

Beton masywny bloków nr 5 i 6 w Elektrowni Opole

1. Wstęp

Zmiana podejścia do projektowania konstrukcji fundamentów, zwłaszcza tych o znacznej objętości, postęp w technologii betonu oraz wzrost inwestycji w energetykę powoduje, iż betonowe konstrukcje masywne stanowią coraz liczniejszą grupę realizacji budowlanych w Polsce.

Konstrukcje te wymagają jednak szczególnego podejścia do każdego etapu realizacji, począwszy od projektowania receptury mieszanki betonowej, poprzez proces zabudowy, a skończywszy na pielęgnacji termiczno-wilgotnościowej młodego betonu. W przeciwnym razie może dojść do powstania trudnych lub czasami niemożliwych do naprawy uszkodzeń we wczesnym stadium dojrzewania betonu. Należy wziąć pod uwagę, iż podczas hydratacji cementu (mieszanki cementowo-popiołowej) zawartego w składzie mieszanki betonowej wydzielane jest ciepło, które prowadzi do wzrostu temperatury betonu oraz, w wyniku rozszerzalności termicznej, do zmiany wymiarów elementu (konstrukcji). Równoczesne chłodzenie powierzchni zewnętrznych wznoszonej konstrukcji przez otoczenie skutkuje powstaniem w warstwach przypowierzchniowych naprężeń rozciągających. Z analizy danych literaturowych [1] wynika, że jeśli różnica temperatur pomiędzy wnętrzem elementu a jego powierzchnią przekroczy 20°C , w młodym betonie mogą pojawić się pęknięcia termiczne (rys. 1).

Powstające naprężenia termiczne są szczególnie niebezpieczne dla „młodego betonu”, czyli etapu przejściowego pomiędzy mieszanką betonową a stwardniałym betonem (rys. 2).

W etapie tym mieszanka betonowa utraciła już zdolność do układania i zagęszczania w konstruk-

cji, jednocześnie w odróżnieniu od stwardniałego betonu, pod wpływem stosunkowo niewielkich obciążeń ulega odkształceniom plastycznym.

Głównym powodem, dla którego naprężenia termiczne są w tym czasie szczególnie niebezpieczne, jest fakt, że w etapie przejściowym beton charakteryzuje się niską wytrzymałością mechaniczną, najmniejszymi odkształceniami granicznymi oraz jednocześnie najszybszym wydzielaniem ciepła w procesie hydratacji [2] (rys. 3).

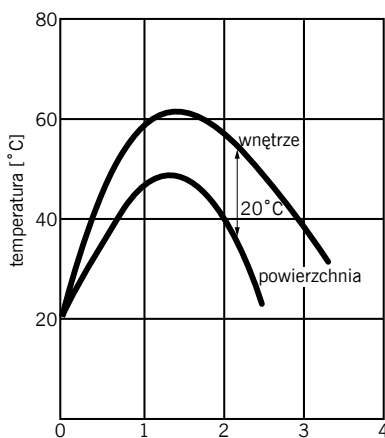
Wymienione czynniki decydują o konieczności podejmowania szczególnych zabiegów technologicznych w celu ochrony konstrukcji przed negatywnymi skutkami tego procesu.

Podstawowymi działaniami mającymi zasadniczy wpływ na ryzyko powstania zarysowań termicznych są:

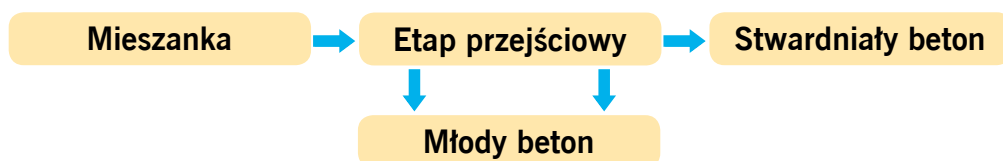
- proces projektowania betonu, z uwzględnieniem niskiego ciepła hydratacji oraz wydłużonego czasu wiązania cementu (spoiwa)
- proces zabudowy gwarantujący odpowiednie zagęszczenie mieszanki betonowej jednocześnie z zapewnieniem poprawnego połączenia układanych warstw
- proces pielęgnacji termiczno-wilgotnościowej minimalizujący różnicę temperatury pomiędzy wnętrzem betonu a jego powierzchnią oraz utratę wody z powierzchni.

W niniejszym artykule zaprezentowano sposoby minimalizacji naprężeń termicznych w dojrzewającym betonie, omówiono także metodykę postępowania przy projektowaniu składu mieszanki betonowej na fundamenty masywne. Przedstawione zostały wyniki badań własnych związane z realizacją fundamentów wznoszonych bloków nr 5 i 6 na Elektrowni Opole.

Rys. 1. Model naprężeń termicznych w masywie betonowym



Rys. 2. Model „młodego betonu”



2. Dobór ilościowy oraz jakościowy składników betonu na przykładzie budowy elementów masywnych bloków 5 i 6 Elektrowni Opole

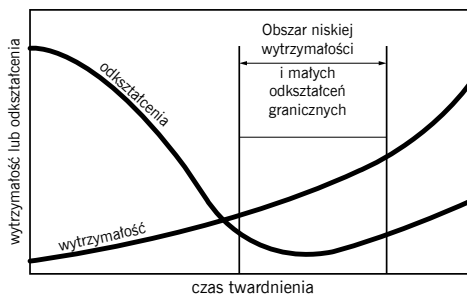
Odpowiednia receptura mieszanki betonowej stanowi podstawę prawidłowego wykonania konstrukcji masywnej. Receptura musi uwzględniać niskie ciepło hydratacji cementu, dostosowane do wymogów betonowanego elementu oraz wydłużony czas początku wiązania, potrzebny do prawidłowego wykonania procesu zabudowy mieszanki betonowej. Cementy predestynowane do wykonywania konstrukcji masywnych to cementy o niskim ciepłe hydratacji LH (poniżej 270 J/g po 41 godzinach, oznaczonej metodą semiadiabatyczną). Na etapie projektowania mieszanki betonowej, dla potrzeb rozbudowy Elektrowni Opole, zdecydowano się na wybór cementu hutniczego CEM III/A 32,5N – LH/HSR/NA. Czynniki decydującymi były w tym przypadku: niskie ciepło hydratacji (rys. 4), wydłużony czas początku wiązania (rys. 5) oraz wysoka odporność na agresywne oddziaływanie środowiska [3].

Ze względu na konieczność ograniczenia ilości cementu w składzie betonu masywnego oraz w celu uzyskania odpowiedniej urabialności oraz pompowności mieszanki betonowej, konieczne stało się zastosowanie dodatków typu II. Najbardziej praktycznym a zarazem powszechnym w stosowaniu jest popiół lotny, który pozytywnie wpływa zarówno na właściwości mieszanki betonowej: zachowanie konsystencji w czasie, pompowność, urabialność, jak i na obniżenie ciepła hydratacji spoiwa i poprawę wytrzymałości mechanicznej stwardniałego betonu [4].

Odpowiednia kompozycja spoiwa (mieszanki cementowo-popiołowej) w betonie konstrukcji masywnej umożliwia uzyskanie ciepła hydratacji spoiwa na poziomie 120 J/g po 41 godzinach, przy jednoczesnej poprawie reologii mieszanki betonowej i wydłużeniu czasu wiązania (rys. 6).

Mieszanka kruszywa stosowana do produkcji betonów masywnych powinna charakteryzować się możliwie niską wodozadržnością oraz jamistością. Umożliwia to redukcję ilości zaczynu cementowego niezbędnego do uzyskania żądanej konsystencji przy zachowaniu założonego wskaźnika wodno-cementowego. W praktyce należy stosować maksymalny wymiar ziarna kruszywa 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 wodozadržności, geometrią zastosowanego zbrojenia w konstrukcji oraz możliwością zabudowy mieszanki betonowej przy pomocy pomp.

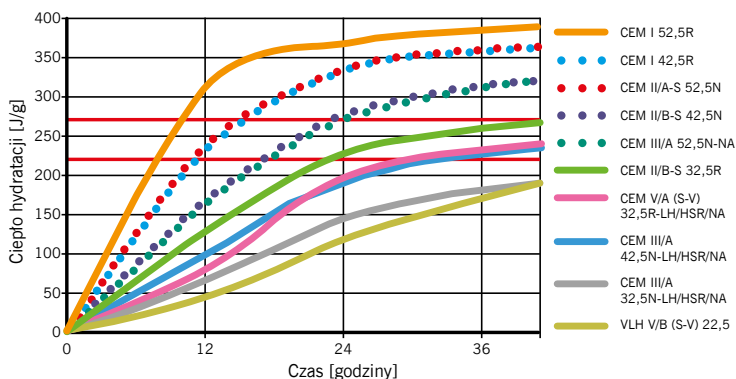
Przy doborze kruszywa należy zwrócić uwagę na jego nasiąkliwość, która to w przypadku podwyższonego poziomu może znacznie wpłynąć na zachowanie cech reologicznych mieszanki betonowej w czasie transportu oraz tuż po zabudowie. Zjawisko to wywołane jest wysoką absorpcją wody oraz rozpuszczonych w niej składników przez kruszywo, w tym także domieszek chemicznych. Współczesne betony masywne nie mogłyby istnieć bez domieszek chemicznych. Obecnie podstawową bazą domieszek stosowanych w produkcji betonu są polikarboksylany bądź akrylany, bardzo często wspomagane przez domieszki na bazie lignosulfonianów oraz opóźniacze czasu wiązania.



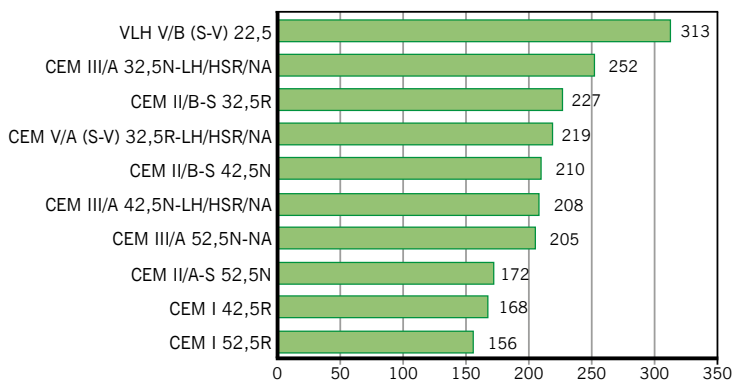
Rys. 3. Zmiany wytrzymałości na ściskanie oraz odkształceń granicznych podczas dojrzewania betonu [2]

Dzięki zastosowaniu odpowiedniego pakietu domieszek chemicznych możliwe jest uzyskanie odpowiedniej konsystencji oraz urabialności betonu do zabudowy w okresie 6 godzin, bez konieczności wtórnego dozowania domieszki chemicznej, oraz wydłużonego czasu początku wiązania przekraczającego 24 godziny (rys. 7).

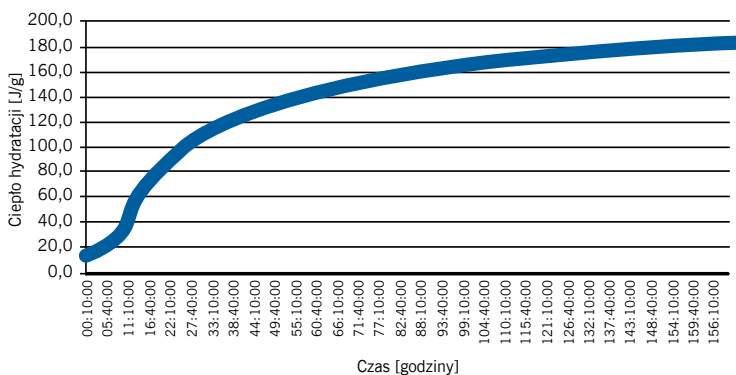
Jako domieszki chemiczne dla realizacji betonów masywnych stosowanych w rozbudowie Elektrowni Opole stosowano superplastyfikator na bazie



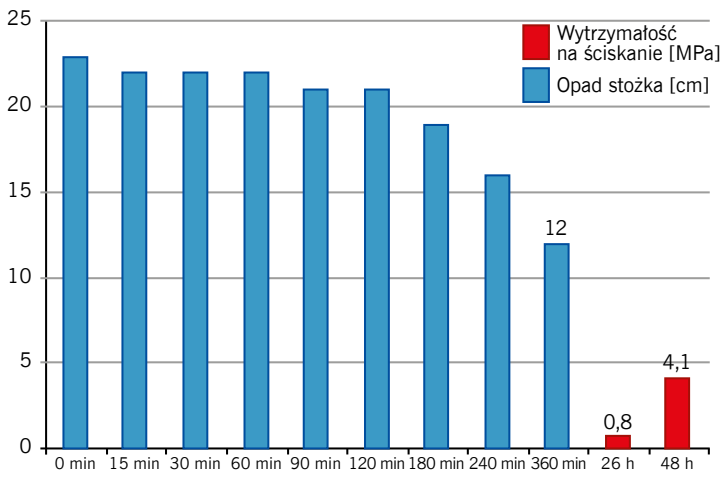
Rys. 4. Ciepło hydratacji cementów z oferty handlowej Górażdże Cement SA [3]



Rys. 5. Początek czasu wiązania cementów z oferty handlowej Górażdże Cement SA [3]



Rys. 6. Ciepło hydratacji spoiwa opartego na cemencie hutniczym CEM III/A 32,5N – LH/HSR/NA oraz popiele lotnym

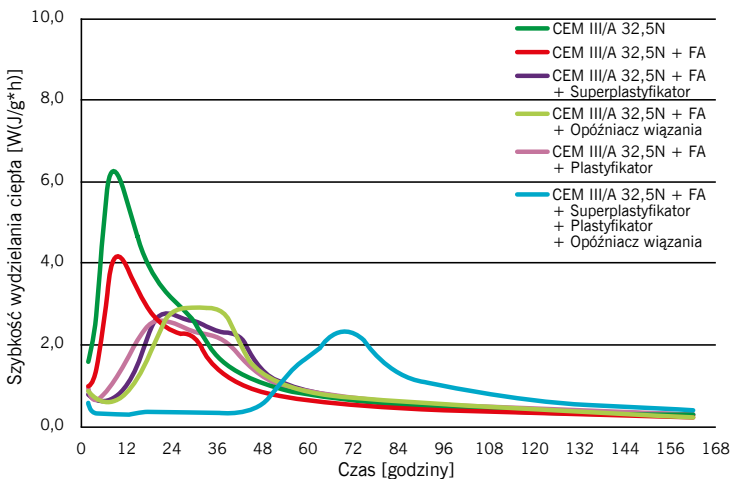


Rys. 7. Zmiana konsystencji w czasie mieszanki betonu masywnego

eterów polikarboksylowych, plastyfikator na bazie lignosulfonianów oraz domieszkę opóźniającą wiązanie na bazie sacharozy.

Zastosowane domieszki chemiczne działały kompleksowo, zarówno na uzyskanie założonego wskaźnika wodno-cementowego, zachowanie konsystencji w czasie przerobu, jak również na początek czasu wiązania spoiwa zawartego w betonie (rys.8).

Rys.8. Wpływ domieszek chemicznych na proces hydratacji spoiwa (mieszanki cementu i popiołu)



3. Zabudowa mieszanki betonowej

Najczęściej stosowanym sposobem zabudowy mieszanki betonowej w konstrukcjach masywnych jest zabudowa z zastosowaniem warstw skośnych. Główną zaletą jest skrócenie czasu potrzebnego do ułożenia i odpowiedniego zabudowania kolejnych warstw betonu na sobie.

Warstwy skośne wymagają jednak, aby warstwa świeżo układanej mieszanki betonowej znajdowała się na warstwie mieszanki betonowej, która utraci-

Rys. 9. Zarysowania pochodzące od osiadania plastycznego mieszanki betonowej



ła już zdolność do płynięcia pod wpływem wibracji. W przeciwnym razie może nastąpić niekontrolowane przemieszczenie warstw, doprowadzając do znacznej zmiany stosunku wysokości do długości podstawy warstwy skośnej. Należy zauważyć, iż specyficzne właściwości mieszanki betonu masywnego: wydłużony czas początku wiązania oraz niska zawartość zaczynu, zwiększają ilość wydzielonej wody na powierzchnię (bleeding betonu). Jest to zjawisko zupełnie naturalne, należy przedsięwziąć jednak odpowiednie kroki, aby nie dopuścić do powstania trwałych zarysowań powierzchni betonu związanych z tym zjawiskiem (rys. 9). Podstawowym sposobem zabezpieczenia przed powstaniem niebezpiecznych dla trwałości rys jest zacieranie powierzchni betonu, które wykonane w odpowiednim czasie pozwala na trwałe zamknięcie utworzonych zarysowań. W celu dodatkowego zabezpieczenia przed pęknięciami możliwe jest zastosowanie przerw przed ułożeniem ostatniej, górnej warstwy betonu, co daje czas, aby zabudowana mieszanka swobodnie osiadła.

4. Pielęgnacja betonu

Na pielęgnację zabudowanego betonu masywnego składa się zabezpieczenie przed utratą wilgoci oraz przed nadmiernym wychłodzeniem powierzchni zewnętrznych betonu. Najczęstszym sposobem pielęgnacji wilgotnościowej jest stosowanie osłon, w postaci folii, które ograniczają prędkości odparowania wody z powierzchni. Metoda ta jest wystarczająca dla większości warunków zewnętrznych, nie wprowadza jednocześnie dodatkowych naprężeń termicznych związanych z bezpośrednim stosowaniem wody, zraszaniem lub zalewaniem powierzchni.

W celu ustalenia początkowych warunków dla pielęgnacji termicznej można posłużyć się metodą obliczeniową, doświadczalną lub połączeniem obydwu. W metodzie obliczeniowej wyznaczamy maksymalny wzrost temperatur wnętrza betonu, zakładając, że panują tam warunki semiadiabaticzne, posługując się następującym równaniem:

$$\Delta T_h = (cQ_c + plQ_{pl}) \frac{1}{C_{bet}}$$

w którym:

- c, pl – ilość cementu i popiołu lotnego w [kg/m³]
- Q_c – ciepło hydratacji cementu wydzielone do czasu osiągnięcia maksymalnej temperatury
- Q_{pl} – ciepło popiołu lotnego wydzielone do czasu osiągnięcia maksymalnej temperatury
- C_{bet} – pojemność cieplna mieszanki betonowej w [kJ/(m³K)] zgodna z poniższym równaniem:

$$C_{bet} = cC_{wc} + wC_{ww} + kC_{wk} + plC_{wpl}$$



Rys.10. Pielęgnacja termiczna betonu masywnego

gdzie:

c, w, k, pl – ilość cementu, wody, kruszywa i popiołu lotnego

C_{wc} – ciepło właściwe cementu, 0,84 kJ/(kgK)

C_{ww} – ciepło właściwe wody, 4,20 kJ/(kgK)

C_{wk} – ciepło właściwe kruszywa, 0,84 kJ/(kgK)

C_{wpl} – ciepło właściwe popiołu lotnego, 0,84 kJ/(kgK)

Określenie początkowych warunków pielęgnacji umożliwi dobór rodzaju materiału izolacyjnego oraz jego grubość podczas pierwszych godzin pielęgnacji (rys. 10). Jednocześnie w trakcie dojrzewania masywu prowadzony jest monitoring rozkładu temperatur w betonie, w oparciu o który podejmowane są decyzje dotyczące zmiany intensywności pielęgnacji oraz czasu jej trwania.

5. Podsumowanie

W lutym oraz kwietniu 2015 r. zrealizowano zabudowę betonu w konstrukcji dwóch fundamentów maszynowni bloków energetycznych nr 5 i 6 o objętości ok 11 000 m³ każdy oraz konstrukcji fundamentu kotłowni nr 5 o objętości 18 500 m³. Odpowiednie podejście do kluczowych etapów realizacji konstrukcji: doboru receptury, zabudowy oraz pielęgnacji, zapobiegło powstaniu rysowań betonu pochodzących od naprężeń termicznych oraz innych rys mogących wpłynąć na trwałość konstrukcji.

Maksymalna temperatura betonu we wnętrzu fundamentu kotłowni nr 5 wyniosła 44°C i wystąpiła po 8 dniach dojrzewania (rys. 11), a maksymalny gradient temperatury pomiędzy wnętrzem a powierzchnią zewnętrzną wyniósł 14 (rys. 12). Spełnione zatem zostały wymogi dotyczące maksymalnej temperatury wnętrza poniżej 70°C i maksymalnego gradientu pomiędzy powierzchnią a wnętrzem poniżej 20°C. Narastanie wytrzymałości na ściskanie betonu, zgodnie z założeniami, charakteryzowało się bardzo niskimi przyrostami w okresie wczesnym (rys. 13). Uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie po 90 dniach dojrzewania z dużym zapasem spełniły wymogi stawiane klasie C30/37.

W trakcie planowania badań dla fundamentu kotłowni nr 5 zdecydowano o przeprowadzeniu badań możliwe najdokładniej odwzorowujących zmianę wytrzymałości na ściskanie betonu we wnętrzu elementu. Część prób betonowych pobranych do badań w trakcie wykonywania fundamentu przechowywana była w zmiennych warunkach temperaturowych odpowiadających temperaturze wnętrza, co dało przybliżoną informację na temat rzeczywistego narastania wytrzymałości w warstwach wewnętrznych konstrukcji (rys. 14).

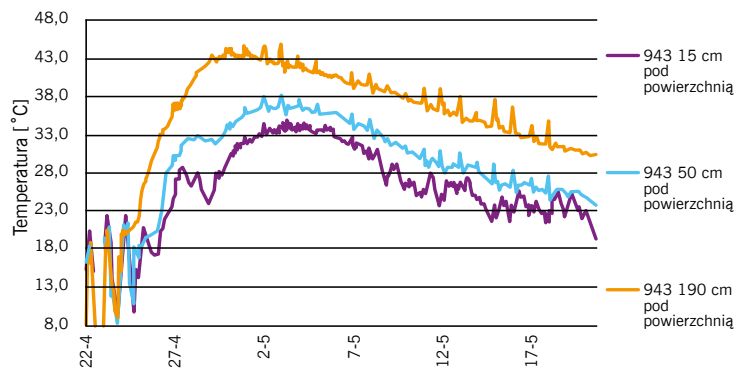
Sebastian Kaszuba

Artur Gołda

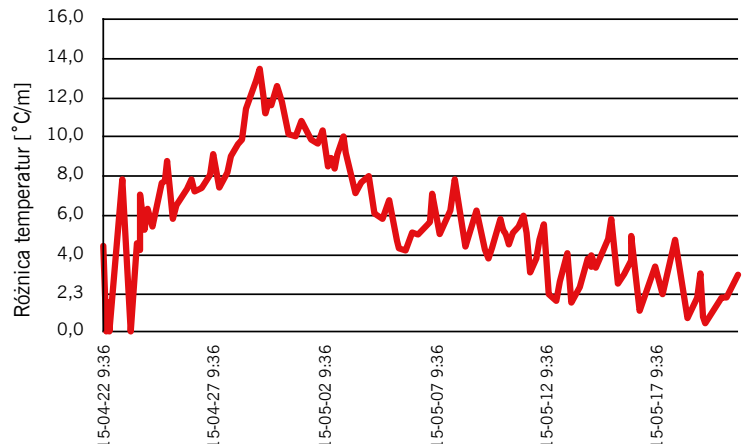
**Centrum Technologiczne BETOTECH Sp. z o.o.
w Dąbrowie Górniczej**

Literatura

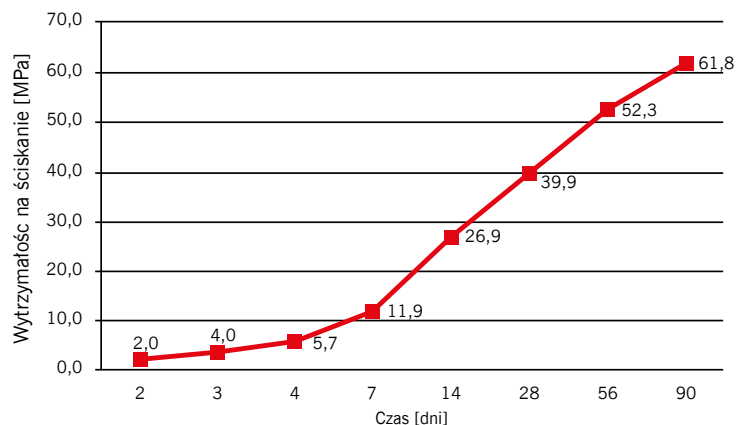
- 1 Neville A.M., *Właściwości betonu*, V edycja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012
- 2 Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcje masywne*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2003
- 3 Cement, kruszywa, beton w ofercie Grupy Górażdże, praca zbiorowa pod kierunkiem Giergicznego Z., Chorula 2015
- 4 Giergiczny Z., *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013



Rys. 11. Rozkład temperatur podczas dojrzewania betonu zabudowanego w konstrukcji fundamentu kotłowni nr 5 Elektrowni Opole



Rys. 12. Różnica temperatur pomiędzy wnętrzem elementu a powierzchnią zewnętrzną podczas dojrzewania betonu zabudowanego w konstrukcji fundamentu kotłowni nr 5 Elektrowni Opole



Rys. 13. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu masywnego klasy C30/37 w okresie dojrzewania (fundament maszynowni bloku nr 5)

Rys. 14. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu masywnego w zależności od temperatury dojrzewania (fundament kotłowni bloku nr 5)

