

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

Znaczne inwestycje w infrastrukturę energetyczną w Polsce, jakie mają miejsce w ostatnim okresie, 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 temperatury w elemencie mogącego, po przekroczeniu wartości progowych, doprowadzić do powstania zarysowań termicznych oraz niezamierzonej dylatacji.



Fot. 1. Zabudowa betonu w konstrukcji masywnej

Tabela 1. Klasyfikacja konstrukcji betonowych [2]

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

## 1. Wprowadzenie

Termin *beton masywny* dotyczy grupy elementów/ obiektów budowlanych, wobec których stawiane są dodatkowe wymogi dotyczące ograniczenia wpływu ciepła hydratacji spoiwa zawartego w betonie. Przykład konstrukcji masywnej pokazano na fotografii 1.

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 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:

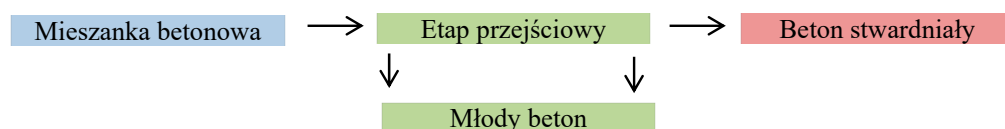
$S$  – oznacza pole powierzchni elementu [ $m^2$ ]

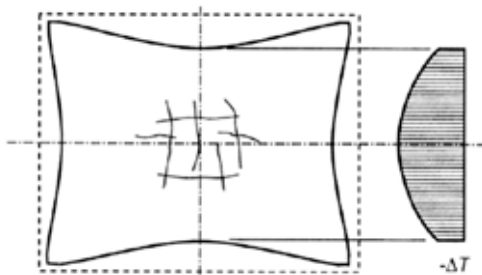
$V$  – objętość elementu [ $m^3$ ].

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

Proces realizacji 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 pęknięcie termiczne [3]. Zjawisko to jest szczególnie groźne na etapie rozwoju właściwości betonu nazywanym „młodym betonem” (schemat poniżej) [4], [5].

Młody beton wyraźnie różni się w swoich właściwościach od 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 lepkiem [5]. W tym okresie beton charakteryzuje się jednocześnie najmniejszymi odkształceniami granicznymi, niewielką wytrzyma-





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

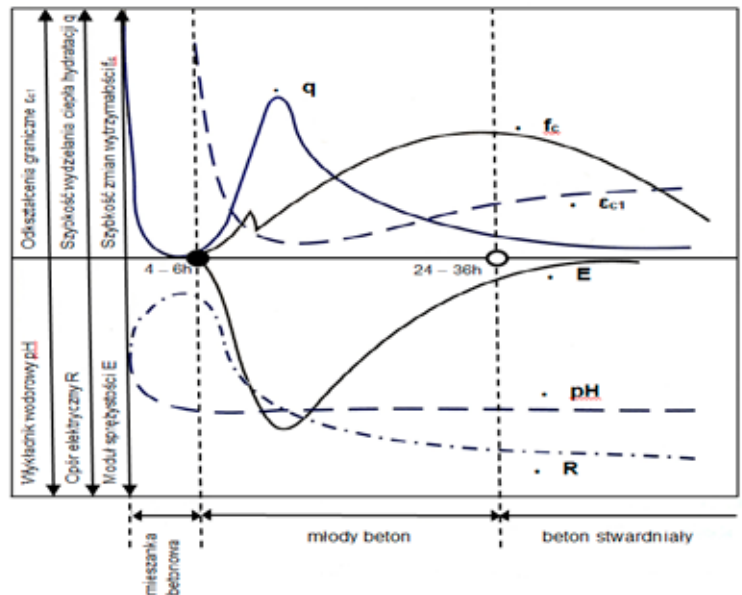
nością mechaniczną oraz maksymalną szybkością wydzielania ciepła hydratacji (rys. 1).

W elementach betonowych, niezależnie od ich grubości, może wystąpić również dodatkowy mechanizm pęknięcia w okresie studzenia konstrukcji, polegający na powstrzymywaniu 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).

Obecnie najczęściej spotykanym sposobem redukcji naprężeń termicznych jest ograniczenie ciepła hydratacji zastosowanego 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 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, wraz z popiołem lotnym krzemionkowym, spełniającym wymogi normy PN-EN 450-1 [7] umożliwi uzyskanie betonów charakteryzujących się 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 projektowa-



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

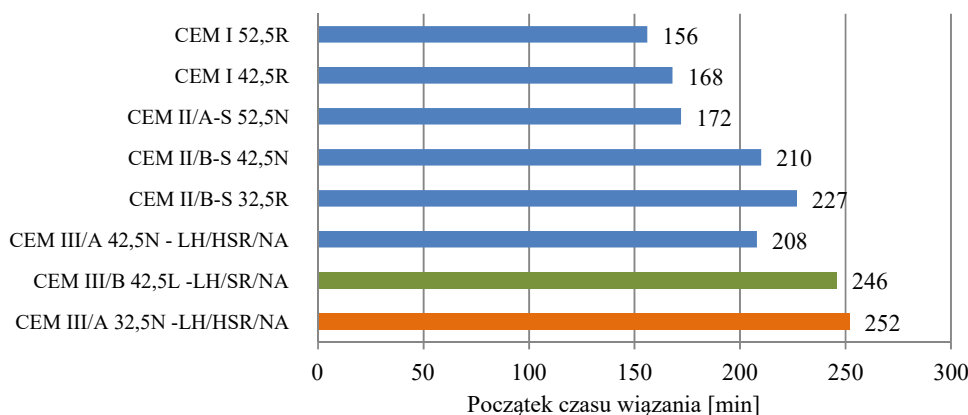
nia składu mieszanki należy uwzględnić nie tylko właściwości normowe betonu, takie jak wytrzymałość na ściskanie czy konsystencja. Kompleksowe podejście do tego etapu musi uwzględniać również pozostałe czynniki kształtujące obciążenia pośrednie betonu, takie jak: wymiary elementu, obecność przerw dylatacyjnych, 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, domieszek chemicznych oraz wartości wskaźnika wodno-cementowego. Cement jakościowo należy dobierać, kierując się poniższymi wskazaniem:

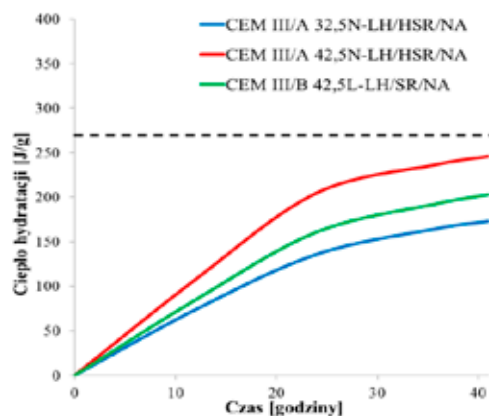
- możliwością uzyskania odpowiednio niskiego ciepła hydratacji cementu oraz dodatku typu II, przy zakładanej klasie wytrzymałości na ściskanie betonu
- odpowiednio długim czasem początku wiązania (rys. 3)
- możliwością kształtowania odporności betonu na oddziaływanie środowiska.

Hydratacja cementu to proces egzotermiczny, w trakcie którego wydzielane jest ciepło. Ilość wydzielonego ciepła jest zależna od składu mineralnego klinkieru portlandzkiego zastosowanego do



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

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



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

Przy doborze cementu przydatny okazuje się współczynnik ciepła hydratacji cementu do jego wytrzymałości na ściskanie ( $W_{HR28}$ ) (2). Obliczony współczynnik dla wybranych cementów przedstawiono na rysunku 5.

$$W_{HR28} = \frac{Q}{R_{28}} \quad (2)$$

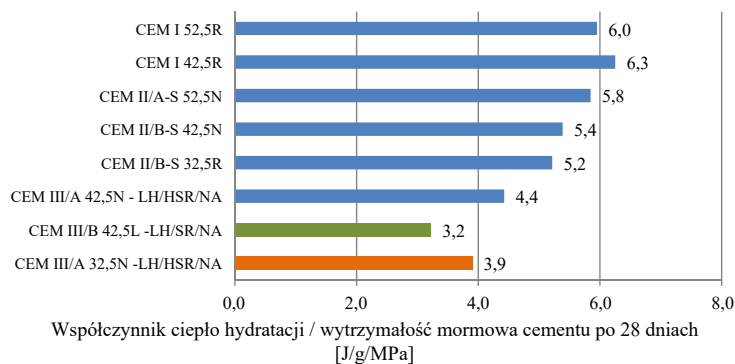
gdzie:

$Q$  – oznacza ciepło hydratacji oznaczone metodą semiadiabatyczną wg PN-EN 196-9 [13] po 41 godzinach

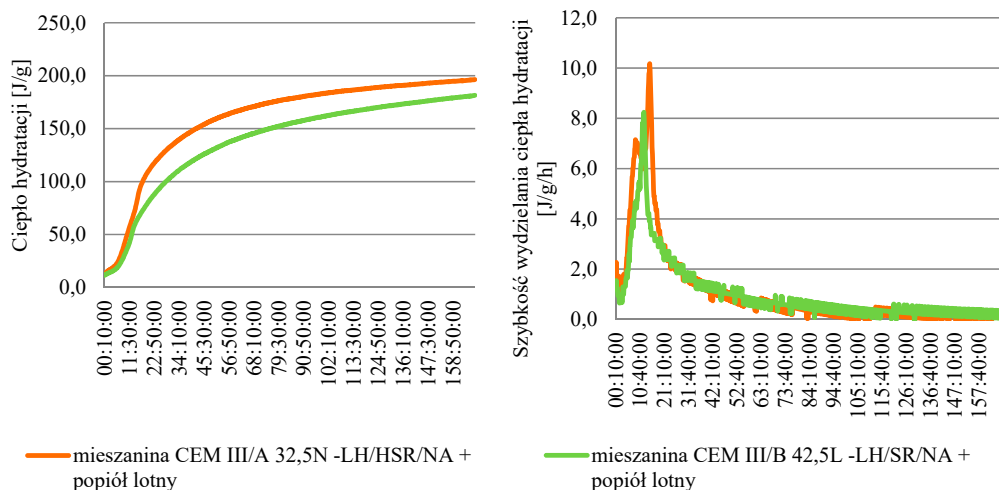
$R_{28}$  – normowa wytrzymałość cementu oznaczona wg PN-EN 196-1 [14].

Niska wartość współczynnika wskazuje na potencjalnie dużą możliwość redukcji ciepła hydratacji

Rys. 5. Współczynnik  $W_{HR28}$  wybranych cementów powszechnego użytku



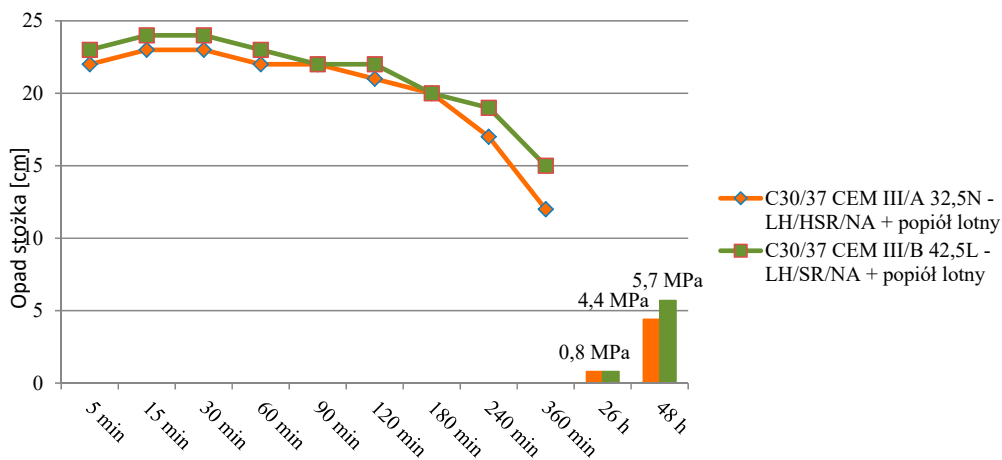
Rys. 6. Całkowite ciepło hydratacji oraz szybkość wydzielania ciepła hydratacji dla spoiw zastosowanych w betonach fundamentowych maszynowych Elektrowni Opole oraz Jaworzno



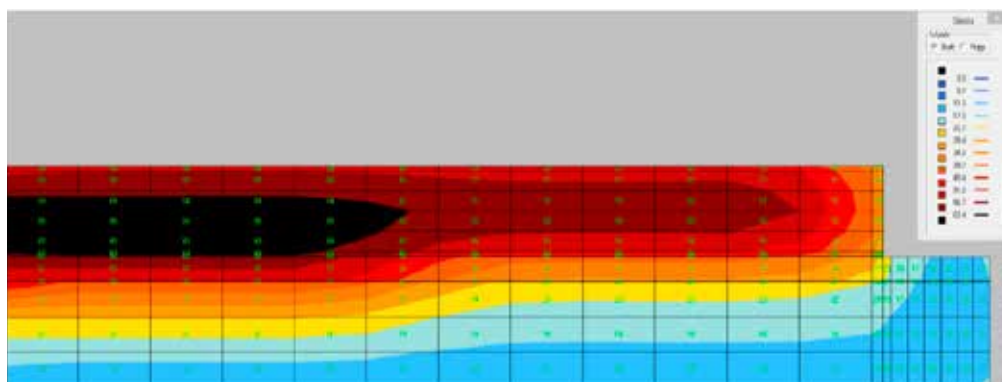
cementu, przy zachowaniu zakładanej klasy wytrzymałości na ściskanie betonu.

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 i poprawę wytrzymałości mechanicznej stwardniałego betonu [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 maszynowych Elektrowni Opole oraz Jaworzno możliwe było uzyskanie bardzo niskiego ciepła hydratacji spoiwa w betonie (rys. 6) oraz wydłużonego czasu zachowania konsystencji. Nowe podejście do projektowania konstrukcji maszynowych 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 maszynowych fundamentów maszynowych oraz kotłowni nowych bloków Elektrowni Opole i Jaworzno zastosowany został układ domieszek chemicznych bazujących na superplastyfikatorze polikarboksylovym MasterGlenium SKY 686, plastyfikatorze MasterPozzolith 18 BVC oraz domieszce opóźniającej wiązanie MasterSet R 433. Dostawcą domieszek chemicznych była firma BASF. 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 masywnych nowych bloków Elektrowni Opole i Jaworzno



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

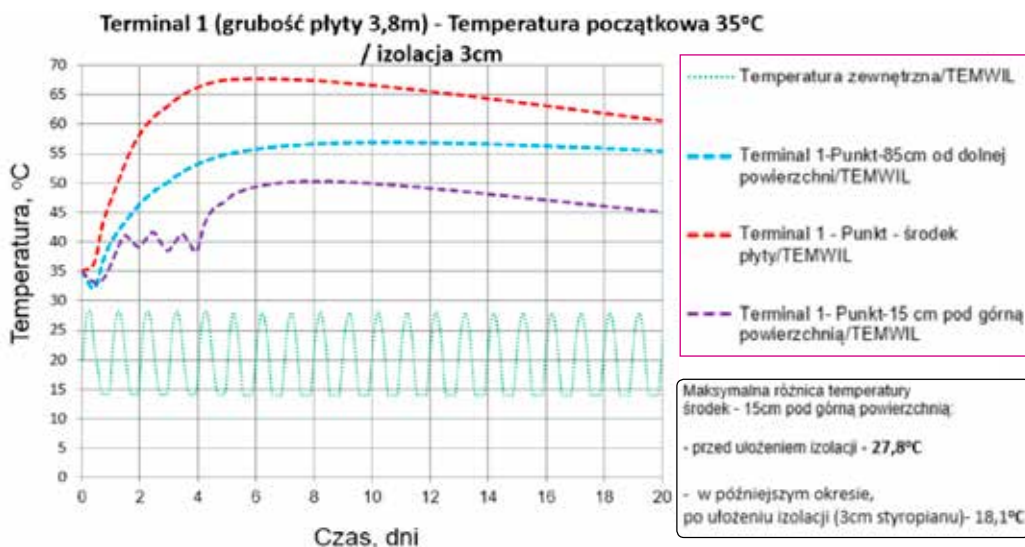
Pierwsze trzy fundamenty masywne (fundament maszynowni nr 5 i 6 oraz kotłowni nr 5, o objętości od 11 tys. m<sup>3</sup> do 18,5 tys. m<sup>3</sup>), zrealizowane podczas budowy nowych bloków Elektrowni Opole, wykonane zostały w oparciu o zastosowanie cementu hutniczego CEM III/A 32,5N – LH/HSR/NA. Ponieważ termin realizacji czwartego z fundamentów masywnych (fundament kotłowni nr 6 o objętości 18,5 tys. m<sup>3</sup>), przypadając na okres wysokich temperatur otoczenia (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 dotychczasowym rozwiązaniu materiałowym istnieje poważne niebezpieczeń-

stwo przekroczenia progowych wartości rozkładu temperatur: zarówno maksymalnej temperatury wnętrza elementu, jak i gradientu temperatur (rys. 8 i 9).

Wartości temperatur uzyskane podczas symulacji numerycznej stanowiły jedną z podstawowych przyczyn zastosowania w betonie masywnym cementu hutniczego CEM III/B 42,5L – LH/SR/NA, który umożliwi dodatkową redukcję wydzielonego ciepła hydratacji.

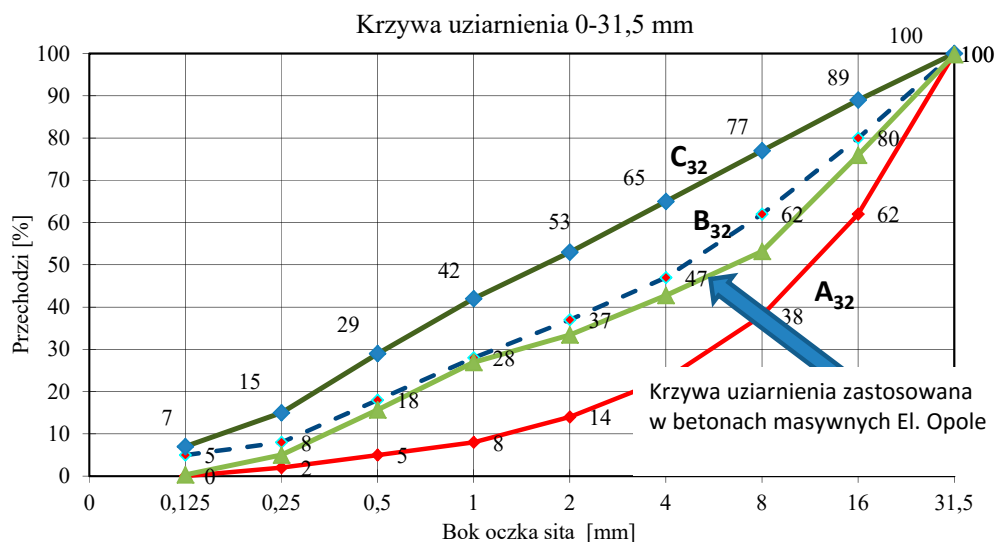
## 2.2. Zasady doboru kruszywa

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

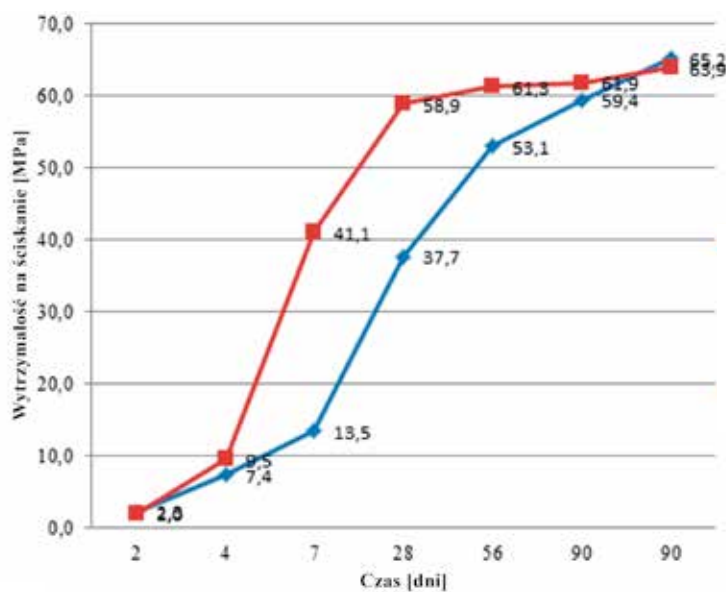


Rys. 9. Zmiana temperatur w czasie twardnienia, temperatura początkowa mieszanki betonowej 35°C, izolacja 3 cm ułożona po 3 dniach twardnienia

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

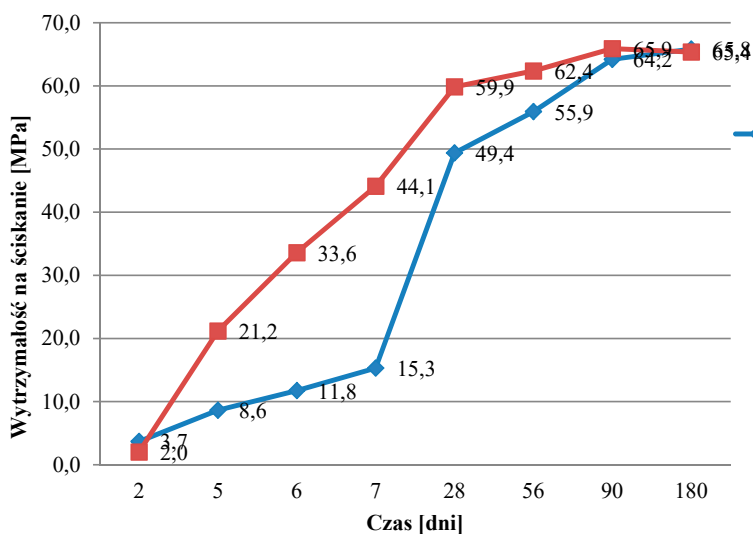


Krzywa uziarnienia zastosowana w betonach masywnych El. Opolo



- Temperatura normowa przechowywania
- Temperatura zmienna zgodnie z wynikami monitoringu wnętrza elementu

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



- Temperatura normowa przechowywania
- Temperatura zmienna zgodnie z wynikami monitoringu wnętrza elementu

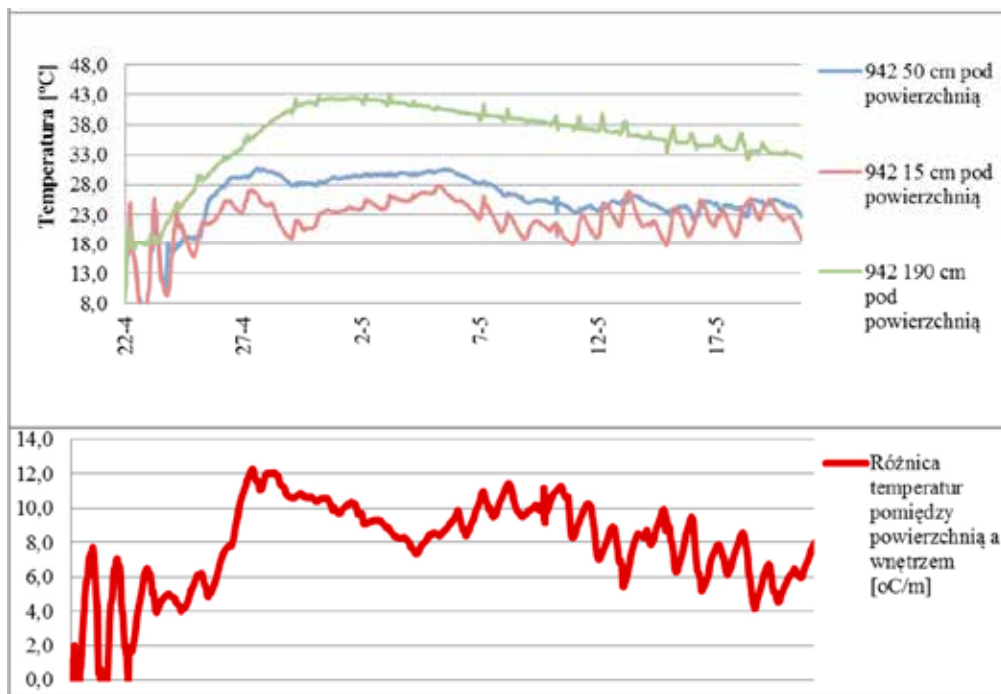
Rys. 12. Wyniki wytrzymałości na ściskanie betonu uzyskane podczas realizacji fundamentu kotłowni nr 6 Elektrowni Opolo dla betonu z zastosowaniem cementu CEM III/B 42,5L - LH/SR/NA

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 jednak przyjąć, iż powinna się ona zawierać w obszarze  $A_{32}/B_{32}$  (rys. 10) wg DIN 1045-2.

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 Opolo 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 Opolo o objętości 18,5 tys.  $m^3$  oraz fundamentu kotłowni Elektrowni Jaworzno o objętości 22,5 tys.  $m^3$ . 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 normowych, jak również przechowywanych w wodzie w temperaturze odpowiadającej temperaturze panującej w danym momencie we wnętrzu konstrukcji. Zabudowany beton uży-



skąf 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 firma Górażdże Beton Sp. z o.o. zrealizowała dostawy betonów masywnych dla następujących konstrukcji:

- fundamenty maszynowni nr 5 i 6 Elektrowni Opole o objętości około 11 tys. m<sup>3</sup> betonu każdy
- fundamenty kotłowni nr 5 i 6 Elektrowni Opole o objętości około 18,5 tys. m<sup>3</sup> betonu każdy
- fundamenty 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.

**Artur Golda**

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

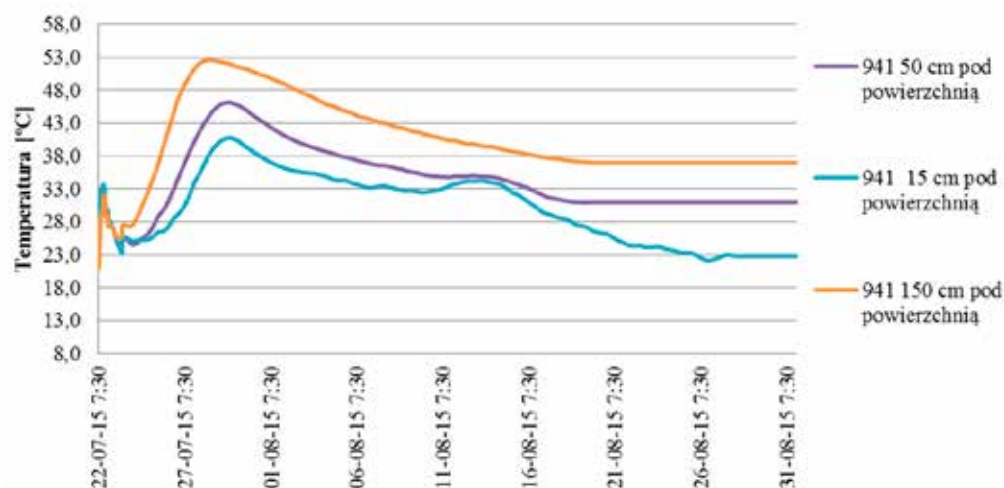
**Kamil Gębusia**

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

**Tomasz Klimala**

**BASF Polska Sp. z o.o.**

**Artykuł został opublikowany  
w materiałach konferencyjnych  
Konferencji Dni Betonu 2016**



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

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

#### 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: Continuous casting - large, rich, quick,” R. K. Dhir, Red., Pergamon Press, 1975, s. 405-416.
- 4 G. Golewski, „Badania odporności na pęknięcie kompozytów betonowych w młodym wieku z dodatkiem 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 Technologia 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 semiadiabatyczna*.
- 14 PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu – Część 1: Oznaczenie wytrzymałości*.