

Przemysław Kaprzyk¹⁾

System pomiaru dojrzałości betonu krokiem do optymalizacji produkcji oraz zmniejszenia śladu węglowego

Określona dojrzałość betonu oznacza, że beton ma taką samą wytrzymałość niezależnie od historii temperaturowej od momentu wbudowania w konstrukcję. Im wyższa temperatura betonu, tym krótszy czas potrzebny do uzyskania wymaganej wczesnej wytrzymałości. Badania nad dojrzałością betonu sięgają połowy XX wieku. Powstało kilka mniej lub bardziej skomplikowanych równań i funkcji, ale w warunkach budowy czy zakładu prefabrykacji nie były one do pewnego czasu proste w użyciu.

W ostatnich latach pojawiło się kilka rozwiązań na rynku budowlanym, pozwalających oszacować dojrzałość/wytrzymałość betonu, aby dać informację o możliwości realizacji kolejnego kroku w robotach budowlanych, tj. m.in. demontażu destrukowania, sprężenia konstrukcji czy obciążenia elementów. W artykule skupiono się na zasadzie oraz zaletach pomiaru dojrzałości betonu w elemencie/konstrukcji.

Temperatura betonu wpływa w znaczny sposób na proces rozwoju jego wytrzymałości. Podczas mieszania cementu, wody, kruszywa, dodatków oraz domieszek dochodzi do znacznego wzrostu ciepła. Rozwój temperatury wewnętrznej będzie przyspieszał do czasu dostępności wolnych do przereagowania cząstek cementu. Temperatura wewnętrzna betonu zależy od wielkości elementu, rodzaju betonu, składu mieszanki, typu cementu, warunków dojrzewania etc.

W świetle programu Net Zero 2050 budownictwo stoi przed wyzwaniem związanym ze zrównoważonym rozwojem. W obecnych czasach mamy wysokie ceny energii, a co za tym idzie koszty ogrzewania. System pomiaru dojrzałości betonu pozwala zoptymalizować w znacznym stopniu czas dojrzewania elementów, ilość potrzebnego ciepła wykorzystywanego podczas pielęgnacji elementów.

Metoda niszcząca vs metoda pomiaru dojrzałości

Metoda niszcząca badania wytrzymałości próbek betonowych (kostek lub walców) jest metodą normową. Na jej wyniki największy wpływ ma:

- **wielkość próbek** – próbka sześcienna o boku 150 mm do badania wytrzymałości na ściskanie ma objętość 3,375 litra, natomiast objętość elementów prefabrykowanych jest znacznie większa. Różnica masy jest kluczowa z uwagi na ciepło hydratacji emitowane podczas dojrzewania elementu. Ilość ciepła wpływa na szybkość rozwoju wytrzymałości [w prefabrykacji stosuje się cementy o normalnym przyroście wytrzymałości oznaczone jako „N” lub o przyspieszonym tempie przyrostu wytrzymałości oznaczone jako „R”];

- **gęstość próbek** – w przypadku betonów o małym współczynniku wodno-cementowym, o konsystencji wilgotnej różnice gęstości będą wynikać z dokładności zagęszczenia próbek;

- **warunki dojrzewania próbek** – w przypadku wytrzymałości wczesnej ważne są warunki dojrzewania; zbliżone warunki należy zapewnić również próbkom. W przypadku stosowania obróbki cieplnej próbki zaleca się wykonywać w formach metalowych;

- **stan form i sprzętu laboratoryjnego** – formy należy regularnie kontrolować, brak płaskości spowoduje uzyskanie błędnych wyników. Maszyna wytrzymałościowa musi być sprawna, serwisowana i posiadać świadectwo wzorcowania.

Pomiar dojrzałości betonu przez pomiar temperatury oraz właściwie przygotowana i obliczona krzywa dojrzałości betonu rozwiązuje wymienione problemy. Doświadczenia bazują na przeprowadzonych próbach oraz wdrożonych rozwiązaniach w dwóch fabrykach Consolis Polska Sp. z o.o. – w Gorzkowicach oraz Ostrowie Wielkopolskim.

Rozpoczęcie prób miało miejsce w maju 2021 r. Rozwiązanie stosowane jest do dnia dzisiejszego.

Zastosowany system składa się z termopar – czujników, nadajników przesyłających pomiar temperatury i routera podłączonego do sieci. Dostęp do danych z poziomu strony internetowej/aplikacji na telefon, 24 godziny na dobę przez siedem dni w tygodniu.

Wyznaczenie dojrzałości – kalibracja

Przed właściwym korzystaniem z systemu pomiaru dojrzałości betonu należy ustalić krzywą dojrzałości. Wykonuje się to dla każdej receptury. Procedura przeprowadzenia kalibracji została podana przez dostawcę systemu i bazuje na wymaganiach normy **ASTM C1074 Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method**. Kluczowe przy wyznaczaniu wytrzymałości są: klasa oraz tempo przyrostu wytrzymałości N lub R; ilość cementu; współczynnik wodno-cementowy; rodzaj i ilość zastosowanej domieszki. Należy przygotować co najmniej 15 próbek, aby wykonać badania w minimum pięciu grupach „wiekowych” betonu. W przypadku każdego wieku testowego potrzebne są trzy próbki, dwie do testów rzeczywistych oraz trzecia – rezerwowa, w przypadku gdyby różnica między dwoma pierwszymi wynikami była większa niż 10% od ich średniej. Probki przygotowujemy zgodnie z serią norm PN-EN 12350. Termopary – czujniki umieszczamy w środku próbek (z dokładnością +/-15 mm od środka). Czujniki podłączamy do nadajników w celu rejestracji temperatury. Pozostawiamy próbki w celu dojrzewania w warunkach normowych. Sprawdzamy wytrzymałość, notujemy czas, wynik dojrzałości, próbki z czujnikami sprawdzamy jako ostatnie. Po zebraniu wyników (wytrzymałości na ściskanie oraz doj-

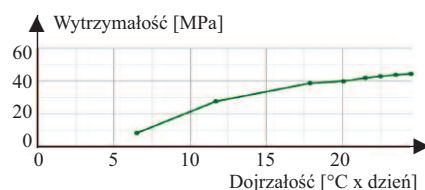
¹⁾ Consolis Polska Sp. z o.o.;
przemyslaw.kaprzyk@consolis.com

rzałości) należy umieścić je na wykresie dojrzałości – wytrzymałość. Krzywa ta służy następnie do określenia wytrzymałości betonu w innych warunkach temperaturowych, na podstawie obliczonego wskaźnika dojrzałości.

W przypadku betonów o małym współczynniku wodno-cementowym ważne jest utrzymanie odpowiedniej wilgotności podczas dojrzewania próbek. W Consolis Polska Sp. z o.o. zdecydowano o weryfikacji krzywej dojrzewania na łożu produkcyjnym w rzeczywistych warunkach ciepło-wilgotnościowych. Podjęto też decyzję o pomiarze dojrzałości betonu w płytach sprężonych typu HC. W zastosowanej recepturze nie ma domieszki chemicznej (domieszka chemiczna – jej rodzaj, dozowanie w betonach płynnych są zmienne w zależności od okresu produkcji, wymagań produkcyjnych, a każda zmiana wymuszałaby kolejną kalibrację krzywej dojrzałości). Jest to receptura stała pod kątem w/c i charakteryzuje się najmniejszymi wahaniami w składzie materiałowym. Przykładowe zestawienie wyników wytrzymałości – dojrzałość zaprezentowano w tabeli oraz na rysunku.

Zależność wytrzymałość – dojrzałość betonu

Numer testu	Wytrzymałość betonu, kostki o boku 150 mm [MPa]	Dojrzałość betonu – wartość odczytana z aplikacji systemu pomiarowego
1	8,45	6,51
2	27,65	11,69
3	38,80	17,87
4	40,02	20,06
5	42,00	21,50
6	43,00	22,50
7	43,8	23,50
8	44,5	24,50



Krzywa dojrzałości

Optymalizacja produkcji

Możliwość wglądu w aktualną wytrzymałość betonu w elementach pozwala na optymalizowanie planowania produkcji. Nie ma potrzeby wykonywania kilku próbek do oceny wytrzymałości wczesnej. W okresie zmiennych warunków dojrzewania elementów – z zimy na wiosnę, z wiosny na lato oraz jesień/zima różnica temperatury w ciągu okresu dojrzewania może sięgać kilkunastu stopni. Przed stosowaniem systemu pomiaru dojrzałości betonu należało pobierać większą liczbę próbek betonu, a w przypadku nieosiągnięcia oczekiwanej wytrzymałości czekać z kolejnym badaniem. Obecnie pobierana jest z danej receptury jedna próbka kontrolna. System pomiaru dojrzałości wskazuje termin (godzinę) osiągnięcia wymaganej wytrzymałości. Wykonuje się tylko badanie kontrolne i łożo zostaje sprężone.

Stosowanie omawianego rozwiązania pozwoliło na następujące oszczędności:

- redukcja liczby próbek – w przypadku 250 dni roboczych, przy pełnym obłożeniu oszczędność betonu wynosi ponad 14 m³ przy założeniu produkcji wg jednej receptury. Jest to ponad 4 000 próbek. Czas wykonania, czas transportu na łożo, czas rozformowania oraz badania można oszacować na ponad 1200 roboczogodzin. Do tego należy doliczyć koszty utylizacji gruzu betonowego;

- czas produkcji – bieżąca kontrola wytrzymałości i informacja o czasie jej uzyskania pozwalają na lepsze wykorzystanie torów produkcyjnych oraz siły roboczej;

- ilość energii/ciepła – w przypadku uzyskania wytrzymałości w godzinach nocnych, można zaplanować wyłączenie ciepła. Przy standardowym procesie dojrzewania wynoszącym 8 – 10 h każda godzina ogrzewania krócej przyczynia się do oszczędności rzędu 10 – 12,5%. Przed wdrożeniem systemu

elementy były grzane nawet 4 h dłużej, co przekłada się na oszczędność i redukcję ilości CO₂ o 25%.

Zalety rozwiązania:

- mała liczba próbek wymagana do testów wytrzymałości wczesnej;
- małe zużycie sprzętu laboratoryjnego (formy, maszyny etc.) i robocizny;
- łatwe planowanie wykorzystania torów produkcyjnych;
- brak „pustych przebiegów” pracowników oczekujących na możliwość sprężenia;
- szybsze sprężenie elementów/sprężenie we właściwym momencie;
- uniknięcie zbędnego grzania torów;
- redukcja śladu węglowego.

Wady rozwiązania:

- konieczność kalibracji krzywej dojrzałości w przypadku zmian w recepturze;
- niedokładne oszacowanie/kalibracja krzywej prowadzi do błędnych wyników;
- wytrzymałość 28-dniową należy nadal sprawdzać metodami tradycyjnymi.

Wykonywanie regularnej walidacji krzywej pomiarowej pozwala na bezpieczne stosowanie zamiennego rozwiązania w postaci pomiaru dojrzałości betonu.

Podsumowanie

Użycie systemu pomiaru dojrzałości betonu pozwala zoptymalizować proces produkcji elementów prefabrykowanych i przyczynia się do znacznej redukcji śladu węglowego. Aby produkować betony niskoemisyjne, należy poza optymalizacją składu mieszanki betonowej (cementy z grupy CEM II – CEM VI, kruszywo z recyklingu, domieszki chemiczne etc.) dostosować warunki produkcji, w tym dojrzewania elementów oraz wykorzystania energii. Informacja o temperaturze oraz dojrzałości betonu pozwala w stopniu znacznym nadzorować proces produkcji.

Partner działu:

Stowarzyszenie Producentów Betonów

www.s-p-b.pl

