

mł. asp. Mateusz Banaś

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Badanie betonu na kruszywie odpadowym w warunkach oddziaływania temperatur pożarowych

Abstrakt

W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych próbek betonowych na kruszywie odpadowym. Próbki zostały poddane badaniom niszczącym po wygrzaniu w piecu, gdzie proces przebiegał według krzywej pożarowej temperatura – czas. Badano również wpływ czasu wiązania betonu na wytrzymałość na ściskanie.

Słowa kluczowe: kruszywo recyklingowe, pożar, wytrzymałość betonu

Examination of Concrete Produced on the Waste Aggregate in Fire Temperatures

Abstract

The article presents the results of the research dealing with the strength of concrete samples on the waste aggregate. The samples were subjected to the destructive tests after the warming in the oven where the process was running according to the fire curve, temperature – time. The influence of the concrete setting on the strength and the compression was tested.

Keywords: recycle aggregate, fire, strength of concrete

Wprowadzenie

Począwszy od epoki kamiennej człowiek wpadł na pomysł łączenia ze sobą pokruszonych skał ze spoiwem, uzyskując w ten sposób materiał zwany betonem.

Początki jego stosowania datuje się na VI w. p.n.e. Do najważniejszych i najstarszych budowli wykonanych z betonu zaliczyć można Panteon w Rzymie, Wielki Mur Chiński czy starożytne wodociągi. W najstarszych wersjach betonu jako spoiwo zastosowanie miało wapno hydrauliczne z dodatkiem naturalnych materiałów wiążących (pucolany) lub sztucznych (sproszkowanej ceramiki) [1]. W dzisiejszych czasach beton to nie tylko okruchy skalne. Kruszywo w mieszance stanowi co najmniej trzy czwarte objętości betonu [2]. Jako kruszywa używa się andezytu, bazaltu, diabazu, granitu, piasku, arkozy, wapienia, marmuru, a także kruszyw otrzymanych w wyniku działania człowieka. Często są to odpady przemysłowe lub materiały nadające się do recyklingu. Do tego typu kruszywa można zaliczyć odpady z ceramiki sanitarnej. Niezwykle ważnym i istotnym aspektem jest wpływ wytwarzania betonu oraz jego użycia na środowisko. Produkcja składników betonu i jego transport znacznie wpływają na emisję CO₂. Według przeprowadzonych badań, produkcja cementu stanowi trzecie największe źródło emisji CO₂ na świecie. Aż 8% produkowanego na kuli ziemskiej tlenku węgla (IV) pochodzi z produkcji cementu. Właśnie z tego powodu beton został objęty programem budownictwa zrównoważonego [3, 4].

Warunki zewnętrzne mają istotny wpływ na wytrzymałość betonu. Elementy konstrukcyjne wykonane z betonu (najczęściej z żelbetu) mogą tracić swoje fizyczne właściwości, szczególnie w warunkach podwyższonej temperatury. Wahania temperatury zależnej tylko od warunków atmosferycznych nie mają większego znaczenia dla wytrzymałości betonu w niewielkich konstrukcjach. W większych budowlach należy wziąć pod uwagę odkształcalność termiczną, czyli zdolność ciała do zmiany wymiarów pod wpływem temperatury. Szczególnym przypadkiem jest przejście przez punkt 0, czyli w momencie gdy temperatura otoczenia spada poniżej 0°C i następuje zmiana stanu skupienia wody [2]. Woda zmieniając swój stan z ciekłego w stały, zwiększa objętość o 8%, a zmiana ta może mieć destrukcyjny wpływ na beton [6]. Dlatego, aby zminimalizować wpływ zmiany objętości wody oraz by nie doszło do uszkodzenia betonu, stosuje się domieszki aeracyjne, dzięki którym struktura betonu uzyskuje odporność na niskie temperatury. Mieszanki aeracyjne mają również wpływ na wytrzymałość powstałego betonu.

W artykule opisano wpływ temperatur pożarowych, sięgających nawet kilkuset stopni przy spalaniu materiałów celulozowych, na wytrzymałość betonu na kruszywie odpadowym. Według statystyk Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, w 2017 r. doszło do 125 892 pożarów w skali całego kraju,

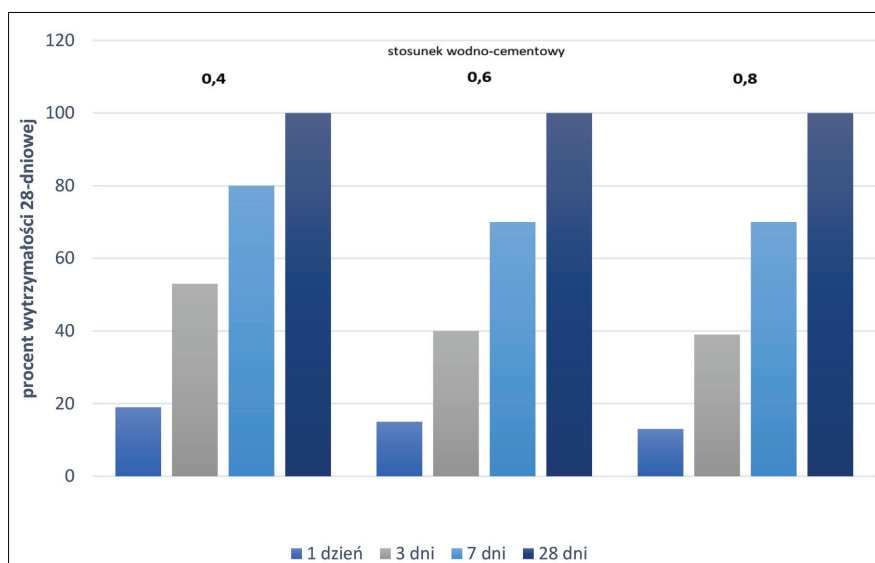
a 34 808 z nich dotyczyło obiektów użyteczności publicznej i mieszkalnych. Skala poruszanego problemu jest zatem ogromna.

Ze względu na szerokie zastosowanie w budownictwie beton, a także jego składniki poddaje się surowej ocenie jakości i badaniom na różnych etapach produkcji, a także eksploatacji w budowlach. Do jednego z ważniejszych badań, które pozwala stwierdzić przydatność betonu w zależności od zastosowania jest poddanie znormalizowanych próbek walcowych lub sześciennych próbie wytrzymałości na ściskanie [5]. W niniejszym artykule skoncentrowano się właśnie na tym badaniu.

1. Zagadnienia teoretyczne

1.1. Wytrzymałość betonu w zależności od wieku

Mieszanka betonowa po wylaniu wiąże. Reakcje chemiczne w betonie zachodzą głównie w fazie ciekłej. Wytrzymałość betonu jest ściśle zależna od czasu, w którym beton dojrzewa. Początkowo wytrzymałość ta jest równa 0.



Rys. 1. Procent wytrzymałości 28-dniowej w zależności od stosunku wodno-cementowego i czasu dojrzewania

Źródło: [2]

Z czasem jednak wzrasta. Jest to szczególnie istotne w budownictwie, gdy wznosi się koleje kondygnacje. Odpowiedni czas, po którym beton dojrzewa i osiąga wymaganą wytrzymałość pozwala np. zdjąć deskowanie czy przejść do wznoszenia kondygnacji powyżej. W praktyce wytrzymałość betonu określa się po 28 dniach. Istotny wpływ na szybkość uzyskania odpowiedniej wytrzymałości przez beton ma stosunek mieszanki wodno-cementowej. Im stosunek ten jest mniejszy, tym beton szybciej uzyskuje zakładaną wytrzymałość. Jeżeli stosunek wody do spoiwa rośnie, tym samym opóźnia się czas, po którym beton osiąga wymaganą wytrzymałość.

1.2. Klasy wytrzymałości betonu na ściskanie

Beton ma wiele zastosowań w budownictwie. Jest podstawowym materiałem, z którego wykonane są płyty prefabrykowane, konstrukcje żelbetowe, ławy i stopy fundamentowe, płyty stropowe. Ze względu na przeznaczenie w konstrukcji, beton dzieli się na konstrukcyjny, konstrukcyjno-izolacyjny, izolacyjny, architektoniczny [1]. W zależności od zastosowania w budownictwie należy dobrać jego odpowiedni rodzaj. Kierując się wyborem, należy wziąć pod uwagę kwestie wytrzymałościowe, gdyż to od nich zależy będzie bezpieczeństwo konstrukcji, a także warunki ekonomiczne. Beton o wyższej wytrzymałości na ściskanie będzie droższy. Należy zatem poszukać kompromisu pomiędzy wytrzymałością a ceną.

Klasyfikacja betonu na ściskanie obejmuje beton zwykły, ciężki i lekki. Podział ten jest przywołany w normie PN-EN 206+A1:2016-12.

beton lekki gęstość od 800 kg/m ³ do 2000 kg/m ³	beton zwykły gęstość od 2000 kg/m ³ do 2600 kg/m ³	beton ciężki gęstość powyżej 2600 kg/m ³
---	---	---

Rys. 2. Klasyfikacja betonu ze względu na gęstość

Źródło: opracowanie własne

Wytrzymałość charakterystyczną na ściskanie określa się na znormalizowanych próbkach walcowych (o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm), a także na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Wytrzymałość charakterystyczna jest to wartość wytrzymałości, poniżej której może znaleźć się jedynie 5%

wszystkich możliwych przebadanych próbek. Klasy wytrzymałości na ściskanie opisywane są za pomocą symboli literowo-słownych.

2. Materiały i metodyka badań

2.1. Ogólna charakterystyka materiałów poddanych badaniu

Badane próbki powstały na bazie kruszywa z ceramiki sanitarnej. Kruszywo klasyfikuje się jako recyklingowe. Jego główne pochodzenie to ceramika biała, z której wykonane są umywalki, wanny, kolanka maskujące, pisuary itp. Stosunek wodno-cementowy, który posłużył do wykonania mieszanki betonowej, wyniósł 0,4. Próbki zostały wykonane na bazie cementu portlandzkiego CEM I 32,5R. Wykonano je z mieszanek podstawowych, a także z domieszką napowietrzającą. W tabeli 1 przedstawiono skład wagowy mieszanek betonowych. Do identyfikacji mieszanek na potrzeby badań wprowadzono oznaczenia literowo-liczbowe, a ich znaczenie podano w tabeli 2.

Tabela 1. Składy wagowe mieszanek podstawowych oraz z domieszką napowietrzającą w kg/m³

Seria betonu	Cement	Kruszywo recyklingowe		Woda	Domieszka
	Portlandzki CEM I 32,5R	Fracja 0-4mm	Fracja 4-8mm		
P-0*	488,0	997,14	398,86	199,0	–
P-5*	487,51	997,14	398,86	199,0	0,49
P-10*	487,02	997,14	398,86	199,0	0,98
*z cementem portlandzkim, gdzie liczba oznacza stopień napowietrzenia					

Źródło: opracowanie własne

Składniki zostały wymieszane w betoniarce DZB-300, a czas ich mieszania wyniósł 3 min. Mieszanie prowadzono w temperaturze 20°C, przy wilgotności względnej na poziomie 60%. Próbki zostały odlane do form ze styropianu i odpowiednio je pielęgnowano. Część z próbek zniszczono po osiągnięciu dojrzałości (po 28 dniach), a pozostałe niszczone sukcesywnie po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach.

2.2. Stanowiska badawcze

Badania próbek w podwyższonych temperaturach, zbliżonych do temperatur pożarowych, prowadzone były w piecu specjalnym PK 1100/5 zasilanym za pomocą energii elektrycznej. Komora właściwa ma objętość około $0,7 \text{ m}^3$. Piec posiada sekcje grzewcze wykonane z drutu oporowego Kanthal A1. Elementy grzejne wykonane zostały na kształt solenoidu. Do rejestracji wyników badań służy komputer obsługujący stanowisko. Wyposażony jest on w specjalistyczne oprogramowanie ThermoPro, które umożliwia zaprogramowanie procesu cieplnego poprzez podanie czasu nagrzewania, temperatury, a także liczby odcinków procesów, które powinny zostać zrealizowane. Dodatkowo istnieje możliwość śledzenia rozkładu temperatury w badanym elemencie za pomocą termopar NiCr-Ni, które spełniają wymagania normy [10]. Rejestracja sygnałów z termopar prowadzona jest za pomocą programu Data Recorder-Piec. Sygnał analogowy (ciągły) z urządzeń wejściowych (termopar) przetwarzany jest na sygnał cyfrowy w specjalnym przetworniku analogowo-cyfrowym (ADAM-4051-BE).

Badania niszczące na ściskanie próbek sześciennych i walcowych przeprowadzono za pomocą systemu Advantest 9 firmy Controls. Głównym elementem systemu jest prasa hydrauliczna. Cieczą roboczą jest olej hydrauliczny, a różnica potencjałów (ciśnień) wytwarzana jest za pomocą pompy wielotłoczkowej. Maszyna jest w stanie wygenerować siłę nacisku do 3000 kN (dotyczy ściskania). Układ pomiarowy stanowił komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem, które przetwarza i rejestruje sygnały z maszyny.



Rys. 3. Stanowisko do badania próbek w podwyższonych temperaturach (po lewej) oraz stanowisko do badania wytrzymałości na ściskanie

Źródło: opracowanie własne

2.3. Charakterystyka próby badawczej

Przed przystąpieniem do właściwych badań wykonano próbki o określonym składzie. Mieszanke betonową przelano do specjalnych form i pozostawiono do związania. Przeprowadzone badania należały do grupy prób niszczących, które charakteryzują się przyłożeniem siły do badanego elementu, a następnie zwiększaniu jej wartości – aż do granic wytrzymałości danego materiału. Niektóre próbki zostały wcześniej wygrzane w temperaturze 400 i 800°C przed zniszczeniem. Podczas prowadzonego badania dążono, aby wzrost temperatury w piecu zbliżony był do standardowego pożaru. Zależność przyrostu temperatury w czasie w warunkach pożaru opisano za pomocą wzoru (1):

$$T = 20 + 345 \log(8 \cdot t + 1) \quad (1)$$

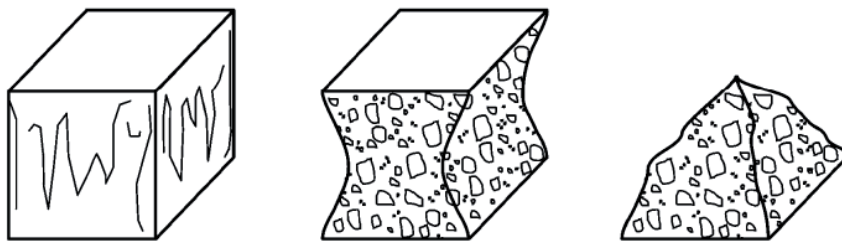
gdzie:

T – temperatura [°C];

t – czas [min].

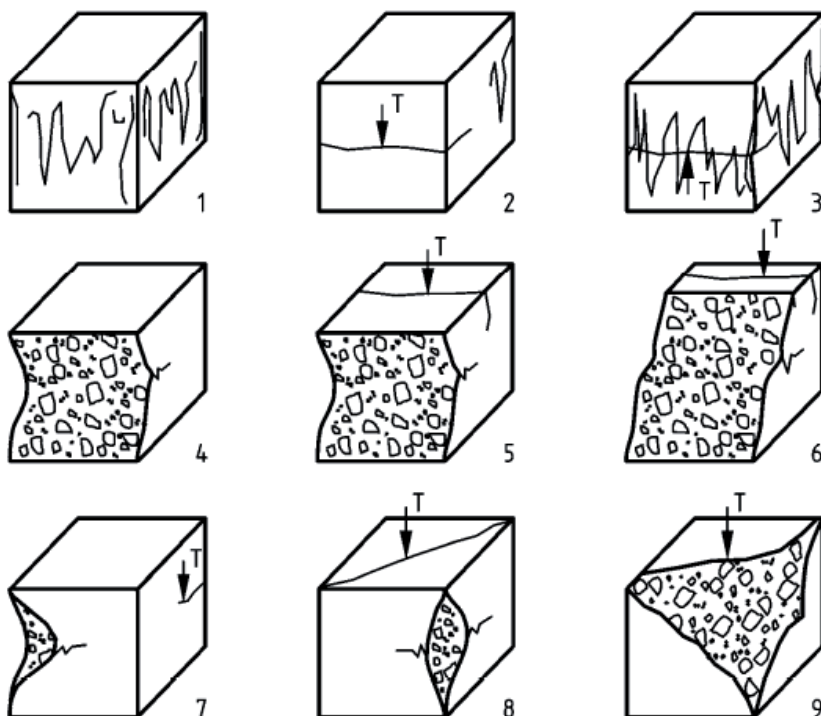
Rozkład temperatury monitorowano w specjalnie nawierconej próbce w kształcie walca. Termopara regulacyjna rejestrowała temperaturę powietrza w komorze pieca. Otwór pod termoparę CH8 wykonany został na środku podstawy (koła) próbki do głębokości 150 mm. Otwór pod termoparę CH9 wykonano 25 mm od krawędzi podstawy. Termopara CH10 zamocowana była do powierzchni bocznej próbki. Otwory zostały uszczelnione wełną mineralną, aby ograniczyć przenikanie ciepła na drodze innej niż przewodzenie. Po osiągnięciu zadanej temperatury, utrzymywano ją jeszcze przez godzinę. Następnie przerywano proces grzania i próbki stygły przez około dobę do temperatury pokojowej.

Próbek, których wytrzymałość na ściskanie badano w zależności od czasu dojrzewania, nie wygrzano. Uznawano, że próbka uległa zniszczeniu zgodnie z normą [5], gdy wszystkie cztery powierzchnie zewnętrzne były spękane równomiernie, a powierzchnie stykające się z płytkami dociskowymi były uszkodzone nieznacznie. Obserwator porównał wszystkie próbki poddane próbie niszczącej z rysunkami zawartymi w normie opisującej wytrzymałość na ściskanie próbek do badań. Wynik uznano za pozytywny, gdy stan faktyczny zgadzał się z oczekiwaniami zawartymi w normie [5].



Rys. 4. Próbkę sześcienną zniszczoną prawidłowo

Źródło: [5]



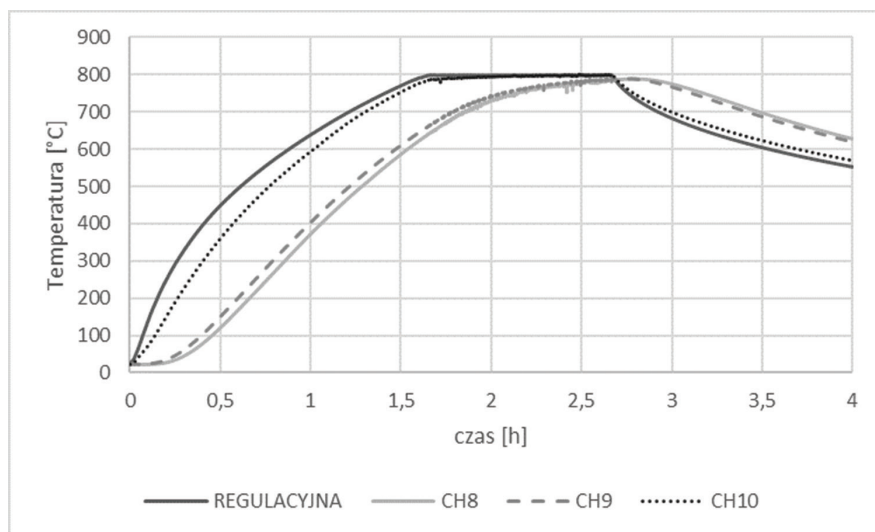
Rys. 5. Próbkę sześcienną zniszczoną nieprawidłowo

Źródło: [5]

3. Wyniki badań

Badaniom poddano 30 próbek sześciennych, które wygrzano w temperaturze 400 lub 800°C. 75 próbek kostkowych nie wygrzano, lecz sukcesywnie znisz-

czono na maszynie wytrzymałościowej po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach. Rozkład temperatury próbek wygrzanych w piecu specjalnym był stale monitorowany i zapisywany za pomocą specjalistycznego oprogramowania na dysku komputera. Przykładowy rozkład temperatury w specjalnie nawierconej próbce walcowej (dodatkowej) przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Rozkład temperatury w próbce walcowej

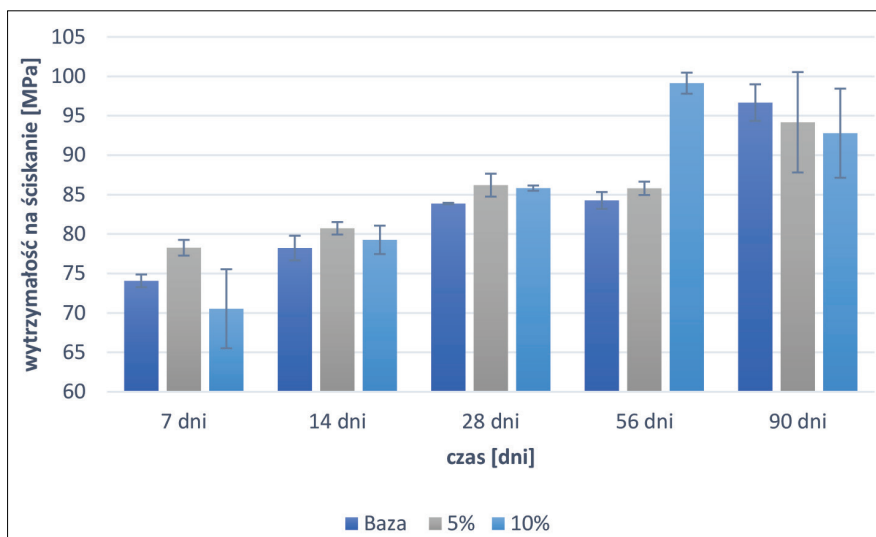
Źródło: opracowanie własne

Badania rozkładu temperatury w walcowym elemencie z betonu dowiodły, że największy jej wzrost w czasie następuje początkowo bezpośrednio na granicy styku faz powietrze-beton, a im głębiej próbki, temperatura wzrasta wolniej. Po około 2,5 godz. od uruchomienia procesu grzejenego, temperatury zrównały się. Oznacza to, iż próbka nagrzała się równomiernie w całej objętości. Z kolei podczas stygnięcia elementu, zaobserwowano utrzymywanie się takiej sytuacji jeszcze kilka minut po odłączeniu źródła energii elektrycznej, a następnie temperatura warstw wewnętrznych była wyższa niż temperatura warstw zewnętrznych.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania niszczące na próbkach sześciennych niewygrzanych, aby sprawdzić wytrzymałość próbek bez wpływu temperatur pożarowych.

Na rys. 7 pokazano wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek, które niszczone po 7, 14, 28, 56 i 90 dniach. Z przeprowadzonych badań wynika, że

wydłużając czas dojrzewania betonu, uzyskuje się wyższą wytrzymałość na ściskanie. Jest to istotne z punktu czasu realizacji inwestycji, stosując tzw. przerwy technologiczne, czyli czas potrzebny na uzyskanie minimalnej wytrzymałości przez element budowlany.



Rys. 7. Średnia wytrzymałość betonu z cementu portlandzkiego na ściskanie w czasie (próbki sześciennie nie wygrzane)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie betonu z cementu portlandzkiego (próbki sześciennie)

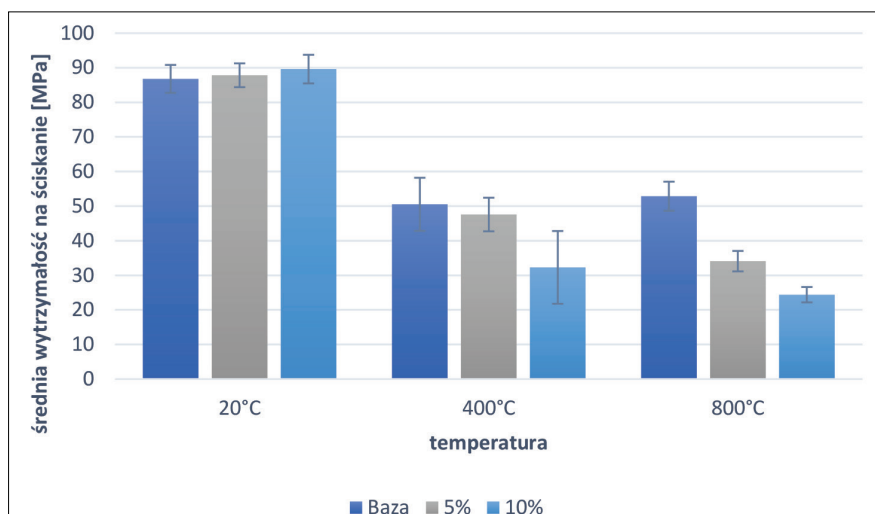
Oznaczenie próbki	Czas dojrzewania	f_c [MPa]	s [MPa]	v [%]	f_{cMax} [MPa]	f_{cMin} [MPa]
P-0	7 dni	74,07	0,80	1,09	75,20	73,40
P-5		78,27	0,99	1,27	79,60	77,20
P10		70,53	5,00	7,10	77,60	67,39
P-0	14 dni	78,23	1,56	2,00	80,00	76,20
P-5		80,73	0,79	0,98	81,80	79,90
P10		79,27	1,80	2,27	81,02	76,79
P-0	28 dni	83,87	0,09	0,11	84,00	83,80
P-5		86,20	1,45	1,68	85,58	84,82
P10		85,82	0,33	0,38	86,17	85,38

cd. Tabeli 2

Oznaczenie próbki	Czas dojrzewania	f_c [MPa]	s [MPa]	v [%]	f_{cMax} [MPa]	f_{cMin} [MPa]
P-0	56 dni	84,27	1,07	1,26	85,30	82,80
P-5		85,80	0,85	0,99	86,83	84,75
P10		99,13	1,33	1,34	101,02	98,15
P-0	90 dni	96,67	2,32	2,40	98,6	93,41
P-5		94,18	6,36	6,76	100,32	85,41
P10		92,79	5,65	6,09	100,77	88,39

Źródło: opracowanie własne

Wyniki przedstawione na rys. 8 dotyczą próbek walcowych, które zostały wygrzane w temperaturze 400°C, 800°C lub nie były w ogóle wygrzewane (próba kontrolna).



Rys. 8. Średnia wytrzymałość próbek walcowych na ściskanie

Źródło: opracowanie własne

Badania dowiodły, że oddziaływanie podwyższonych temperatur na próbki betonowe powoduje spadek ich wytrzymałości na ściskanie. Najprościej można wytłumaczyć ten fakt powstawaniem rys w strukturze próbki i osłabieniem kontaktu kruszywo-zaczyn. Rośnie również porowatość zaczynu i następuje odparowanie wody.

Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek walcowych

Oznaczenie próbki	Temperatura wygrzewania	f_c [MPa]	s [MPa]	v [%]	f_{cMax} [MPa]	f_{cMin} [MPa]
P-0	20°C	86,77	4,04	4,65	92,24	79,91
P-5		87,82	3,44	3,92	93,34	82,45
P-10		89,60	4,13	4,61	93,61	81,61
P-0	400°C	50,53	7,67	15,18	59,88	38,9
P-5		47,57	4,86	10,21	55,53	42,35
P-10		32,29	10,51	32,56	39,71	14,28
P-0	800°C	52,86	4,21	7,97	58,61	48,49
P-5		34,09	2,96	8,67	36,82	29,11
P-10		24,39	2,22	9,08	28,4	21,46

Źródło: opracowanie własne

Zaobserwowano zależność, że im wyższa temperatura ekspozycji próbek betonowych na podwyższoną temperaturę, tym większy spadek wytrzymałości na ściskanie. Największy spadek wytrzymałości na ściskanie dotyczył próbek najbardziej napowietrzonych. Nastąpił znaczny spadek wytrzymałości próbek, które wygrzano do temperatury 800°C. Pojawiła się tu pewna wątpliwość dotycząca zastosowania cementu portlandzkiego.

Uwagi końcowe

Przeprowadzone badania dowiodły, że na wytrzymałość betonu na ściskanie ma wpływ czas dojrzewania, a także temperatura ekspozycji. Ekstremalne temperatury, jakie występują w warunkach pożarowych, znacznie osłabiają badany parametr. Oddziaływanie temperatury 800°C na próbki o oznaczeniu P-10 powodowało spadek wytrzymałości na ściskanie nawet o 73% w porównaniu do próby kontrolnej. Zaobserwowano związek między temperaturą ekspozycji a wytrzymałością na ściskanie i dowiedziono, że wraz ze wzrostem temperatury spadek wytrzymałości jest większy. Ma to szczególne znaczenie podczas oględzin budowli po pożarze i stwierdzeniu, czy nadaje się dalej do eksploatacji.

Wyniki badań świadczą również o tym, że uzyskano beton o wysokiej wytrzymałości. Badania dowiodły o przydatności stosowania kruszywa z ceramiki

białej w produkcji betonu z cementu portlandzkiego, gdy nie występuje czynnik pożarowy. Oddziaływanie wysokich temperatur znacznie osłabia strukturę betonu powstałego z cementu portlandzkiego, w związku z czym należy poszukiwać innych rodzajów betonu, gdy zagrożenie czynnikiem pożarowym jest duże.

Z ekologicznego punktu widzenia ponowne wykorzystanie ceramiki białej jako kruszywa jest bardzo korzystne, gdyż nie podlega ona biodegradacji. Opublikowane wyniki próby badawczej mogą być podstawą do dalszych badań nad zastosowaniem materiałów recyklingowych jako kruszywa.

Literatura

- [1] Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa 2005.
- [2] Neville A., *Właściwości betonu*, Polski Cement Sp. z.o.o., Kraków 2002.
- [3] Błaszczczyński T., Król M., *Produkcja betonu a problem redukcji emisji dwutlenku węgla*, *Izolacje* 2014, nr 3, s. 38–44.
- [4] Andrew R., *Global CO₂ emissions from cement production*, *Earth System Science Data* 2018, Nr 10, s. 195–217.
- [5] PN-EN 12390-3:2011 *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań*.
- [6] *Beton napowietrzony – co o nim wiemy*, <http://betonnadom.pl/zanim-kupisz/faq/beton-napowietrzony-o-nim-wiemy> (dostęp: 30.04.2018).
- [7] *Požary wg kodu obiektu w rozbiciu na województwo – 2017*, KG PSP, Warszawa 2018.
- [8] Halicka A., Zegardło B., *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu*, *Przegląd budowlany* 2011, nr 7-8, s. 50–55.
- [9] *Beton według normy PN-EN 206:2014*, Góraźdże.
- [10] PN-EN 60584-1:2014-04 *Termoelementy. Część 1: Specyfikacje i tolerancje EMF*.
- [11] PN-EN 206+A1:2016-12 *Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*.