

Betony stosowane w konstrukcjach masywnych – nieoczywiste spojrzenie materiałowe



PAWEŁ MOFINA
CEMEX Polska Sp. z o.o.
ORCID: 0000-0001-5189-0611



PIOTR GÓRAK
CEMEX Polska Sp. z o.o.
ORCID: 0000-0003-3479-7647

W artykule przedstawiono analizę potencjalnych rozwiązań materiałowych dla betonów przeznaczonych dla konstrukcji masywnych.

Wprowadzenie

Współczesna technologia betonu zmagają się z wieloma wyzwaniami związanymi z redukcją emisyjności betonu, rozwojem ekologicznych rozwiązań materiałowych, ograniczeniem dostępności surowców do produkcji także w aspekcie ich jakości czy też stałości właściwości użytkowych. Powstają nowe rozwiązania i technologie, stosowane są coraz to nowe domieszki chemiczne oraz dodatki pozwalające świadomie zarządzać śladem węglowym produkowanych betonów i wykonanych z nich konstrukcji. Obserwowany jest również powrót, oczywiście po pewnej modyfikacji, do technologii czy też surowców doskonale sprawdzonych w przeszłości. Dotychczasowe rozwiązania recepturowe bazujące na cementach charakteryzujących się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi czy też bazujące na stosowaniu dużej ilości dodatków typu II przekształcają się w rozwiązania dopasowane do lokalnych uwarunkowań surowcowych, mając na uwadze nie tylko dostępność czy cenę, ale także logistykę dostaw. Poszukiwane i rozwijane są rozwiązania dostępne, bezpieczne i stabilne, co jednocześnie nie oznacza, że dopuszczane są kompromisy w obszarze obniżenia jakości. W przypadku rozwiązań recepturowych dla betonu przewidzianego do wbudowania

w elementy masywne najpopularniejszym i najbardziej bezpiecznym z punktu widzenia termiki dojrzewającego betonu oraz jego wytrzymałości i trwałości jest zastosowanie cementów z wysoką zawartością składników głównych pozaklinkierowych, czyli najczęściej cementów hutniczych zawierających granulowany żużel wielkopiecowy. Zastosowanie innych rodzajów cementów w tego typu elementach jest utrudnione z powodu braku innych sprawdzonych rozwiązań czy też doświadczeń z realizacji. Dodatkowo nie zawsze brany jest pod uwagę racjonalny aspekt ekologiczny oparty na analizie cyklu życia (LCA) w zakresie zastosowania produktu i jego śladu węglowego w obszarze od źródła produkcji do miejsca wbudowania, a to czasem może zwiększyć wbudowany ślad węglowy, czyniąc ekologiczną inwestycję, np. łądowną farmę wiatrową, bardziej emisyjną już na etapie dostawy surowców na budowę.

Cel przeprowadzonych analiz

Autorzy niniejszej publikacji w trakcie planowania projektu badawczego postawili szereg kluczowych pytań/zagadnień związanych z opracowaniem rozwiązania recepturowego dla konstrukcji masywnej m.in.:

- Czy rozwiązanie na cementach hutniczym CEM III/A jest jedynym możliwym?

- Czy stosowanie dodatków typu II do betonu w postaci popiołów lotnych krzemionkowych jest konieczne?
- Czy stosowany cement powinien być cementem klasy 42,5?

Założenia badawcze

Głównym założeniem było zaprojektowanie i wykonanie betonu w klasie minimum C35/45 ocenianej w czasie równoważnym po 56 dniach z przeznaczeniem do wykorzystania w konstrukcji masywnej pracującej w warunkach środowiskowych opisanych klasami ekspozycji XC4, XD1, XF1 oraz XA1.

Z uwagi na fakt, że w przypadku betonów masywnych brakuje doświadczeń z aplikacji, gdzie były stosowane cementy portlandzkie popiołowe, autorzy zdecydowali się porównać rozwiązania na cementach:

- Cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V 42,5 R
- Cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5 R-HSR
- Cement hutniczy CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA – jako cement referencyjny

Dodatkowym parametrem potwierdzającym możliwość zastosowania wybranych cementów do projektu była kwalifikacja tych cementów jako cementy o niskim ciepłe hydratacji (LH) zgodnie z normą PN-EN 197-1:2012P [1] na podstawie wyników ciepła

Tab. 1. Podstawowe właściwości zastosowanych w projekcie cementów

Właściwość fizykochemiczna	Jednostka	CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	CEM II/B-V 32,5 R-HSR	CEM II/A-V 42,5 R
		Rudniki	Chełm	Chełm
Wytrzymałość na ściskanie D2	MPa	13,6	13,6	24,7
Wytrzymałość na ściskanie D28	MPa	57,8	41,1	53,1
Początek wiązania	min	175	255	160
Koniec wiązania	min	225	295	220
Ciepło hydratacji	J/g	198	211	262

hydratacji oznaczonego zgodnie z normą EN 196-9. Wszystkie wytypowane cementy ze względu na uzyskane wartości ciepła hydratacji poniżej 270 J/g kwalifikują się jako „LH” zgodnie z normą PN-B 19707 [2].

Podstawowym założeniem opracowanych receptur była sumaryczna ilość spoiwa (cement lub cement + popiół lotny krzemionkowy) wynosząca 330 kg/m³ oraz jednakowy wskaźnik w/s (w/c+p). Mając na uwadze różne wytrzymałości stosowanych cementów oraz potencjalne możliwości współpracy układu cement i popiół lotny krzemionkowy, w tym możliwości normowe, zaproponowano następujące receptury zgodne z tab. 2.

Wyniki z przeprowadzonych badań podstawowych

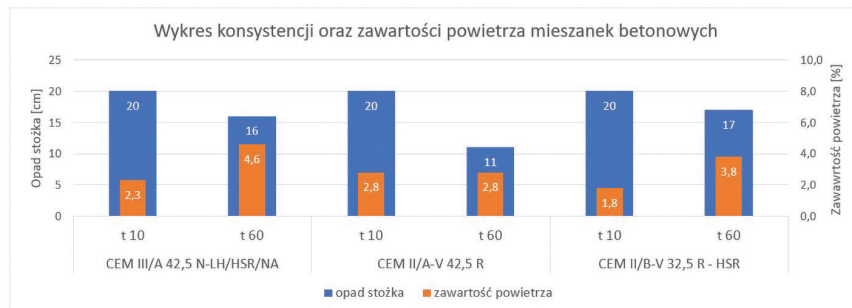
Badania mieszanek betonowych w zakresie cech reologicznych wyrażonych konsystencją i zawartością powietrza wykonano dla wszystkich receptur w czasie 5 i 60 minut od zadozowania wody zarobowej. Uzyskane po 60 minutach wyniki badań spełniły zakładane kryteria oceny wyrażone klasą konsystencji S3. Graficzne zestawienie wyników badań zostało zaprezentowane na rys. 1.

Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono odpowiednio po 2, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania próbek w warunkach normowych. Wyniki badań zostały zaprezentowane w tab. 3.

Analizując uzyskane wyniki wytrzymałości, można stwierdzić, że założenia spełnienia warunku wytrzymałości dla klasy C35/45 po 56 dniach dojrzewania spełniły rozwiązania recepturowe wykonane na cementach CEM III/A 42,5 N i CEM II/B-V 32,5 R ($f_{cm} \geq f_{ck} + 4$ MPa). W przypadku rozwiązania opartego na cemencie CEM II/A-V 42,5 R wpływ na niższy wynik wytrzymałości miała jakość popiołu lotnego deklarowanego przez producenta jako zgodny z normą PN-EN 450-1 [3], [6]. Według późniejszych badań autorów popiół lotny zastosowany w projekcie badawczym nie spełniał wymagań normy w zakresie aktywności pucolanowej po 28 i 90 dniach. Zgodnie z zapisami tablicy F.1 polskiego uzupełnienia do normy PN-EN 206 [4, 5] [7, 8] w przypadku stosowania w recepturze cementu CEM II/A wraz z popiołem lotnym możliwe jest obniżenie zawartości cementu

Tab. 2. Składy receptur

		CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA	CEM II/A-V 42,5 R	CEM II/B-V 32,5 R – HSR
Nr próby		1	2	3
Cement	[kg]	300	280	330
Popiół lotny krzem.	[kg]	30	50	-
Wef	[kg]	160	160	160
w/c		0,53	0,57	0,48
w/(c+p)		0,48	0,48	0,48
plastyfikator	[%]	0,55	0,55	0,55
superplastyfikator	[%]	0,28	0,22	0,23



Rys. 1. Wyniki z porównania uzyskanych konsystencji oraz zawartości powietrza

w stosunku do pierwotnej wartości (300 kg/m³ dla założonego lub przyjętego w projekcie zestawu klas ekspozycji) do 280 kg/m³ przy wykorzystaniu założonej wartości współczynnika $k=0,4$ według punktu 5.2.5.2.2 tychże norm. Jednakże jest to założenie prawdziwe i spełniające założenia, jeżeli popiół lotny, jaki jest stosowany, spełnia wymagania normy PN-EN 450-1 w zakresie właściwości fizycznych i chemicznych. W przeciwnym razie projektowany beton może nie osiągnąć zakładanych parametrów wytrzymałościowych.

Analiza ciepła hydratacji rozwiązań spoiwowych

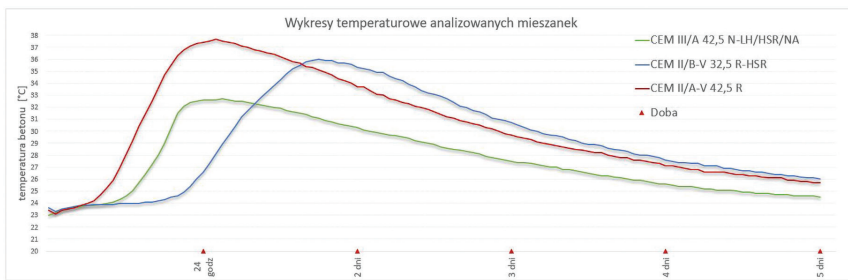
W przypadku betonów przeznaczonych do wykonywania konstrukcji maszynych bardzo istotną rolę odgrywa ciepło hydratacji, a w zasadzie ilość i szybkość wydzielania ciepła z egzotermicznej reakcji uwodnienia cementu [6], [7]. To ten parametr powinien decydować o możliwości zastosowania danego rozwiązania w elementach maszynych. Badanie ciepła hydratacji polega na

umieszczeniu zalanej mieszaną betonową formy w walcowej i izolowanej „kabinie” hydratacyjnej i prowadzeniu rejestracji temperatury dojrzewającego betonu. Względnie stabilna temperatura otoczenia oraz zastosowana specjalna izolacja termiczna w beczce o znanej izolacyjności pozwalają na dokładne obliczenie strat ciepła w układzie. W trakcie trwania badania rejestracja temperatury odbywała się za pomocą dwukanałowego rejestratora firmy TESTO model 175 T3 i termopar typu T, przy czym kanał nr 1 rejestrował temperaturę panującą w otoczeniu beczki hydratacyjnej, a kanał nr 2 temperaturę dojrzewającego i twardejącego betonu. Rejestracja temperatury odbywała się przez 10 dni z interwałem 60-minutowym, co umożliwiło wyznaczenie krzywej rozwoju temperatury w dojrzewającym betonie z punktem charakterystycznym dla maksimum za pomocą programu 4C-Heat [8]. Pozyskane dane pozwoliły na wykreślenie krzywej rozwoju ciepła hydratacji mieszanek betonowej – przedstawiono na rys. 2.

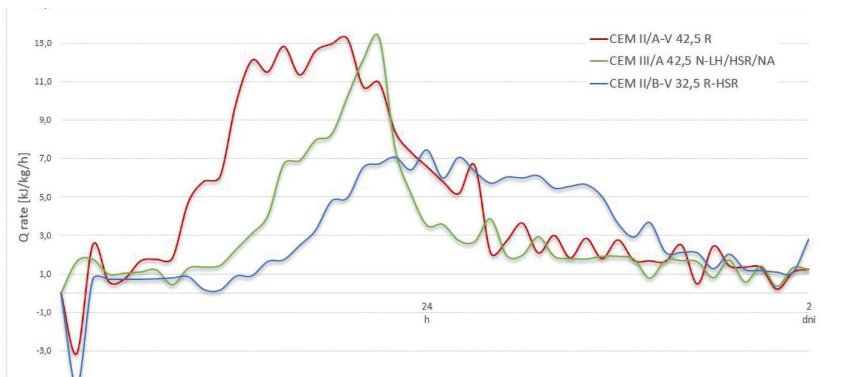
Tab. 3. Zestawienie wyników badań i ocena wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Klasa wytrzymałości	Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie [MPa]					Kryterium $f_{ck} + 4$ MPa*
		f_{c2}	f_{c7}	f_{c28}	f_{c56}	f_{c90}	
1 (CIII/A4N+P)	C35/45	9,2	17,2	36,1	55,3	56,9	49,0
2 (CII/A4R+P)		15,1	27,1	37,6	45,7	49,2	
3 (CII/B3R)		10,0	24,9	39,5	51,0	61,3	

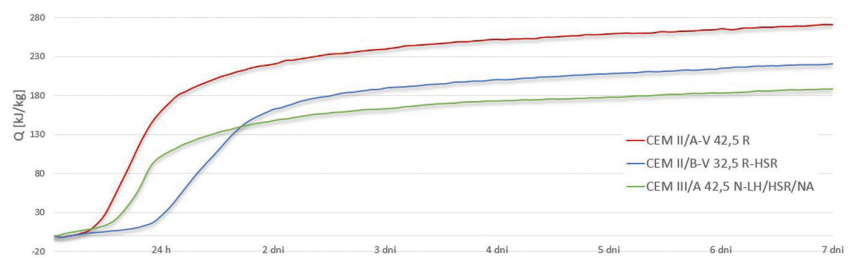
*Kryterium dla oceny po 56 dniach dojrzewania



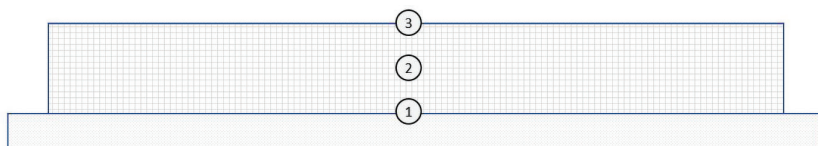
Rys. 2. Zestawienie temperatury dojrzewających mieszanek betonowych do 5 dnia



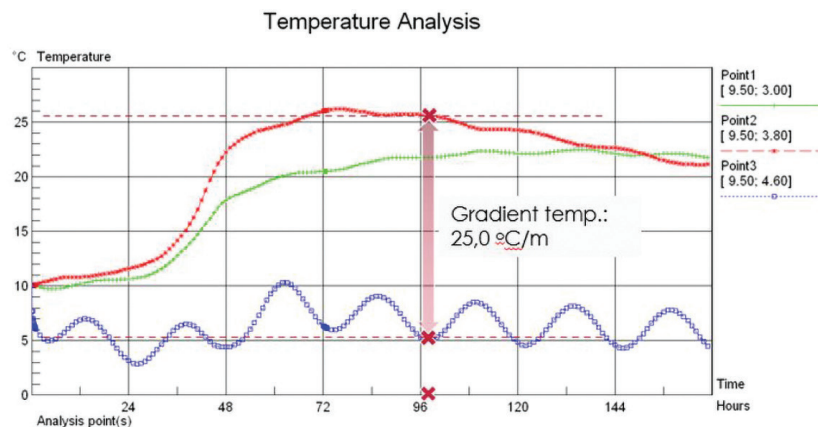
Rys. 3. Szybkość wydzielania ciepła (Q rate)



Rys. 4. Ciepło skumulowane (Q)



Rys. 5. Poglądowy rysunek przekroju płyty i rozmieszczenia czujników



Rys. 6. Wykres symulowanego rozkładu temperatury w elemencie masywnym dla receptury nr 1 – symulacja nr 1

Można zauważyć, że ilość ciepła powstałego podczas hydratacji betonu zależy po pierwsze i przede wszystkim od rodzaju cementu oraz jego składu (składniki główne pozaklinkierowe), ale również od ilości cementu w m^3 mieszanki betonowej [9]. Zebrane dane odnośnie do każdej z mieszanek z beczki hydratacyjnej pozwalają po przeniesieniu do arkusza kalkulacyjnego na analizę szybkości wydzielania ciepła oraz wielkość ciepła skumulowanego, które zostały zestawione na rys. 3. i 4.

Szybkość przyrostu temperatury na skutek procesów hydratacji jest zależna od ilości ciepła wydzielanego podczas hydratacji jednostki masy cementu w jednostce czasu.

Niski współczynnik przewodzenia ciepła betonu (λ) w początkowym okresie hydratacji cementu i twardnienia betonu wewnątrz konstrukcji powoduje kumulację ciepła [10]. Różnica pomiędzy temperaturą wnętrza betonu a powierzchnią zewnętrzną mającą często bezpośredni kontakt z warunkami temperaturowymi otoczenia jest tym większa, im większe jest ciepło hydratacji cementu. Różnica temperatury w odniesieniu do odległości 1 m nosi nazwę gradientu temperaturowego i zgodnie z przyjętymi zasadami nie powinna przekraczać $20^\circ C/m$.

Symulacja komputerowa rozwoju temperatury w elemencie masywnym

Na podstawie pozyskanych danych z kabiny hydratacyjnej wykonano szczegółową symulację rozkładu temperatury w elemencie za pomocą programu 4C-Temp&Stress. Na potrzeby analizy zostały przyjęte wymiary fundamentu oraz warunki środowiskowe, w których będzie dojrzewał beton. Przyjęte zostały mniej korzystne warunki, tj. niska temperatura otoczenia.

- Grubość płyty 1,6 m.
- Temperatura mieszanki betonowej $10^\circ C$.
- Temperatura otoczenia w okresie pierwszych 7 dób: $0^\circ C$ (noc) / $7^\circ C$ (dzień).
- Prędkość wiatru 5 m/s.
- Szalunek płytowy gr. 21 mm (przez 3 doby).
- Izolacja termiczna powłokowa w postaci folii bąbelkowej.

Rozmieszczenie czujników temperatury na potrzeby symulacji przedstawia rys. 5.

Punkt 1 – dół płyty fundamentowej (0,05 m od powierzchni styku z podbudową).

Punkt 2 – środek płyty (0,8 m – środek).

Punkt 3 – góra płyty (0,05 m od górnej powierzchni).

Symulowany rozkład temperatur w elemencie masywnym między punktami 2–3, czyli między środkiem płyty masywnej a wierzchem fundamentu, dla analizowanych rozwiązań przedstawiają rys. 6–10.

Na rys. 6. przedstawiono rozkład temperatury wariantu opartego na recepturze nr 1,

natomiast przyjęto założenie, że beton dojrzewa w konstrukcji bez powłokowej izolacji termicznej. Najwyższy gradient temperatury został odnotowany po około 96 godzinach i wynosi 25°C, czyli przekracza dopuszczalną wartość gradientu o 5°C.

Na rys. 7. przedstawiono rozkład temperatur wariantu opartego na recepturze nr 1, natomiast w tym przypadku przyjęto założenie, że beton dojrzewa w konstrukcji z powłokową izolacją termiczną w postaci pojedynczej warstwy folii bąbelkowej. Najwyższy gradient temperatury został odnotowany po około 96 godzinach i wynosi 18,1°C, czyli nie przekracza dopuszczalnej wartości gradientu.

Na rys. 8. przedstawiono rozkład temperatury wariantu opartego na recepturze nr 2 przy założeniu, że beton dojrzewa w konstrukcji z pojedynczą powłokową izolacją termiczną. Najwyższy gradient temperatury został odnotowany po około 96 godzinach i wynosi 26,3°C, czyli przekracza dopuszczalne wartości gradientu o 6,3°C.

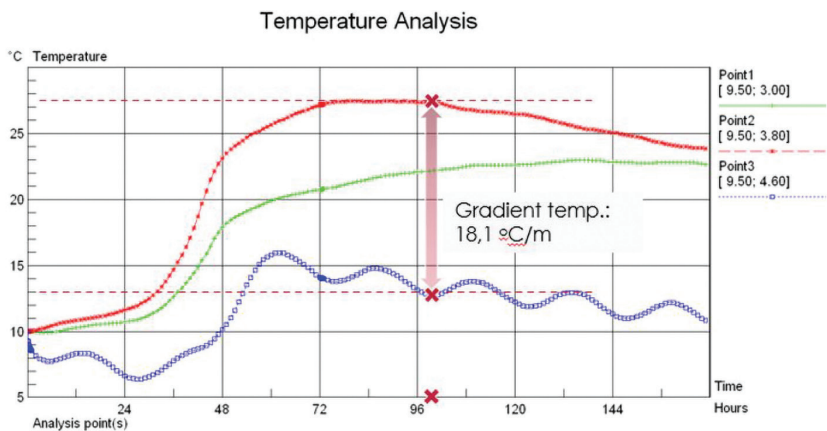
Na rys. 9. przedstawiono rozkład temperatury wariantu opartego na recepturze nr 2 przy założeniu, że beton dojrzewa w konstrukcji z podwójną powłokową izolacją termiczną. Najwyższy gradient temperatury został odnotowany ponownie po 96 godzinach i wynosi 20,0°C, czyli można przyjąć, że spełnia wymaganie dla dopuszczalnej wartości gradientu.

Na rys. 10. przedstawiono rozkład temperatury wariantu opartego na recepturze nr 3 przy założeniu, że beton dojrzewa w konstrukcji z pojedynczą powłokową izolacją termiczną. Najwyższy gradient temperatury został odnotowany po ponad 144 godzinach i wynosi 20,0°C, czyli nie przekracza dopuszczalnej wartości gradientu.

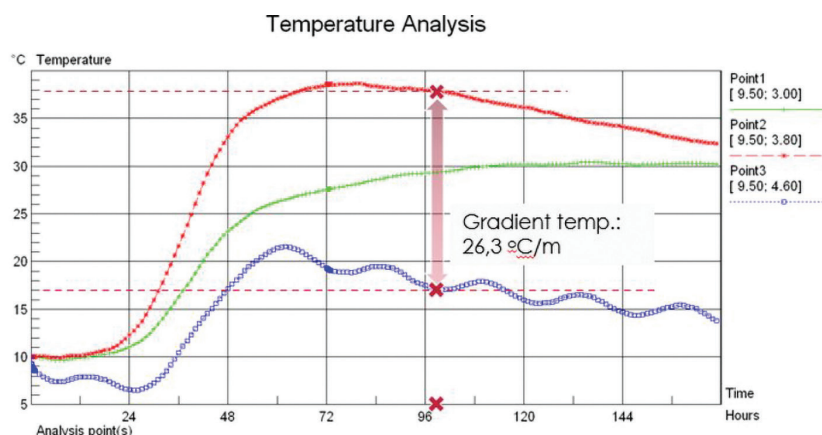
Wnioski

Nawiązując do pytań postawionych na początku niniejszego artykułu, można stwierdzić, że:

- rozwiązania na cementach CEM III/A nie są jedynym możliwym rozwiązaniem dla betonów masywnych, czego potwierdzeniem są



Rys. 7. Wykres symulowanego rozkładu temperatury w elemencie masywnym dla receptury nr 1 – symulacja nr 2



Rys. 8. Wykres symulowanego rozkładu temperatury w elemencie masywnym dla receptury nr 2 – symulacja nr 3

pozytywne wyniki uzyskane na cemente CEM II/B-V 32,5 R-HSR;

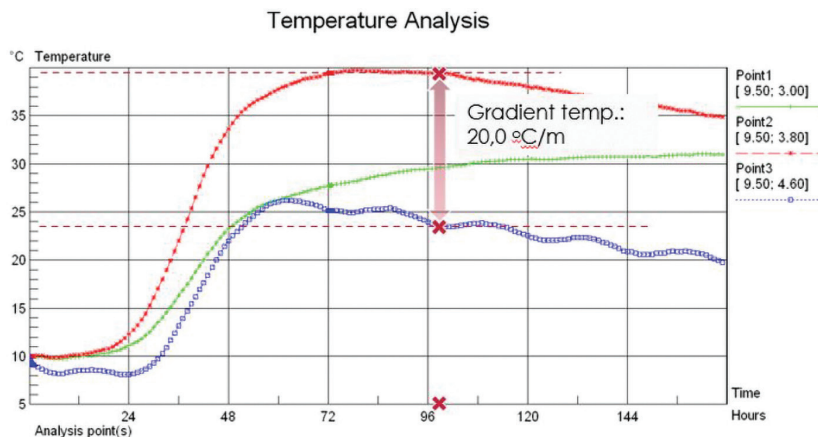
- stosowanie dodatków typu II do betonu, czyli popiołów lotnych krzemionkowych, nie jest konieczne, jeśli zostanie dobrany odpowiedni rodzaj i klasa cementu;
- stosowany cement może, ale nie musi być cementem klasy 42,5 – odpowiednio zaprojektowana receptura betonu pozwala na uzyskanie zakładanych klas wytrzymałości.

Dodatkowo analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że:

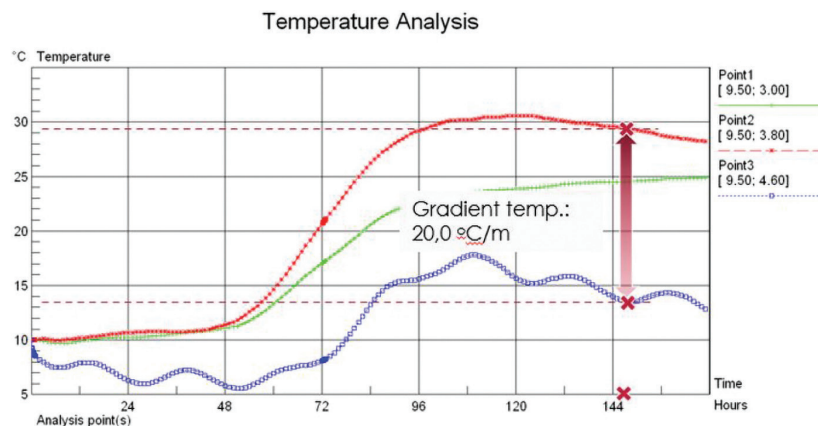
- Cement CEM III/A oraz CEM II/B-V charakteryzują się zbliżoną wartością ciepła hydratacji (J/g), natomiast zauważalnie różnią się charakterystyką i tempem wydzielania ciepła.
- Betony wykonane na cementach CEM II/B-V potwierdzają swoją przydatność do zastosowania w betonach masywnych.

Tab. 4. Zestawienie przeprowadzonych symulacji temperaturowych z oceną ryzyka spękań

Nr symulacji	Receptura	Izolacja termiczna	Temperatura maksymalna [T _{max}]	Różnica temperatur ΔT (p2-p3)	Gradient °C/1 m	Ryzyko spękań
			[°C]	[°C]	[°C]	
1	1 (CIIIA4N+P)	Brak	32,7	20,5	25,0	TAK
2	1 (CIIIA4N+P)	1x folia bąbelkowa		14,5	18,1	NIE
3	2 (CIIIV4R+P)	1x folia bąbelkowa	37,7	21,0	26,3	TAK
4	2 (CIIIV4R+P)	2x folia bąbelkowa		16,0	20,0	NIE
5	3 (CIIIV3R)	1x folia bąbelkowa		35,9	16,0	20,0



Rys. 9. Wykres symulowanego rozkładu temperatury w elemencie masywnym dla receptury nr 2 – symulacja nr 4



Rys. 10. Wykres symulowanego rozkładu temperatury w elemencie masywnym dla receptury nr 3 – symulacja nr 5

- Jakość zastosowanego popiołu lotnego jest bardzo istotna z punktu widzenia uzyskanych właściwości betonu. W trakcie projektowania rozwiązania recepturowego i wykonywania badań wstępnych należy potwierdzić jakość stosowanego dodatku II w zakresie podstawowych cech fizycznych i chemicznych.
- Bardzo istotna jest rola termicznej izolacji powierzchniowej fundamentu chroniącej przed zbyt szybką ucieczką ciepła w strefach przypowierzchniowych fundamentu, co prowadzi do silnego wzrostu gradientu powyżej dopuszczalnych 20°C.
- Mieszanka wykonana na cemencie CEM II/A-V 42,5 R może być z pewnymi rygorystycznymi założeniami brana pod uwagę do betonowania elementu masywnego, a mianowicie:
 - a. zagwarantowanie solidnej powierzchniowej izolacji termicznej;
 - b. łagodniejsze warunki betonowania niż założone w symulacji (wyższa temp. otoczenia);
 - c. właściwego doboru dobrej jakości popiołu lotnego zgodnego z wymaganiami normy PN-EN 450-1.

Bibliografia

- [1] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [2] PN-B 19707. 2013-10. Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [3] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [4] PN-EN 206+A1:2016-16 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [5] PN-B 06265:2018-10. Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
- [6] Kiernożycki W., Betonowe konstrukcje masywne, teoria wymiarowanie realizacja, Kraków: Polski Cement Sp. z o.o., 2003.
- [7] Neville A., Właściwości betonu, Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012.
- [8] Instrukcje obsługi programów 4C-Heat, 4C-Tem-p&Stress.
- [9] Gajewski R., Szabat Ł., System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – przykłady praktycznego zastosowania, „Beton Technologie i Architektura” Wydanie 3(31)/2005.
- [10] Jabłoński M., Gawęda I., Gawin D., Wpływ temperatury na kinetykę procesu hydratacji różnych cementów.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.9590

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Mofina Paweł, Górak Piotr, 2022, Betony stosowane w konstrukcjach masywnych – nieoczyszczone spożycie materiałowe, „Builder” 9 (302).

DOI: 10.5604/01.3001.0015.9590

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę potencjalnych rozwiązań materiałowych dla betonów przeznaczonych dla konstrukcji masywnych. Głównym założeniem autorów

było potwierdzenie możliwości zastosowania innych niż oparte na cemencie CEM III/A kompozycji spoiwowych zapewniających optymalne i bezpieczne warunki termiczne w dojrzewających masywnych elementach. Finalnym elementem analizy było wykonanie symulacji rozwoju temperatury w przykładowej masywnej płycie fundamentowej, która była ostateczną weryfikacją proponowanych rozwiązań materiałowych.

Słowa kluczowe: beton, konstrukcje masywne, temperatura, cement, wytrzymałość

Abstract: CONCRETE USED IN MASSIVE STRUCTURES – A NON-OBVIOUS LOOK ON MATERIAL. The article presents analyze potentially materials solutions which we meet with concrete which is used in solid constructions. Main authors' assumption there was a confirmation possibility of usage different than based on cement CEM III/A binder compositions which provide optimally and safety thermal conditions in maturing massive elements. Final element this analyze was doing temperature development simulation in example of massive slab foundation which was finally verification of proposal material solutions.

Keywords: concrete, massive structures, temperature, cement, compressive strength

Rozwój i wdrażanie technologii materiałów budowlanych CEMEX jest częścią globalnego networku ds. badań i rozwoju, na czele z Centrum Badań CEMEX z siedzibą w Szwajcarii.

Prawa autorskie © 2022 / CEMEX Innovation Holding Ltd., Szwajcaria; Wszystkie prawa zastrzeżone.