

**Batog Maciej**

*Góraźdże Cement S.A.*

**Golda Artur**

*Centrum Technologiczne BETOTECH Sp. z o.o.*

**Giergiczny Zbigniew**

*Politechnika Śląska w Gliwicach, Góraźdże Cement S.A.*

# **POPIÓŁ LOTNY SKŁADNIKIEM BETONU MASYWNEGO NA FUNDAMENTY NOWYCH BLOKÓW ENERGETYCZNYCH**

## **STRESZCZENIE**

---

*Przedstawiono wytyczne do projektowania składu betonów masywnych z uwzględnieniem konieczności obniżenia ciepła wydzielanego podczas procesu hydratacji, jak i zapewnienia odpowiednich właściwości roboczych dla mieszanki betonowej w odpowiednio długim okresie. Dokonano analizy wpływu, zarówno składników betonu (cementu, popiołu lotnego krzemionkowego) na właściwości istotne dla konstrukcji masywnych.*

---

## **1. WPROWADZENIE**

Nakłady inwestycyjne w infrastrukturę energetyczną w Polsce, jakie mają miejsce w ostatnim okresie czasu, sprawiły, że betony masywne znajdują częściej zastosowanie w praktyce budowlanej. W przypadku betonów masywnych niezwykle ważna jest znajomość wpływu poszczególnych etapów wykonywania elementu, począwszy od projektu mieszanki betonowej, a skończywszy na pielęgnacji na właściwości mechaniczne oraz trwałościowe konstrukcji. Podstawowy problem w zabudowie konstrukcji (obiektów) masywnych dotyczy rozkładu temperatur w elemencie. Temperatura zabudowanego betonu, po przekroczeniu wartości progowych, może doprowadzić do powstania

zarysowań termicznych oraz niezamierzonej dylatacji (spękań), które mogą znacznie obniżyć trwałość.

W niniejszej pracy przedstawiono zasady projektowania składu betonów masywnych z uwzględnieniem konieczności obniżenia ciepła wydzielanego podczas procesu hydratacji. Istotną rolę w tym procesie ma właściwy dobór cementu i dodatku typu II (popiołu lotnego krzemionkowego). Zaprezentowano wyniki badań własnych obejmujące właściwości mieszanki oraz stwardniałego betonu masywnego z zastosowaniem cementów hutniczych CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA oraz popiołu lotnego krzemionkowego.

## **2. DOBÓR SKŁADU MIESZANKI BETONOWEJ DO ZASTOSOWAŃ W KONSTRUKCJACH MASYWNYCH**

Odpowiedni dobór składników mieszanki betonowej ma kluczowe znaczenie dla poprawności wykonania konstrukcji masywnej. Na etapie projektowania składu mieszanki betonowej należy uwzględnić nie tylko właściwości normowe betonu takie jak: wytrzymałość na ściskanie, czy konsystencja. Kompleksowe podejście musi uwzględniać również pozostałe czynniki kształtujące obciążenia pośrednie betonu takie jak: wymiary elementu, obecność przerw dylatacyjnych, prognozowane temperatury otoczenia przy których prowadzona będzie zabudowa, sposób zabudowy i możliwości prowadzenia pielęgnacji wczesnej.

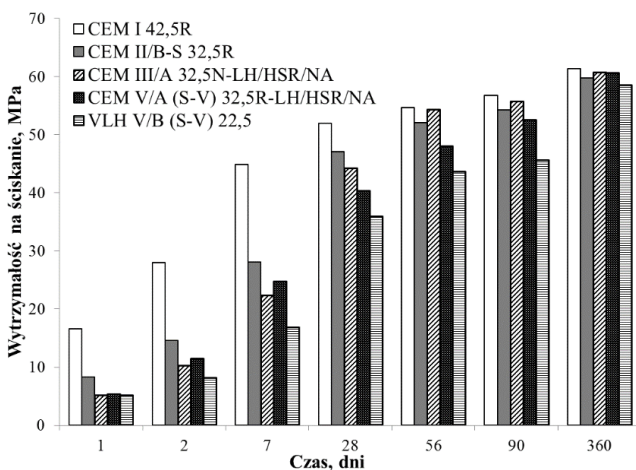
Szczególnego znaczenia w betonowych konstrukcjach masywnych nabierają efekty termiczne (egzotermiczne) związane z hydratacją cementu. Powstająca w wyniku wydzielanego ciepła w procesie hydratacji cementu, różnica temperatur pomiędzy wnętrzem, a stosunkowo szybko chłodzoną powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego, prowadzi do powstania naprężeń termicznych. Może to w ekstremalnych warunkach skutkować powstawaniem rys w całej objętości elementu betonowego, prowadząc do obniżenia jego trwałości i skrócenia okresu użytkowania [1÷3]. W celu minimalizacji wpływu naprężeń termicznych na trwałość konstrukcji betonowej stosuje się szereg zabiegów technologicznych takich jak chłodzenie mieszanki betonowej, betonowanie etapami, odpowiedni dobór składników betonu, itp. Jedną z najefektywniejszych metod jest „wprowadzenie” z zastosowanym cementem (spoiwem) minimalnej ilości ciepła z hydratacji cementu [4]. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie w składzie betonu cementów zawierających w swoim składzie znaczną zawartość popiołu lotnego i/lub granulowanego żużla wielkopieczowego – CEM II÷CEM V i VLH III÷VLH V (tabela 1), mając jednocześnie na uwadze, że rozwój właściwości mechanicznych tych cementów jest

wolniejszy niż cementu portlandzkiego CEM I (rys.1) [5]. W przypadku konstrukcji masywnych szybkość przyrostu wytrzymałości jest jednak sprawą drugorzędną, celem nadrzędnym staje się zapewnienie trwałości takiej konstrukcji.

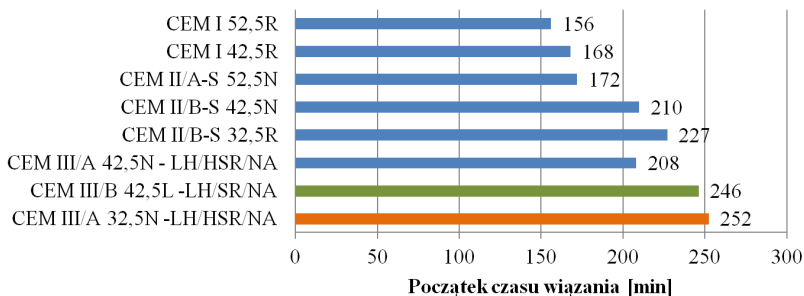
Nie bez znaczenia jest także odpowiednio długi czas początku wiązania (rys. 2) oraz możliwość kształtowania odporności betonu na korozyjne oddziaływania środowiska (właściwości specjalne cementu takie jak odporność na agresję siarczanową, chlorkową i alkaliczną) [5].

**Tabela 1.** Skład cementu

Rodzaj cementu	Zawartość, % wag.			
	Klinkier portlandzki	Granulowany żużel wielkopiecowy	Popiół lotny krzemionkowy	Kamień wapienny
CEM I 42,5R	95,7	-	-	4,3
CEM II/B-S 32,5R	68,3	27,1	-	4,6
CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA	41,1	58,9	-	-
CEM III/B 42,5L -LH/SR/NA	30,0	70,0	---	---
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA	62,2	18,2	19,6	-
VLH V/B (S-V) 22,5	32,3	34,4	33,3	-

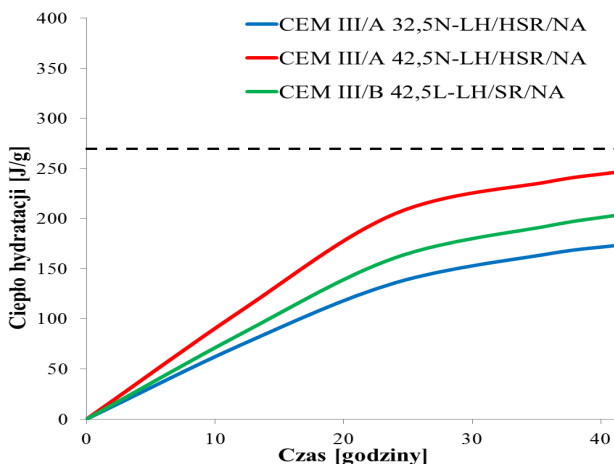


Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie betonów



Rys. 2. Początek czasu wiązania różnych rodzajów cementów

Hydratacja cementu, jak wcześniej wspomniano, to proces egzotermiczny w trakcie którego wydzielane jest ciepło. Ilość wydzielonego ciepła, jest zależna od ilości i składu mineralnego klinkieru portlandzkiego zastosowanego w składzie cementu. Najniższym ciepłem hydratacji charakteryzują się cementy hutnicze CEM III (rys. 3). Wynika to z dominacji w składzie cementu granulowanego żużla wielkopiecowego.



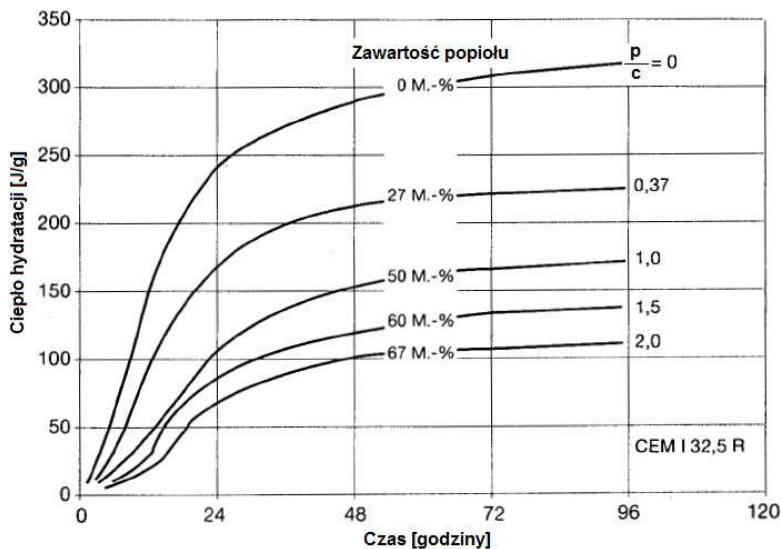
**Rys. 3.** Ciepło hydratacji cementów hutniczych CEM III/A,B

Stosowanie dodatków mineralnych w składzie cementu prowadzi również do opóźnienia czasu wystąpienia temperatury maksymalnej w betonie (tabela 2). Dla betonów zawierających cement hutniczy CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA i cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R- LH/HSR/NA, zawierający w swoim składzie żużel oraz popiół lotny krzemionkowy, temperatura maksymalna została zaobserwowana 20 godzin później niż dla betonu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. W przypadku betonu na cemencie VLH V/B (S-V) 22,5, który zawierał w swym składzie najwięcej dodatków mineralnych maksymalna temperatura została zarejestrowana 21 godzin później niż dla betonu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R.

Ze względu na konieczność dodatkowego ograniczenia ciepła hydratacji oraz uzyskania odpowiedniej urabialności i pompowalności mieszanki betonowej, stosowane są dodatki typu II. Najbardziej praktycznym, a zarazem powszechnym w stosowaniu jest popiół lotny krzemionkowy, który pozytywnie wpływa, zarówno na właściwości mieszanki betonowej (zachowanie konsystencji w czasie, pompowalność, urabialność), jak i na obniżenie ciepła hydratacji spoiwa (mieszaniny cementu z popiołem lotnym) (rys.4) i poprawę wytrzymałości mechanicznej stwardniałego betonu, zwłaszcza po dłuższym okresie twardnienia.

**Tabela 2.** Charakterystyczne temperatury twardnienia betonu (kostka betonowa 40 x 40 x 40 cm)

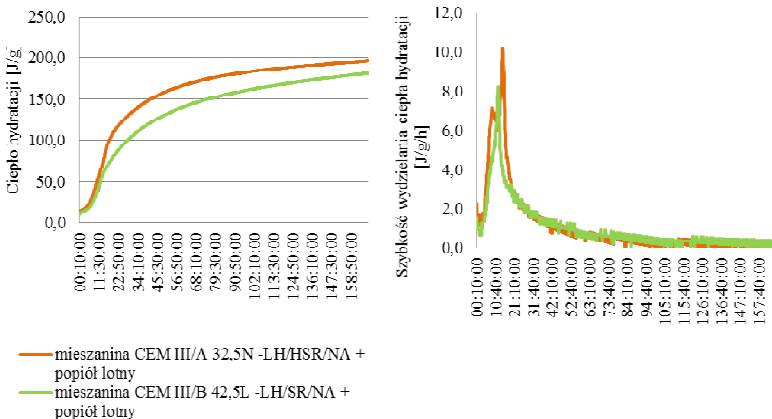
Właściwość	CEM I 42,5 R	CEM II/B-S 32,5R	CEM III/A 32,5N- LH/HSR/NA	CEM V/A (S-V) 32,5R- LH/HSR/NA	VLH V/B (S-V) 22,5
Temperatura początkowa, $T_p$ , °C	21,2	19,6	19,7	17,0	22,6
Temperatura maksymalna, $T_{max}$ , °C	55,7	47,0	41,1	38,7	35,6
Wzrost temperatury, $\Delta T = T_{max} - T_p$ , °C	34,5	27,4	21,4	21,7	13,0
Czas wystąpienia maksymalnej temperatury, hh:mm	32:51	37:00	51:18	51:51	53:36



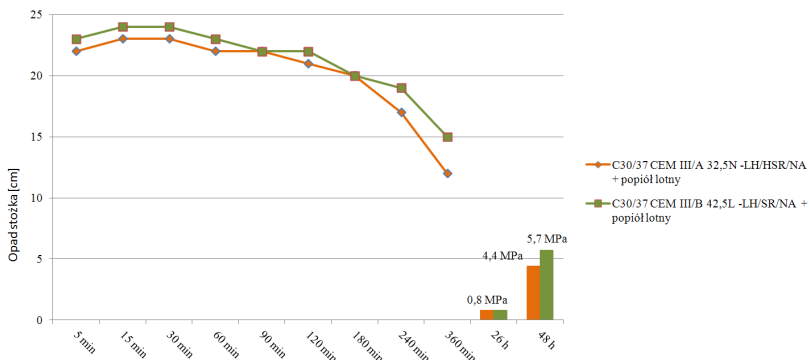
**Rys. 4.** Rozwój ciepła hydratacji spoiw cement/popiół lotny przy  $w/(c+f) = 0,6$  zmierzony testem termosowym [6]

Dzięki zastosowaniu dodatku popiołu lotnego krzemionkowego oraz cementów hutniczych CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA i CEM III/A 42,5L – LH/SR/NA, w betonach masywnych, możliwe było uzyskanie bardzo niskiego ciepła hydratacji spoiwa w betonie (rys. 5) oraz wydłużonego czasu zachowania konsystencji (wydłużonego początku wiązania betonu).

Nowe podejście do projektowania konstrukcji masywnych wymaga spełnienia przez dostarczony na budowę beton, coraz to wyższych klas wytrzymałości na ściskanie. Obecnie podstawową klasą w tego typu konstrukcjach jest klasa wytrzymałość na ściskanie C30/37. Spełnienie warunku wytrzymałościowego przy jednoczesnej redukcji ilości spoiwa w betonie powoduje konieczność zastosowania nowoczesnych rozwiązań w zakresie domieszek chemicznych do betonu. W betonach masywnych fundamentów maszynowni zastosowany został układ domieszek chemicznych bazujących na superplastyfikatorze polikarboksyłowym MasterGlenium SKY 686, plastyfikatorze MasterPozzolith 18 BVC oraz domieszce opóźniająca wiązanie MasterSet R 43. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania oraz odpowiedniej kompozycji spoiwa (mieszanki cementowo-popiołowej) możliwe było uzyskanie zakładanego zakresu konsystencji w czasie powyżej 4 godzin, oraz czasu opóźnienia początku wiązania wynoszącego ponad 24 godziny (rys. 6). Umożliwiło to poprawne przeprowadzenie procesu zabudowy mieszanki betonowej oraz eliminację obszarów „zimnych styków”, które mogłyby być zagrożeniem dla monolityczności konstrukcji.



**Rys. 5.** Całkowite ciepło hydratacji oraz szybkość wydzielania ciepła hydratacji dla spoiw zastosowanych w fundamentowych masywnych w budowie nowych bloków energetycznych.



**Rys. 6.** Zmiana konsystencji w czasie oraz wytrzymałość wczesna betonów masywnych zabudowanego w fundamentach bloków energetycznych

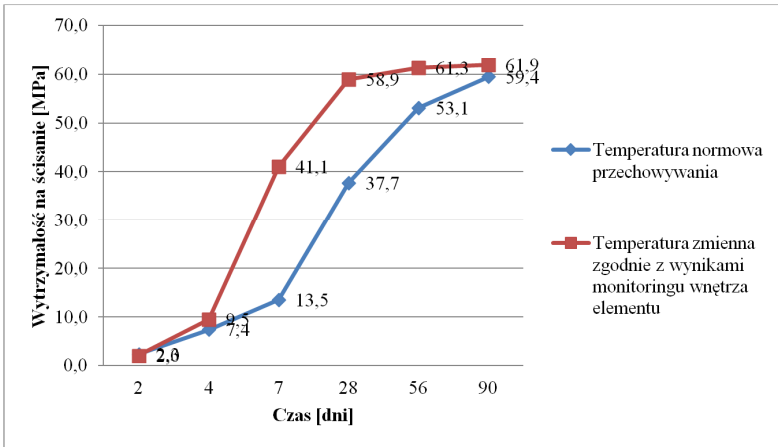
Fundamenty masywne (o objętości od 11 tys. m<sup>3</sup> do 18,5 tys. m<sup>3</sup>) wykonane zostały w oparciu o zastosowanie cementu hutniczego CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA. Ponieważ termin realizacji jednego z fundamentów masywnych (fundament o objętości 18,5 tys. m<sup>3</sup>), przypadał na okres wysokich temperatur otoczenia (miesiąc lipiec temperatura zewnętrzna ok. 35°C) zdecydowano się na zastosowanie, w składzie betonu masywnego, cementu hutniczego CEM III/B 42,5L – LH/SR/NA (zawierającego blisko 70% granulowanego żużla wielkopieczowego), który umożliwił dodatkową redukcję wydzielonego ciepła hydratacji w wyniku osiągnięcia wyższych wytrzymałości na ściskanie (zmniejszenie ilości cementu w składzie betonu).

### 3. WYNIKI BADAŃ PRZEPROWADZONE W TRAKCIE REALIZACJI FUNDAMENTÓW MASYWNYCH

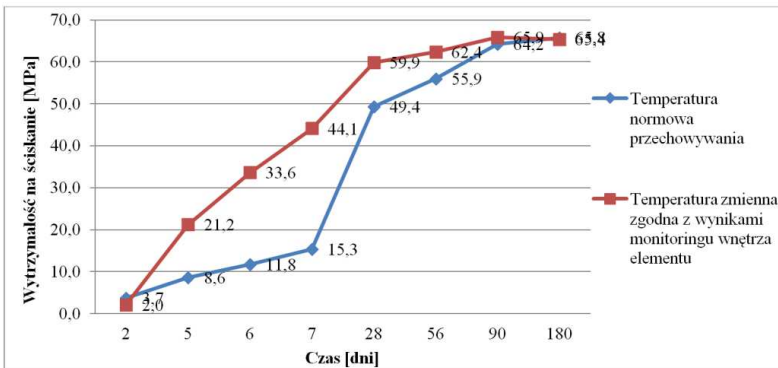
W trakcie realizacji fundamentów nowych bloków energetycznych prowadzono szereg badań, których celem była weryfikacja założeń projektowych. Dane uzyskane w trakcie pierwszych realizacji wykorzystane zostały przy projektowaniu składu mieszanek betonowych przeznaczonych dla budowy fundamentu kotłowni o objętości 18,5 tys. m<sup>3</sup> oraz fundamentu kotłowni o objętości 22,5 tys. m<sup>3</sup>. W ramach kontroli wykonane zostały m.in.: badania wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu (rys. 7 i 8) oraz pomiary rozkładu temperatur w wykonanych elementach (rys. 9 i 10). Badania wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzone zostały, zarówno na próbach przechowywanych w warunkach normowych, jak



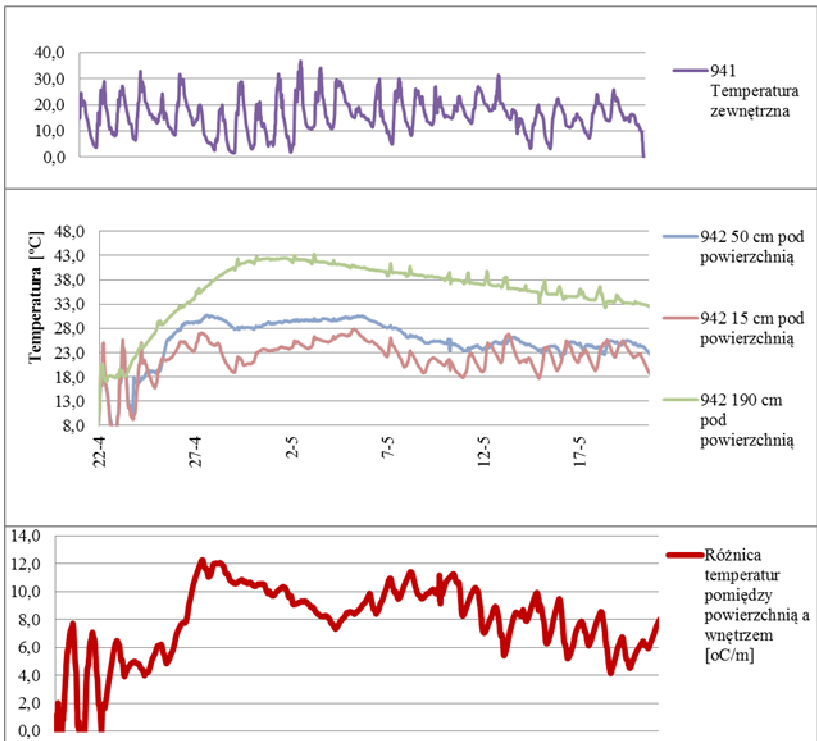
również przechowywanych w wodzie w temperaturze odpowiadającej temperaturze panującej w danym momencie we wnętrzu konstrukcji. Zabudowany beton uzyskał zakładaną klasę wytrzymałości na ściskanie C30/37 w terminie 56 dni dla betonu wykonanego cementu hutniczego CEM III/A 32,5N – LH/HSR/NA oraz po upływie 28 dni dla betonu wykonanego z cementu hutniczego CEM III/B 42,5L – LH/SR/NA.



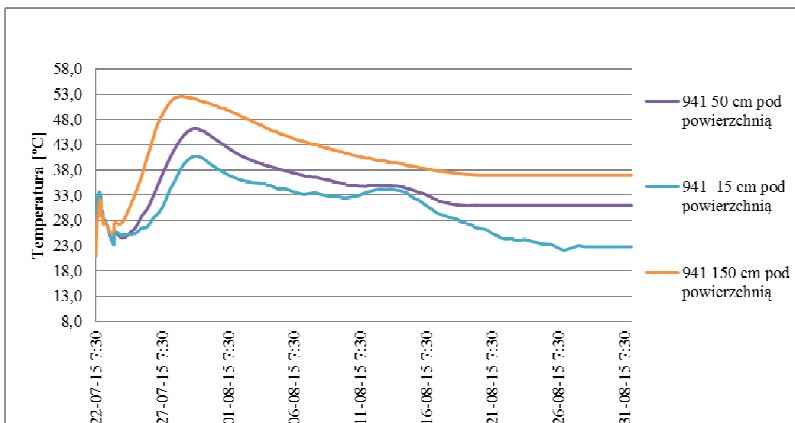
**Rys.7.** Wytrzymałość na ściskanie betonu uzyskana podczas realizacji fundamentu masywnego z zastosowaniem cementu hutniczego CEM III/A 32,5N –LH/SR/NA



**Rys. 8.** Wytrzymałość na ściskanie betonu uzyskana podczas realizacji fundamentu z zastosowaniem cementu hutniczego CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA



**Rys. 9.** Rozkład temperatur uzyskany podczas realizacji fundamentu z betonu masywnego z udziałem cementu hutniczego CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA (temperatura początkowa mieszanki betonowej od 14°C do 17° C).



**Rys. 10.** Rozkład temperatur uzyskany podczas realizacji fundamentu z betonu masywnego z zastosowaniem cementu CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA (temperatura początkowa mieszanki betonowej od 31 do 35°C).

#### 4. PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że beton masywny zawierający w swoim składzie cementy z granulowanym żużlem wielkopiecowym (cement hutniczy CEM III/A,B) i popiół lotny jako dodatek typu II może osiągać bardzo dobre właściwości mechaniczne, osiągając jednocześnie niskie temperatury twardnienia, co jest szczególnie istotne w przypadku betonu masywnego.

Badania kontrolne przeprowadzone w ramach nadzoru budowy potwierdziły, w przypadku każdej z realizacji, poprawność przyjętych założeń projektowych, zarówno w zakresie wytrzymałości na ściskanie, jak i rozkładu temperatury w elemencie.

## LITERATURA

- [1] ACI Committee 207; Guide to mass concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute, 2006
- [2] ACI Committee 207; Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute, 2007
- [3] Bofang, Z.; Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Butterworth-Heinemann, Kidlington, Oxford, 2014
- [4] Kiernożycki W.; Betonowe konstrukcje masywne. Teoria, wymiarowanie, realizacja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2003
- [5] Poradnik *Cement- Kruszywa -Beton*, Chorula , 2016
- [6] Schießl P., Hårdtl R.: Betone für massige Bauteile, Beton (46), 1996, H.11, S. 668-67

## FLYASH IN MASS CONCRETE FOR FOUNDATIONS OF NEW POWER UNITS

### ABSTRACT

---

*Guidelines and recommendations for designing mass concrete composition are presented in this paper, considering the necessity of lowering of heat emitted during hydration while providing adequate working properties of fresh concrete in an appropriately long time period. Impact of constituents of the concrete mix (cement, siliceous flyash) on properties of concrete especially important in the case of mass concrete structures is analysed.*

---