

dr inż. Piotr Woyciechowski*
mgr inż. Małgorzata Piotrowicz**

Ocena wpływu klasy pielęgnacji na wybrane właściwości eksploatacyjne betonu

Warunkiem zapewnienia trwałości betonu jest prawidłowa pielęgnacja. Beton niepielęgnowany lub pielęgnowany nieprawidłowo ma osłabioną warstwę powierzchniową. Wynika to z fizykochemicznych zjawisk, związanych z przepływem wilgoci oraz strumienia ciepła, przy czym skala zagrożeń wynikających z każdego z tych czynników związana jest z warunkami klimatycznymi. W temperaturze otoczenia ponad +10 °C dominują zjawiska związane z niedostatkim wilgoci, przy czym ewentualne skutki błędów są tym groźniejsze, im wyższa temperatura otoczenia, w której prowadzone są roboty betoniarskie i im większa siła wiatru. W obniżonej temperaturze zapewnienie właściwych warunków wilgotnościowych jest również ważne, ale znaczenia nabiera pielęgnacja cieplna. W ekstremalnych przypadkach efekty błędów pielęgnacji mogą być zauważone w krótkim czasie, często jednak są ukryte w strukturze betonu i ujawniają się podczas jego eksploatacji, zmniejszając trwałość. Jednym z głównych defektów jest wzrost porowatości warstwy powierzchniowej betonu (tzn. otuliny zbrojenia), która pogarsza jej właściwości ochronne i szczelność [1]. W efekcie pogorszeniu ulegają cechy mechaniczne warstwy przypowierzchniowej betonu, a także wodoszczelność, mrozoodporność, odporność chemiczna, w tym odporność na wnikanie chlorków i karbonatyzację. Wpływ ten jest większy w przypadku betonów zawierających dodatki mineralne, stosowane jako zamiennik części cementu. Istotny jest także poziom wskaźnika w/c: w przypadku średniej i małej jego wartości rola pielęgnacji jest szczególnie ważna ze względu na uzyskanie optymalnej struktury warstwy powierzchniowej, a w przypadku dużego w/c rola pielęgnacji maleje [2].

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

** ICiMB, Centrum Badań Betonów CEBET

Zasady pielęgnacji betonu wg PN-EN 13670:2011

Zgodnie z PN-EN 13670:2011 [3] młody beton powinien być pielęgnowany, aby zminimalizować skurecz plastyczny, zapewnić odpowiednią wytrzymałość powierzchniową oraz trwałość strefy powierzchniowej. Pielęgnacja powinna obejmować ochronę betonu przed szkodliwymi warunkami atmosferycznymi, zamarzaniem, drganiami, uderzeniami oraz uszkodzeniami. Metoda pielęgnacji powinna być tak dobrana, aby chronić beton przed zbyt szybkim odparowywaniem wody z powierzchni lub utrzymywać powierzchnię wilgotną [10]. Pielęgnacja naturalna jest wystarczająca, jeśli podczas wymaganego jej okresu parowanie z powierzchni betonu zachodzi z małą prędkością, np. podczas wilgotnej, deszczowej lub mglistej pogody.

Powierzchnia betonu powinna być poddana pielęgnacji bezzwłocznie po zagęszczeniu i wykończeniu [4]. Czas pielęgnacji zależy od oczekiwanego poziomu wytrzymałości betonu odniesionego do wytrzymałości charakterystycznej po 28 dniach. **W PN-EN 13670: 2011 wyszczególniono, wg tego kryterium, trzy klasy pielęgnacji: 2, 3 i 4 (tabela 1).** Przewidziano także wariant zminimalizowanego przebiegu pielęgnacji (klasa 1), w którym nie zakłada się wymaganej wytrzymałości po pielęgnacji, a jej okres jest ograniczony do 12 h. Wybór klasy pielęgnacji powinien wynikać także z klasy ekspozycji, składu betonu oraz grubości otuliny zbrojenia. Ważne są również warunki klimatyczne i masywność elementów. Szczegółowe kryteria wyboru klasy pielęgnacji nie są jednak sprecyzowane, co powoduje, że w specyfikacjach

Tabela 1. Klasy pielęgnacji

Charakterystyka	Klasa pielęgnacji			
	1	2	3	4
Czas (godziny)	12	NA	NA	NA
Procent wymaganej wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie po 28 dniach	NA	35	50	70

NA – nie stosuje się

technicznych zalecana klasa pielęgnacji nie jest sformułowana, pomimo iż takie wymaganie sformułowano w normie. Określenie klasy pielęgnacji pozwala wyznaczyć (wg tabel F1, F2 i F3 w załączniku F PN-EN 13670: 2011) minimalny czas pielęgnacji, w zależności od temperatury powierzchni betonu i szybkości rozwoju wytrzymałości na ściskanie r :

$$r = \frac{f_{cm}^2}{f_{cm}^{28}} \quad (1)$$

gdzie:

f_c^2 i f_c^{28} – wytrzymałości na ściskanie odpowiednio po 2 i 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych.

Naszym zdaniem klasa 1 pielęgnacji nie powinna być zalecana w większości przypadków, ponieważ pielęgnowanie przez 12 h jest niewystarczające do uzyskania właściwej jakości przypowierzchniowej warstwy betonu. Wybór tej klasy pielęgnacji jest uzasadniony w przypadku betonu przeznaczonego do eksploatacji w środowisku nieagresywnym. Dokonanie wyboru klasy pielęgnacji 2, 3 lub 4 z uwagi na oczekiwaną wytrzymałość na ściskanie bezpośrednio po pielęgnacji, wymaga uwzględnienia uwarunkowań doraźnych (historia obciążenia elementu w okresie dojrzewania zarówno ciężarem własnym, jak i obciążeniem zewnętrznym) oraz długoterminowych (klasa ekspozycji betonu). Propozycje kryteriów szczegółowych wyboru klasy pielęgnacji, z uwagi na wymaganą wytrzymałość na ściskanie bezpośrednio po pielęgnacji, przedstawiono w [2].

Osobnym zagadnieniem jest interpretacja normowego zapisu o wyborze klasy pielęgnacji w zależności od temperatury powierzchni betonu. W normie nie sprecyzowano ani terminu, ani sposobu, ani miejsca pomiaru temperatury. Naszym zdaniem powinno w tym wypadku chodzić o temperaturę powietrza tuż nad powierzchnią betonu, która ma być pielęgnowana, mierzona bezpośrednio po zakończeniu działań technologicznych (betonowanie, zagęszczanie itp.), tzn. w chwili kiedy najkorzystniej byłoby rozpocząć pielęgnację (nawet jeśli rozpo-

częcie to nie jest możliwe z uwagi na ograniczenia przyjętej techniki pielęgnacji). Dokonanie wyboru klasy pielęgnacji betonu nie determinuje metody pielęgnacji betonu, a jedynie czas jej trwania.

Zgodnie z PN-EN 13670:2011 mogą być stosowane następujące metody pielęgnacji: pozostawienie deskowania na miejscu; pokrycie powierzchni betonu paroszczelnymi powłokami, zabezpieczonymi przed wysychaniem przy krawędziach i złączach; układanie mokrych mat na powierzchni i zabezpieczenie ich przed wysychaniem; utrzymywanie powierzchni betonu w stanie wilgotnym przez użycie wody oraz stosowanie preparatów pielęgnujących o ustalonej skuteczności. Można również stosować inne metody pielęgnacji o podobnej efektywności.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że ujęcie normowe odnosi zagadnienie pielęgnacji betonu jedynie do wytrzymałości na ściskanie bezpośrednio po zakończeniu pielęgnacji. Należy jednak zwrócić uwagę, że wybór klasy pielęgnacji powinien być związany także z wymaganiami dotyczącymi trwałości betonu. Czas pielęgnacji, wystarczający z uwagi na wymaganą wytrzymałość po jej zakończeniu, może nie być wystarczający z punktu widzenia wymagań dotyczących wodoszczelności, mrozoodporności i innych cech ściśle związanych z jakością i szczelnością warstwy powierzchniowej betonu [5]. Należy sądzić, że wpływ czasu trwania pielęgnacji wilgotnościowej na te cechy może być większy niż na wytrzymałość na ściskanie.

Wpływ klasy pielęgnacji na wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i wodoszczelność

Badania wykonano na próbkach z betonów klasy wytrzymałości C25/30, z cementami CEM I 32, R oraz CEM II/ B-V 32,5 R – HRS z tej samej cementowni oraz z żwirowymi kruszywami frakcjonowanymi o uziarnieniu do 16 mm, bez stosowania domieszek chemicznych. Celem badań było określenie wpływu dwóch skrajnych wariantów pielęgnacji betonu wg normy PN-EN 13670:2011 [7] (tablica 4 w normie), tj. klasy 1 i klasy 4 na wybrane cechy betonu. Taki plan badań pozwolił wykazać zarówno znaczenie klasy pielęgnacji w kształtowaniu cech betonu, jak i fakt, że klasa pielęgnacji 1 jest z reguły niewystarczająca do osiągnięcia satysfakcjonującej jakości betonu. Czas trwania pielęgnacji w przypadku klasy 4 (tablica F. 3 w normie) określono dla

przyjętej w badaniach temperatury powierzchni betonu (ok. 25 °C) i rozwoju wytrzymałości na ściskanie wyznaczonego na podstawie wyników z badań wstępnych, który dla obu betonów sklasyfikowano jako szybki (tabela 2). Zgodnie z PN-EN 13670:2011 rozwój wytrzymałości na ściskanie jest szybki, jeśli $r \geq 0,5$. W takim przypadku minimalny czas pielęgnacji wg klasy 4 wynosi 3 dni.

Tabela 2. Rozwój wytrzymałości betonu na ściskanie

Właściwość	Rodzaj cementu	
	CEM I 32,5 R	CEM II/ B-V 32,5 R-HSR
f_{cm}^2	21,6	19,6
f_{cm}^{28}	36,9	35,8
$r = f_{cm}^2 / f_{cm}^{28}$	0,58	0,54

Próbki zaformowane wg PN-EN 12390-2 przykryto folią, umieszczono w komorze o temperaturze ok. 25 °C i RH ok. 95% i rozformowano po 24 h. Pielęgnacja próbek polegała na ich przechowywaniu w tych samych warunkach i przykryciu wilgotną tkaniną przez cały okres pielęgnacji. Przebieg dojrzewania próbek i zakres badań cech betonu przedstawiono w tabeli 3. Betony zaprojektowano przy założeniu klasy wytrzymałości na ściskanie C20/25 oraz klasy konsystencji wg metody opadu stożka S1 (tabela 4).

Tabela 3. Przebieg i zakres badań

Klasa pielęgnacji	% założonej wytrzymałości 28-dniowej po pielęgnacji	Temp. dojrzewania podczas pielęgnacji	Czas pielęgnacji	Dalsze dojrzewanie	Badane cechy
1	–	~ 25 °C	min. 12 h (przyjęto ~ 24 h)	warunki powietrzno-suche, temp. od +10 °C do +20 °C	f_{cm}^{28} , N^{28} , W^{28}
4	70	~ 25 °C	3 doby	zw.	f_{cm}^{28} , N^{28} , f_{cm}^{30} , W^{28} , f_{cm}^{90} , W^{90}

f_{cm}^{28} , f_{cm}^{30} , f_{cm}^{90} – wytrzymałość na ściskanie badana na próbkach o wymiarach 100 x 100 x 100 mm po 3, 28 i 90 dniach dojrzewania wg PN-EN 12390-3:2011 [7]; N^{28} – nasiąkliwość betonu badana na próbkach o wymiarach 100 x 100 x 100 mm po 28 dniach dojrzewania wg PN-88/B-06250 p. 6.4 [8]; W^{28} , W^{90} – głębokość penetracji wody pod ciśnieniem badana na próbkach o wymiarach 150 x 150 x 150 mm po 28 i 90 dniach dojrzewania wg PN-EN 12390-8: 2011 [9].

Tabela 4. Skład mieszanek betonowych

Składnik	Ilość składnika [kg/m ³]	
	CEM I 32,5 R	CEM II/ B-V 32,5 R-HSR
Cement	330	
Piasek	680	
Żwir 2/4 mm	230	
Żwir 4/8 mm	410	
Żwir 8/16 mm	570	
Woda	170	
Właściwości mieszanek betonowej	Rodzaj cementu	
	CEM I 32,5 R	CEM II/ B-V 32,5 R-HSR
Opad stożka [mm]	30	35
Gęstość [kg/m ³]	2340	2351
Zawartość powietrza [%]	1,9	1,8

Wyniki badań

Badania wytrzymałości na ściskanie, wodoszczelności i nasiąkliwości betonu prowadzono w odniesieniu do dwóch skrajnych wariantów pielęgnacji, tj. klasy 1 i klasy 4 (tabela 5).

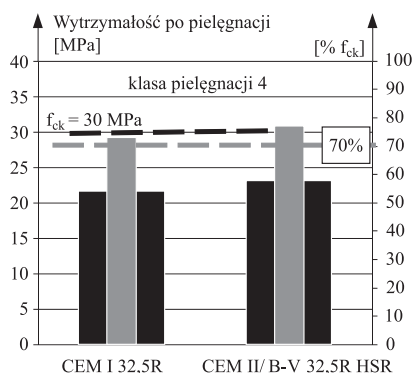
Niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu bezpośrednio po pielęgnacji klasy 4 prowadzonej przez 3 dni uzyskano oczekiwany poziom wytrzymałości, tzn. nie mniej niż 70% wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie (rysunek 1). Jednocześnie pielęgnacja klasy 1 prowadzona przez 12 h, spowodowała obniżenie wytrzymałości 3-dniowej o 20 – 30%, zależnie od rodzaju cementu (większe obniżenie w przypadku cementu CEM II).

Po 28 dniach dojrzewania w warunkach naturalnych betony poddane pielęgnacji klasy 4 uzyskały wyższą wytrzymałość niż te same betony pielęgnowane wg klasy 1 (rysunek 2). Różnica ta wyniosła 20% w przypadku betonu z cementem portlandzkim i 25% w przypadku betonu z cementem portlandzkim wieloskładnikowym (popiołowym). Niemniej jednak, niezależnie od klasy pielęgnacji, wszystkie betony po 28 dniach uzyskały wytrzymałość większą niż założona minimalna wytrzymałość charakterystyczna równa 30 MPa (rysunek 2). W przypadku przyjęcia klasy pielęgnacji 1 wytrzymałość po 28 dniach była większa od charakterystycznej zaledwie o 8 – 9%, zaś w przypadku klasy pielęgnacji 4 – o 30 – 37%. Nie stwierdzono istotnych różnic w wynikach badania nasiąkliwości masowej betonów, różnie pielęgnowanych (rysunek 3). Rozrzut wyników badania nasiąkliwości betonu pielęgnowanego wg wymagań klasy 1 i 4 nie przekroczył 0,1%, w przypadku obu cementów.

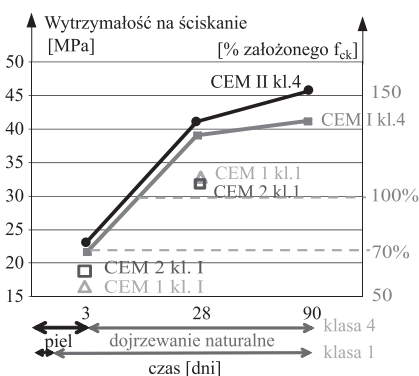
Badania wykazały istotny wpływ klasy pielęgnacji na wynik badania głębokości wnikanania wody pod ciśnieniem. Zgodnie z oczekiwaniami nieznacznie lepsze wyniki badania (lepsza wodoszczelność) uzyskano w przypadku betonów z cementem popiołowym, ale różnica w głębokości wnicania wody nie przekroczyła 20%, niezależnie od klasy pielęgnacji. Znaczne różnice uzyskano natomiast w przypadku betonu pielęgnowanego wg wymagań klasy 1 i klasy 4 (rysunek 4). W przypadku betonu z cementem CEM I próbki pielęgnowane wg klasy 1 po 28 dniach przeciekały (głębokość wnicania wody – 150 mm), natomiast próbki pielęgnowane wg klasy 4 wykazały średnią głębokość wnicania wody 66 mm, tj. o ok. 60% mniejszą.

Tabela 5. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości betonu

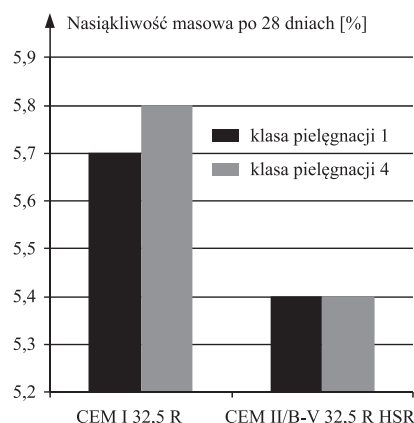
Wytrzymałość na ściskanie odpowiednio po 3, 28 i 90 dniach	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]			
	CEM I 32,5 R		CEM II/ B-V 32,5 R-HSR	
	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 4	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 4
f_c^3	17,4	21,7	15,8	23,2
f_c^{28}	32,4	39,1	32,7	41,1
f_c^{90}	–	41,2	–	45,6
Nasiąkliwość po 28 dniach	Nasiąkliwość [%]			
	CEM I 32,5 R		CEM II/ B-V 32,5 R-HSR	
	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 4	Klasa pielęgnacji 1	Klasa pielęgnacji 4
N^{28}	5,7	5,8	5,4	5,4



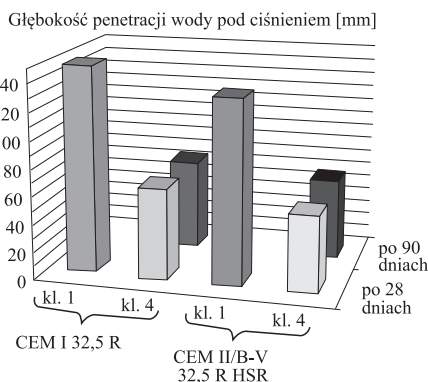
Rys. 1. Wytrzymałość betonu bezpośrednio po pielęgnacji (klasa 4)



Rys. 2. Rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie, w zależności od klasy pielęgnacji i rodzaju cementu



Rys. 3. Wpływ klasy pielęgnacji na nasiąkliwość betonu w zależności od rodzaju cementu



Rys. 4. Porównanie głębokości wnikięcia w beton wody pod ciśnieniem, w zależności od klasy pielęgnacji

Podobnie w przypadku betonów z cementem popiołowym – próbki pielęgnowane wg klasy 4 wykazały głębokość zawilgocenia mniejszą o 58% niż próbki pielęgnowane wg klasy 1. Głębokości wnikięcia wody w beton po 28 i 90 dniach były praktycznie takie same (65 – 66 mm w przypadku betonu z CEM I i 55 – 58 mm w przypadku betonu z CEM II). W świetle wyników można zatem uznać, że klasa pielęgnacji miała istotny wpływ na wodoszczelność (głębokość wnikięcia wody pod ciśnieniem) badanych betonów.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analiz wyników stwierdzono, że w odniesieniu do betonu o szybkim rozwoju wytrzymałości ($r > 0,5$), pielęgnowanego w relatywnie wysokiej temperaturze (ok. 25 °C) zaobserwowano następujące prawidłowości:

- minimalna klasa pielęgnacji (klasa 1) pozwoliła z trudem spełnić wymaganie 28-dniowej wytrzymałości betonu, pomimo prowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych; wskazuje to na duże ryzyko niespełnienia wymagań wytrzymałościowych w warunkach budowy, w przypadku przyjęcia klasy pielęgnacji 1;
- pielęgnacja wg wymagań klasy 4 pozwoliła uzyskać wymagane 70% wytrzyma-

łości charakterystycznej bezpośrednio po zakończeniu pielęgnacji, a po 28 dniach klasę wytrzymałości z wystarczającym zapasem (ponad 20%);

- nie stwierdzono istotnych różnic we wpływie klasy pielęgnacji na beton z cementem portlandzkim i cementem portlandzkim wieloskładnikowym popiołowym;
- nie zaobserwowano wpływu klasy pielęgnacji na nasiąkliwość masową betonu;
- klasa pielęgnacji miała kluczowy wpływ na głębokość wnikięcia w beton wody pod ciśnieniem.

Rezultaty badań wyraźnie wskazują na istotny wpływ klasy pielęgnacji na wytrzymałość i cechy będące miarami trwałości betonu (głębokość zawilgocenia pod ciśnieniem). Celowe wydają się dalsze badania nad wpływem klasy pielęgnacji na wodoszczelność, a także mrozoodporność, szczególnie powierzchniową (scaling), natomiast za mniej istotny można uznać wpływ klasy pielęgnacji na nasiąkliwość, co potwierdza mniejszą rolę tej cechy jako miary trwałości betonu. W świetle analiz wymagań normowych interesująca byłaby ocena wpływu pielęgnacji na wymienione cechy w przypadku: pośrednich klas pielęgnacji (tzn. 2 i 3), betonów o średnim i wolnym rozwoju wytrzymałości na ściskanie, pielęgnacji w pozostałych zakresach temperatury wyszczególnionych w normie PN-EN 13670 (tj. 25 – 15 °C, 15 – 10 °C oraz 10 – 5 °C), szerokiego zakresu wskaźników w/c i innych rodzajów cementu (zwłaszcza CEM III) niż użyte w przedstawionych badaniach.

Literatura

[1] Jackiewicz-Rek W., Woyciechowski P., Pielęgnacja – klucz do zapewnienia trwałości betonu w konstrukcji, BTA 3 (59) 2012, 54 – 58.
 [2] Woyciechowski P., Jackiewicz-Rek W., Rola pielęgnacji w kształtowaniu trwałości betonu, Materiały Budowlane 5/2012, 44 – 48.
 [3] PN-EN 13670:2011 Wykonywanie konstrukcji z betonu.
 [4] Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz pod redakcją L. Czarnieckiego, Polski Cement, Kraków 2004 r.
 [5] Bajorek G. Pielęgnacja betonu, BTA (35)/2006, 48 – 50.
 [6] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
 [7] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
 [8] PN-B-06250:1988 Beton zwykły.
 [9] PN-EN 12390-8:2011 Badania betonu – Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
 [10] Bajorek G., Kiernia-Hnat M., Skrzypczak I., Wykonywanie betonu nareszcie unormowane – PN-EN 13670: 2011. Zagadnienia dotyczące betonu. BTA 3 (59)/2012, 62 – 66.