°C, a średnia wilgotność – do około 70%. Warto również zauważyć, iż maksymalne temperatury powietrza w tym okresie w ciągu dnia dochodziły do 20-23°C, a wilgotność powietrza nocą i wcześniej rano niejednokrotnie przekraczała 95%. Prawdopodobnie nałożenie się wszystkich tych czynników spowodowało, że między 7. a 28. dniem dojrzewania zaobserwowano znaczny przyrost wytrzymałości próbek przechowywanych na dworze w stosunku do próbek przechowywanych w laboratorium. W przypadku receptury 1 (CEM I 42,5 R 200 kg, W/C = 0,9) otrzymano wytrzymałości wyższe nawet od tych uzyskanych z próbek serii A, pielęgnowanych w warunkach zgodnych z normą dotyczącą pielęgnacji próbek betonowych.

Dodatkowym czynnikiem mogącym mieć wpływ na zawyżenie wyników wytrzymałości wszystkich badanych próbek oprócz serii A mógł być sposób badania wytrzymałości, tzn. na sucho. Warto pamiętać, iż zgodnie z normą [8] próbki należy badać w stanie wilgotnym, tuż po wyjęciu z wanny i otarciu próbki z wilgoci. Warunek ten jest o tyle istotny, że łatwiej go uzyskać w stosunku do „stanu suchego”, który obejmuje stopnie wysuszenia w większym zakresie. Jest to o tyle ważne, iż w przypadku próbek prawidłowo pielęgnowanych, ale badanych w stanie suchym, uzyskamy wartości wytrzymałości na ściskanie nawet o 10% wyższe niż wartości wyników badania przeprowadzonego na mokro [2]. Prawdopodobnie jest to spowodowane pęcznieniem żelu cementowego w skutek zaabsorbowanej wody – siły kohezji cząstek stałych ulegają wtedy zmniejszeniu. W niniejszym opracowaniu wszystkie próbki oprócz tych przechowywanych w wodzie były badane na sucho, bez uprzedniego nasycania ich wodą.

### Wpływ warunków przechowywania na wynik wytrzymałości betonu na ściskanie – przykład praktyczny

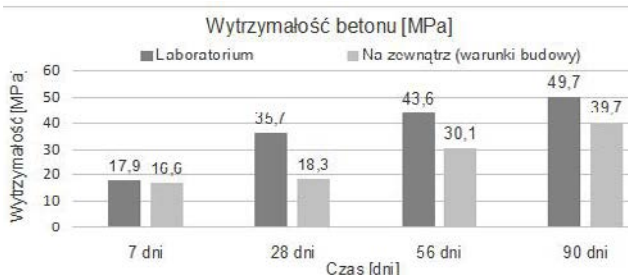
23.12.2015 r. odbyło się betonowanie fundamentu na terenie zakładu produkcyjnego. Ze względu na masywny charakter konstrukcji zdecydowano, iż receptura mieszanki betonowej oparta



Rys. 5. Wykres przedstawiający warunki atmosferyczne, w jakich przechowywane były próbki z oznaczeniem C

Składnik	Ilości [kg/m³]
CEM III/A 42,5 N Dyckerhoff	290
Popiół lotny krzemionkowy kat A	50
0/2 Piasek Pawłów	672
2/8 Grys Miedzianka	510
8/16 Grys Miedzianka	659
Woda	168
Domieszka ATLAS Fortis NS-130 0,8% mc.	2,32

Tab. 3. Receptura mieszanki betonowej klasy C25/30



Rys. 6. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie dla kostek sześciennych przechowywanych na budowie fundamentu oraz w warunkach laboratoryjnych

będzie o cement hutniczy CEM III/A 42,5 N HSR/NA oraz popiół lotny. Skład receptury przedstawiono w tab. 3. Zadeklarowano, iż wymagana klasa wytrzymałości na ściskanie C25/30 zostanie osiągnięta po 56 dniach dojrzewania betonu. Część próbek po zaformowaniu trafiła do laboratorium i była przechowywana zgodnie z normą europejską w wodzie [3]. Pozostałe próbki pozostawiono na powierzchni elementu, aby dojrzewały w warunkach możliwie „zblizonych” do tych, którym został poddany element, tak jak mówi norma PN-B-06250:1988 [1].

Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawiono na rys. 6. Badany beton spełnił kryteria zgodności dotyczące wytrzymałości na ściskanie zgodnie z normą PN-EN 206 dla założonej w recepturze klasy wytrzymałości C25/30 już po 28 dniach dla próbek dojrzewających w wodzie w warunkach laboratoryjnych. Natomiast próbki przechowywane na budowie nie uzyskały wymaganej klasy wytrzymałości nawet po 56 dniach dojrzewania.

W pierwszym tygodniu po zabetonowaniu elementu średnia temperatura powietrza w Piotrkowie Trybunalski wynosiła około 8°C i wahała się w granicach od 4°C do 12°C. Między 8. a 28. dniem od betonowania średnia temperatura dobową spadła i wynosiła -3°C, osiągając w nocy nawet do -11°C. Zestawienie pomiarów temperatury w okresie przechowywania próbek na budowie przedstawiono na rys. 7.



Między 7. a 28. dniem dojrzewania betonu doszło prawdopodobnie do jednorazowego, częściowego zamarznięcia wody niezwiązanej w próbkach, dlatego proces hydratacji został spowolniony aż do odwilży, która nastąpiła dopiero 35 dni od betonowania. Z danych literaturowych wynika, iż całkowite zatrzymanie hydratacji następuje w temperaturze  $-12^{\circ}\text{C}$  [2]. Nie zmienia to jednak faktu, iż przyrost wytrzymałości próbek betonowych w temperaturze bliskiej zeru lub niższej jest bardzo mały. W badanych próbkach, w związku ze spowolnieniem procesu hydratacji, zatrzymany został również rozwój wytrzymałości betonu w czasie. Nie ma tu również mowy o cyklicznym procesie zamrażania - odmrażania, dlatego nie zaobserwowano ubytków, pęknięć na powierzchniach próbek. Należy również pamiętać, iż po uzyskaniu tzw. wytrzymałości bezpiecznej 5 MPa stwardniały beton jest odporny na jeden cykl zamrażania - odmrażania [6]. Nadejście odwilży i rozmrożenie próbek spowodowało, iż proces hydratacji mógł być kontynuowany, jednak relatywnie niska temperatura otoczenia spowolniła proces hydratacji w późniejszym okresie i nie uzyskano tak dużych przyrostów wytrzymałości, jak miało to miejsce w przypadku próbek przechowywanych w warunkach laboratoryjnych.

Badanie zostało wykonane pogładowo i nie należy tych wyników identyfikować z wytrzymałością betonu w konstrukcji, gdyż pojemność cieplna całego elementu (masywu) jest znacznie wyższa. Należy pamiętać, iż przy ocenie zgodności betonu według normy PN-EN 206 nie należy uwzględniać próbek przechowywanych inaczej, niż zapisano w punkcie 5.5 normy PN-EN 12390-2:2013, a wszystkie odstępstwa od normy powinny zostać zanotowane w sprawozdaniu [3].

## Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż zmiany warunków przechowywania próbek będą miały zawsze konsekwencje w kształtowaniu wytrzymałości stwardniałego betonu przez cały okres dojrzewania. Zaobserwowano następujące tendencje:

- Przechowywanie prób w pomieszczeniach, gdzie próbki są chronione przed działaniami warunków atmosferycznych, nie zabezpiecza ich przed utratą wilgoci, co w konsekwencji zwykle prowadzi do obniżenia wytrzymałości na ściskanie betonu, w porównaniu z próbkami przechowywanymi normowo.
- Obniżona temperatura otoczenia, w jakiej dojrzewają próbki, jest czynnikiem spowalniającym proces wiązania, czego konsekwencją jest zmniejszenie wytrzymałości w stosunku do próbek przechowywanych w wodzie. Jest to szczególnie zauważalne w przypadku zastosowania cementu o niskim cieple hydratacji - wytrzymałość 28-dniowa próbek przechowywanych w  $5^{\circ}\text{C}$  osiągnęła zaledwie 30% wytrzymałości próbek przechowywanych zgodnie z normą europejską.
- Wzrost temperatury otoczenia jest czynnikiem intensyfikującym przyrost wytrzymałości w pierwszych dniach dojrzewania betonu. Brak zabezpieczenia przed utratą wilgoci powoduje odparowanie wody, czego konsekwencją jest wzrost porowatości betonu oraz jego niższa wytrzymałość po 28 dniach dojrzewania w stosunku do betonu przechowywanego zgodnie z normą. Zastosowanie ochrony próbek przed utratą wilgoci gwarantuje uzyskanie wyższych wytrzymałości w stosunku do próbek niezabezpieczonych.
- Poddanie próbek działaniom czynników atmosferycznym powoduje, iż wszystkie wyżej wymienione procesy nakładają się



Rys. 7. Warunki przechowywania próbek na budowie - zestawienie średnich temperatur dobowych w okresie od 1. do 90. dnia od betonowania

na siebie, w zależności od warunków pogodowych, pory roku czy też strefy klimatycznej. Konsekwencją tego jest uzyskanie wyniku, który jest informacją o wytrzymałości konkretnej próbki betonowej, a nie wyniku wytrzymałości betonu w konstrukcji.

Celem niniejszej publikacji jest zwrócenie uwagi na istotę odpowiedniego postępowania z próbkami od momentu formowania aż do badania, ze szczególnym naciskiem na warunki pielęgnacji próbek. Oczywiście oprócz wyżej wymienionych zagadnień jest jeszcze szereg innych czynników, takich jak np.: prawidłowe przygotowanie prób i ich transport, odpowiedniej jakości formy, stopień wilgotności prób bezpośrednio przed badaniem, centryczność ustawienia próbki w maszynie wytrzymałościowej podczas badania wytrzymałości, szybkość zwiększania obciążenia podczas badania, określenie rodzaju i prawidłowości zniszczenia próbki po badaniu czy wiele innych, które mogą mieć wpływ na wynik końcowy. Dla wielu czytelników powyższe zagadnienia mogą okazać się oczywiste, jednak z obserwacji autorów wynika, iż na palcu budowy, na terenie wytwórni betonu towarowego, a nawet w laboratoriach wciąż jeszcze można się spotkać z pewnymi zaniedbaniami (często nieumyślnymi), których konsekwencją jest umieszczenie w sprawozdaniu z badań niemiarodajnego wyniku badania wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu. □

## Piśmiennictwo

1. PN-B-06250:988 *Beton zwykły*.
2. Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Kraków 2000.
3. PN-EN 12390-2:2011 *Badania betonu - Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych*.
4. PN-EN 12390-1:2013 *Badania betonu - Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form*.
5. <http://www.worldweatheronline.com/piotrkow-trybunalski-weather-history/pl.aspx>.
6. *Instrukcja ITB 282: Wytyczne wykonywania robót budowlano-montażowych w okresie obniżonych temperatur*. Warszawa 1995.
7. PN-B-06265:2004 *Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003 Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.
8. PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.
9. Burg R.G.: *The Influence of Casting and Curing Temperature on the Properties of Fresh and Hardened Concrete*. Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD113T.
10. Verbeck G.J., Helmuth R.A.: *Structures and physical properties of cement paste*. Proc. 5 Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo, vol. 3, pp. 1-32, 1968.