

te ch n o l o g i e Zabudowa betonu w konstrukcjach masywnych

Wstęp

Problematyka „betonu masywnego” dotyczy elementów o takich gabarytach, w których rozkład temperatur w zabudowanym młodym betonie odgrywa istotne znaczenie dla uzyskania monolitycznej masy betonowej w całej konstrukcji. Główną trudność podczas procesu projektowania receptur mieszanek betonowych, przeznaczonych do zabudowy w konstrukcjach masywnych, stanowi określenie rozkładu temperatur w konstrukcji i wynikających z tego rozkładu gradientów temperatury w poszczególnych częściach konstrukcji. Informacje te są niezbędne w celu zastosowania odpowiednich zabiegów technologicznych, polegających zarówno na modyfikacji domieszkami chemicznymi matrycy cementowej (sterowanie szybkością procesu hydratacji przez zastosowanie opóźniaczy wiązania oraz rozkładem w czasie wydzielającego się ciepła z hydratacji cementu), jak i zastosowaniu izolacji termicznej konstrukcji, mającej na celu przeciwdziałanie powstawaniu termicznych naprężeń krytycznych z punktu widzenia wytrzymałości betonu. Nakłada to na wykonawcę konstrukcji konieczność kontrolowania termiki konstrukcji w czasie zabudowywania jej mieszanką betonową jak i po zabudowaniu. Informacje uzyskane podczas kontroli termiki konstrukcji w pierwszym okresie wiązania i twardnienia betonu z kolei służą do odpowiedniego sterowania procesem pielęgnacji termicznej konstrukcji w celu uniknięcia, bądź znacznego ograniczenia, powstawania rys wywołanych naprężeniami termicznymi. Mówiąc o zabudowie mieszanki betonowej w konstrukcji nie należy także bagatelizować odpowiedniego sposobu układania mieszanki betonowej w konstrukcjach wielkogabarytowych.

W konstrukcjach masywnych, przede wszystkim należy zwrócić uwagę na proces hydratacji cementu – silnie egzotermiczna reakcja występująca podczas wiązania i twardnienia cementu – która jest przyczyną wzrostu temperatury w konstrukcji. Podczas hydratacji cementu wydzielają się ciepło,

które powoduje wzrost temperatury betonu, a co za tym idzie na skutek rozszerzalności cieplnej wzrost objętości elementu.

W sytuacji hipotetycznej braku występowania jakichkolwiek więzów, wzrost objętości zabudowanego w elemencie betonu nie powoduje wystąpienia naprężeń termicznych.

W praktyce występuje zawsze co najmniej jeden rodzaj więzów:

- wewnętrzne, związane z nierównomiernym rozkładem temperatury w betonie (rys. 3)
- zewnętrzne, związane z ograniczeniem termicznego wzrostu objętości.

Warunki rzeczywiste wprowadzają szereg ograniczeń i czynników determinujących powstawanie wspomnianych więzów. Skutkuje to oczywiście powstaniem naprężeń wewnętrznych w objętości konstrukcji, mających destrukcyjny charakter.

Dobór składników mieszanki betonowej

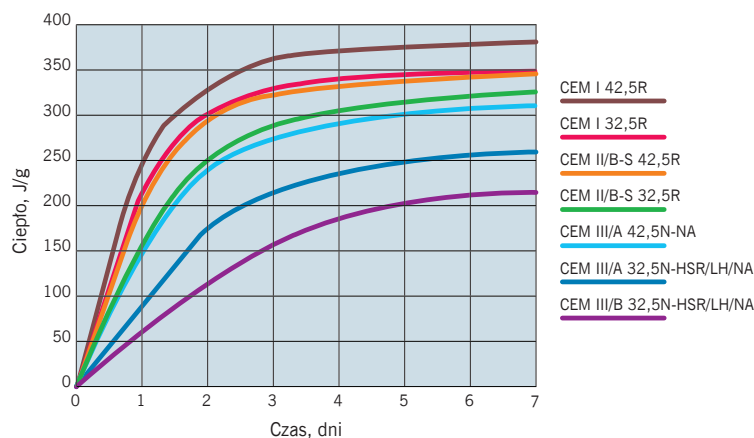
Pojęcie betonu masywnego niesie z sobą szereg zagadnień i nie odnosi się wyłącznie do odpowiednio dobranej receptury mieszanki betonowej. Równorzędne w znaczeniu uzyskania poprawnego efektu finalnego jest odpowiednie przeprowadzenie zabudowy oraz pielęgnacji termicznej wykonywanej konstrukcji, o czym już sygnalizowano wcześniej. Receptura mieszanki betonowej winna być tak zaprojektowana, aby uzyskać zakładane parametry stwardniałego betonu przy maksymalnym ograniczeniu ciepła wydzielającego się podczas hydratacji cementu. Ponieważ cement jest składnikiem betonu determinującym wydzielanie ciepła, wobec czego należy dążyć do ograniczenia jego ilości do niezbędnego minimum z punktu widzenia zarówno trwałości konstrukcji, jak i uzyskania parametrów końcowych betonu. W szczególnych przypadkach zakłada się, że parametry stwardniałego betonu uzyskane będą w terminach przekraczających 28. dzień dojrzewania betonu.

Podstawą prawidłowo zaprojektowanej mieszanki betonowej jest odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy wszystkich składników receptury mieszanki betonowej, ze szczególnym naciskiem na rodzaj zastosowanego cementu oraz rodzaj i ilość wprowadzanych dodatków mineralnych.

Niezmienne przydatnymi i zalecanymi do zastosowania w konstrukcjach masywnych spoiwami są cementy z dużą ilością dodatków mineralnych i o niskim ciepłe hydratacji. Idealnymi w zastosowaniu do tego typu realizacji są cementy z grupy CEM III. Na polskim rynku dostępne są różne rodzaje cementów hutniczych, np. CEM III/A 32,5 N-HSR/LH/NA bądź CEM III/B 32,5 N-HSR/LH/NA. W oparciu o te cementy wykonano jedne z największych w Polsce elementy żelbetowe wielokubaturowe.

Wymienione cementy charakteryzują się niskim ciepłem hydratacji, odpowiednio nie wyższym niż

Rys. 1. Zależność ilości wydzielonego ciepła w funkcji czasu dla wybranych cementów



270 J/g dla CEM III/A 32,5 N-HSR/LH/NA oraz 210 J/g dla CEM III/B 32,5 LH (wyznaczone po 7 dniach metodą rozpuszczania wg PN-EN 196-8). Tak niskie ciepło hydratacji cementu pozwala na uzyskanie łagodnej dynamiki wzrostu temperatury młodego betonu oraz możliwie duże w czasie rozłożenie ilościowego wydzielenia się ciepła podczas hydratacji cementu. Są to istotne właściwości, które pozwalają ograniczyć możliwość powstania krytycznych gradientów temperatury w objętości konstrukcji, a w efekcie końcowym wydatnie ograniczają samonagrzew ułożonego w konstrukcji betonu. Zastosowanie tego rodzaju cementów pozwala także wyeliminować kosztowne rozwiązania chłodzenia konstrukcji.

Bardzo często, prócz zastosowania jako uzupełnienie drobnych frakcji w stosie kruszywowym, także w celu dodatkowego ograniczenia ilości wydzielanego ciepła w procesie twardnienia betonu, stosowane są jako składnik mieszanki betonowej dodatki mineralne. Najbardziej popularnym dodatkiem stosowanym w produkcji betonu towarowego jest dodatek popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego.

Następnym zagadnieniem przy projektowaniu receptury mieszanki betonowej po właściwym pod względem jakościowym doborze spoiwa, jest odpowiedni dobór ilości stosowanego spoiwa. Podczas ustalenia zawartości cementu w mieszance betonowej można posłużyć się wytycznymi wskazanymi przez FitzGibbona, który ocenił, iż wzrost maksymalnej temperatury betonu w warunkach adiabatywnych wynosi ok. 12°C na każde 100 kg cementu przypadające na 1 m³ betonu, dla zawartości cementu pomiędzy 300 a 600 kg/m³. Zależność ta jest niezwykle przydatna, ponieważ nie wpływa na nią rodzaj zastosowanego cementu.

W praktyce dla betonów konstrukcji masywnych ilość cementu przypadająca na 1 m³ betonu powinna oscylować w okolicy 300 kg.

Dzięki postępowi, jaki dokonał się w dziedzinie domieszek chemicznych, możliwe jest sterowanie wskaźnikiem w/c w taki sposób, aby uzyskać zakładane właściwości reologiczne oraz wytrzymałościowe betonu przy możliwie niskiej ilości cementu. Z uwagi na konieczność ograniczenia skurczu betonu, zapewnienie odpowiedniej szczelności betonu oraz odpowiedniej trwałości konstrukcji betonowej stosunek w/c nie powinien przekraczać wartości 0,5. Zastosowane domieszki chemiczne muszą zatem zapewnić znaczne ograniczenie ilości wody w mieszance betonowej oraz, co jest równie istotne, odpowiednio długie zachowanie urabialności mieszanki betonowej, ponieważ przy wykonywaniu konstrukcji masywnych bardzo ważnym aspektem jest prawidłowe połączenie układanych po sobie warstw mieszanki betonowej. Jest to konieczne dla uzyskania monolitycznego obiektu. Aby spełnić ten warunek, mieszanka betonowa winna zachowywać w czasie wystarczającą urabialność, która w zależności od przyjętego schematu zabudowy oraz możliwości wytworzenia mieszanki betonowej powinna utrzymać się nawet do 6 godzin.

W mieszankach betonów masywnych pożądane jest zastosowanie kruszywa o możliwie największym wymiarze maksymalnym ziarna. Zastosowanie takiego stosu okruszowego ma trzy główne

aspekty, które należy wymienić:

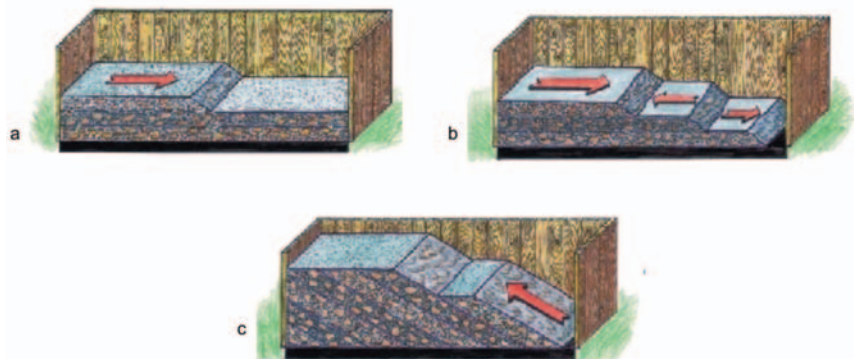
- po pierwsze, powoduje ograniczenie zawartości frakcji drobnych, co pociąga za sobą zredukowanie wodożądności kruszywa, a to skutkuje poprawą szczelności i lepszymi właściwościami stwardniałego betonu
- po drugie, bardzo istotne z punktu rozszerzalności termicznej betonu, większa ilość jednorodnego, monolitycznego, „naturalnie zespolonego” składnika betonu, jakim niewątpliwie jest kruszywo (ziarno kruszywa), wydatnie ogranicza skurcz betonu, co jest szczególnie pożądane
- po trzecie, zastosowanie stosu okruszowego o możliwie największym wymiarze maksymalnym ziaren kruszywa grubego skutkuje mniejszą powierzchnią rozwinięcia, w przeliczeniu na cały stos okruszowy, co w efekcie końcowym wymaga mniejszej ilości cementu do „zespolenia” kruszywa w mieszance betonowej (teoria otulenia ziarn kruszywa przez ziarna cementu stosowana w projektowaniu składu mieszanek betonowych).

Jak wynika z powyższego, ideałem byłoby dążenie do zastosowania stosu okruszowego o D_{max} 63 mm i większym. Niestety istnieją powody ograniczające maksymalny wymiar ziarna kruszywa w betonach masywnych. Na ogół jest to przede wszystkim sposób podawania mieszanki betonowej, którym w większości przypadków jest pompowanie betonu, oraz sam proces układania i zagęszczania mieszanki betonowej w konstrukcji, która zawiera przeszkody dla swobodnego wypełnienia objętości w postaci zbrojenia. Z tego powodu w większości mieszanek betonów masywnych (za wyłączeniem konstrukcji hydrotechnicznych) stosuje się kruszywo o maksymalnym ziarnie do 31,5 mm (rys. 4).

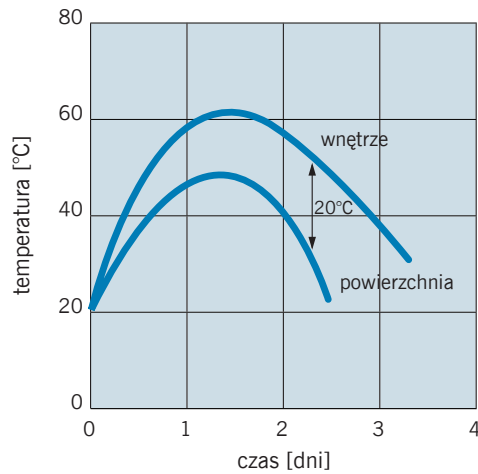
Zabudowa mieszanki betonowej oraz pielęgnacja termiczna młodego betonu

Najbardziej rozpowszechnionym sposobem układania i zagęszczania mieszanek betonowych w konstrukcjach masywnych jest układanie mieszanki betonowej warstwami, w sposób skośny (rys. 2c). W przypadku stosowania wymienionego sposobu układania mieszanki betonowej warstwa betonu układana jest sukcesywnie na całej wysokości elementu, co umożliwi znaczne skrócenie czasu potrzebnego na położenie na sobie i połączenie z sobą kolejnych układanych warstw. Betonowanie sposobem warstw skośnych niesie z sobą konieczność odpowiedniego doboru konsystencji układanej mieszanki betonowej. W przypadku zastosowania konsystencji zbyt niskiej możemy spodziewać się braku prawidłowego zagęszczenia w dolnych

Rys. 2. Sposoby układania mieszanki betonowej:
a) betonowanie warstwami poziomymi ciągłymi (elementy o niewielkich powierzchniach)
b) betonowanie warstwami ze stopniowaniem (elementy o znacznych powierzchniach i niewielkich grubościach)
c) betonowanie warstwami skośnymi (elementy o znacznych powierzchniach i znacznych grubościach)



Rys. 3. Przykład rozkładu temperatur w elemencie wywołujący krytyczny gradient temperatury



partiach układanego elementu, jeżeli zastosujemy konsystencję zbyt wysoką, nie będziemy w stanie utrzymać zakładanego stosunku wysokości do długości warstwy skośnej, co doprowadzi do znacznego wydłużenia czasu układania kolejnych warstw, a w skrajnym przypadku do zmiany sposobu układania. Odpowiednia do danego sposobu układania mieszanki betonowej konsystencja powinna być ustalana doświadczalnie podczas wykonywania badań wstępnych.

Opisany sposób układania mieszanek betonowych zastosowano między innymi podczas wykonywania fundamentów o kubaturze ponad 6750 m³ w Elektrowni Pątnów w Koninie oraz Elektrowni Łągisza w Będzinie oraz przy wykonywaniu elementów masywnych konstrukcji maszyny COS3 w Mittal Steel Polska SA. Zastosowana metoda zabudowy w połączeniu z odpowiednią ilością pomp do betonu na budowie zapewniła skrócenie czasu połączenia kolejnych warstw betonu w przedstawionych przykładach do niespełna 2 godzin.

Wcześniej wspomniano, iż sam wzrost temperatury betonu w elemencie masywnym nie stanowi zagrożenia w przypadku, gdy nie istnieją zewnętrzne i wewnętrzne więzy. W warunkach rzeczywistych jednak wszystkie elementy betonowe posiadają określone więzy.

Więzy wewnętrzne związane z naprężeniami termicznymi powstają na skutek oddawania przez element ciepła do otoczenia, które zgodnie z prawem Newtona opisane jest równaniem:

$$\rho_b = \alpha_p (T_s - T_z)$$

gdzie:

ρ_b – ciepło odprowadzone z powierzchni elementu

α_p – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni elementu [W/m²K]

T_s – temperatura powierzchni elementu

T_z – temperatura otoczenia

Z przedstawionego równania wynikają następujące możliwości ograniczenia naprężeń termicznych w konstrukcji:

- zmniejszenie współczynnika przejmowania ciepła poprzez zastosowanie izolacji termicznej
- zmniejszenie różnicy temperatur poprzez ograniczenie temperatury elementu.

W przypadku osiągnięcia krytycznej wartości odprowadzania ciepła z elementu naprężenia rozciągające związane z rozszerzalnością cieplną wnętrza elementu i bezwładnością cieplną zewnętrznych warstw osiągają wartość przekraczającą wytrzymałości na rozciąganie młodego betonu.

Krytyczną różnicę temperatur, przy której naprężenia rozciągające przekroczą wytrzymałości młodego betonu podał w swej pracy FitzGibbon i wynosi ona ok. 20°C.

Jak wynika z powyższych rozważań, bardzo ważnym czynnikiem determinującym uzyskanie pozbawionego pęknięć elementu jest odpowiednie przeprowadzenie pielęgnacji termicznej. Intensywność, rodzaj oraz okres trwania pielęgnacji powinny być ustalone w oparciu o zmierzone wartości temperatury podczas monitorowania rozkładu temperatur w elemencie.

W praktyce rozkład temperatur monitorowany jest w różnych punktach konstrukcji za pomocą termopar. Rozmieszczenie punktów pomiarowych oraz ich ilość dobierana jest z uwzględnieniem spodziewanych pól termicznych o maksymalnych tempe-

Rys. 4. Krzywa przesiewu mieszanki mineralnej betonu masywnego

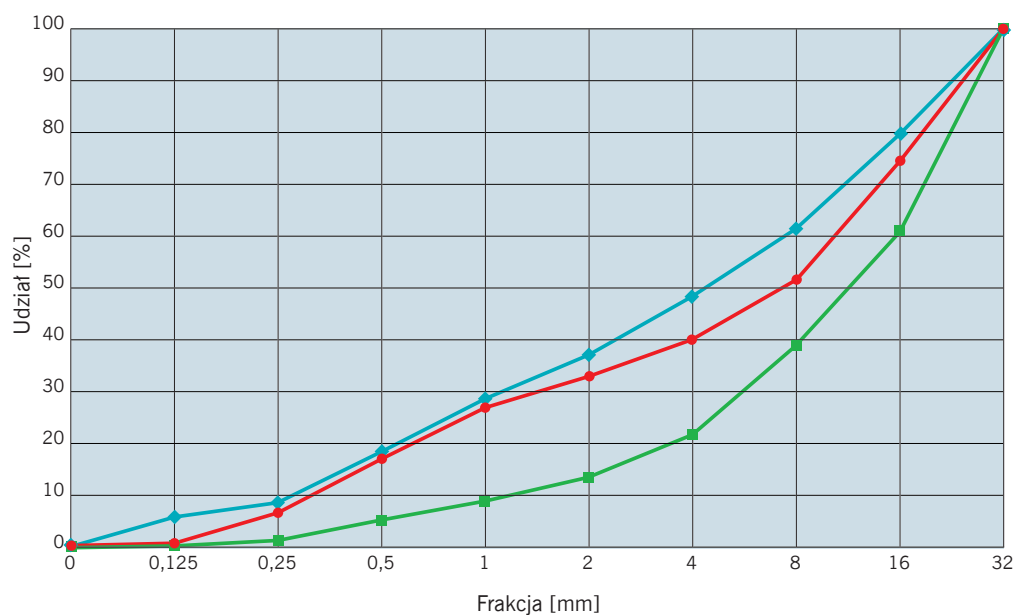


Tabela 1. Receptura mieszanki betonowej

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Piasek 0/2	619
Grys 2/8	354
Grys 8/16	399
Grys 16/31,5	453
CEM III/A 32,5N – HSR/LH/NA	300
Popiół lotny	70
Woda	143
Plastyfikator	1,24
Superplastyfikator	4,34

raturach. W oparciu o uzyskiwane tą drogą informacje podejmowane są decyzje o odpowiednim zastosowaniu izolacji termicznej. Zgodnie z wytycznymi literaturowymi oraz w świetle zdobytych doświadczeń podczas tego typu realizacji izolacja termiczna powinna być zachowana do momentu zmniejszenia się różnicy temperatur pomiędzy poszczególnymi warstwami poniżej 10°C.

Jako izolacje termiczne powszechnie wykorzystywane są płyty styropianowe połączone z folią z tworzyw sztucznych dla zapewnienia odpowiednich warunków wilgotnościowych. Zwiększenie grubości izolacji termicznej należy zastosować na odkrytych narożach elementu, gdzie wymiana ciepła z otoczeniem jest szczególnie duża. Przy pielęgnacji tego typu elementów należy zwrócić szczególną uwagę na wszelkiego rodzaju środki nanoszone powierzchniowo, aby ich zastosowanie nie spowodowało dodatkowego efektu chłodzenia. W szczególności nie wolno stosować powszechnego, dobrze zdającego egzamin w przypadku pielęgnacji niewielkich elementów, polewania powierzchni elementu zimną wodą.

Oprócz więzów wewnętrznych związanych z rozkładem temperatur w konstrukcji bardzo często występują więzy zewnętrzne związane z ograniczeniem rozszerzalności cieplej wykonywanego elementu. Przykładem takich więzów mogą być szalunki lub wykonywanie konstrukcji betonowej na już istniejącym elemencie (ściany powstające na istniejącym fundamencie), który ogranicza swobodne zmiany liniowe twardniejącego betonu, wywołane rozszerzalnością termiczną ciała stałego. Sposobem uniknięcia tak wywołanych uszkodzeń może być odpowiedni dobór zbrojenia oraz, jeżeli to możliwe, zapewnienie maksymalnej swobody zmian wymiarów w pozostałych nieograniczonych kierunkach wykonywanemu elementowi, w celu rozładowania naprężeń termicznych.

Zabudowa betonu w obiektach maszynowych COS3 dla Mittal Steel Polska SA

W pierwszym kwartale 2006 roku rozpoczęła się budowa obiektów maszynowych dla potrzeb budowy trzeciej nitki ciągłego odlewu stali w hucie Mittal Steel w Dąbrowie Górniczej. Wykonawca elementów żelbetowych, firma Hochtief Polska, zlecił opracowanie receptury mieszanki betono-

Tabela 2. Parametry mieszanki betonowej

Opad stożka	120 mm
Zawartość powietrza	0,9%
Wskaźnik w/c	0,48

Tabela 3. Średnie uzyskane parametry stwardniałego betonu

Wytrzymałość na ścisk. 7-dniowa	25,9 MPa
Wytrzymałość na ścisk. 28-dniowa	48,2 MPa
Wodoprzepuszczalność	W8

wej i sprawowanie nadzoru laboratoryjnego nad zabudową oraz pielęgnacją betonu firmie Beto-tech Sp. z o.o.

Zaproponowana przez laboratorium receptura mieszanki betonowej oparta została na cementach CEM III/A 32,5N-HSR/LH/NA z dodatkiem popiołów lotnych.

Zastosowano stos okruszowy o maksymalnym wymiarze ziarna 31,5 mm.

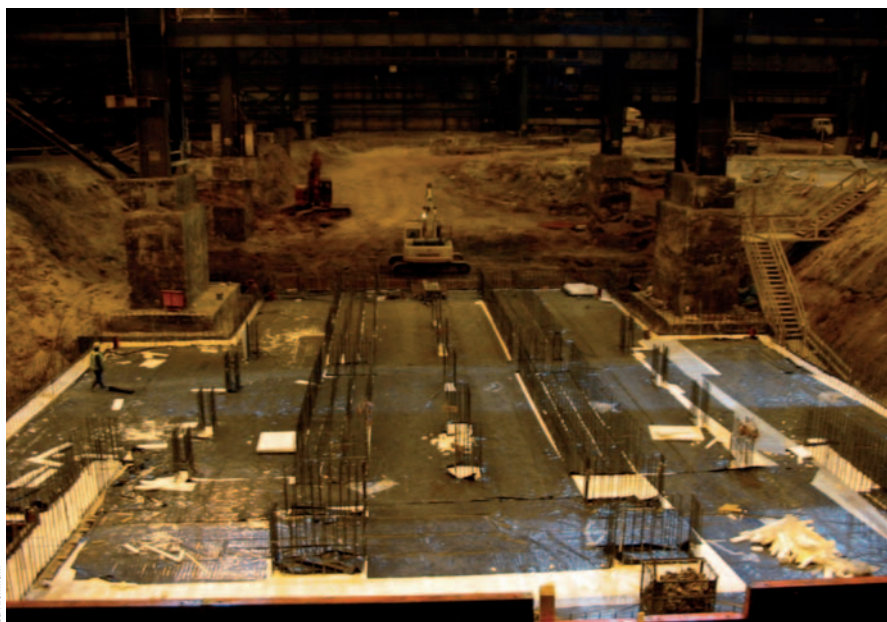
Ze względu na konieczność ograniczenia wskaźnika w/c do wartości 0,48 zastosowano kombinację wysoko wydajnego superplastyfikatora z plastyfikatorem.

Dzięki użyciu takiej kombinacji domieszek chemicznych zapewniono odpowiednią redukcję wody zarobowej oraz wydłużono czas przerobu mieszanki betonowej do 6 godzin, co dało wystarczający zapas czasu potrzebny na ułożenie w konstrukcji mieszanki betonowej oraz na połączenie kolejnych warstw skośnych. Skład zastosowanej receptury mieszanki betonowej został podany w tabeli 1.

Średnie parametry mieszanki betonowej zostały podane w tabeli 2, a stwardniałego betonu w tabeli 3.

Jako izolację zastosowano folię polipropylenową oraz warstwy styropianu.

Widok izolowanego termicznie elementu



Intensywność oraz czas pielęgnacji termicznej były ustalane na podstawie odczytu rozkładu temperatur w maszywie betonowym. Pomiar temperatur odbywał się za pomocą termopar typu K w ilości zależnej od objętości, wymiarów oraz kształtu spodziewanych rozkładów termicznych w wykonywanym elemencie. Sondy zamontowane były na trzech wysokościach: 15 cm pod powierzchnią górną, w środku elementu oraz 15 cm od dolnej powierzchni. Rozmieszczenie sond poprzedzone było wstępnymi obliczeniami rozkładu temperatury w elemencie celem określenia najbardziej niebezpiecznych obszarów, które szczególnie należy monitorować.

Podczas pomiarów uzyskano charakterystykę rozkładu temperatury pokazaną na rys. 5.

Jak wynika z przedstawionych wyników pomiarów, prawidłowo prowadzony proces pielęgnacji termicznej w powiązaniu z dobrze zaprojektowaną recepturą mieszanki betonowej oraz prawidłowo sporządzonym i zrealizowanym planem zabudowy dał w końcowym rozrachunku pożądaną efekt w postaci braku usterek w konstrukcji. Maksymalny gradient temperatury przypadający na metr grubości elementu wyniósł w przedstawionym przypadku $7,2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ i wystąpił, podobnie jak maksymalna temperatura wnętrza, po czterech dniach od zabudowy. Zarówno maksymalna temperatura wnętrza jak również gradient temperatur nie przekroczyły ustalonych na etapie projektowania granicznych wartości $\Delta t < 16^{\circ}\text{C}/\text{m}$ oraz $T_{w \text{ max}} < 60^{\circ}\text{C}$.

Docelowo na potrzeby budowy trzeciej linii maszyny COS zostanie dostarczone około 30.000 m³ betonu, z czego większość zostanie zabudowana w konstrukcjach maszynowych.

Podsumowanie

Nie sposób w szczegółach przekazać całej wiedzy związanej z wykonywaniem konstrukcji maszynowych w tak krótkim materiale. Niemniej jednak można pokusić się o stwierdzenie, iż aby odnieść sukces przy tworzeniu tak specyficznych i trudnych elementów konstrukcyjnych, należy oprócz ugruntowanej wiedzy fachowej i doświadczenia posiadać zaplecze techniczne umożliwiające dostarczenie rzetelnych informacji istotnych z punktu podejmowania decyzji oraz w wyniku posiadanego doświad-

czenia, trafnie i szybko reagować na powstające problemy. Ponadto wymagana jest komunikacja i fachowa wymiana informacji pomiędzy wykonawcą konstrukcji, dostawcą mieszanki betonowej i jednostkami odpowiedzialnymi za nadzór.

Oprócz świadomości trudności, jakie niesie z sobą wykonanie takich konstrukcji, należy także opierać podejmowane decyzje na ugruntowanej wiedzy inżynierskiej. Należy brać pod uwagę i wykorzystywać najnowsze rozwiązania techniczne obszaru technologii cementu, betonu, a zwłaszcza chemii budowlanej. Pozwala to w znacznym stopniu ograniczać dodatkowe koszty.

Przedstawiona w artykule realizacja jest jedną z wielu, które powstały w czasie ostatnich kilku lat i przy których pracownicy Betotech Sp. z o.o. czynnie uczestniczyli. Zdobyte doświadczenie podczas realizacji prac zarówno ze strony jednostki nadzorującej jak i dostarczającej technologię pozwoliło wypracować procedury postępowania podczas realizacji tego typu zadań, wyeliminowania najczęstszych błędów popełnianych podczas zabudowy i pielęgnacji zarówno przez wykonawcę jak i dostawcę mieszanki betonowej. Należy z całą stanowczością stwierdzić, iż prócz ugruntowanej wiedzy inżynierskiej konieczne jest doświadczenie w realizacji elementów wielkogabarytowych. Nie sposób przewidzieć wszystkich zagrożeń przed przystąpieniem do realizacji konstrukcji, wobec czego jednostka odpowiedzialna za nadzór nad poprawnością wykonywanych prac winna uczestniczyć na każdym etapie procesu podejmowania decyzji technicznych, a podczas właściwego procesu realizacji zadania bezpośrednio brać udział w podejmowaniu decyzji wpływających na jakość finalnego elementu.

mgr inż. Sebastian Kaszuba
mgr inż. Artur Golda
Betotech Sp. z o.o.

Literatura

1. A. N. Neville, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000
2. W. Kurdowski, *Chemia cementu*, PWN, Warszawa 1991

Rys. 5. Rozkład temperatury w wykonywanej konstrukcji betonowej

