

Rola składników mieszanki betonowej w kształtowaniu właściwości betonu masywnego

THE ROLE OF CONCRETE CONSTITUENTS IN FORMATION OF MASS
CONCRETE PROPERTIES

Streszczenie

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań nad określeniem wpływu rodzaju cementu i kruszywa na kształtowanie się temperatur twardnienia i właściwości mechanicznych betonu. W badaniach wykorzystano siedem rodzajów cementu, które zawierały w składzie do 70% nieklinkierowych składników głównych oraz cztery rodzaje kruszyw (bazalt, granit, wapień i żwir). Uzyskane wyniki badań pokazały, że cementy z małą zawartością klinkieru tj. cementy hutnicze CEM III oraz cementy wieloskładnikowe CEM V i VLH V pozwalają znacznie obniżyć temperaturę twardnienia betonu, a przez to minimalizują ryzyko powstania rys i spękań betonu. Rodzaj kruszywa nie wpływał znacząco na temperaturę twardnienia betonu, miał natomiast wpływ na wielkość generowanych naprężeń termicznych, co było wynikiem różnych współczynników rozszerzalności termicznej badanych kruszyw. Spośród analizowanych kruszyw najbardziej korzystne do stosowania w betonie masywnym jest kruszywo granitowe, bazaltowe i wapienne. Zastosowanie w betonie kruszywa żwirowego, którego głównym składnikiem jest kwarc, może prowadzić w pewnych niekorzystnych warunkach do zarysowania konstrukcji masywnej w wyniku generowanych naprężeń termicznych.

Abstract

Hereby paper presents results of research on determining the impact of the cement and aggregate type on the formation of the hardening temperature and the mechanical

Zbigniew Giergiczny – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; Górażdże Cement S.A.

Maciej Batog – Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa; Górażdże Cement S.A.

Damian Dziuk – Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.,

properties of concrete. In the study six cement types, which contain up to 70% of main non-clinker constituents, and four types of aggregate (basalt, granite, limestone and gravel) were used. The test results showed that cements with low clinker content e.g. slag cements CEM III and composite cements CEM V, VLH V allow to significantly reduce hardening temperature of concrete, and thus minimize the risk of cracks formation in concrete. Aggregate type hasn't affected concrete hardening temperature. However it has impact on magnitude of generated thermal stresses, which was caused by different thermal expansion coefficients of the aggregates. The most favourable aggregates to use in mass concrete from all analysed aggregates is granite, basalt and limestone. Usage of gravel aggregates in concrete, which main constituent is quartz, might lead in certain unfavourable conditions to cracks formation caused by generated thermal stresses.

1. Wprowadzenie

Efekty termiczne związane z hydratacją cementu nabierają szczególnego znaczenia w betonowych konstrukcjach masywnych. Powstająca, w wyniku wydzielanego ciepła w procesie hydratacji cementu, różnica temperatur pomiędzy wnętrzem, a stosunkowo szybko chłodzoną powierzchnią zewnętrzną elementu betonowego, prowadzi do powstania naprężeń termicznych. Może to w ekstremalnych warunkach skutkować powstawaniem rys w całej objętości elementu betonowego, prowadząc do obniżenia jego trwałości i skrócenia okresu użytkowania [1÷3]. W celu minimalizacji wpływu naprężeń termicznych na trwałość konstrukcji betonowej stosuje się szereg zabiegów technologicznych takich jak: chłodzenie mieszanki betonowej, betonowanie etapami, odpowiedni dobór składników betonu, itp.

Jedną z najefektywniejszych metod obniżenia naprężeń termicznych jest „wprowadzenie” z cementem jak najmniejszej ilości ciepła wydzielanej w procesie hydratacji (twardnienia) [4]. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie w składzie betonu cementów z obniżoną zawartością klinkieru portlandzkiego CEM II÷CEM V oraz VLH V 22,5, mając jednocześnie na uwadze fakt, że rozwój właściwości mechanicznych tych betonów jest wolniejszy w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I [4,6÷8]. W przypadku konstrukcji masywnych szybkość przyrostu wytrzymałości jest jednak sprawą drugorzędą, celem nadrzędnym staje się zapewnienie trwałości takiej konstrukcji. Wytrzymałość wczesna powinna przewyższać wartość naprężeń termicznych i być na tyle wysoka, aby umożliwić dalszy postęp zaplanowanych prac budowlanych. Prawidłowo zabudowany i pielęgnowany beton z cementami CEM II÷CEM V i VLH V będzie charakteryzował się również wysoką trwałością w projektowanym czasie użytkowania [8÷9]. Nie bez znaczenia jest także efekt ekologiczny stosowania cementów z dodatkami mineralnymi, co wiąże się z niższą emisją CO₂ spowodowaną zastąpieniem części klinkieru portlandzkiego innymi nieklinkierowymi składnikami głównymi cementu. Odpowiedni dobór kruszywa i jego stosu okruszowego również pozwala na ograniczenie z jednej strony negatywnych efektów związanych ze wzrostem temperatury w trakcie twardnienia betonu masywnego, z drugiej optymalizacji zawartości cementu w 1m³ mieszanki betonowej (też istotne z punktu widzenia termiki betonu).

Celem prowadzonych badań było pokazanie, że odpowiedni dobór rodzaju cementu i kruszywa w składzie mieszanki betonowej pozwala na zmniejszenie gradientu temperatury oraz wielkości naprężeń w trakcie twardnienia betonu masywnego.

2. Składniki betonu i metodyka badań

2.1. Składniki

W badaniach zastosowano siedem rodzajów cementu wyprodukowanych w skali przemysłowej z różną zawartością klinkieru portlandzkiego, popiołu lotnego i/lub granulowanego żuźla wielkopieczowego: cement portlandzki CEM I 42,5R (jako cement odniesienia), cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S 32,5R, cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R, cement hutniczy CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, cement hutniczy CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA, cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA, które spełniały wymagania norm PN-EN 197-1:2012 [10] i PN-B-19707:2013 [11] oraz cement specjalny wieloskładnikowy o bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH V/B (S-V) 22,5 spełniający wymagania normy PN-EN 14216:2005 [12]. Zawartość w składzie cementu popiołu lotnego krzemionkowego (V) i/lub granulowanego żuźla wielkopieczowego (S) wynosiła od 27% do 70%. W tabeli 1 przedstawiono właściwości fizyczne i mechaniczne stosowanych cementów.

Tabela 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne cementów

| Właściwość | CEM I 42,5R | CEM II/B-S 32,5R | CEM II/B-V 32,5R | CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA | CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA | CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA | VLH V/B (S-V) 22,5 |
|--------------------------------|-------------|------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Wytrzymałość na ściskanie, MPa | | | | | | | |
| - po 2 dniach | 28,9 | 18,0 | 13,6 | 9,5 | 10,8 | 15,3 | 6,4 |
| - po 28 dniach | 57,8 | 48,7 | 36,3 | 50,5 | 58,9 | 43,0 | 31,0 |
| - po 90 dniach | 61,3 | 53,8 | 49,3 | 57,3 | 71,1 | 54,9 | 45,4 |
| Wodożądność, % | 27,6 | 27,4 | 27,4 | 31,4 | 31,5 | 28,2 | 29,4 |
| Początek czasu wiązania, min | 175 | 215 | 274 | 275 | 246 | 235 | 480 |
| Stałość objętości, mm | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,0 |

W składzie betonu zastosowano piasek oraz cztery rodzaje kruszywa grubego: żwirowe, bazaltowe, granitowe oraz wapienne.

Kruszywa zastosowane w badaniach dobrano ze względu na ich właściwości termiczne: przewodnictwo cieplne, pojemność cieplną oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej. Właściwości te zestawiono w tabeli 2. Wszystkie kruszywa spełniały wymagania normy PN-EN 12620+A1:2010 [13].

Tabela 2. Właściwości termiczne kruszyw [3, 4]

| Rodzaj kruszywa | Współczynnik przewodnictwa cieplnego | Pojemność cieplna | Współczynnik rozszerzalności cieplnej |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | [W/mK] | [kJ/kg·K] | [10 ⁻⁶ /K] |
| Żwir ¹⁾ | 4,60÷4,70 | 0,69÷0,72 | 10,2÷13,4 |
| Bazalt | 1,91÷1,92 | 0,77 | 6,1÷7,5 |
| Granit | 2,94÷2,94 | 0,72÷0,74 | 5,5÷8,5 |
| Kamień wapienny | 4,04 | 0,75 | 3,6÷6,0 |

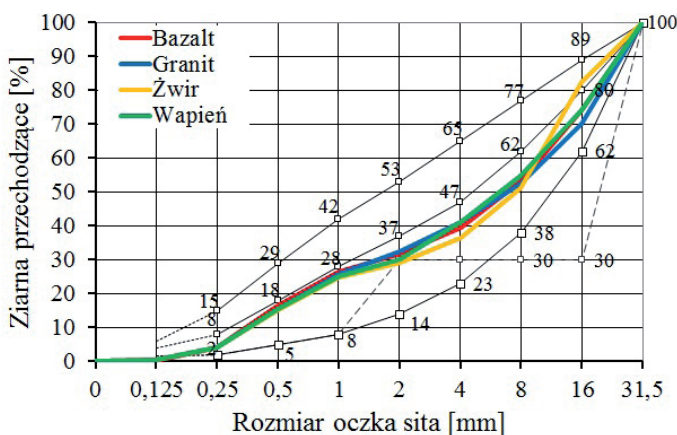
¹⁾ w kruszywie żwirowym największy udział stanowił kwarc > 85% wg [14]

2.2. Skład betonu

Badania przeprowadzono na betonach o składzie pokazanym w tabeli 3, różnicując rodzaj zastosowanego cementu oraz kruszywa. Receptury betonu ze względu na maksymalny rozmiar ziaren kruszywa przygotowano w dwóch wariantach A i B. Wariant A z kruszywem żwirowym i wapiennym, a wariant B z kruszywem granitowy i bazaltowym. Krzywe przesiewu mieszanki kruszyw przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 3. Skład betonu

| Składnik | Zawartość [kg/m ³] | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------|
| | Wariant A | Wariant B |
| Cement | 300 | |
| Woda | 150 | |
| Piasek 0/2 mm | 583 | |
| Żwir/Wapień 2/8 mm | 427 | - |
| Żwir/Wapień 8/16 mm | 389 | - |
| Żwir/Wapień 16/31,5 mm | 544 | - |
| Granit/Bazalt 2/8 mm | - | 427 |
| Granit/Bazalt 8/16 mm | - | 389 |
| Granit/Bazalt 16/22,5 mm | - | 544 |



Rys. 1. Krzywe przesiewu stosu okruszowego (krzywe graniczne wg DIN 1045-2 [15])

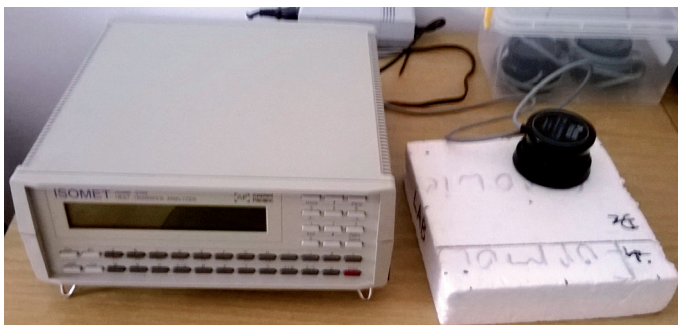
2.3. Metodyka badań

Program badań swoim zakresem obejmował: oznaczenie ciepła hydratacji cementu, wytrzymałości na ściskanie betonu oraz rozwój temperatury w betonie.

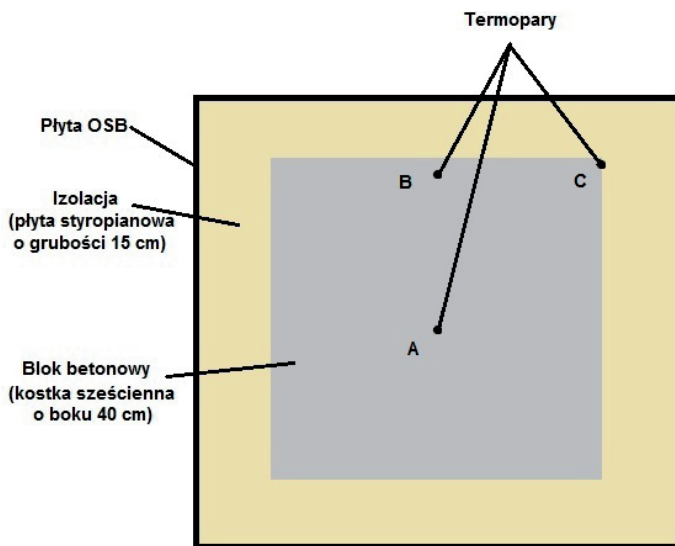
Wytrzymałość na ściskanie betonu określano na próbkach sześciennych o boku 150 mm zgodnie z procedurą zawartą w normie PN-EN 12390-3 [16], po 1, 2, 7, 14, 28, 56 i 90 dniach twardnienia. Próbki po zaformowaniu przechowywano wg wytycznych zawartych w PN-EN 12390-2 [21].

Ciepło hydratacji cementu i kinetykę jego wydzielania w czasie oznaczono za pomocą kalorymetru izotermicznego TamAir firmy TA Instruments. Badania prowadzono przez okres 72 godzin na zaczynach cementowych o współczynniku wodno-cementowym $w/c = 0,4; 0,5$ i $0,6$ w temperaturze 20°C i 50°C .

Badania przewodnictwa cieplnego i pojemności cieplnej betonu wykonano wykorzystując aparat ISOMET 2104 firmy Applied Precision Inc. (fot. 1). Pomiar bazuje na metodzie nieustalonego przepływu ciepła, a dokładniej na analizie reakcji temperaturowej badanego materiału na impulsy ciepłe. Przepływ ciepła generowany jest za pomocą grzałki elektrycznej bezpośrednio stykającej się z badaną próbką. Ocena przewodności, jak i pojemności cieplnej próbki bazuje na okresowym pomiarze temperatury w funkcji czasu. Aparat



Fot. 1. Przyrząd pomiarowy ISOMET 2104.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do badania temperatury twardnienia betonu (widok z góry)

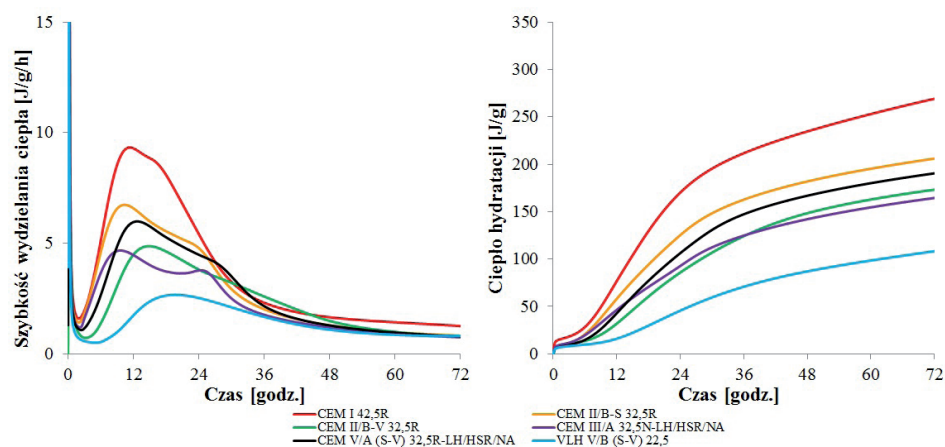
ten umożliwił pomiar przewodności cieplnej w zakresie $0,015 \div 6,0$ W/mK, a pojemności cieplnej w zakresie $4,0 \cdot 10^4 \div 4,0 \cdot 10^6$ J/(m \cdot K). Badania wykonano na betonowych próbkach sześciennych o boku 100 mm, wysuszonych do stałej masy w temperaturze 105°C w celu zminimalizowania wpływu wody zawartej w próbce na mierzone parametry.

Rozwój temperatury twardnienia betonu badano na próbce sześcienniej o boku 400 mm zaizolowanej 150 mm warstwą styropianu o współczynniku przewodzenia ciepła 0,044 W/mK. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. Do pomiaru temperatury wykorzystano elektroniczny termometr wielokanałowy TES 1383 z termoparami typu K. Pomiaru temperatury dokonywano w trzech punktach pomiarowych: A – środek sześcianu, B – środek powierzchni bocznej i C – krawędź na wysokości 20 cm od podstawy (rys. 2). Do dalszej analizy przyjęto średnią ze wszystkich trzech punktów pomiarowych. Temperatura zewnętrzna w trakcie pomiaru wynosiła $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

3. Wyniki badań i ich omówienie

3.1. Wpływ rodzaju cementu na kinetykę wydzielania ciepła w procesie hydratacji

Wyniki badań ciepła hydratacji cementu przedstawiono na rysunku 3. Największą ilością wydzielanego ciepła w procesie hydratacji charakteryzował się cement portlandzki CEM I 42,5R (próbka referencyjna). Cementy CEM II-CEM V oraz VLH V, charakteryzują się niższym ciepłem hydratacji i kinetyką jego wydzielania niż cementy portlandzkie CEM I, a ilość wydzielonego ciepła jest głównie uzależniona od zawartości klinkieru cementowego i powierzchni właściwej. Najmniej ciepła wydzielono przy hydratacji cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA i cementu specjalnego wieloskładnikowego o bardzo niskim ciepłe hydratacji VLH V/B (S-V) 22,5, które zawierały najwięcej nieklinkierowych składników głównych.

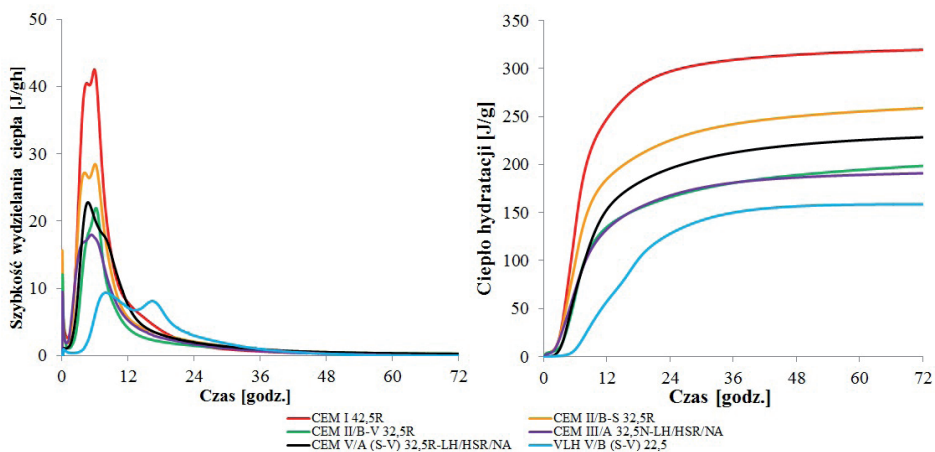


Rys. 3. Wpływ rodzaju cementu na ciepło hydratacji i szybkość jego wydzielania w warunkach izotermicznych w temperaturze 20°C

3.2. Wpływ temperatury na kinetykę wydzielania ciepła hydratacji

Wraz ze wzrostem temperatury z 20°C do 50°C reakcja hydratacji wszystkich badanych cementów uległa przyspieszeniu (rys. 4), a z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku konstrukcji masywnych, gdzie szybkość odprowadzania ciepła jest ograniczona i w wyniku ciepła hydratacji cementu następuje szybki wzrost temperatury.

Dla cementu portlandzkiego CEM I 42,5R ilość wydzielonego ciepła po 12 godzinach w temp. 50°C była ponad 3-krotnie wyższa niż w temp. 20°C. W przypadku cementów CEM II÷CEM V oraz VLH V również zaobserwowano wzrost ilości wydzielanego ciepła hydratacji wraz ze wzrostem temperatury, zwłaszcza we wczesnym okresie (do 12 h). Wzrost ten jest tym mniejszy im większa jest zawartość żuźla wielkopieczowego lub żuźla wielkopieczowego/popiołu lotnego w składzie cementu. Stosowanie cementów CEM II÷CEM V oraz VLH V pozwala spowolnić kinetykę wydzielania ciepła oraz intensywność jego wydzielania we wczesnym stadium twardnienia betonu (pierwsze 24 godziny) w wyższych temperaturach, co pozwala ograniczyć ryzyko zarysowania konstrukcji.



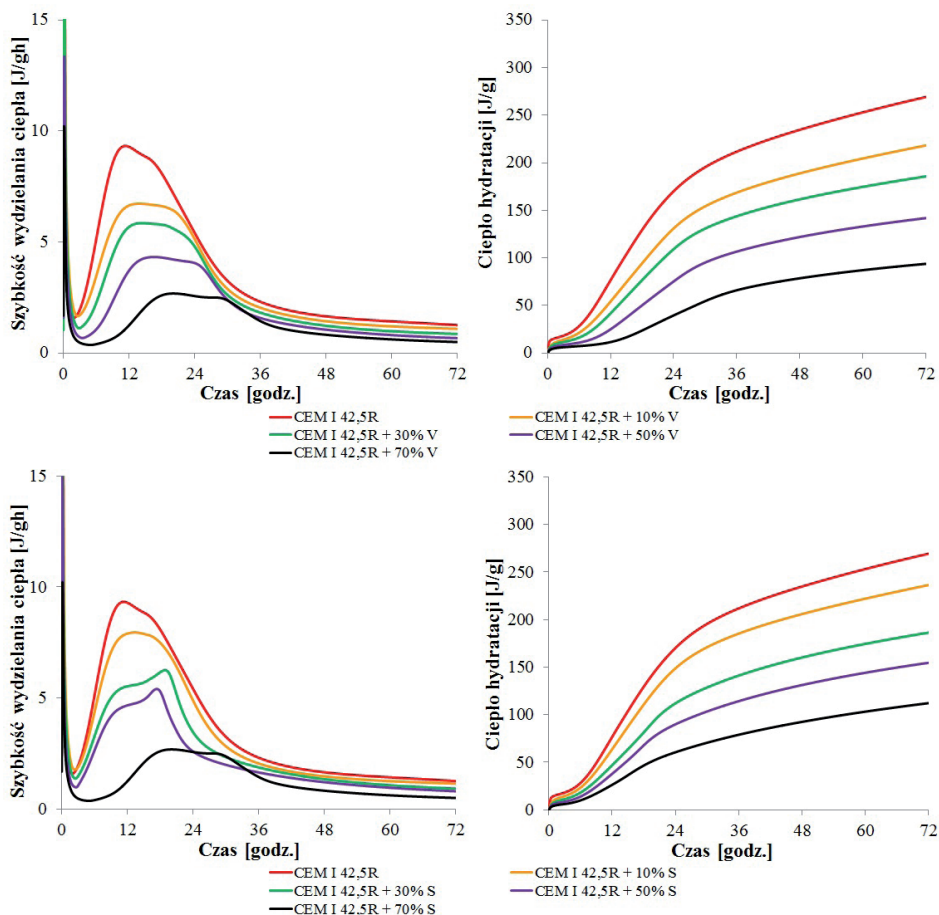
Rys. 4. Wpływ rodzaju cementu na ciepło hydratacji i szybkość jego wydzielania w warunkach izotermicznych w temperaturze 50°C

3.3. Wpływ rodzaju i ilości dodatku mineralnego na kinetykę wydzielania ciepła hydratacji

Na rysunku 5 pokazano wpływ popiołu lotnego krzemionkowego (V) oraz granulowanego żuźla wielkopieczowego (S) na ilość i kinetykę wydzielania ciepła. Cementy wyprodukowano w skali laboratoryjnej poprzez zmieszanie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R odpowiednio z 10%, 30%, 50% oraz 70% popiołu lotnego krzemionkowego lub granulowanego żuźla wielkopieczowego. Wraz ze wzrostem ilości tych składników w składzie cementu maleje ilość wydzielonego ciepła w procesie twardnienia, przy czym efekt ten silniejszy w przypadku popiołu lotnego krzemionkowego. W pierwszych 12 godzinach ilość wydzielonego ciepła hydratacji była niższa niż wynikałoby to ze stopnia zastąpienia cementu CEM I 42,5R, a po 72 godzinach była równa stopniowi zastąpienia. Zastosowanie nieklinkierowych składników głównych powoduje również opóźnienie

wystąpienia maksimum wydzielania ciepła. W tabeli 5 [23] pokazano wpływ dodatku popiołu lotnego na termikę w betonie (beton z wysoką zawartością popiołu lotnego użyty w betonowaniu dużego elementu betonowego o wymiarach 2,5m x 4,0m x 5,0m).

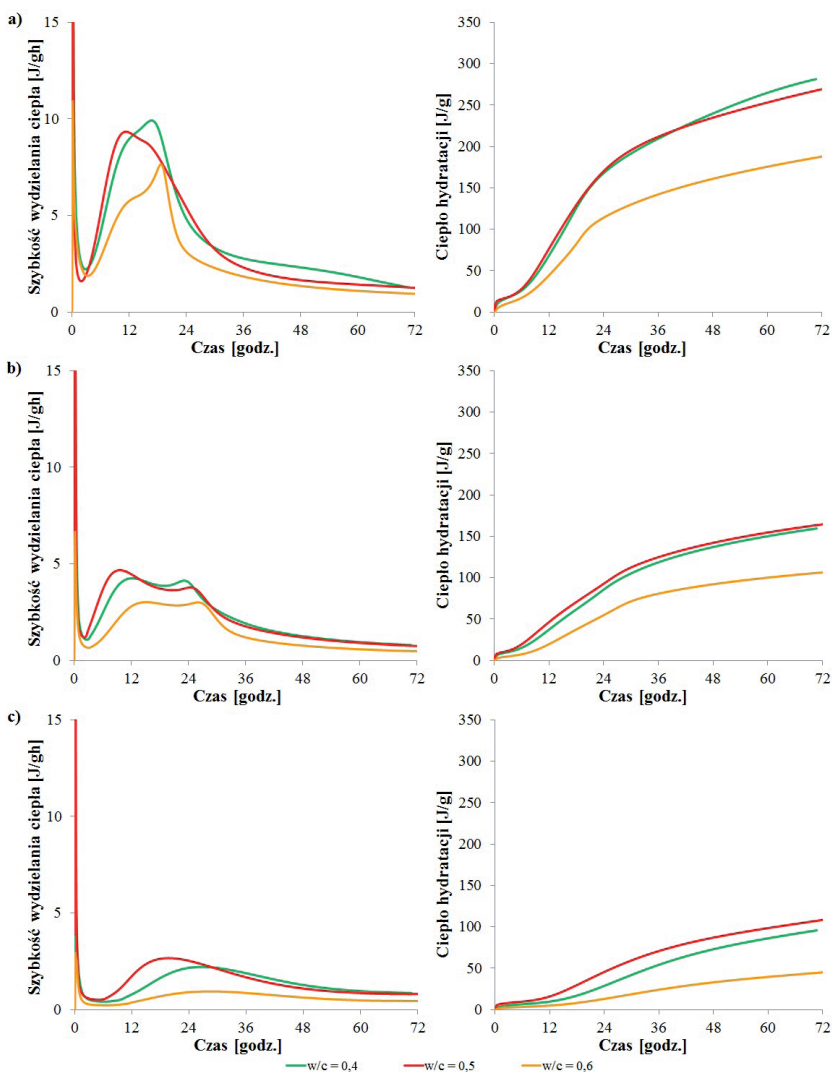
W celu obniżenia ryzyka zarysowań konstrukcji masywnej w wyniku generowanych naprężeń termicznych korzystniej jest stosować popiół lotny krzemionkowy z termicznego punktu widzenia. W przypadku stosowania tylko popiołu lotnego krzemionkowego w składzie betonu należy liczyć się z niższą dynamiką narastania wytrzymałości niż w przypadku betonu z mielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym [21, 22]. Dlatego najkorzystniejsze jest stosowanie kombinacji popiołu lotnego krzemionkowego i granulowanego żużla wielkopieczowego, np. poprzez wprowadzenie popiołu lotnego jako dodatku typu II do składu betonu wykonanego z cementu hutniczego CEM III/A,B.



Rys. 5. Wpływ popiołu lotnego krzemionkowego (V) i mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego (S) na ciepło hydratacji i szybkość jego wydzielania w warunkach izotermicznych (20°C) przy współczynniku w/c = 0,5

3.4. Wpływ współczynnika w/c na kinetykę wydzielania ciepła hydratacji

Zwiększenie współczynnika wodno-cementowego w/c powyżej 0,5 pozwala na zmniejszenie ilości wydzielanego ciepła oraz spowolnienie kinetyki jego wydzielania we wczesnym okresie hydratacji (rys. 6), co jest korzystne ze względu na wczesne wpływy termiczne w betonie masywnym. Jednakże przy podwyższaniu współczynnika w/c w betonie w celu obniżenia ilości wydzielonego ciepła należy mieć na uwadze spadek wytrzymałości oraz trwałości takiego betonu [20÷21]. Natomiast zmniejszenie współczynnika w/c poniżej 0,5 nie wpłynęło znacząco na ilość oraz kinetykę wydzielanego ciepła.



Rys. 6. Wpływ współczynnika wodno-cementowego w/c na ciepło hydratacji i kinetykę jego wydzielania: a) CEM I 42,5R, b) CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, c) VLH V/B (S-V) 22,5

Tabela 4. Przyrost temperatury w elemencie masywnym [23]

| Receptura | Zawartość [kg/m ³] | | Stosunek w/cm [*] | Wytrzymałość [MPa] | | Maksymalna temperatura [°C] | Czas uz. maks. temp. [godz.] |
|-----------|--------------------------------|--------|----------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|
| | Cement | Popiół | | po 1 dniu | po 3 dniach | | |
| 1 | 365 | --- | 0,45 | 10,3 | --- | 68 | 29 |
| 2 | 125 | 155 | 0,46 | 1,6 | 5,1 | 44 | 53 |
| 3 | 170 | 220 | 0,29 | 8,4 | 15,6 | 54 | 57 |
| 4 | 330 | --- | 0,50 | 7,3 | 14,0 | 55 | 75 |
| 5 | 125 | 155 | 0,41 | 2,5 | 8,4 | 47 | 98 |

**cm- suma zawartości cementu i popiołu*

3.5. Współczynnik przewodności cieplnej i ciepło właściwe betonu

W tabelach 5 i 6 przedstawiono współczynnik przewodności i pojemności cieplnej betonu w stanie powietrzno-suchym w zależności od rodzaju zastosowanego cementu i kruszywa. Najwyższym współczynnikiem przewodności cieplnej charakteryzowały się betony z kruszywem żwirowym, co jest związane z dużą zawartością kwarcu w jego składzie (61÷94% w zależności od frakcji wg [14]). Najmniejszym współczynnikiem przewodnictwa charakteryzował się beton z kruszywem bazaltowym – o ok. 25% niższym niż beton z kruszywem żwirowym. Natomiast betony wykonane na kruszywie granitowym i wapiennym charakteryzowały się podobnymi współczynnikami przewodności cieplnej i były niższe niż z betonów z kruszywem żwirowym o 13÷17%. Z punktu widzenia szybkości odprowadzania ciepła z betonu najkorzystniejszym rozwiązaniem jest stosowanie kruszywa żwirowego, a najmniej kruszywa bazaltowego. Analiza wyników badań współczynnika przewodzenia ciepła pozwoliła stwierdzić, że zastosowany rodzaj cementu ma niewielki wpływ na jego wartość. Współczynnik ten zmieniał się w przedziale 1÷6% dla betonów z różnych cementów i kruszyw. Wyjątek stanowił beton z cementem hutniczym CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA i kruszywem granitowym. W tym przypadku współczynnik przewodzenia ciepła zmienił się aż o 13% w stosunku do betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

Różnice w pojemności cieplnej badanych betonów wyniosły ok. 4÷6% dla poszczególnych cementów i kruszyw. Najwyższą pojemnością cieplną charakteryzował się beton wykonany z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, a najniższą – beton z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA. Analiza wyników pojemności cieplnej betonu pozwala stwierdzić, że największą pojemnością cieplną charakteryzowały się betony z kruszywem bazaltowym i granitowym. Natomiast betony z kruszywem żwirowym i wapiennym charakteryzowały się 6÷10% niższą pojemnością cieplną. W przypadku pojemności cieplnej rodzaj cementu i kruszywa ma znacznie mniejsze znaczenie niż w przypadku współczynnika przewodności cieplnej.

Z przedstawionej analizy wyników badań można wnioskować, iż w składzie betonu masywnego najkorzystniej jest stosować kruszywo żwirowe, następnie granitowe i wapienne, a najmniej korzystne jest stosowanie kruszywa bazaltowego. Należy mieć jednak na uwadze, że główny składnik kruszywa żwirowego tj. kwarc charakteryzuje się

wysokim współczynnikiem rozszerzalności termicznej, ponad dwukrotnie większym niż pozostałych analizowanych kruszyw.

Tabela 5. Współczynnik przewodzenia ciepła betonu w zależności od rodzaju cementu i kruszywa

| Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)] | | | | |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Rodzaj cementu | Rodzaj kruszywa | | | |
| | Żwir | Bazalt | Granit | Wapień |
| CEM I 42,5R | 2,43 | 1,84 | 2,01 | 2,03 |
| CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA | 2,35 | 1,70 | 1,75 | 1,99 |
| CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA | 2,28 | 1,71 | 1,98 | 1,96 |

Tabela 6. Pojemność cieplna betonu w zależności od rodzaju cementu i kruszywa

| Pojemność cieplna [$10^6 \cdot \text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$] | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Rodzaj cementu | Rodzaj kruszywa | | | |
| | Żwir | Bazalt | Granit | Wapień |
| CEM I 42,5R | 1,72 | 1,83 | 1,81 | 1,71 |
| CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA | 1,68 | 1,77 | 1,74 | 1,76 |
| CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA | 1,61 | 1,76 | 1,77 | 1,67 |

3.6. Temperatury twardnienia betonu

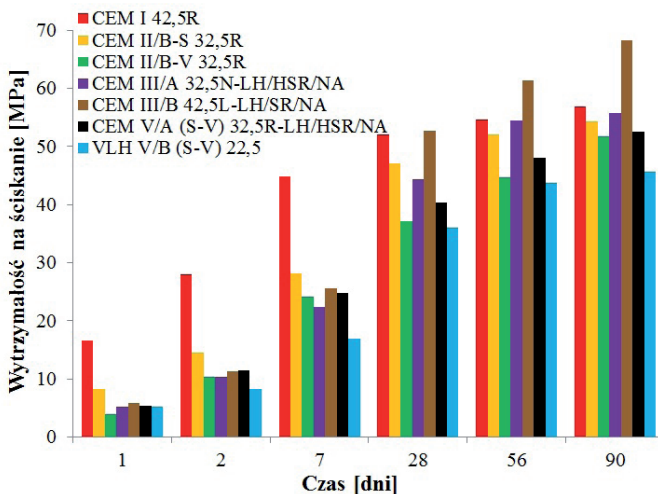
Rozwój temperatur twardnienia betonu pokazano na rysunku 7, jako wartości średnie z punktów pomiarowych A, B i C (rys. 2). Zastosowanie w składzie betonu cementów z dodatkami mineralnymi obniżyło maksymalną temperaturę twardnienia betonu. Szczególnie efektywny jest wpływ popiołu lotnego krzemionkowego (V) w składzie cementu. W przypadku cementu CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA oraz cementu CEM II/B-V 32,5R uzyskano temperaturę zbliżoną do betonu z cementu CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA. Najniższą temperaturę twardnienia zarejestrowano w przypadku betonu z cementu VLH V/B (S-V) 22,5, niezależnie od rodzaju zastosowanego kruszywa.

Zastosowanie w betonie cementów o dużej zawartości granulowanego żużla wielkopiecowego i/lub popiołu lotnego wpłynęło też znacząco na opóźnienie momentu wystąpienia temperatury maksymalnej. Dla cementów CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA, CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA, CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA oraz VLH V/B (S-V) 22,5 maksymalną temperaturę zarejestrowano od 11 do 24 godzin później w porównaniu z cementem portlandzkim CEM I 42,5R.

Porównanie ilościowe wyników badań najlepiej odnieść do wartości maksymalnego wzrostu temperatury ΔT_{\max} , czyli różnicy pomiędzy temperaturą maksymalną, a temperaturą początkową mieszanki betonowej. Zastosowanie w składzie betonu cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/B-S 32,5R spowodowało zmniejszenie wartości ΔT_{\max} od 11°C do 15°C w stosunku do cementu CEM I 42,5R (próbka referencyjna). Dla cementu

3.7. Wytrzymałość na ściskanie betonu

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu przedstawiono na rysunku 8. Średnia wytrzymałość wczesna po 2 i 7 dniach betonów z cementami CEM II ÷ CEM V i VLH V była niższa od 30 do 50% od średniej wytrzymałości na ściskanie betonu z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Jednakże w dłuższych okresach dojrzewania (28÷90 dni) zaobserwowano znaczne przyrosty średniej wytrzymałości na ściskanie betonów z cementami zawierającymi nieklinkierowe składniki główne, które po 90 dniach osiągały wartości porównywalne z betonem z cementem portlandzkim CEM I 42,5R. Szczególnie duże przyrosty uzyskał cement hutniczy CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA, co daje możliwość optymalizacji ilości cementu (zmniejszenie) ze względu na ilość wydzielanego ciepła przy jednoczesnym zachowaniu właściwości mechanicznych betonu.



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie betonu

4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że beton zawierający w swoim składzie cementy z granulowanym żużlem wielkopieczowym (S) i/lub popiołem lotnym krzemionkowym (V) może osiągać bardzo dobre właściwości mechaniczne w dłuższych okresach twardnienia, osiągając jednocześnie niskie temperatury twardnienia, co jest szczególnie istotne w przypadku betonu masywnego. Na szczególną uwagę zasługują w tym kontekście cementy z dużą ilością dodatków mineralnych: cement hutniczy CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA oraz CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA, cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA oraz cement specjalny wieloskładnikowy o bardzo niskim cieple hydratacji VLH V/B (S-V) 22,5. Stosowanie tych cementów w składzie betonu pozwala zminimalizować ryzyko powstania wczesnych rys skurczowych spowodowanych przez naprężenia termiczne wywołane wydzielającym się ciepłem z procesu hydratacji cementu.

Ryzyko powstawania wczesnych rys termiczno-skurczowych można minimalizować poprzez odpowiedni dobór kruszywa, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości termicznych tj. przewodności i pojemności cieplnej oraz współczynnika rozszerzalności termicznej. Najlepszymi właściwościami termicznymi charakteryzował się beton z kruszywem żwirowym, a następnie granitowym i wapiennym, najmniej korzystnymi właściwościami charakteryzował się beton z kruszywem bazaltowym. Należy mieć jednak na uwadze, że w zastosowanym kruszywie żwirowym głównym składnikiem jest kwarc charakteryzujący się wysokim współczynnikiem rozszerzalności termicznej, co jak pokazały wyniki przedstawione w pracy [24] może wpływać na podwyższenie generowanych naprężeń termicznych.

Literatura

- [1] ACI Committee 207; Guide to mass concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute, 2006
- [2] ACI Committee 207; Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute, 2007
- [3] Bofang, Z.; Thermal stresses and temperature control of mass concrete. Butterworth-Heinemann, Kidlington, Oxford, 2014
- [4] Kiernożycki W.; Betonowe konstrukcje masywne. Teoria, wymiarowanie, realizacja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2003
- [5] PN-EN 206:2014 „Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
- [6] Li, G. and Zhao, X.; Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag. Cement and Concrete Composites, 25(3), pp. 293-299, 2003
- [7] Maia, L., Azenha, M., Faria, R. and Figueiras, J.; Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions. Cement and Concrete Research, 41(8), pp.799-807, 2011
- [8] Giergiczyński, Z.; Rola popiołów wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006
- [9] Chładzyński S., Garbacz A.; Cementy wieloskładnikowe w budownictwie. Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2008
- [10] PN-EN 197-1:2012 „Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”
- [11] PN-B-19707:2013 „Cement – Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności”
- [12] PN-EN 14216:2005 „Cement – Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów specjalnych o bardzo niskim cieple hydratacji”
- [13] PN-EN 12620+A1:2010 „Kruszywa do betonu”
- [14] Górażdże Kruszywa Sp. z o.o., Raport z badań kruszywa z kopalni Dziewgowice, 2013
- [15] DIN 1045-2:2014 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206”
- [16] PN-EN 12390-3:2011 „Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań”
- [17] PN-EN 12390-5:2011 „Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań”
- [18] ISO 1920-10:2010 „Badania betonu – Część 10: Wyznaczanie statycznego modułu sprężystości przy ścisłaniu”
- [19] PN-EN 12390-2:2011 „Badania betonu -- Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”
- [20] Giergiczyński, Z., Popiół lotny w składzie cementu i betonu, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
- [21] Giergiczyński Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2002
- [22] Neville A.M., Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000
- [23] Thomas M.; Optimizing the use of fly ash in concrete. Portland Cement Association (USA), 2007.
- [24] M. Batog, Kształtowanie składu mieszanki betonowej z uwagi na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w betonowych konstrukcjach masywnych, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2016