

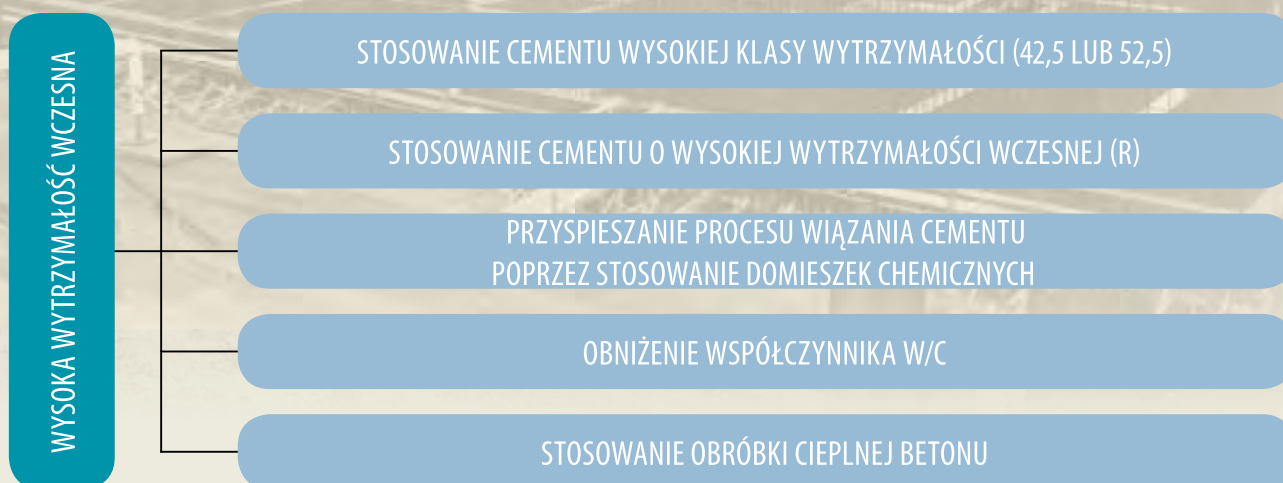
Produkcja prefabrykatów betonowych wymaga zastosowania odpowiednich surowców i technologii wytwarzania w celu zapewnienia projektowanych cech technicznych i właściwości użytkowych. Istotną jest także odpowiednia estetyka elementów prefabrykowanych. Bardzo ważnym zagadnieniem jest właściwy dobór cementu do przyjętej technologii produkcji, co w dużej mierze kształtuje, zarówno właściwości techniczne prefabrykatów (betonu), jak i koszty ich wytwarzania.

Cementy stosowane w produkcji prefabrykatów i galanterii betonowej (kostka brukowa, krawężniki, obrzeża, palisady, dachówki cementowe) powinny charakteryzować się wysoką wytrzymałością wczesną. Pozwala to na szybką rotację form oraz bezpieczne magazynowanie i paletyzowanie gotowych wyrobów. Klasyfikację wytrzymałości wczesnej przedstawiono na rys. 1.

WYTRZYMAŁOŚĆ ROZFORMOWANIA	UMOŻLIWIA BEZPIECZNE ROZFORMOWANIE ELEMENTU BEZ USZKODZEŃ
WYTRZYMAŁOŚĆ SKŁADOWANIA	UMOŻLIWIA USTAWIENIE ELEMENTÓW W STOSIE, OKREŚLANA JAKO 50% WYTRZYMAŁOŚCI PO 28 DNIACH.
WYTRZYMAŁOŚĆ MONTAŻOWA	UMOŻLIWIA PRZEWÓZ NA MIEJSCE WBUDOWANIA I MONTAŻ KONSTRUKCJI, WYNOŚI MIN. 70% WYTRZYMAŁOŚCI PO 28 DNIACH.

Rys.1. Rodzaje wytrzymałości określanych w prefabrykacji.

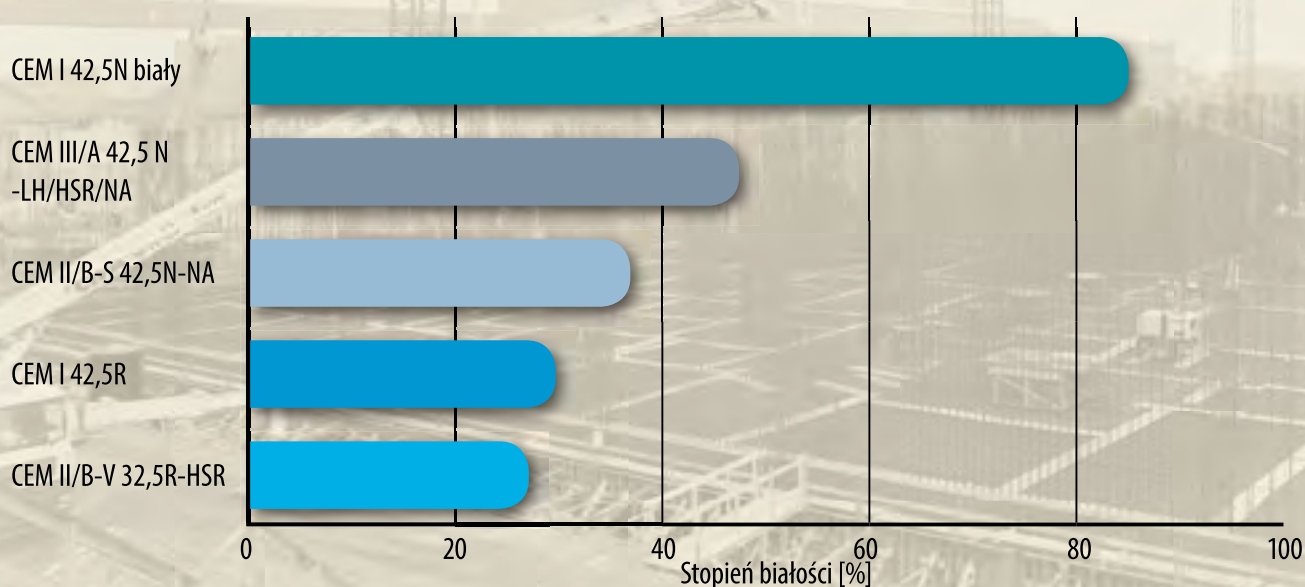
Jednym ze sposobów spełnienia wymagań technologicznych i jakościowych przewidzianych dla elementów prefabrykowanych jest właściwe zaprojektowanie mieszanki betonowej, a zwłaszcza właściwy dobór cementu i jego ilości. Wytrzymałość wczesną elementu można kształtować stosując metody przedstawione na rys. 2.



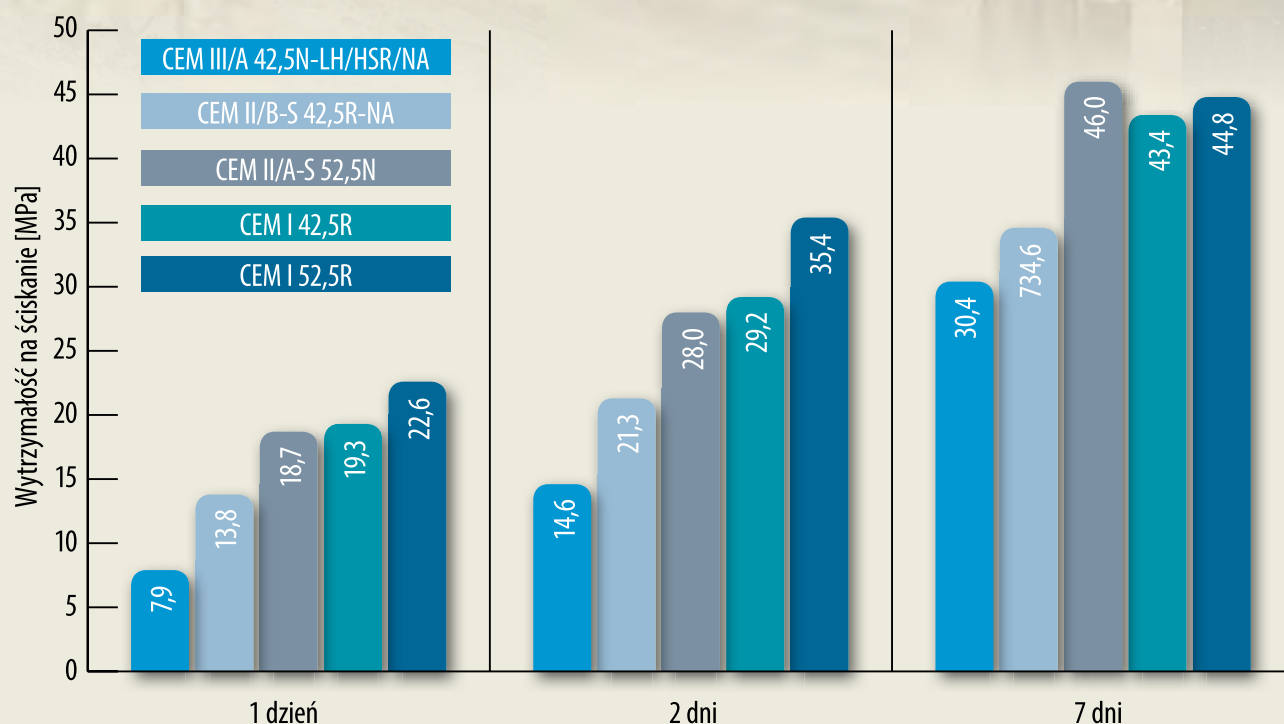
Rys. 2. Metody kształtowania wytrzymałości wczesnej.



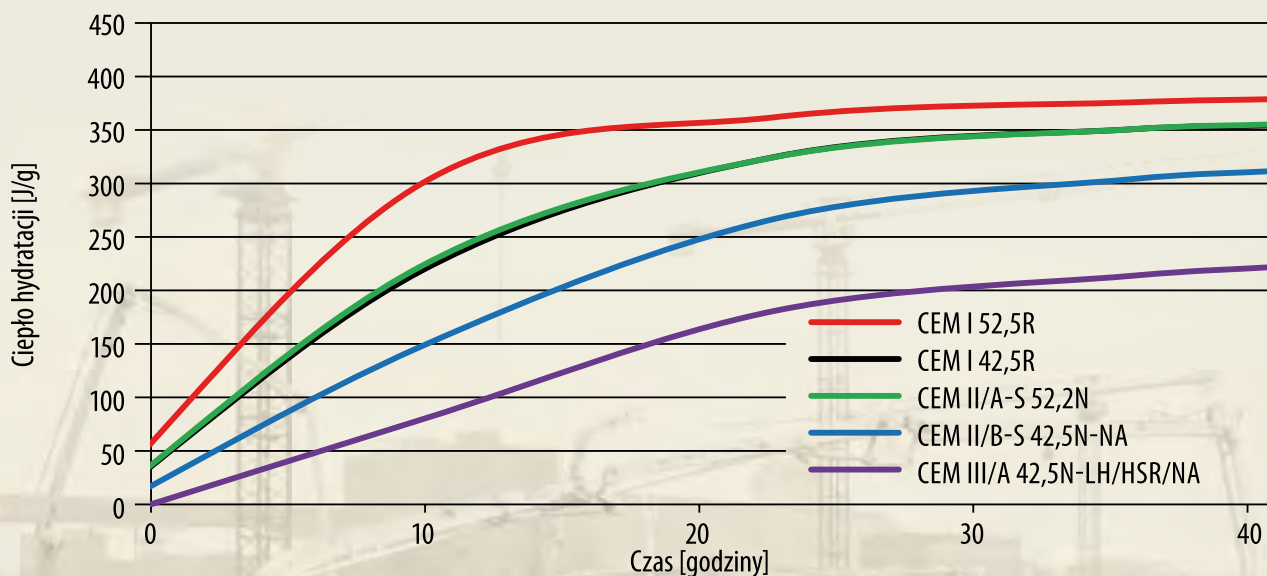
Cementy klas wytrzymałości 42,5 i 52,5 charakteryzują się szybkim przyrostem wytrzymałości wczesnej, wysoką wytrzymałością normową oraz wysokim ciepłem hydratacji. W przypadku stosowania cementu portlandzkiego wieloskładnikowego CEM II lub cementu hutniczego CEM III uzyskuje się podwyższoną trwałość elementów prefabrykowanych oraz lepszą urabialność mieszanki betonowej. Cementy zawierające w swoim składzie granulowany żużel wielopieczowy charakteryzują się także jaśniejszą barwą, co jest istotne zwłaszcza przy wykonywaniu barwionych prefabrykatów betonowych (rys. 3). Szybkość narastania wytrzymałości wczesnej zapraw wykonanych z cementów portlandzkich CEM I oraz cementów CEM II i CEM III klasy wytrzymałości 42,5 i 52,5 pokazano na rysunku 4. Przyrost wytrzymałości wczesnej poszczególnych cementów związany jest z dynamiką wydzielania ciepła w procesie twardnienia (rys. 5). Wyraźnie widać wysoką dynamikę narastania wytrzymałości wczesnej cementu portlandzkiego CEM I 52,5R i CEM I 42,5R oraz cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5N. Cechą charakterystyczną tych cementów jest wysokie ciepło hydratacji (twardnienia), co czyni je szczególnie przydatnymi w okresie obniżonych temperatur (jesień – zima – wczesna wiosna). Najniższą dynamikę przyrostu wytrzymałości w okresie początkowym posiada cement hutniczy CEM III/A 42,5N-HSR/NA. Jednak przy właściwie prowadzonym procesie technologicznym, zwłaszcza kiedy stosowana jest obróbka cieplna, może on być z powodzeniem stosowany w produkcji prefabrykatów.



Rys. 3. Stopień białości cementów szarych w porównaniu z cementem białym

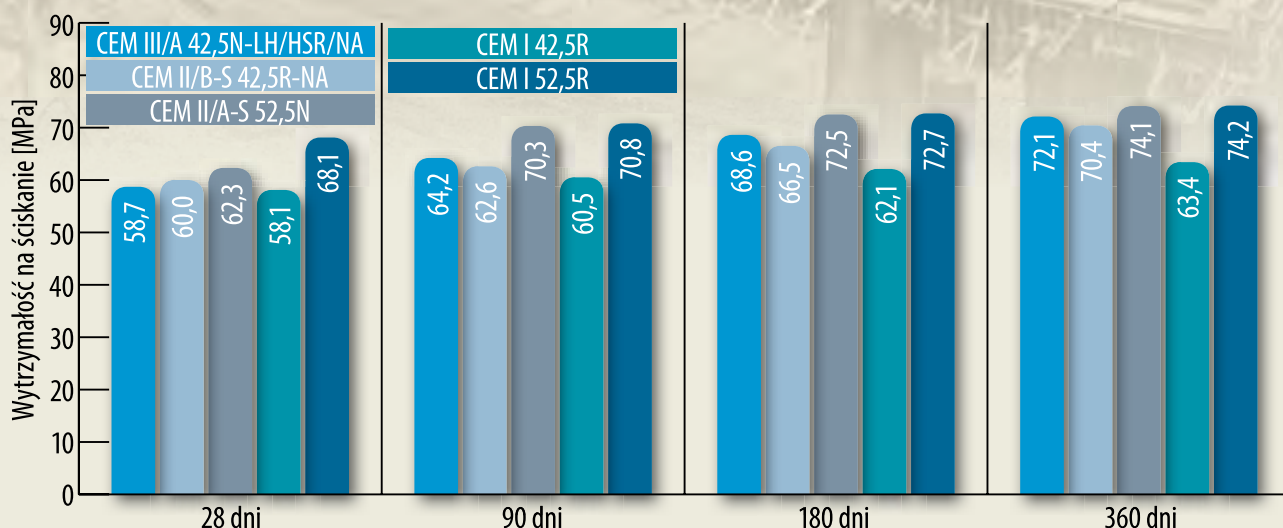


Rys. 4. Wczesna wytrzymałość na ściskanie normowych zapraw cementowych w temperaturze +20°C



Rys. 5. Ciepło hydratacji cementu

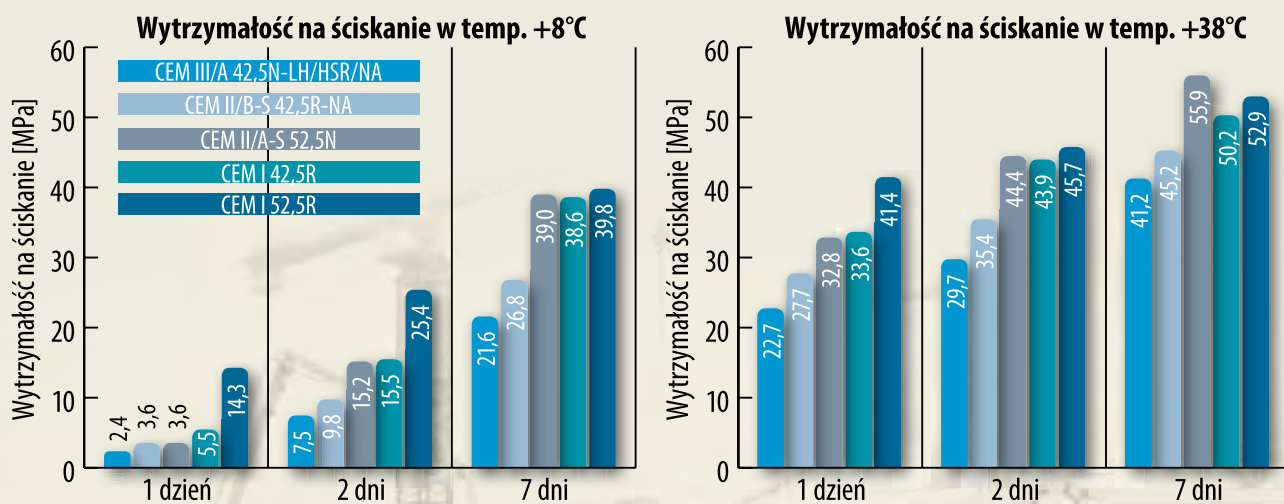
Normowa wytrzymałość na ściskanie (po 28 dniach) cementów zawierających w swoim składzie granulowany żużel wielkopiecowy (CEM II/A-S 52,5N, CEM II/B-S 42,5R-NA lub CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA) jest zbliżona lub wyższa w porównaniu z wytrzymałością cementu portlandzkiego CEM I. W późniejszych okresach przyrost wytrzymałości cementów żużlowych i hutniczych jest znacznie większy niż cementów CEM I (rys. 6). Przyrost wytrzymałości zapraw i betonów w długich okresach twardnienia jest związany z tworzeniem się zwartej struktury betonu, co zapewnia wysoką trwałość obiektom budowlanym, nawet po wielu latach eksploatacji. Efekty te są szczególnie widoczne przy stosowaniu cementu hutniczego CEM III. Z tego powodu w przypadku prefabrykatów narażonych na agresywne wpływy środowiska, np. elementy zbiorników w oczyszczalniach ścieków, elementy nabrzeży morskich, płyty chodnikowe, kostka brukowa, itp., wskazane jest stosowanie cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA. Właściwie wykonane elementy prefabrykowane, przy użyciu cementów hutniczych, charakteryzują się wysoką szczelnością oraz podwyższoną odpornością na agresywne działanie czynników chemicznych.



Rys. 6. Długoterminowa wytrzymałość normowych zapraw cementowych w temperaturze +20°C

DOJRZEWANIE W OBNIŻONEJ I PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE ZEWNĘTRZNEJ

Obniżenie temperatury dojrzewania do +8°C spowalnia przyrost wytrzymałości wczesnej cementu (rys. 7). Najwyższy poziom wytrzymałości w takich warunkach osiągają cementy portlandzkie CEM I 52,5R i CEM I 42,5R oraz cement portlandzki żużlowy CEM II/A-S 52,5N.

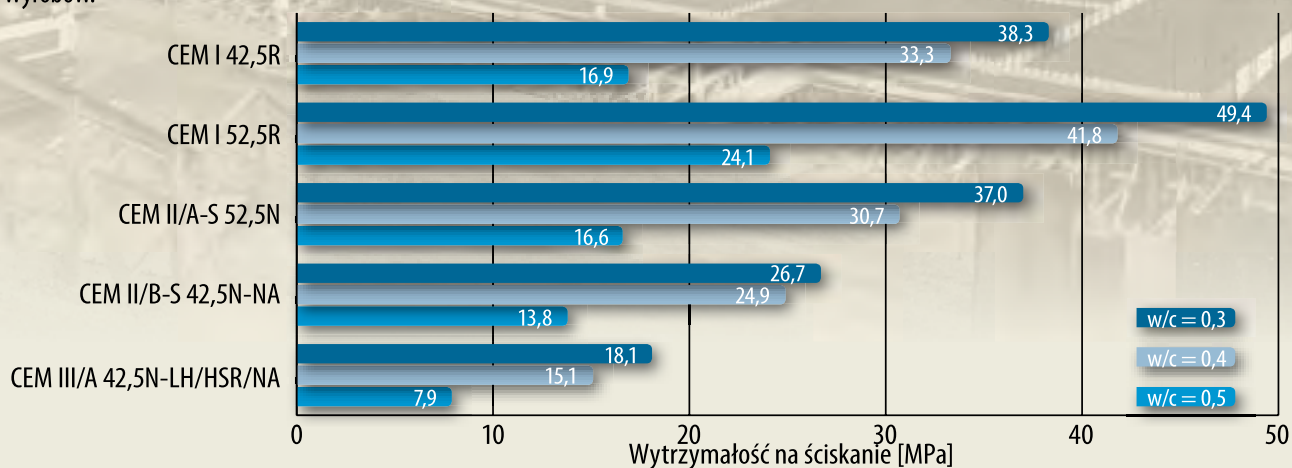


Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie normowych zapraw cementowych w temperaturze +8°C i +38°C

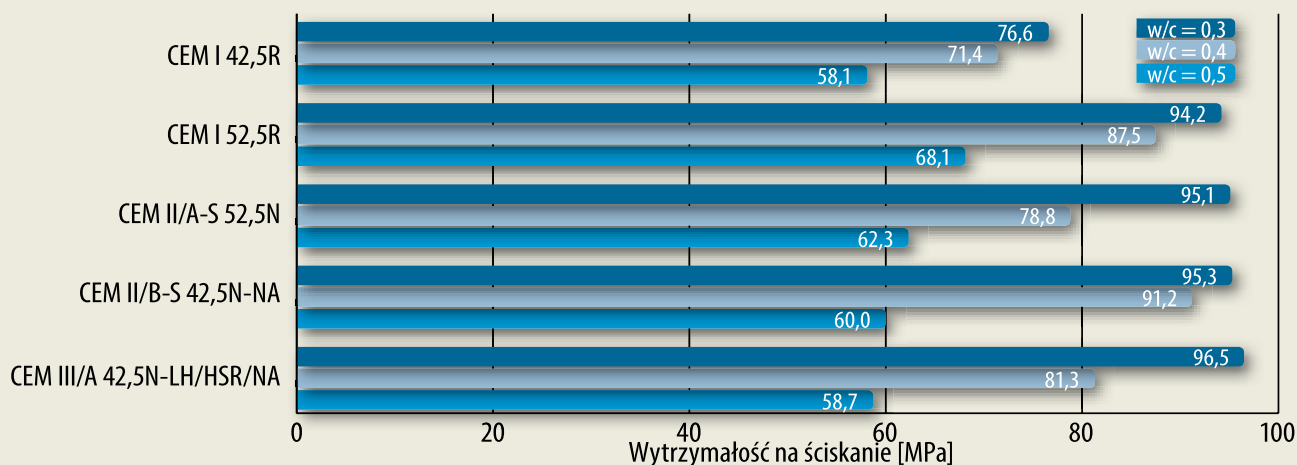
Podwyższenie temperatury dojrzewania do +38°C znacznie przyspiesza proces narastania wytrzymałości, zwłaszcza cementów zawierających w swoim składzie granulowany żużel wielkopiecowy. W takich warunkach dojrzewania, tj. w okresie od maja do końca września, stosowanie cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5N lub CEM II/B-S 42,5R-NA, a także cementu hutniczego CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA jest uzasadnione technologicznie i ekonomicznie.

STOSUNEK W/C

Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na właściwości stwardniałego betonu jest wielkość stosunku wodno-cementowego (w/c). Na rys. 8 i 9 pokazano wpływ stosunku w/c na wytrzymałość na ściskanie cementu po 1 dniu i 28 dniach dojrzewania. Drogą do uzyskania wysokiej jakości betonowych elementów prefabrykowanych jest projektowanie składu mieszanki betonowej z niskim stosunkiem w/c (konieczne jest stosowanie domieszek uplastyczniających mieszankę betonową) oraz stworzenie odpowiednich warunków do dojrzewania zaformowanych wyrobów.



Rys. 8. Wpływ stosunku w/c na wytrzymałość zapraw cementowych po 1 dniu twardnienia



Rys. 9. Wpływ stosunku w/c na wytrzymałość zapraw cementowych po 28 dniach twardnienia

ZABIEGI TECHNOLOGICZNE

Jednym ze sposobów podniesienia wytrzymałości wczesnej prefabrykatów jest stosowanie obróbki cieplnej.

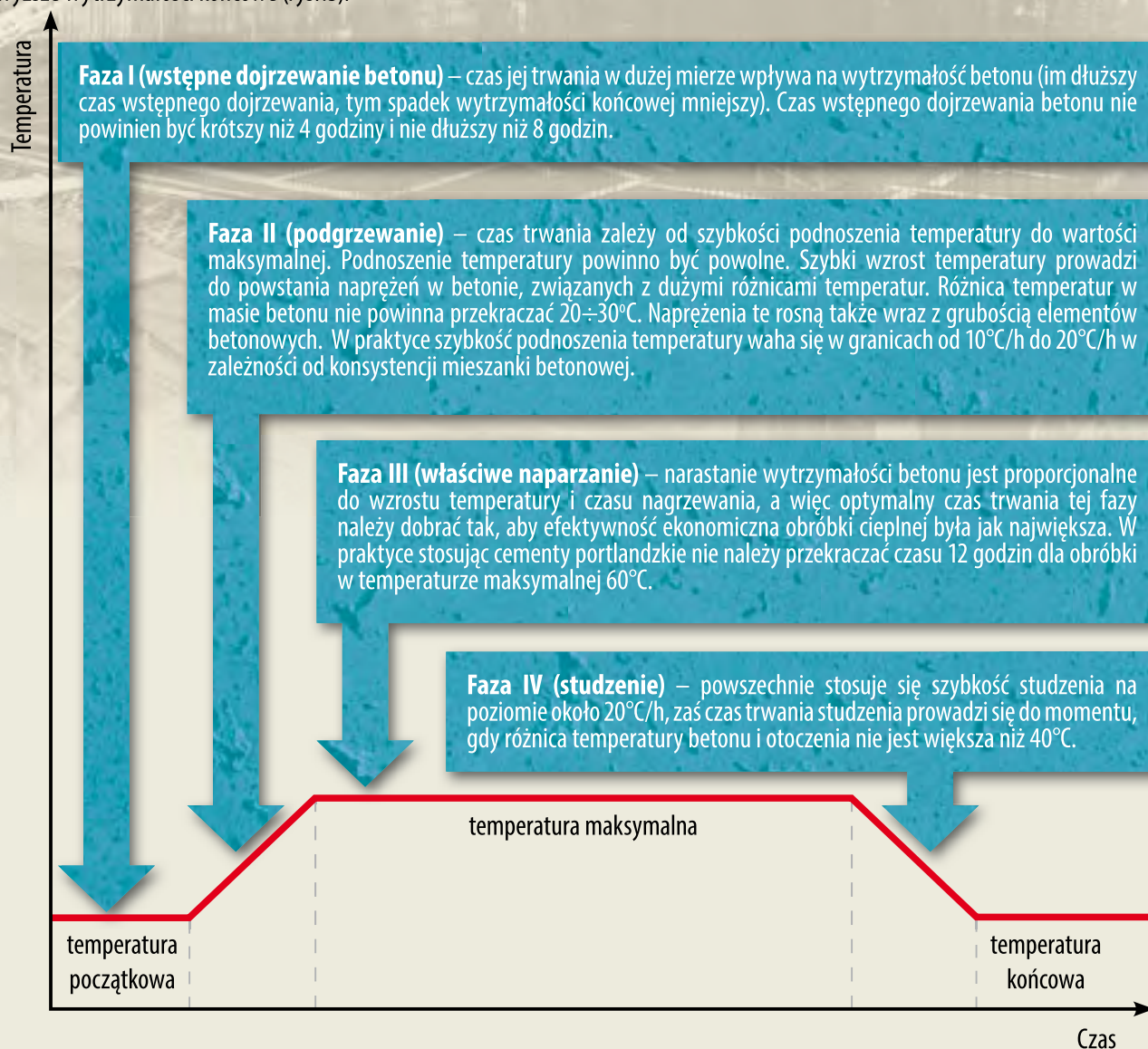
- niskoprężne naparzenie,
- przyspieszona karbonatyzacja i dojrzewanie z wykorzystaniem komory VAPOR,
- autoklawizacja,
- formowanie na gorąco,
- elektronagrzew,
- nagrzewania promieniowaniem podczerwonym.

W praktyce najczęściej stosowanymi metodami są: naparzenie niskoprężne, autoklawizacja (elementy z betonu komórkowego, wyroby wapienno-piaskowe) oraz technologia VAPOR.

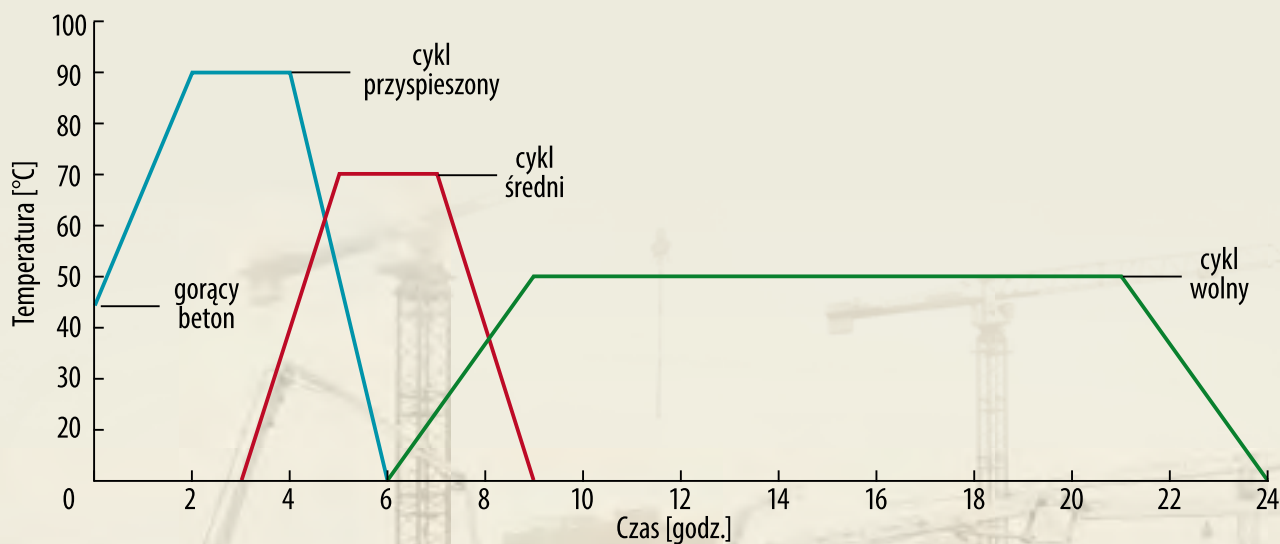
NISKOPRĘŻNE NAPARZANIE

W procesie naparzania niskoprężnego podstawowym czynnikiem przyspieszającym proces hydratacji cementu jest podwyższona temperatura. Bardzo ważną rolę w tym procesie odgrywa sposób obróbki cieplnej, w którym wyróżniamy 4 fazy – przedstawiono je na rys. 10. Sam proces naparzania może być realizowany w różnych cyklach (rys.11).

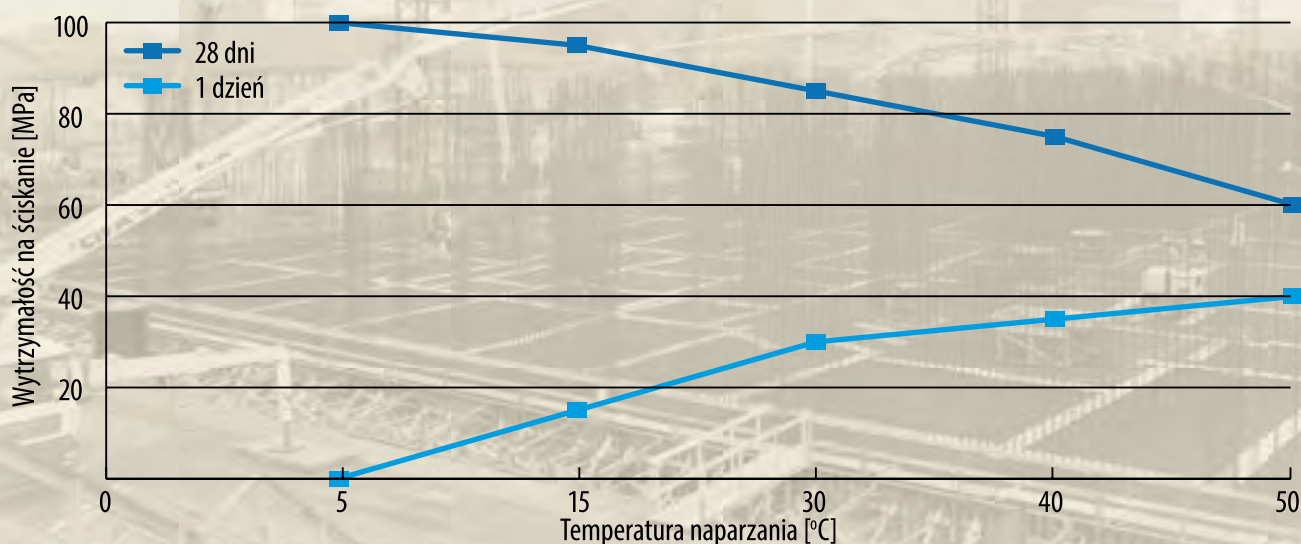
Obróbka cieplna betonu pozwala osiągnąć podwyższone wytrzymałości wczesne. Skutkuje to jednak obniżeniem wytrzymałości końcowej (rys. 12). Spadek wytrzymałości końcowej betonu można ograniczyć poprzez wydłużenie czasu wstępnego dojrzewania. Należy także dobrać optymalną szybkość przyrostu temperatury, zgodnie z zasadą, że im wolniejszy przyrost temperatury, tym wyższe wytrzymałości końcowe (rys.13).



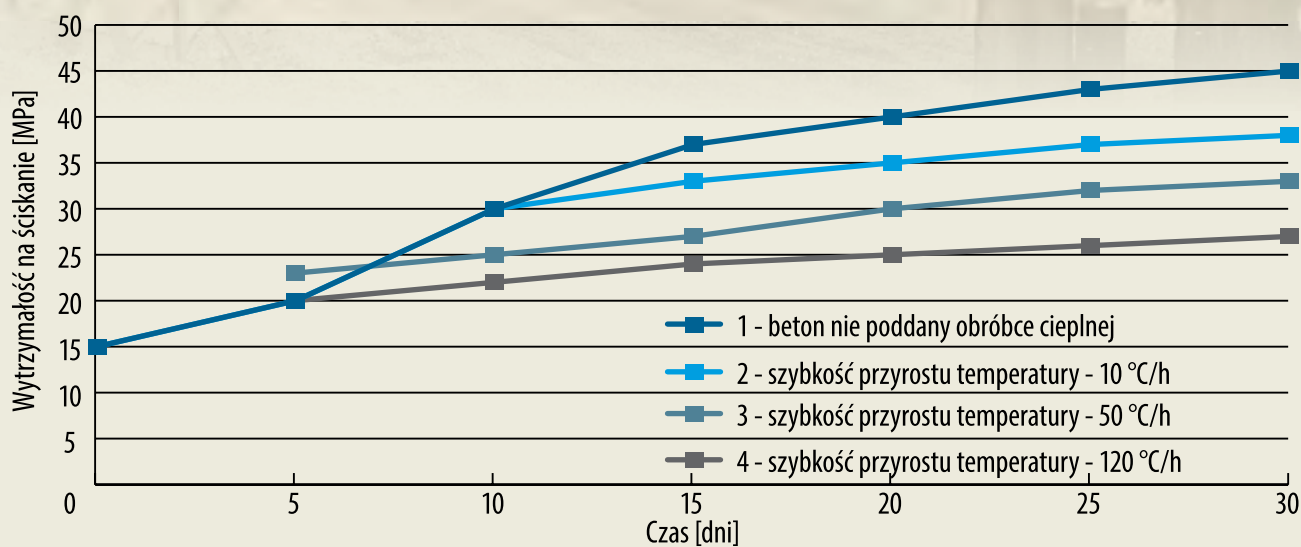
Rys. 10. Schemat technologiczny obróbki cieplnej



Rys. 11. Cykle naparzania niskoprężnego



Rys. 12. Wpływ temperatury naparzania na wytrzymałość betonu



Rys. 13. Wpływ szybkości podwyższania temperatury na wytrzymałość betonu

Duże znaczenie w procesie obróbki cieplnej ma zawartość w składzie cementów dodatków mineralnych (np. popioły lotne, granulowany żużel wielkopiecowy). Podwyższona temperatura przyspiesza reakcję składników żużla i popiołu z wodorotlenkiem wapnia. W związku z tym wytrzymałość betonu z udziałem tych cementów po obróbce cieplnej będzie znacznie wyższa niż wytrzymałość betonu dojrzewającego w naturalnych warunkach.

VAPOR

Innym rodzajem obróbki cieplnej jest technologia VAPOR, która jest połączeniem naparzania niskoprężnego z przyspieszonym procesem karbonatyzacji betonu. Dojrzewanie świeżo wyprodukowanych prefabrykatów odbywa się na regałach w specjalnych komorach o podwyższonej temperaturze (30°C do 45°C) i wilgotności (80% do 95%). Dodatkowo do komór wprowadzany jest dwutlenek węgla CO_2 , np. ze spalania oleju opałowego stosowanego do podgrzewania powietrza. Ten sposób obróbki cieplnej najczęściej stosowany jest w produkcji galanterii betonowej (kostka brukowa, palisady, obrzeża, itp.), zwłaszcza barwionej (praktycznie nie występują wtórne wykwity węglanowe). W komorach panują stałe i ściśle kontrolowane warunki niezależne od czynników pogodowych, dzięki czemu proces wiązania przebiega prawidłowo, a podwyższona zawartość dwutlenku węgla, powoduje przyspieszenie procesu przejścia wodorotlenku wapnia Ca(OH)_2 w węglan wapnia CaCO_3 , który dodatkowo doszczelnia strukturę warstw zewnętrznych. Efekty stosowania technologii VAPOR pokazano na rys. 13.

V POPRAWA SZCZELNOŚCI BETONU

A PODWYŻSZENIE MROZODPORNOŚCI

P ZMNIJSZENIE NASIĄKLIWOŚCI

O OBNIŻENIE PRAWDOPODOBIENSTWA WYSTĄPIENIA WTÓRNYCH WYKWITÓW WĘGLANOWYCH

R UZYSKANIE 70% WYTRZYMAŁOŚCI PROJEKTOWANEJ PO 24 GODZINACH DOJRZEWANIA

Rys. 14. Efekty stosowania technologii VAPOR.

AUTOKLAWIZACJA

Autoklawizacja jest procesem prowadzonym w podwyższonej temperaturze (około 200°C) i ciśnieniu (1,2 – 1,6 MPa) w atmosferze nasyconej parą wodną, które pełnią rolę czynników przyspieszających hydratację cementu w betonie. Najczęściej ten sposób przyspieszania dojrzewania stosowany jest do wyrobu prefabrykatów z betonu komórkowego i cegły wapienno-piaskowej. Nie jest on zazwyczaj stosowany w przypadku prefabrykatów z betonu zwykłego.

WYKWITY WĘGLANOWE

Dużym problemem producentów prefabrykatów betonowych są powstające na ich powierzchni wykwity węglanowe. Stosowanie cementów z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego (np. CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA) zmniejsza tendencję do występowania wykwitów. Spowodowane jest to ograniczeniem zawartości klinkieru w składzie cementu oraz zmniejszoną porowatością, a zarazem zwiększoną szczelnością stwardniałego betonu. Zmiany w strukturze twardniejącego betonu spowodowane są tym, że aktywne składniki granulowanego żużla wielkopieczowego reagują z Ca(OH)_2 pochodzącym z hydratacji faz krzemianowych klinkieru. Produktem tej reakcji jest dodatkowa ilość żelowej fazy C-S-H, która wypełnia kapilary powstałe przez związanie wody, jak również przez jej odparowanie. W ten sposób zmiana ulega struktura porów – zwiększa się ilość bardzo drobnych porów żelowych, które są zamknięte dla cieczy, a zmniejszeniu ulega ilość porów kapilarnych odpowiedzialnych za transport czynników korozyjnych do wnętrza betonu. Wykwity węglanowe można ograniczyć również przez stosowanie technologii VAPOR.

