

# **Projektowanie, produkcja i zabudowa betonu masywnego w wykonawstwie nowych bloków energetycznych w Elektrowni Opole i Jaworzno**

DESIGN, PRODUCTION AND PLACING OF MASSIVE CONCRETE  
IN CONSTRUCTION OF NEW POWER UNITS IN POWER PLANTS  
OPOLE AND JAWORZNO

## **Streszczenie**

Znaczne inwestycje w infrastrukturę energetyczną w Polsce, jakie mają miejsce w ostatnim okresie czasu, oraz zmiany w podejściu do projektowania konstrukcji, sprawiły że betony masywne znajdują częstsze zastosowanie. 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. Podstawowa informacja dotyczy rozkładu temperatur w elemencie, która, po przekroczeniu wartości progowych, może doprowadzić do powstania zarysowań termicznych oraz niezamierzonej dylatacji.

W niniejszej pracy przedstawiono zasady projektowania składu betonów masywnych z uwzględnieniem konieczności obniżenia ciepła wydzielanego podczas procesu hydratacji. Dokonano analizy wpływu zarówno składników betonu, jak i etapów zabudowy oraz pielęgnacji wczesnej, na właściwości istotne dla konstrukcji masywnych. Zaprezentowano wyniki badań własnych obejmujące właściwości mieszanki oraz stwardniałego betonu masywnego z zastosowaniem cementów hutniczych CEM III/A 32,5N -LH/HSR/NA oraz CEM III/B 42,5L -LH/SR/NA.

## **Abstract**

Significant investments in energy infrastructure in Poland, which take place in the last period of time and changes in the approach to structures design, has ensured that the

---

*Artur Golda – Centrum Technologiczne BETOTECH Sp. z o.o.*

*Kamil Gębusia – Centrum Technologiczne BETOTECH Sp. z o.o.*

*Tomasz Klimala – BASF Polska Sp. z o.o.*

massive concrete are more frequently application. For massive concrete it is extremely important to establish the impact of different stages of element construction, starting from the design of the concrete mix and ending with the curing on the mechanical properties and durability of the structure.

In this paper authors presents the design rules for the composition of massive concrete including the necessity to reduction heat generated during the hydration process. The impact of concrete components and stages of construction realization and early curing, was determined on the important properties for design of massive structures. The test results, including the properties of the mixture and hardened concrete massive using cement CEM III/A 32,5N -LH/HSR/NA and CEM III/B 42,5L -LH/SR/NA was showed.

## 1. Wprowadzenie

Termin beton masywny dotyczy grupy elementów / obiektów budowlanych wobec których stawiane są dodatkowe wymagania dotyczące ograniczenia wypływu ciepła twardnienia (hydratacji) spoiwa zawartego w betonie. Przykład konstrukcji masywnej pokazano na fotografii 1.



Fot. 1. Zabudowa betonu w konstrukcji masywnej

Definicją najlepiej odzwierciedlającą naturę betonu masywnego jest ta, iż konstrukcją masywną jest każdy element o takich wymiarach, przy których rozkład temperatur wynikający z egzotermicznej reakcji hydratacji cementu (spoiwa) oraz chłodzenia powierzchni może doprowadzić do pęknięć betonu [1]. Bardzo pomocnym, na wstępnym etapie projektowania składu mieszanki betonowej, jest podział ze względu na moduł powierzchniowy ( $m_p$ ) [2] wyrażony wzorem (1):

$$m_p = S/V \quad (1)$$

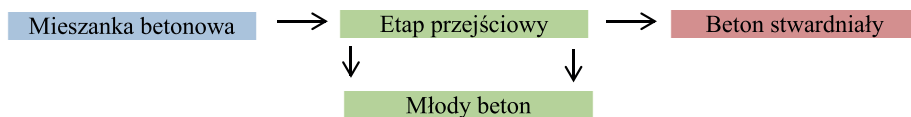
gdzie:  $S$  – oznacza pole powierzchni elementu [ $m^2$ ],  
 $V$  – objętość elementu [ $m^3$ ].

Umożliwia on wstępne określenie „wrażliwości” konstrukcji na wpływy termiczne, jak również oszacowanie wartości samoociepnięcia betonu (tabela 1).

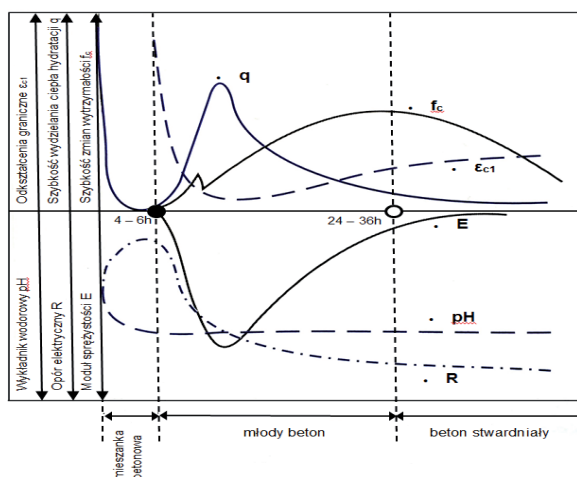
Tabela 1. Klasyfikacja konstrukcji betonowych [2]

Rodzaj konstrukcji	Moduł powierzchniowy ( $m_p$ ) [ $m^{-1}$ ]	Samocieplenie betonu [ $^{\circ}C$ ]
Niemasywna	>15	1 do 3
Średniomasywna	2 do 15	3 do 20
Masywna	<2	>20

Proces wykonawstwa betonowego obiektu masywnego przebiega wieloetapowo. Szczególnie istotnymi etapami są: odpowiedni dobór składu jakościowego i ilościowego mieszanki betonowej, dostawa mieszanki betonowej, zabudowa w konstrukcji oraz proces pielęgnacji termiczno-wilgotnościowej. Występujące w betonowych konstrukcjach masywnych więzy wewnętrzne, wynikające z faktu ograniczenia swobodnego rozszerzania termicznego warstw wewnętrznych elementu przez chłodniejsze warstwy zewnętrzne mogą spowodować wystąpienie naprężeń rozciągających przekraczających wytrzymałość „młodego” betonu. W sytuacji gdy różnica temperatury pomiędzy wnętrzem elementu a warstwami powierzchniowymi, przekroczy  $20^{\circ}C$ , następuje pękanie termiczne [3]. Zjawisko to jest szczególnie groźne na etapie rozwoju właściwości betonu nazywanego potocznie „młodym betonem” [4], [5].

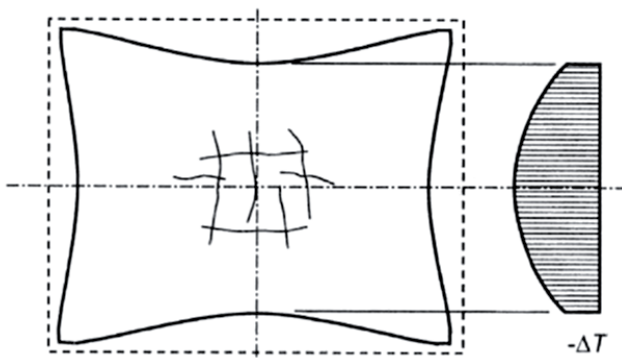


Młody beton wyraźnie różni się w swoich właściwościach do pozostałych etapów dojrzewania betonu. Na tym etapie beton traci już swoje właściwości reologiczne, dzięki którym możliwe było jego ułożenie i zagęszczenie w konstrukcji, bardzo łatwo jednak ulega odkształceniom sprężystym plastycznym i lepkim [5]. W tym okresie beton charakteryzuje się jednocześnie najmniejszymi odkształceniami granicznymi, niewielką wytrzymałością mechaniczną oraz maksymalną szybkością wydzielania ciepła hydratacji (rys. 1).



Rys. 1. Etapy rozwoju właściwości twardniejącego betonu [5]

W elementach betonowych, niezależnie od ich grubości, może wystąpić również dodatkowy mechanizm pęknięcia w okresie studzenia konstrukcji, polegający na powstrzymaniu zmian objętości stygnącego wnętrza przez warstwy powierzchniowe. Mechanizm ten nazywany jest klinowaniem struktury betonu, a naprężenia w ten sposób powstałe nazywamy naprężeniami klinowania lub naprężeniami powstrzymywania [10], [11]. Klinowanie odpowiada za propagację rys przez całą grubość betonu, a w konsekwencji utratę monolityczności konstrukcji (rys. 2).



Rys. 2. Zniszczenie wnętrza elementu wskutek powstrzymywania odkształceń wnętrza przez warstwy powierzchniowe [11]

Obecnie najczęściej spotykanym sposobem redukcji naprężeń termicznych jest ograniczenie ciepła hydratacji zastosowanego cementu (spoiwa) oraz stosowanie izolacji termicznej redukującej oddawanie ciepła do otoczenia z warstw powierzchniowych. Dobór składników mieszanki betonowej, w tym przede wszystkim rodzaju i ilości stosowanego cementu oraz dodatku typu II, ma podstawowy wpływ na ilość i szybkość wydzielania ciepła w procesie twardnienia (hydratacji), determinując jednocześnie proces pielęgnacji termicznej dojrzewającego betonu. Zastosowanie cementów hutniczych CEM III spełniających kryteria normy PN-EN 197-1 [6] dla cementów o niskim ciepłe hydratacji LH, wraz z popiołem lotnym krzemionkowym, spełniającym wymogi normy PN-EN 450-1 [7] umożliwia uzyskanie betonów charakteryzujących się odpowiednio wysokimi wytrzymałościami mechanicznymi, jak i niskim przyrostem temperatur wnętrza masywu [8].

## 2. Dobór składu mieszanki betonowej do zastosowań w konstrukcjach masywnych

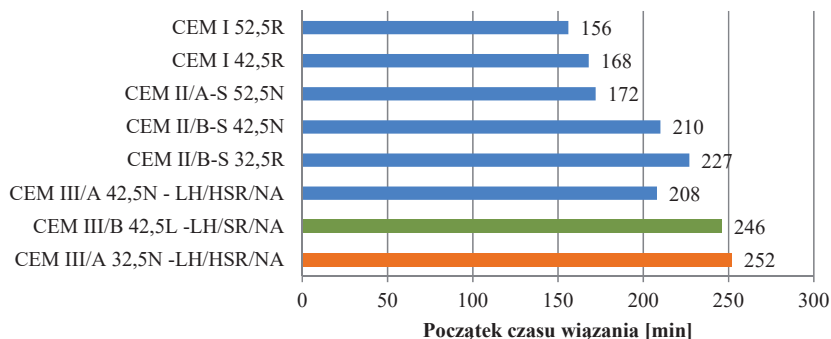
Odpowiedni dobór składników mieszanki betonowej ma kluczowe znaczenie dla poprawności wykonania konstrukcji masywnej. Na etapie projektowania składu mieszanki należy uwzględnić nie tylko właściwości normowe betonu takie jak: wytrzymałość na ściskanie, czy konsystencja. Kompleksowe podejście do tego etapu 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.

## 2.1. Zasady doboru składu zaczynu

Podstawowym etapem projektowania składu betonu jest ustalenie składu zaczynu. Etap ten polega na doborze jakościowym i ilościowym cementu, dodatku typu II, domieszek chemicznych oraz wielkości wskaźnika wodno-cementowego.

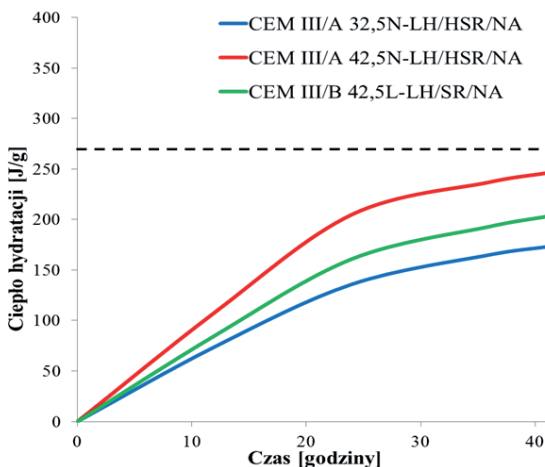
Cement jakościowo należy dobierać kierując się poniższymi wskazaniem:

- możliwością uzyskania odpowiednio niskiego ciepła hydratacji cementu oraz dodatku typu II, przy zakładanej klasie wytrzymałościowej betonu,
- odpowiednio długim czasem początku wiązania (rys. 3),
- możliwością kształtowania odporności betonu na korozyjne oddziaływania środowiska.



Rys. 3. Początek czasu wiązania cementów z oferty handlowej Górażdże Cement S.A [11]

Hydratacja cementu 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, rodzaju oraz ilości pozostałych składników cementu i powierzchni właściwej (rys. 4).

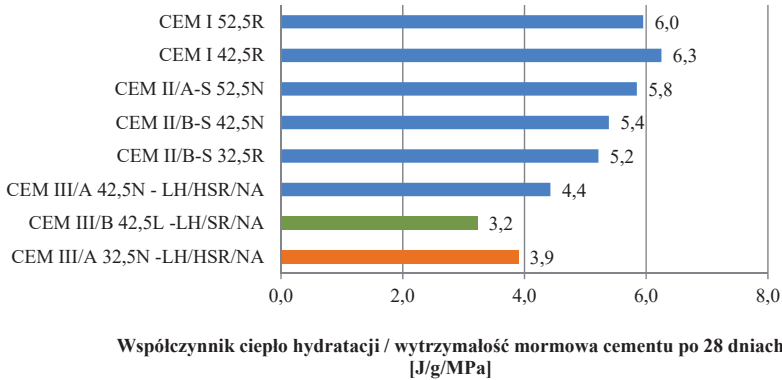


Rys. 4. Ciepło hydratacji cementów hutniczych CEM III/A,B

Przy doborze cementu przydatny okazuje się współczynnik ciepła hydratacji cementu do jego wytrzymałości na ściskanie ( $W_{H/R28}$ ) (2). Obliczony współczynnik dla wybranych cementów przedstawiono na rysunku 5.

$$W_{H/R28} = Q/R_{28} \quad (2)$$

gdzie:  $Q$  – oznacza ciepło hydratacji oznaczone metodą semiadiabatyczną wg PN-EN 196-9 [13] po 41godzinach,  
 $R_{28}$  – normowa wytrzymałość cementu oznaczona wg PN-EN 196-1[14].



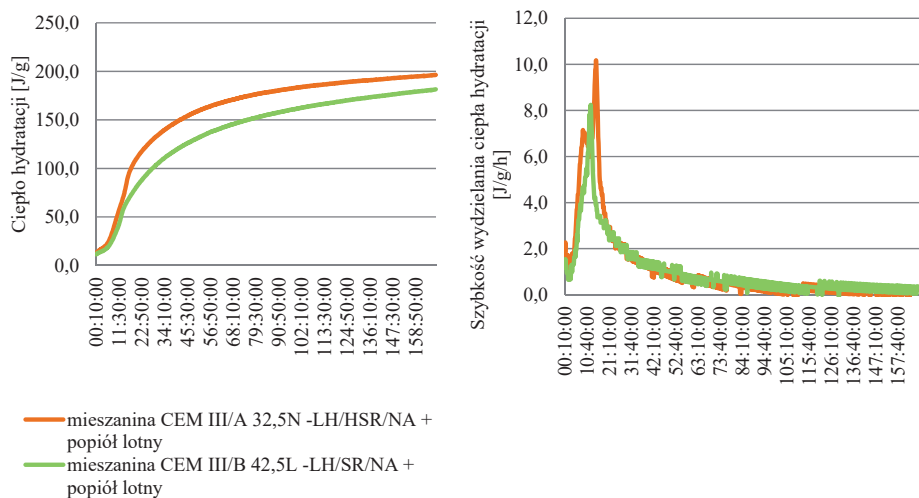
Rys. 5. Współczynnik  $W_{H/R28}$  wybranych cementów powszechnego użytku

Niska wartość współczynnika wskazuje na potencjalnie dużą możliwość redukcji ciepła hydratacji cementu, przy zachowaniu zakładanej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu.

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 (mieszanki cementu z popiołem lotnym) i poprawę wytrzymałości mechanicznej stwardniałego betonu, zwłaszcza po dłuższym okresie twardnienia [12].

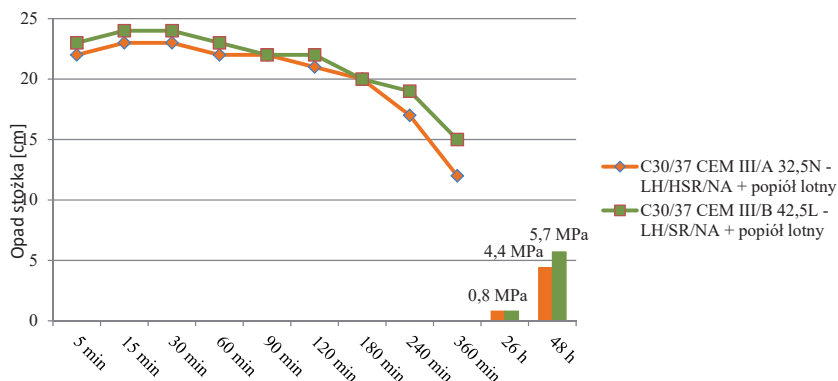
Dzięki zastosowaniu dodatku popiołu lotnego krzemionkowego oraz cementów hutniczych CEM III/A 32,5N -LH/HSR/NA i CEM III/A 42,5L -LH/SR/NA w betonach masywnych Elektrowni Opole oraz Jaworzno, możliwe było uzyskanie bardzo niskiego ciepła hydratacji spoiwa w betonie (rys. 6) oraz wydłużonego czasu zachowania 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 wytrzymałości na ściskanie C30/37. Spełnienie warunku wytrzymałościowego, przy jednoczesnej redukcji ilości spoiwa w betonie, powoduje konieczność zastosowania nowoczesnych rozwiązań w zakresie



Rys. 6. Całkowite ciepło hydratacji oraz szybkość wydzielania ciepła hydratacji dla spoiw zastosowanych w fundamentowych maszynych Elektrowni Opole oraz Jaworzno

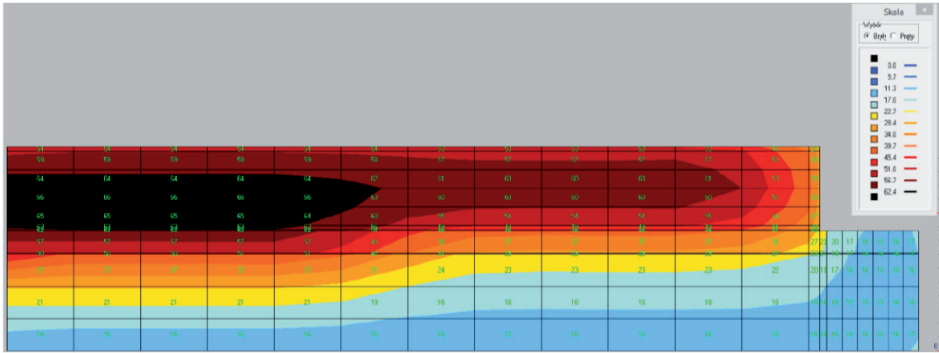
domieszek chemicznych do betonu. W betonach maszynych fundamentów maszynowni oraz kotłowni nowych bloków Elektrowni Opole i Jaworzno, zastosowany został układ domieszek chemicznych bazujących na superplastyfikatorze polikarboksyłowym MasterGlenium SKY 686, plastyfikatorze MasterPozzolith 18 BVC oraz domieszce opóźniającej 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. 7). Umożliwiło to poprawne przeprowadzenie procesu zabudowy mieszanki betonowej oraz eliminację obszarów „zimnych styków”, które mogłyby być zagrożeniem dla monolityczności konstrukcji.



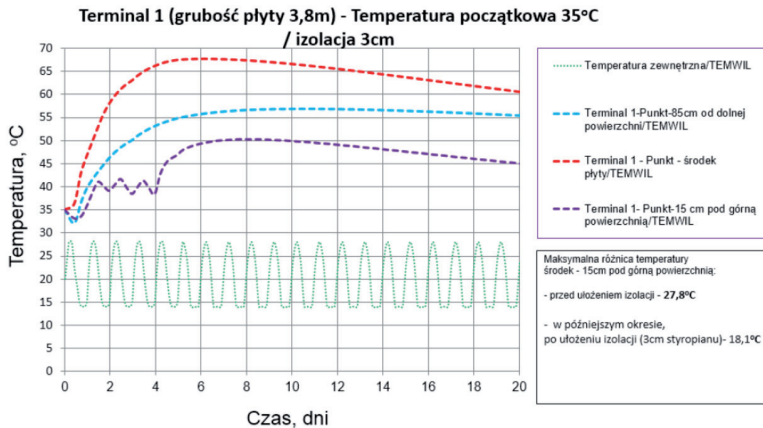
Rys. 7. Zmiana konsystencji w czasie oraz wartość wytrzymałości wczesnych betonów maszynych nowych bloków Elektrowni Opole i Jaworzno



Pierwsze trzy fundamenty masywne (fundament maszynowni nr 5 i 6 oraz kotłowni nr 5, o objętości od 11 tys. m<sup>3</sup> do 18,5 tys. m<sup>3</sup>), zrealizowane podczas budowy nowych bloków Elektrowni Opole, wykonane zostały w oparciu o zastosowanie cementu hutniczego CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA. Ponieważ termin realizacji czwartego z fundamentów masywnych (fundament kotłowni nr 6 o objętości 18,5 tys. m<sup>3</sup>), przypadał na okres wysokich temperatur otoczenia (miesiąc lipiec), przeprowadzono symulację za pomocą modelu numerycznego (program TEMWIL). Walidacja modelu została wykonana w oparciu o rzeczywiste wyniki rozkładu temperatur w poprzednio wykonywanych fundamentach. Wyniki obliczeń wykazały, iż przy dotychczasowy rozwiązaniu materiałowym, istnieje poważne niebezpieczeństwo przekroczenia progowych wartości rozkładu temperatur: zarówno maksymalnej temperatury wnętrza elementu, jak i gradientu temperatur (rys. 8 i 9).



Rys. 8. Rozkład temperatur w elemencie po 12 dniach twardnienia z uwzględnieniem temperatury początkowej mieszanki betonowej wynoszącej 35°C

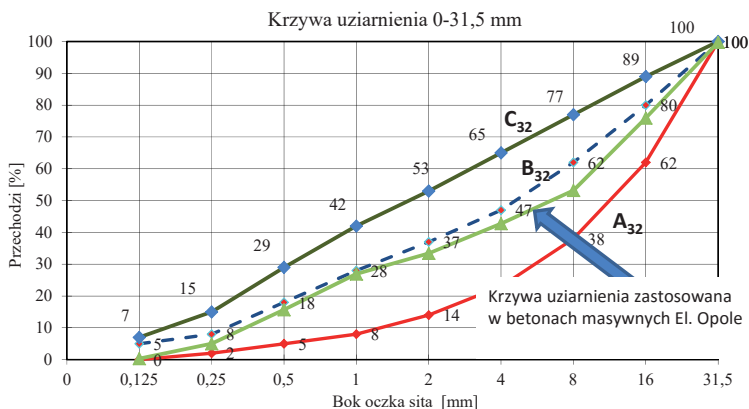


Rys. 9. Zmiana temperatur w czasie twardnienia, temperatura początkowa mieszanki betonowej 35°C, izolacja 3 cm ułożona po 3 dniach twardnienia

Temperatury uzyskane podczas symulacji numerycznej stanowiły jedną z podstawowych przyczyn zastosowania w betonie masywnych cementu hutniczego CEM III/B 42,5L – LH/SR/NA (zawierającego blisko 70% granulowanego żużla wielkopiecowego), który umożliwił dodatkową redukcję wydzielonego ciepła hydratacji w wyniku osiągnięcia wyższych wytrzymałości na ściskanie.

## 2.2. Zasady doboru kruszywa

Mieszanka kruszywa stosowana do produkcji betonów masywnych powinna charakteryzować się możliwie niską wodożądnością oraz jamistością. Umożliwia to redukcję ilości zaczynu cementowego niezbędnego do uzyskania żądanej konsystencji przy zachowaniu założonego wskaźnika wodno-cementowego. Maksymalny wymiar ziarna kruszywa powinien być ograniczony przez otulinę zbrojenia oraz odległości pomiędzy prętami zbrojeniowymi, leżącymi prostopadle do kierunku betonowania. Zazwyczaj w betonach konstrukcji masywnych stosowane jest kruszywo o maksymalnym wymiarze ziarna  $D=31,5$  mm, które stanowi dobry kompromis pomiędzy redukcją wodożądności, geometrią zastosowanego zbrojenia w konstrukcji oraz możliwością zabudowy mieszanki betonowej przy pomocy pomp. Krzywa uziarnienia mieszanki powinna być ustalona doświadczalnie, można ją przyjąć, iż powinna się ona zawierać w obszarze  $A_{32}/B_{32}$  (rys. 10) wg DIN 1045-2.

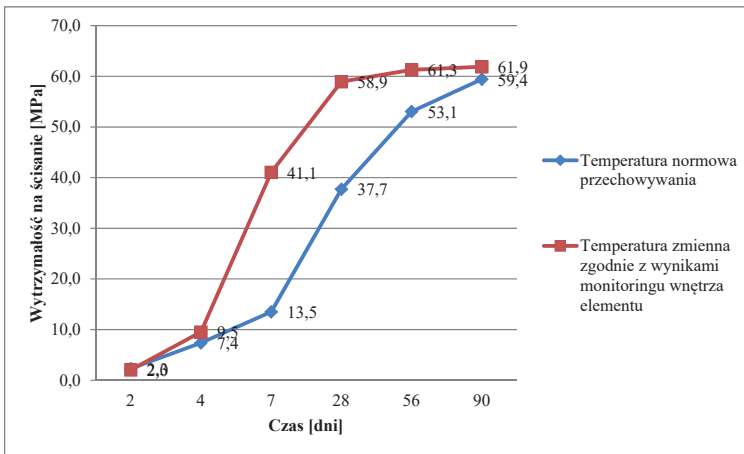


Rys. 10. Krzywa uziarnienia mieszanki kruszywa zastosowana w betonach masywnych nowych bloków Elektrowni Opole

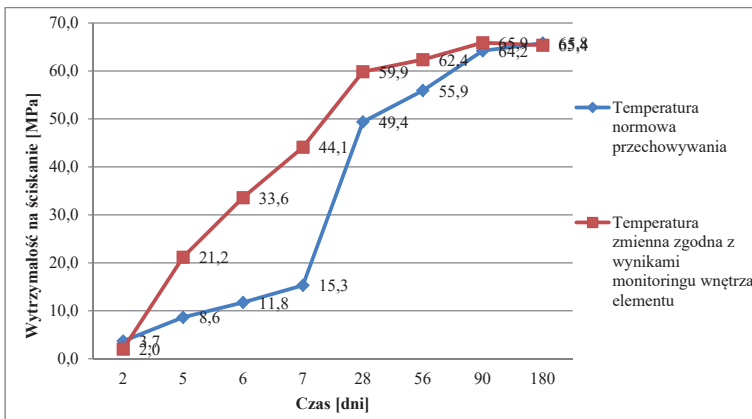
Przy doborze kruszywa należy zwrócić uwagę na jego nasiąkliwość, która to w przypadku podwyższonego poziomu, może znacznie wpłynąć na zachowanie cech reologicznych mieszanki betonowej w czasie transportu oraz tuż po zabudowie. Zjawisko to wywołane jest wysoką absorpcją wody oraz rozpuszczonych w niej składników przez kruszywo, w tym także domieszek chemicznych.

### 3. Wyniki badań przeprowadzone w trakcie realizacji fundamentów masywnych

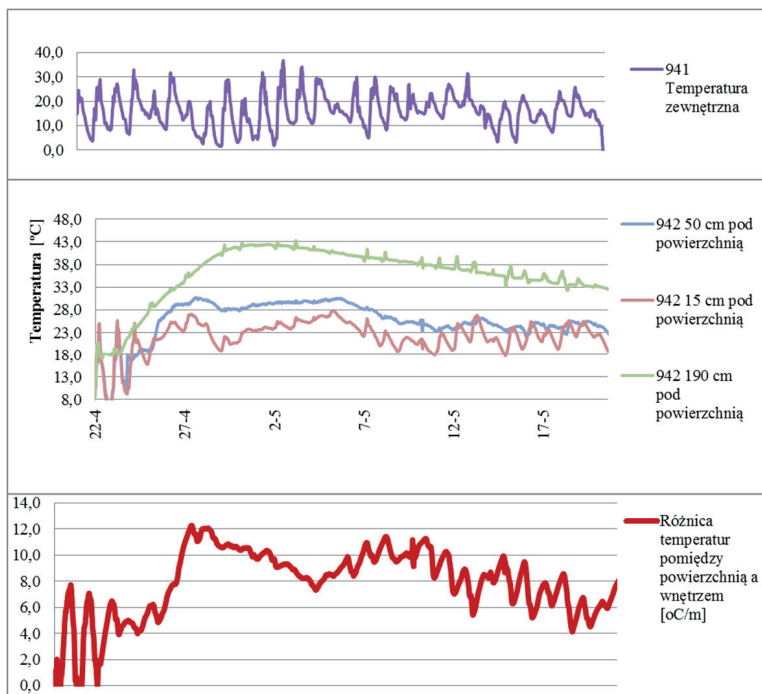
W trakcie realizacji fundamentów nowych bloków energetycznych Elektrowni Opole oraz Jaworzno, prowadzono szereg badań, których celem była weryfikacja założeń projektowych. Dane uzyskane w trakcie pierwszych realizacji wykorzystane zostały przy projektowaniu składu mieszanek betonowych przeznaczonych dla budowy fundamentu kotłowni nr 6 Elektrowni Opole o objętości 18,5 tys. m<sup>3</sup> oraz fundamentu kotłowni Elektrowni Jaworzno o objętości 22,5 tys. m<sup>3</sup>. W ramach kontroli wykonane zostały m.in.: badania wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu (rys. 11 i 12) oraz pomiary rozkładu temperatur w wykonanych elementach (rys. 13 i 14). Badania wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzone zostały zarówno na próbach przechowywanych w warunkach



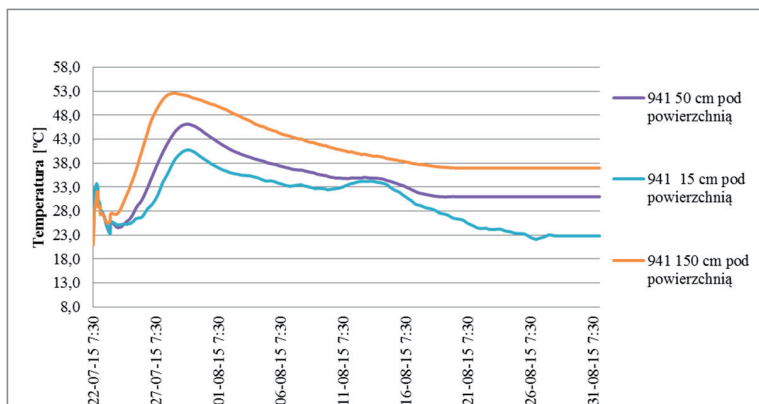
Rys. 11. Wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu uzyskane podczas realizacji fundamentu masywni nr 5 Elektrowni Opole dla betonu z zastosowaniem cementu CEM III/A 32,5N –LH/SR/NA



Rys. 12. Wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu uzyskane podczas realizacji fundamentu kotłowni nr 6 Elektrowni Opole dla betonu z zastosowaniem cementu CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA



Rys. 13. Rozkład temperatur uzyskany podczas realizacji fundamentu maszynowni nr 5 Elektrowni Opole dla betonu z zastosowaniem cementu CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA, temperatura początkowa mieszanki betonowej 14 do 17°C



Rys. 14. Rozkład temperatur uzyskany podczas realizacji fundamentu kotłowni nr 6 Elektrowni Opole dla betonu z zastosowaniem cementu CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA, temperatura początkowa mieszanki betonowej od 31 do 35°C

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 z zastosowaniem cementu CEM III/A 32,5N –LH/HSR/NA oraz 28 dni dla betonu wykonanego z zastosowaniem cementu CEM III/B 42,5L –LH/SR/NA.

## 4. Podsumowanie

W 2015 roku zostały zrealizowane dostawy betonów masywnych dla następujących konstrukcji:

- dwóch fundamentów maszynowni nr 5 i 6 Elektrowni Opole o objętości około 11 tys m<sup>3</sup> betonu każdy,
- dwóch fundamentów kotłowni nr 5 i 6 Elektrowni Opole o objętości około 18,5 tys. m<sup>3</sup> betonu każdy,
- dwóch fundamentów turbozespołu nr 5 i 6 Elektrowni Opole o objętości około 2,5 tys. m<sup>3</sup> betonu każdy,
- fundament nawy elektrycznej bloku 910 MW Elektrowni Jaworzno o objętości 2,5 tys. m<sup>3</sup> betonu
- fundament maszynowni bloku 910 MW Elektrowni Jaworzno o objętości 13 tys. m<sup>3</sup> betonu,
- fundament kotłowni bloku 910 MW Elektrowni Jaworzno o objętości 22,4 tys. m<sup>3</sup> betonu.

Łączna ilość betonu zabudowanego w konstrukcjach masywnych na powyższych inwestycjach przekroczyła 100 tys. m<sup>3</sup>.

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] A. Neville, Właściwości betonu, Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012.
- [2] K. Flaga, Naprężenia własne termiczne typu „makro” w elementach i konstrukcjach z betonu, Cement Wapno Gips nr 4, 5 s. 98–102, 1991.
- [3] M. E. FITZGIBBON, „Advances in Ready Mixed Concrete Technology: Continious casting - large, rich, quick,” R. K. Dhir, Red., Pergamon Press, 1975, s. 405–416.
- [4] G. Golewski, „Badania odporności na pękanie kompozytów betonowych w młodym wieku z dodatkami popiołów lotnych,” Przegląd budowlany, nr 3, s. 38–42, 2013.
- [5] W. Kiernorzycki, Betonowe konstrukcje masywne, teoria wymiarowanie realizacja, Kraków: Polski Cement Sp. z o.o., 2003.
- [6] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku, 2012.
- [7] PN-EN 450-1:2012 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności, 2012.
- [8] Z. Giergiczny, A. Golda, M. Batog, S. Synowiec, „Beton masywny z wykorzystaniem cementu hutniczego CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA,” Budownictwo Technologie Architektura, nr 4, s. 52–55, październik 2015.
- [9] P. Witakowski, „Technologia i pielęgnacja betonu na budowie mostu Świętokrzyskiego w Warszawie,” Prace Instytutu Techniki Budowlanej, nr 4 (128), 2003.
- [10] P. Witakowski, „Wewnętrzne klinowanie struktury dojrzewającego betonu,” Inżynieria i Budownictwo, nr 8, 1997.
- [11] Cement, kruszywa, beton w ofercie Grupy Górażdże, praca zbiorowa pod kierunkiem Z. Giergicznego, Chorula 2015.
- [12] Z. Giergiczny, Popiół lotny w składzie cementu i betonu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [13] PN-EN 196-9:2010 Metody badania cementu – Część 9: Ciepło hydratacji – Metoda semiadiatyczna.
- [14] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.