

Doświadczenia z betonowania masywnych konstrukcji fundamentu pod kotłownię pieca odzysknicowego oraz fundamentu turbozespołu parowego i gazowego o mocy 460 MW na terenie PKN Orlen S.A. we Włocławku

EXPERIENCE IN PLACING THE CONCRETE OF MASSIVE CONCRETE
CONSTRUCTION FOUNDATIONS OF RECUPERATOR FURNACE
AND 460 MW STEAM AND GAS TURBINE SET AT PKN ORLEN SA
IN WŁOCŁAWEK

Streszczenie

Na podstawie wielu doświadczeń wskazać można kluczowe czynniki charakteryzujące technologię formowania konstrukcji masywnych. Zaliczymy do nich m.in. wymiary elementu, swobodę jego odkształceń, możliwość przepływu energii i masy między betonem a otoczeniem, czas oraz metody transportu i wszystkich operacji towarzyszących w budowaniu mieszanki betonowej czy wreszcie warunki atmosferyczne w trakcie betonowania.

Mimo licznych realizacji, opisywanych i prezentowanych choćby na cyklu konferencji Dni Betonu, wykorzystanie obecnych doświadczeń w kolejnych inwestycjach jest wciąż ograniczone. Wynika to ze zróżnicowania wskazanych czynników jako zestawu danych wejściowych. Intencją autorów jest uzupełnienie tych doświadczeń o realizację fundamentów pieca i turbozespołu we Włocławku. Niniejszy przypadek charakteryzowały m.in.: 5-metrowa grubość płyty, 7-godzinny czas przerobu mieszanki betonowej i jesienny okres betonowania.

Abstract

Following wide experience, key factors characterising the technology of forming massive structures can be given. These include such properties as the dimensions of an element, its free deformability, the potential for the energy and mass flow between concrete and the environment, the time and methods of transport and all the operations which accompany concrete casting, and finally weather conditions while placing concrete.

Despite numerous projects that have been described and presented, say at the Concrete Days cycle of conferences, the use of the present experience in the next investments remains limited. This results from the diversity of factors as a set of input data. The authors' intention is to complement such experience with the project involving the oven and turbine set foundations in Włocławek. This case involved such features as a 5-metre thick slab, 7-hour workability retention as well as autumn season intended for concrete placing.

1. Wybrane zagadnienia realizacji konstrukcji masywnych z betonu

Największe zagrożenie występuje w najmniej odpowiednim czasie. Tak w skrócie opisać można wagę zagadnienia termicznych zmian objętościowych oraz ich konsekwencji w przypadku konstrukcji masywnych z betonu. W terminologii technicznej powyższe stwierdzenie brzmiałoby: okresowi maksymalnej szybkości wydzielania ciepła odpowiadają minimalne odkształcenia graniczne [3]. Takie ujęcie jasno wskazuje konieczność zaangażowania projektanta konstrukcji, wykonawcy robót oraz dostawcy i technologa betonu. Krytyczny – ze względu na ryzyko tworzenia się rys i potencjalnej utraty monolityczności elementów – okres dotyczy fazy dojrzewania, w której kompozyt określa się mianem „młodego betonu”.

Podział zadań między uczestnikami procesu tworzenia konstrukcji masywnej wynika z czynników kształtujących rozwój temperatury w bloku i generowanych naprężeń. Zmiany objętościowe w czasie twardnienia betonu możemy podzielić na skurczowe i termiczne. Eurokod 2 klasyfikuje je jako tzw. oddziaływania pośrednie. Wczesne zmiany objętościowe generują naprężenia własne oraz – w przypadku ograniczenia swobody odkształceń – naprężenia wymuszone. Rolą projektanta jest uwzględnienie możliwych wartości naprężeń przy kształtowaniu wymiarów, statycznych warunków brzegowych (swobody odkształceń) oraz zbrojenia elementów. Wartości naprężeń zależą będą w dużym stopniu od rzeczywistych warunków przepływu energii i masy pomiędzy betonem i otoczeniem. A warunki te są zawsze wypadkową słuszności przyjętej technologii wykonania robót i stopnia ich realizacji przez Wykonawcę. Założenia projektowe i wykonawcze dostarczają z kolei danych dla technologa betonu. Przewidywana intensywność samoociepłenia twardniejącego kompozytu i jego następstw określać będzie jakościowe i ilościowe różnice w stosunku do technologii betonu zwykłego.

Omówione zagadnienia są stosunkowo powszechnie znane wśród specjalistów w Polsce. Z doświadczeń autorów wynika również, że uświadomienie zagrożeń i niezbędnych działań zapobiegawczych o charakterze technologiczno-materiałowym również nie stanowi większego problemu. W tym względzie niewątpliwe wsparcie wynika choćby ze wspaniałej tradycji budownictwa hydrotechnicznych w Polsce, ale również niemałej liczby współczesnych realizacji konstrukcji masywnych. Jak w wielu innych przypadkach niedogodności wynikać mogą jednak z przyczyn formalnych. Jako pierwsza występuje kwestia klasyfikacji – czy rozpatrywane konstrukcje / elementy są „masywne”? W przypadku pozytywnej odpowiedzi pojawia się druga przyczyna, związana z koniecznością zatwierdzenia „odstępstw” od specyfikacji, tworzonych najczęściej jak dla betonu „nie-masywnego”.

Najbardziej pożądana byłaby miara, definicja lub kryterium ilościowe masywności. W przypadku konstrukcji o prostych kształtach intensywność wpływów termicznych jest często kojarzona z ich grubością. Przykładem może być podział betonów hydrotechnicznych w zależności od wymiarów poprzecznych budowli lub jej elementów wg opracowania [13]. Jeśli najmniejszy wymiar wynosi $\geq 1,5$ m to konstrukcję opisuje się jako masywną. Powszechnie stosuje się również wielkości względne jako relacje powierzchni i objętości elementów. Przedstawione podejścia uwzględniają wyłącznie geometrię elementów. Próby uwzględnienia warunków chłodzenia (dokładniej wymiany ciepła) z wyodrębnieniem powierzchni mających bezpośredni kontakt z otaczającym powietrzem stanowią dalszą idealizację modelu. Tracą sens fizyczny w praktyce, gdy stosowane są różne rodzaje „przykrycia” powierzchni, np. podłoże, deskowanie, folia, styropian, maty, itd. Oczy-

wiście opracowano wiele rozbudowanych modeli, umożliwiających przeprowadzenie symulacji tym dokładniejszych, im większa ilość i jakość danych została wprowadzona. Podejście takie jest jednak wysoce zindywidualizowane, a zatem traci zastosowanie jako uniwersalna miara „progu czułości” konstrukcji na wpływy termiczne czy oddziaływania pośrednie w ogólności [3].

Jak widać ilościowe zdefiniowanie konstrukcji masywnej pozostaje zadaniem niezwykle trudnym, o ile w ogóle możliwym w praktycznym zastosowaniu. Stąd podejścia jakościowe, mimo sprawiania wrażenia bardzo (zbyt) ogólnych, zyskują charakter uniwersalny. Definicje wg [10] i [11] mówią o wymiarach konstrukcji „na tyle dużych”, że prowokować mogą wystąpienie istotnych wpływów termicznych, a w domyśle ich negatywnych konsekwencji. Odnoszą się zatem do intuicji lub doświadczenia uczestników procesu realizacji. Cechą takich definicji jest pewne „przerzucenie” decyzji na interpretatora.

Pozostaje wreszcie kwestia właściwej specyfikacji betonu konstrukcji masywnych. W zakresie normy [15] znajduje się zapis o możliwości podania dodatkowych lub innych wymagań dotyczących m.in. betonu do konstrukcji masywnych. Źródłem tych wymagań mogą być dalsze części normy EN 206 lub „inne specjalistyczne normy europejskie”, a w przypadku, gdy nie są one dostępne stosowane mogą być „postanowienia przyjęte w kraju stosowania betonu”. Identyczny zapis utrzymano w przygotowywanej wersji normy [14], co więcej pozycja „national building regulation (in place of use)” zyskała symboliczną nadrzędność w stosunku do układu kompatybilnych norm. A więc formalna podstawa istnieje. Niestety specyfikacje często podają wymagania sprzeczne z praktyką technologii betonu w konstrukcjach masywnych. Wzmianka o konieczności zastosowania cementu o niskim cieple hydratacji może być niewystarczająca dla zachowania monolityczności elementów, jeśli jednocześnie zachowane mają być graniczne wartości składu dla określonych klas ekspozycji, szczególnie w aspekcie minimalnej zawartości cementu. Otwartym pytaniem pozostaje czy potrafimy wskazać lub opracować „postanowienia przyjęte w Polsce”? Szansa istniała przy tworzeniu krajowego uzupełnienia do normy EN 206-1 [16]. Być może nowelizacja jej zapisów będzie kolejną. Mamy jeszcze normę branżową z 1962 r. [13]. Póki co autorzy mają nadzieję, że jej treść nie będzie w całości sklasyfikowana jako sprzeczna z nową, przyjętą w Polsce wersją EN 206.

2. Opis zadania

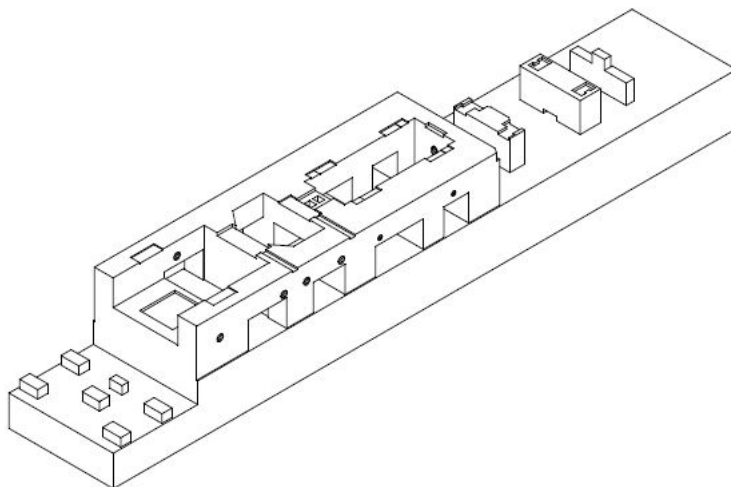
Włocławska inwestycja jest z wielu względów wizytówką przyjętej strategii koncernu PKN ORLEN S.A. Powstająca elektrociepłownia gazowo-parowa będzie największą tego typu w Polsce. Moc bloku określana jest na 460 MW. W jednym procesie technologicznym tzw. kogeneracji wytwarzane będzie ciepło oraz energia elektryczna. Taki sposób produkcji jest jednocześnie efektywny i przyjazny środowisku naturalnemu. Wmurowanie kamienia węgielnego odbyło się 18.04.2013 r., natomiast z końcem 2015 r. planowane jest oddanie do eksploatacji.

Ciekawym, z punktu widzenia technologii betonu, wyzwaniem była realizacja posadowienia bloku elektrociepłowni. Charakterystykę geometryczną elementów przybliży czytelnikowi tabela 1 oraz rysunek 1.

Niezależnie uzyskane doświadczenia uczestników procesu tworzenia omawianych fundamentów pozwoliło wyeliminować etap wykazania masywności konstrukcji oraz wiążących się z tym zagrożeń. Niemniej dla porządku określono wartość tzw. modułu powierzchniowego, rozumianego jako iloraz powierzchni i objętości elementów. Wyniosła

Tabela 1. Podstawowa charakterystyka geometryczna konstrukcji fundamentu

Element		Fundament płyty kotłowni	Fundament turbozespołu
Długość	m	37,65	60,95
Szerokość	m	33,20	10,20
Grubość	m	2,00	5,00
Objętość	m ³	1953	2941



Rys. 1. Wizualizacja fundamentu turbiny parowej i gazowej

ona 1,1 oraz 1,2 m⁻¹ odpowiednio dla fundamentu kotłowni oraz turbozespołu. Najmniejszy wymiar poprzeczny w obu przypadkach przekraczał 1,5 m. A zatem fundamenty zgodnie z normą [13] oraz opracowaniem [2] także formalnie sklasyfikować należy jako masywne.

W zakresie materiałowym zadanie sprowadzało się do opracowania właściwej recepty mieszanki betonowej. W porównaniu do wielu zastosowań, przygotowanie składu nie było pojedynczym, ograniczonym do jednego przedziału czasu etapem procesu. Korekty i modyfikacje uwzględniano na bieżąco, wraz z kolejnymi ustaleniami i postępowaniem tworzenia technologii wykonania robót.

3. Dobór rozwiązania

3.1. Skala laboratoryjna

Przy ustaleniu składu betonu wykorzystano liczne doświadczenia z realizacji, dla których ujawnił się istotny wpływ oddziaływań pośrednich: fundamentów pod maszty elektrowni wiatrowych, masywnych posadowień budynków wysokich czy ścian o znacznej długości, ograniczonej swobodzie odkształceń (utwierdzonych) i dużej rotacji form. Szczególnie

cenne były te przykłady, gdzie określone zabiegi pozwoliły wyeliminować konkretny problem.

Jako priorytetowe czynniki wskazano: czas przerobu i urabialność mieszanki betonowej, zawartość cementu oraz zawartość wody.

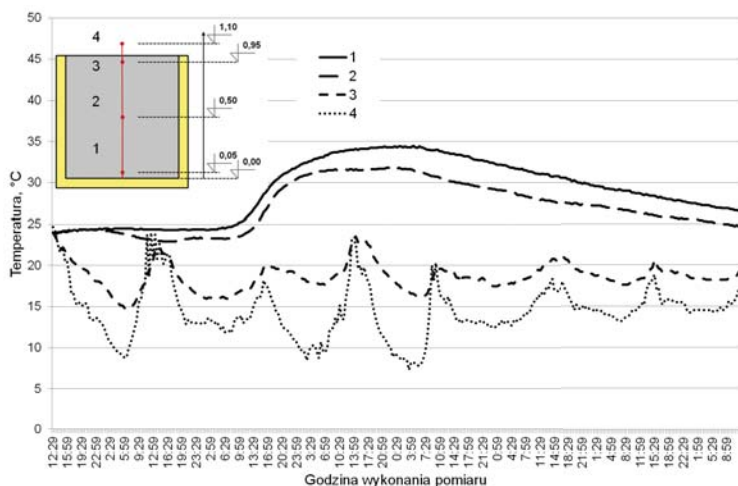
Urabialność masy betonowej w opisywanym zastosowaniu określona jest wysoką podatnością na transport rurociągiem (pompowanie) oraz dokładne zagęszczenie w elemencie. Pożądanymi właściwościami reologicznymi są w tym przypadku wysoka spójność (kohezja), przy ograniczonej lepkości plastycznej i granicy płynięcia. Tą ostatnią cechą zapewnić miała konsystencja mieszanki betonowej w granicach od 120 do 180 mm opadu stożka (S3/S4). Analiza geometrii i zbrojenia elementów, przy założonej technologii potwierdziła możliwość wykorzystania kruszywa o wymiarze ziaren do 31,5 mm. Fakt ten sprzyja redukcji niezbędnej ilości zaczynu, choć może jednocześnie zwiększać tendencję do segregacji składników mieszanki. Jednym z podstawowych założeń była również zawartość wody. Określono ją nie tyle jako wartość względną (w/c), lecz bezwzględną efektywną ilość $\leq 140 \text{ kg/m}^3$. Zawartość cementu CEM III/A 42,5N-LH-HSR/NA przyjęto wstępnie na poziomie 240 kg/m^3 .

Omówiony pokrótce układ wymagań i założeń komplikował projektowanie składu. Dobór rodzaju i ilości każdego ze składników wywiera istotny wpływ na wszystkie kluczowe właściwości w omawianym zastosowaniu. Stąd w dużej mierze projektowanie oparto na tradycyjnym warsztacie technologa, m.in. iteracyjnym doborze uziarnienia czy porównaniu ilości pracy dla pełnego zagęszczenia. Po uzyskaniu pożądanych cech „klasycznej” mieszanki, wymagane właściwości reologiczne oraz czas wiązania uzyskano poprzez dobór domieszek i odpowiednie dozowanie popiołu lotnego krzemionkowego. Projektowana klasa wytrzymałości betonu na ściskanie C30/37 miała zostać uzyskana po 90 dniach dojrzewania.

3.2. Skala przemysłowa

W terminologii zarządzania jakością próby w skali przemysłowej nazwalibyśmy etapem walidacji rozwiązań. Dla opracowania technologii betonu monolitycznych elementów masywnych etap ten jest nie tyle „mile widziany”, ile bezwzględnie wymagany.

Jak wspomniano wcześniej największe ryzyko powstania rys występuje w pewnym krytycznym okresie dojrzewania betonu. Znany z praktyki sposobem symulacji zachowania się młodego betonu w elementach masywnych jest wykonanie i pomiar zmiany temperatury w tzw. blokach testowych. W przypadku opisywanej realizacji bloki posiadały wymiary $1,0 \times 1,0 \times 1,0 \text{ m}$. Wykonano je w formie, której wszystkie – z wyjątkiem górnej – powierzchnie izolowane były warstwą styropianu o grubości 10 cm. Zmiany temperatury w przekroju określano w odstępach 0,5 h przez 7 dni dla 3 punktów: w środku oraz 5 cm od spodu i od góry bloku (rysunek 2). Dodatkowy czujnik rejestrował również temperaturę powietrza 10 cm powyżej górnej, nieizolowanej powierzchni. W tym przypadku wartości podstawowych miar masywności wyniosły: moduł powierzchniowy $6 / 1 = 6,0$ oraz współczynnik masywności pozornej $1 / 1 = 1,0 \text{ m}^1$ [7]. Wszystkie badania wykonał personel Hydrobudowa-1 Betoniarnia-Laboratorium Sp. z o.o.



Rys. 2. Rozwój temperatury w bloku testowym

Maksymalna temperatura w bloku testowym została zarejestrowana przez czujnik nr 1 (spód elementu) jako 34,5°C po 88 h od momentu zaformowania elementu. Warto zwrócić uwagę na odmienną charakterystykę zmian temperatury górnej powierzchni bloku (czujnik nr 3) w porównaniu do spodu i środka bloku. Wyraźnie widać wpływ braku izolacji – przebieg zmian był zbliżony do zarejestrowanych zmian temperatury powietrza. Jako ciekawostkę przytoczyć można maksymalną temperaturę > 60°C w bloku, w którym testowano inną mieszankę o zawartości cementu hutniczego na poziomie 320 kg/m³.

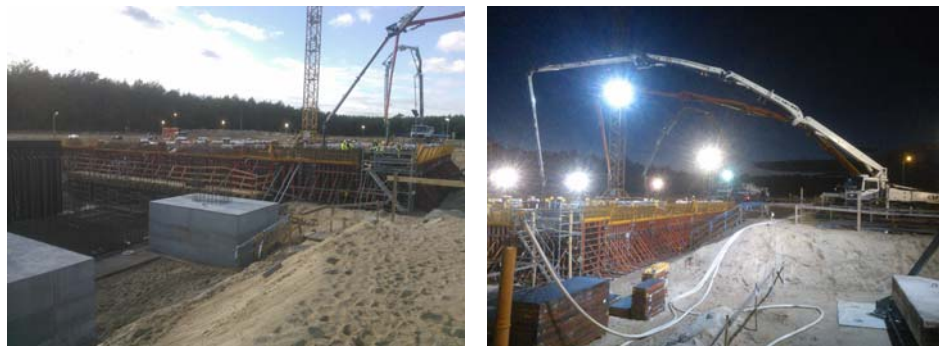
Ważnym elementem prób było również określenie czasu przydatności mieszanki betonowej do wbudowania oraz zagęszczenia w rzeczywistych warunkach. Po 2 h transportu konsystencję oznaczono na miejscu wbudowania jako 135 mm opadu stożka. Po kolejnych 5 h konsystencja partii mieszanki przechowywanej w otwartym pojemniku wynosiła 35 mm opadu stożka, przy czym mieszanka wykazywała pełną podatność na zagęszczenie wibratorem pograżanym (buławą). Zawartość powietrza nie przekraczała 2% objętości.

4. Realizacja i wyniki badań

Dostawcą betonu oraz pomp było konsorcjum firm Thomas-Beton Polska Sp. z o.o. (lider) oraz Budizol Sp. z o.o. S.K.A. Wytwórnice zlokalizowane były odpowiednio w odległości 55 i 15 km od miejsca budowy we Włocławku, z typowym czasem przejazdu betonomieszarek 120 i 30 minut.

Sama organizacja oraz przebieg betonowania zbliżone były do podobnych realizacji w Polsce, opisanych szeroko m.in. na Konferencjach Dni Betonu. Wbudowanie mieszanki realizowano jednocześnie z pomocą 3 pomp o wysięgu 42 m, z zapewnieniem ciągłego dźwizgu kolejnej pompy. Realna wydajność pomp w czasie betonowania wynosiła ok. 20 m³/h. Mieszankę układano w warstwach poziomych o grubości 30 cm. Z ciągłego charakteru formowania płyty oraz przyjętej technologii wynikała m.in. minimalna liczba betonomieszarek (22) i wibratorów buławowych (14) oraz gwarantowana wydajność

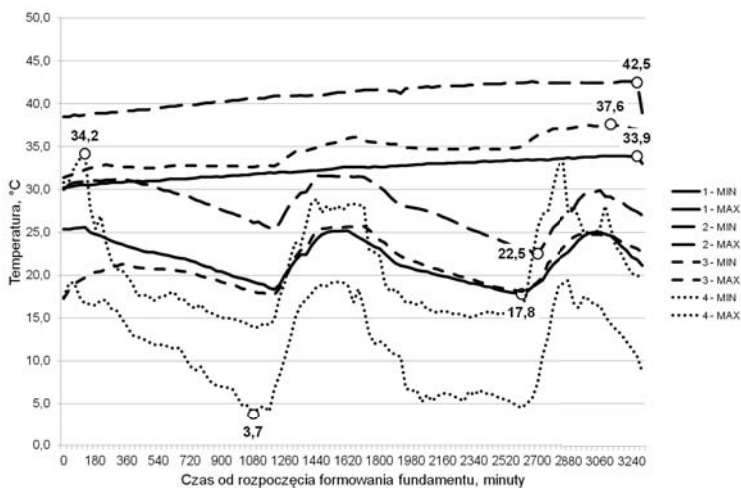
wytwórni betonu ($35 + 25 \text{ m}^3/\text{h}$). Pielęgnację mieszanki realizowano cyklem kolejnych czynności: wygładzenie powierzchni, zroszenie wodą, przykrycie warstwą styropianu i folii budowlanej oraz polewanie wodą całego fundamentu. Decyzja o zdjęciu izolacji każdorazowo podejmowana była na podstawie analizy danych z czujników temperatury. Całość zadania zgodnie z podziałem fundamentów na betonowane bloki zajęła łącznie 7 dni wliczając dzienne i nocne betonowania (fot. 1 i 2).



Fot 1 i 2. Dzielne i nocne formowanie konstrukcji fundamentów

W technologii betonu konstrukcji masywnych najczęściej uwzględnia się dwie podstawowe charakterystyki: maksymalną wartość temperatury oraz gradient temperatury w odniesieniu do położenia na wysokości elementu. Dla opisywanej realizacji maksymalna odnotowana temperatura w fundamentach nie przekroczyła 45°C , a gradient temperatury osiągnął maksymalną wartość $13^\circ\text{C}/\text{m}$ (w zdecydowanej większości $< 8^\circ\text{C}/\text{m}$). Wspomniana izolacja górnej powierzchni dojrzewającego betonu w postaci płyt styropianowych o grubości 5 cm zdecydowanie spełniła zakładaną rolę. Umożliwiła zbliżenie warunków dojrzewania do panujących w dolnej części fundamentu. Potwierdzają to uzyskane pomiary rozkładu temperatury betonu w czasie, wyraźnie charakteryzujące się „symetrią” w stosunku do fragmentów w środkowej części.

Skalę zróżnicowania wartości temperatury w funkcji położenia w formowanym bloku i czasu przedstawia rysunek 3. Wyniki opracowano na przykładzie fundamentu kotłowni, dla wartości mierzonych w 11 przekrojach na 4 wysokościach – razem 44 czujniki. Wartości przedstawiono jako rodzaj obwiedni temperatury, pokazując maksymalną i minimalną wartość w danym czasie dla danej wysokości. Na planie $33 \times 38 \text{ m}$ różnice temperatury powietrza 5 cm nad zaizolowaną powierzchnią betonu (czujniki poziom 4) w tym samym momencie dochodziły do 15°C . Wyraźnie widać podobny rozkład minimalnych i maksymalnych wartości temperatury w dolnej (czujniki poziom 1), środkowej (poziom 2) i górnej (poziom 3) powierzchni płyty. Odpowiadające danej chwili czasu wartości są ogólnie bardzo zbliżone dla spodu i góry fundamentu, natomiast „średnie” wartości w środku elementu są od nich wyższe o 5 do 10°C . Wykres stanowi praktyczne potwierdzenie niejednorodności tzw. pól temperatury, które stanowią źródło naprężeń własnych i wymuszonych.



Rys. 3. Maksymalne i minimalne wartości temperatury w funkcji czasu zarejestrowane przez czujniki na 4 różnych wysokościach fundamentu kotłowni

W tabeli 2 zaprezentowano właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego uzyskane w ramach kontroli produkcji wytwórni Thomas-Beton. Wszystkie wyniki uzyskano dla próbek mieszanki pobranej w miejscu dostawy.

Tabela 2. Wyniki badań właściwości mieszanki i betonu stwardniałego

Właściwość		Jednostka	n	x	s	nn
Konsystencja mieszanki betonowej		mm	42	160	23	2
Gęstość mieszanki betonowej		kg/m ³	36	2401	27	-
Wytrzymałość betonu na ściskanie	7 dni	N/mm ²	9	24,1	-	-
	28 dni		45	52,8	4,0	0
	56 dni		10	56,0	-	0
	90 dni		27	65,7	4,6	0
n – liczba wyników, x – średnia z wyników, s – odchylenie standardowe, nn – liczba wyników niezgodnych						

Uwagę zwraca stosunkowo wysoka gęstość mieszanki betonowej, wynikająca m.in. z niskiej zawartości powietrza i wody. Wymagania dla klasy wytrzymałości na ściskanie zostały spełnione już po 28 dniach dojrzewania. Fakt ten zyskuje na znaczeniu, jeśli odniesiemy go do rzeczywistych wyników z pomiarów temperatury w formowanych blokach oraz składu betonu. Jedyne przypadki niezgodności ze specyfikacją zanotowano dla konsystencji ładunków mieszanki dwóch betonomieszarek – odpowiednio 90 i 200 mm opadu stożka. Mieszanka została jednak poprawnie wbudowana, a wyniki badań wytrzymałości uzyskanego z niej betonu potwierdziły słuszność tej decyzji.

5. Podsumowanie

Z perspektywy czasu realizację posadowienia elektrociepłowni we Włocławku określić można jako bardzo sprawną w porównaniu do wielu innych konstrukcji masywnych, z którymi autorzy mieli praktyczną styczność. Wynikało to ze zrozumienia priorytetu zachowania monolityczności nad sztywnymi zapisami pierwszej wersji specyfikacji. W efekcie przygotowanie i zatwierdzenie kompletnej technologii wykonania wraz ze wszystkimi konsultacjami i próbami w skali przemysłowej zajęło 2 miesiące.

Krajowe tradycje, doświadczenia i referencje stanowią w tym zastosowaniu betonu wystarczającą podstawę. Niemniej opracowane rozwiązanie materiałowe dla fundamentów włocławskiej elektrociepłowni jest potwierdzeniem rozwoju w dziedzinie technologii betonu konstrukcji masywnych. Pod normowymi oznaczeniami kryją się nowoczesne spoiwa i domieszki. Cement o niskim cieple hydratacji i klasie wytrzymałości 42,5 w układzie z kompatybilnymi domieszkami stanowi niezwykle ciekawe narzędzie. Umożliwia ono jednoczesną kontrolę zjawisk towarzyszących samoociepłeniu twardniejącego betonu oraz uzyskanie wysokiej wytrzymałości po relatywnie krótkim czasie dojrzewania. Przykładem jest fundament elektrociepłowni, który po 3 miesiącach tworzyła w pełni monolityczna konstrukcja z betonu o rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie $> 65 \text{ N/mm}^2$.

Literatura

- [1] Dziewański J., Starowicz J., *Zastosowanie kruszywa z miejscowych złóż materiałów budowlanych do betonów hydrotechnicznych (na przykładzie zapory w Solinie)*, Studia, Rozprawy, Monografie 102, Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2002
- [2] Flaga K., *Naprężenia własne typu 'makro' w elementach i konstrukcjach z betonu*, Zeszyt Naukowy Politechniki Krakowskiej, Monografia 106, Kraków 1990
- [3] Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcje masywne. Teoria. Wymiarowanie. Realizacja*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2003
- [4] Kledyński Z., *Termika betonów hydrotechnicznych – Aspekty technologiczne*, materiały szkoleniowe ITB, Warszawa 2006r.
- [5] Kledyński Z., *Beton hydrotechniczny wg aktualnych wymagań normowych*, materiały szkoleniowe ITB, Warszawa 2006r.
- [6] Neville A. M., *Właściwości betonu*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000
- [7] Witkowski P., *Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu*, materiały XIII Konferencji Naukowej „Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbielew 2001
- [8] Witkowski P., *Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998
- [9] Witkowski P., *Uszkodzenia termiczne przyczółków mostowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2011
- [10] Sachstand Massenbeton. Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, 1982
- [11] ACI 116R, Cement and Concrete Terminology
- [12] ACI 207.1R-05, Guide to Mass Concrete, 2012
- [13] BN-62/6738-07 Beton hydrotechniczny
- [14] FprEN 206:2013 (E) Concrete – Specification, performance, production and conformity. Final draft
- [15] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [16] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia normy PN-EN 206-1:2003