



mgr inż. Bartosz Zegardło

**Zastosowanie odpadów ceramiki sanitarnej  
jako kruszywa do betonów specjalnych**

AUTOREFERAT  
dysertacji doktorskiej

PROMOTOR:  
dr hab. inż. Anna Halicka, prof. PL

Siedlce-Lublin 2012

## **1. Geneza i cel pracy**

Jednym z głównych problemów współczesnego świata jest globalny problem gospodarki odpadami. Szczególnie trudnym zagadnieniem jest utylizacja odpadów, które w sposób długotrwały nie ulegają biodegradacji. Zalicza się do nich odpady produktów ceramicznych. Ich rozkład w środowisku naturalnym szacuje się na około cztery tysiące lat. Odpady poprodukcyjne przemysłu ceramicznego stanowią w Europie 3 do 7% produkcji, co oznacza, że miliony ton wypalanych glin pojawiają się rocznie na wysypiskach [67].

Jednym z naturalnych kierunków utylizacji przemysłowych odpadów nieorganicznych, jakimi są odpady ceramiki sanitarnej, jest wykorzystanie ich do wytworzenia materiałów budowlanych, w szczególności zastosowania ich jako składnika betonów. Prowadzi to do projektowania ekologicznych tzw. „zielonych betonów” (*Green Concrete*). Recykling taki w sposób podwójnie korzystny wpływa na środowisko: zmniejsza ilość deponowanych odpadów oraz obniża wydobycie kruszyw ze złóż naturalnych. Poszukiwanie alternatywnych kruszyw bazujących na odpadach przemysłowych jest więc nie tylko zgodne z trendami ekonomii ale również jest uzasadnione ekologicznie.

Odpady ceramiczne mają tę dodatkową zaletę, że wykorzystywane jako kruszywo nie muszą być w sposób szczególny przetwarzane. Również proces technologiczny wytworzenia mieszanki betonowej nie wymaga żadnych zmian w stosunku do betonów z kruszywem tradycyjnym.

Autor zetknął się z hałdami tzw. stłuczki sanitarnej zalegających w pobliżu zakładu produkcyjnego oraz lokalnymi próbami ich zagospodarowania. Postanowił podjąć próbę opracowania metody wykorzystania stłuczki sanitarnej jako kruszywa do betonu.

Jednak uzyskanie kruszywa ze stłuczki sanitarnej nie jest tanie ze względu na koszt przekruszenia i dlatego autor założył, że znajdzie ona zastosowanie nie w betonach zwykłych, ale w betonach specjalnych, wykorzystujących specjalne cechy uzyskanego kruszywa.

## **2. Problem badawczy**

Za podstawowy problem badawczy podjęty w pracy uznano:

1. Opracowanie metody wykorzystania odpadów ceramiki sanitarnej jako kruszywa do betonu,
2. Zbadanie uzyskanego betonu pod względem parametrów wytrzymałościowych i innych cech użytkowych,

3. Opracowanie propozycji zastosowania betonu z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej w sposób wykorzystujący jego specyficzne właściwości.

### **3. Zakres pracy**

Praca niniejsza składa się z trzech głównych części. Część pierwszą stanowią studia literatury dotyczące następujących zagadnień:

- ceramiki sanitarnej, a w szczególności sposobu jej wytwarzania, składu chemicznego, cech mechanicznych,
- dotychczasowych prób wykorzystania odpadów ceramiki sanitarnej,
- betonów specjalnych, w szczególności betonów trudnościeralnych oraz betonów żaroodpornych,
- zjawiska akumulacyjności cieplnej.

Część drugą stanowi opis przeprowadzonych badań i eksperymentów, mających na celu rozwiązanie problemu badawczego, osiągnięcie postawionego celu oraz analiza ich wyników.

W zakres wykonanych przed autorem badań i analiz weszły:

- badania cech kruszywa uzyskanego ze stłuczki sanitarnej,
- projekt składu betonu z kruszywem ze stłuczki sanitarnej,
- badania betonu na kruszywie ceramicznym: wytrzymałości, odporności na ścieranie, odporności na wysokie temperatury, zdolności akumulacji ciepła.

Trzecia część pracy zawiera propozycje praktycznych zastosowań betonów sporządzanych z użyciem kruszyw ze stłuczki sanitarnej.

### **4. Charakterystyka odpadów przemysłu ceramiki sanitarnej i dotychczasowe próby jej wykorzystania**

Słowo *ceramika* pochodzi od greckiego *keramos* (*glina*) i pojęciem tym określa się wszystkie wyroby, które powstają z gliny.

Ceramika sanitarna [25,71] pojawiła się po raz pierwszy w końcu XVIII wieku w Anglii. Materiałem do jej produkcji był aż do połowy XX wieku fajans. Współcześnie stosowane jest kilka rodzajów mas ceramicznych. Ich różnorodne składy oraz zróżnicowane procesy produkcyjne wpływają na znaczne różnice we właściwościach otrzymywanych produktów. Zarówno zawartości procentowe poszczególnych składników jak i parametry technologiczne, np. temperatura wypalania, wpływają na różnice we właściwościach zarówno chemicznych jak i fizycznych.

Zagadnienie wykorzystania odpadów ceramiki sanitarno-technicznej jako kruszywa do betonów pojawia się w nielicznych publikacjach obcojęzycznych. Dotyczą one różnej ceramiki, często wyrobów ceramicznych o skrajnie różnych parametrach wytrzymałościowych i fizyko-chemicznych: od ceramiki czerwonej – cegieł, dachówek, przez ceramiczne płytki ściennie i podłogowe do ceramiki sanitarnej (stłuczka sanitarna) i sanitarno-technicznej (ceramiczne izolatory elektryczne).

We wszystkich analizowanych pracach stwierdzono możliwość użycia odpadów ceramicznych jako kruszywa do betonu, ale ze względu na różniące się cechy takich kruszyw również cechy wytworzonych na ich bazie betonów są różne.

Analiza dostępnych wyników badań betonów, komponowanych z udziałem kruszywa wytworzonego z odpadów ceramiki sanitarno-technicznej (ceramika sanitarna, ceramiczne izolatory elektryczne) potwierdza korzystny wpływ tego typu kruszywa na wytrzymałość betonu. Parametry wytrzymałościowe takiego betonu są zbliżone lub nawet przewyższają parametry betonów na kruszywach tradycyjnych, a jako jedną z korzyści wynikających z zastosowania do betonu dodatku kruszywa z ceramiki sanitarnej autorzy wymieniają wzrost odporności betonu na ścieranie [2,24,45,66,67].

### **5. Badania kruszywa uzyskanego ze stłuczki sanitarnej**

Kruszywo użyte w badaniach własnych zostało przygotowane na bazie poprodukcyjnych odpadów ceramiki sanitarnej, zalegających na hałdach jednego z polskich producentów ceramiki sanitarnej (rys.1).



*Rys. 1 Przygotowany do rozdrobnienia fragment uszkodzonej umywalki*

Do przygotowania kruszywa zastosowano kruszarki szczękowe, pozwalające na wyodrębnienie frakcji "drobnej"  $0 \div 4 \text{ mm}$ , która przechodziła przez sito o oczku  $4 \text{ mm}$  oraz frakcji "grubej"  $4 \div 8 \text{ mm}$  to jest ziaren, które pozostawały na sicie o oczku  $4 \text{ mm}$ , ale

przechodziły przez sito o oczku 8mm (rys.2). Kruszywo grubsze, które pozostawało na sicie 8 mm trafiło powtórnie do kruszarki.



Rys. 2 Kruszywo z ceramiki sanitarnej frakcji 4-8 mm

Tablica. 1 Porównanie cech kruszywa z ceramiki sanitarnej z cechami skal, z których otrzymuje się

Lp.	Cecha	Jednostka	Granit	Porfir	Diabaz	Bazalt	Piaszkowiec kwarcytowy	Wapień zbity	Dolomit	Kruszywo z ceramiki	
										literatura	badania własne
1	Gęstość właściwa	kg/dm <sup>3</sup>	2,3-2,8	2,6-2,5	2,8-2,9	2,6-3,2	2,6-2,7	2,6-2,9	2,4-2,8		2,64
2	Gęstość objętościowa	kg/dm <sup>3</sup>	2,1-2,7	2,3-2,4	2,6-2,8	2,5-3,1	2,4-2,6	2,5-2,8	2,2-2,6		2,36
3	Wytrzymałość na ścislenie	MPa	160-240	160-300	180-250	250-400	120-200	80-180	60-180	400-600	
4	Wytrzymałość na rozłupanie	MPa	7-14	8-16	9-18	10-20	7-11	4-10	4-10		
5	Moduł sprężystości	10 <sup>2</sup> MPa	130-610	360-680	700-900	560-990	40-430	210-530	180-480	400-700	
6	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	$\alpha \cdot 10^{-6}$	5-9	7-9	7-9	8-12	12-18	1-8	3-12	6-7	
7	Nasiąkliwość	%	0,2-0,5	0,2-0,7	0,1-0,3	0,1-0,4	0,2-0,5	0,3-1,5	0,3-2	0,75-5	1,53
8	Porowatość	%	do 1	do 3	do 5	do 3	do 5	do 3	do 4		
9	Ścieralność	-	0,1-0,3	0,1-0,6	0,3-0,7	0,1-0,2	0,3-1,5	0,2-2,0	0,3-1,4		
11	Charakter chemiczny		Kwaśny	Kwaśny	Zasadowy	Zasadowy	Zasadowy	Zasadowy	Zasadowy		
12	Stopień rozkruszenia	%	18	13	16	3,8	15	18-20	20		8,9

powszechnie stosowane kruszywa budowlane[30]

Zbadano gęstość właściwą i gęstość objętościową, nasiąkliwość i stopień rozkruszenia. Na podstawie badań własnych kruszywa oraz danych literaturowych dokonano porównania cech badanego kruszywa z cechami kruszyw używanych powszechnie w budownictwie (Tab.1). Na ich podstawie stwierdzić można, że właściwości kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej nie odbiegają od cech kruszyw stosowanych tradycyjnie do betonów i mogą być użyte jako takie kruszywo. Zwraca uwagę bardzo wysoka wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości, a także niski stopień rozkruszenia. Charakterystyczną cechą jest również stosunkowo wysoka nasiąkliwość zbliżona do nasiąkliwości wapienia i dolomitu.

## **6. Projektowanie składu betonu z kruszywem ceramicznym i badania mieszanki betonowej**

Ogólne założenia wyjściowe do projektowania betonu były, zgodnie z podstawowymi zasadami technologii betonu [30]:

Założenia szczegółowe, uwzględniające cel, jakim miało być uzyskanie betonu specjalnego, odpornego na działanie wysokich temperatur były następujące:

1. Użycie kruszywa z ceramiki – podyktowane wcześniej zbadanymi korzystnymi parametrami fizycznymi kruszywa oraz względami ekologicznymi (recykling odpadów),
2. Użycie cementu wysokoglinowego – ze względu na bliskość chemiczną z ceramiką (niska zawartość CaO) oraz odporność tego cementu na działanie wysokich temperatur,
3. Brak dodatków i domieszek, które nie są zalecane do stosowania w przypadku betonów pracujących w wysokich temperaturach.
4. Zwiększenie ilości wody związane z większą niż dla kruszyw tradycyjnych nasiąkliwością kruszywa.
5. Konieczność optymalizacji ilości zaczynu dla uzyskania szczelności mieszanki betonowej ze względu na to, że w badaniach pilotujących uzyskano beton porowaty.

Skład betonu zaprojektowano metodą obliczeniowo-doświadczną bazując na wzorach [14]. Po modyfikacji eksperymentalnej składu betonu uzyskano następujący skład mieszanki:

- kruszywo ceramiczne  $K = 1387,9 \text{ kg/m}^3$  (stosunek frakcji 0-4 mm do frakcji 4-8 mm równy 1:0,4, ustalony na podstawie optymalizacji eksperymentalnej),
- woda  $W = 201,4 \text{ kg/m}^3$ ,
- cement glinowy:  $C = 493,4 \text{ kg/m}^3$ ,
- wskaźnik  $C/W = 2,45$ .

Badania wytrzymałościowe próbek betonowych przeprowadzono przy użyciu prasy hydraulicznej ADWANTEST 9. Badano wytrzymałość próbek na zginanie według normy PN-EN 12390-5:2005 [97], a po złamaniu - na ściskanie według normy PN-EN 12390-3:2006 [95] Widok stanowiska badawczego z badaną próbką przedstawiono na rys. 3

Wyniki można streścić następująco:

- średnia wytrzymałość betonu na ściskanie (średnia z 6 próbek) - 90,54 MPa ,
- średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu (średnia z 3 próbek) - 9,56 MPa

Oznacza to, że beton na kruszywie ceramicznym miał bardzo wysokie wytrzymałości zarówno na rozciąganie jak i ściskanie, pozwalające na zakwalifikowanie go do betonów wysokowartościowych.



*Fot. 3 Badania wytrzymałościowe betonu na kruszywie ze stłuczki ceramicznej: a) badanie wytrzymałości na zginanie, b) badanie wytrzymałości na ściskanie*

## **7. Badania betonu na kruszywie ceramicznym w warunkach podwyższonych temperatur**

### **7.1 Rodzaje próbek i procedura wygrzewania**

Głównym celem badań była ocena zachowania się betonu sporządzonego przy użyciu kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej w warunkach wysokich temperatur. Zakładając stosowanie betonu do konstrukcji żaroodpornych, cykl wygrzewania opracowano z uwzględnieniem etapów wprowadzania betonu do wysokich temperatur [112].

Badania wykonano dwuetapowo.

Pierwszy etap (oznaczenie „1”) obejmował badania próbek betonu na cemencie glinowym (CA - *ceramic aggregate*) z kruszywem z ceramiki sanitarnej (HAC- *high alumina cement*) – 1– CA+HAC , próbek porównawczych na cemencie glinowym (HAC) i kruszywie

żwirowym (SGA - *sand and gravel aggregate*) – 1–SGA+HAC, oraz próbek betonowych na cemencie portlandzkim (PC – *portland cement*) i kruszywie żwirowym (SGA) 1–SGA+PC .  
Były to próbki prostopadłościowe o wymiarach 40 x 40 x 160 mm.

Tablica 2 Składy mieszanek betonowych użytych do badań i program badań

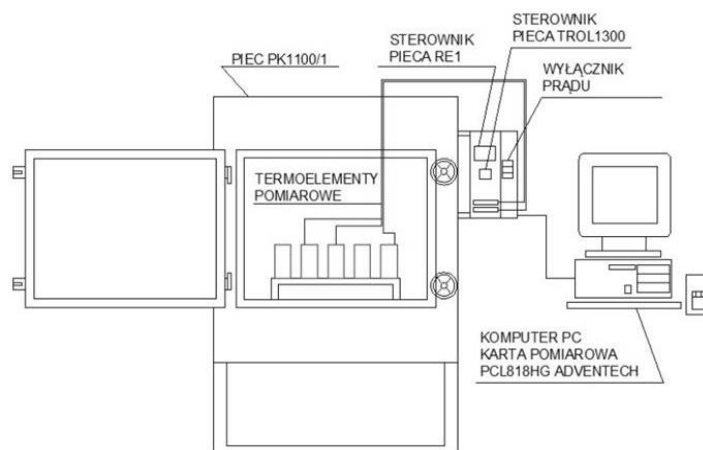
	Kruszywo	Cement	Wygrzewanie		Test Wytrzymałości	Ilość próbek
<b>ETAP PIERWSZY</b>						
1– CA+HAC	Ceramika sanitarna	Cement wysoko- glinowy	1–CA+HAC/1000°C/30-p	Wygrzewanie w 1000°C	30 dni po wygrzewaniu	3
			1–CA+HAC/30-p	Bez wygrzewania		3
1–SGA+HAC	Piasek i żwir	Cement wysoko- glinowy	1–CA+HAC/1000°C/30-p	Wygrzewanie w 1000°C	30 dni po wygrzewaniu	3
			1–SGA+HAC/30-p	Bez wygrzewania		3
1–SGA+PC	Piasek i żwir	Portlandzki cement	1– GA+PC/1000°C/30-p	Wygrzewanie w 1000°C	30 dni po wygrzewaniu	3
			1– GA+PC/30-p	Bez wygrzewania		3
<b>ETAP DRUGI</b>						
2–CA+HAC	Ceramika sanitarna	Cement wysoko- glinowy	2–CA+HAC/1000°C/0-p	Wygrzewanie w 1000°C	Zaraz po wygrzewaniu	-
			2–CA+HAC/1000°C/0-c			3
			2–CA+HAC/0-p	Bez wygrzewania		3
			2–CA+HAC/0-c		3	
2–CA+HAC/1000°C/21-p	Wygrzewanie w 1000°C	21 dni po wygrzewaniu	3			
2–CA+HAC/1000°C/21-c			-			
2–SGA+HAC	Piasek i żwir	Cement wysoko- glinowy	2–SGA+HAC/1000°C/0-p	Wygrzewanie w 1000°C	Zaraz po wygrzewaniu	-
			2–SGA+HAC/1000°C/0-c			3
			2–SGA+HAC/0-p	Bez wygrzewania		3
			2–SGA+HAC/0-c		3	
2–SGA+HAC/1000°C/21- p	Wygrzewanie w 1000°C	21 dni po wygrzewaniu	3			
2–SGA+HAC/1000°C/21- c			-			
2–GA+ HAC	Granit	Cement wysoko- glinowy	2–GA+HAC/1000°C/0-p	Wygrzewanie w 1000°C	Zaraz po wygrzewaniu	-
			2–GA+HAC/1000°C/0-c			3
			2–GA+HAC/0-p	Bez wygrzewania		3
			2–GA+HAC/0-c		3	
2–GA+HAC/1000°C/21-p	Wygrzewanie w 1000°C	21 dni po wygrzewaniu	3			
2–GA+HAC/1000°C/21-c			-			
p – próbki pryzmatyczne, c – próbki cylindryczne						

W etapie drugim badaniom poddano jedynie próbki betonowe na cemencie glinowym. Zastosowano trzy rodzaje kruszywa: mieszanka betonowa 2–SGA+HAC przygotowana została na bazie kruszywa tradycyjnego z odpowiednich frakcji piasku i żwiru (*sand and gravel*), mieszanka 2–GA+HAC przygotowana została na bazie rozfrakcjonowanego kruszywa



granitowego (*granite aggregate*), a mieszanka betonowa 2-CA+HAC z udziałem dwóch frakcji kruszywa na bazie rozdrobnionych odpadów ceramiki (*ceramic aggregate*). Oprócz próbek prostopadłościennych o wymiarach podanych wyżej (oznaczenie „p”), badaniom poddano próbki cylindryczne o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm (oznaczenie „c”). Rodzaje i ilości próbek zestawiono w tabelicy 3.

Próbki poddawano wygrzewaniu w średnotemperaturowym piecu komorowym typu PK1100/1. pokazano na rys.4



Rys.4 Widok pieca z przygotowanymi do wygrzewania próbkami

Program wygrzewania – wartości temperatur oraz szybkości ich przyrostu i obniżania opracowano indywidualnie dla każdego z etapów.

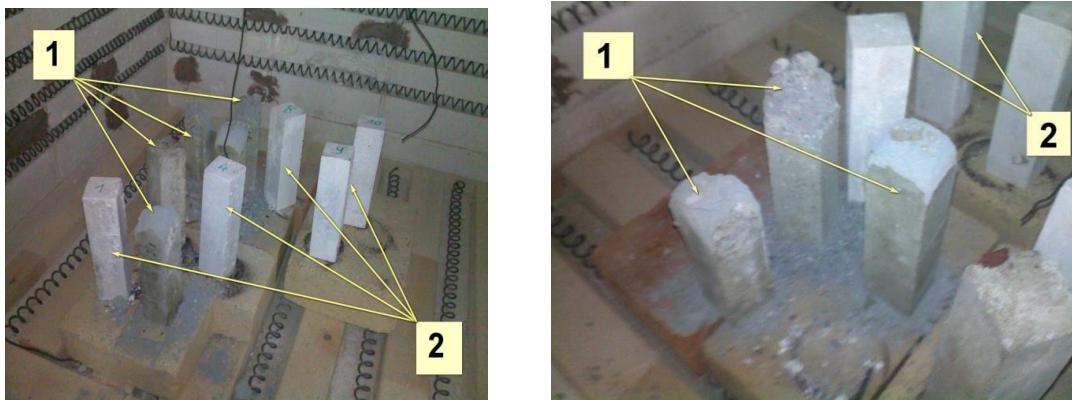
Ze względu na ograniczenia czasowe użycia pieca, pierwszy etap wygrzewania skrócono do 8 godzin. Cykl wygrzewania próbek w piecu składał się z następujących etapów: :

1. Dochodzenie do temperatury 150°C przez 2 godziny,
2. Utrzymanie temperatury 150°C przez 1 godzinę,
3. Dochodzenie do temperatury 550°C przez 2 godziny,
4. Utrzymanie temperatury 550°C przez 1 godzinę,

5. Dochodzenie do temp 1000°C przez 1,5 godziny.

6. Utrzymanie 1000°C przez 0,5 godziny.

Próbki po wygrzewaniu pozostały w zamkniętym piecu do jego całkowitego ostygnięcia. Po otwarciu pieca i usunięciu osłon bez dotykania próbek dokonano oględzin próbek, co dokumentowano fotograficznie Rys 5.



Rys 5 Próbki po wygrzewaniu po zdjęciu osłon: a) widok ogólny próbek w piecu, b) zniszczenia próbek z betonu na cemencie portlandzkim, 1 – próbki na cemencie portlandzkim, 2 – próbki na cemencie glinowym

W drugim etapie cykl wygrzewania próbek odbywał się według następującego schematu:

- I. Przygotowanie próbek: przetrzymywanie w temperaturze 13-20 °C przez 7 dni,
- II. Wprowadzenie do pracy w wysokich temperaturach
  1. dochodzenie do temp 110 ° C przez 5 godzin,
  2. suszenie w temperaturze 110 ° C przez 32 godziny,
  3. dochodzenie do temperatury 150 ° C przez 2 godziny,
  4. utrzymywanie temperatury 150 ° C przez 7 godzin,
  5. dochodzenie do temperatury 1000 ° C przez 10 godzin,
  6. przetrzymywanie w temperaturze 1000 ° C przez 4 godziny,
- III. studzenie do temperatury pokojowej razem z piecem,
- IV. Wygrzewanie właściwe – powtórzenie 5 razy następującego cyklu:
  1. dochodzenie do temperatury 150 ° C przez 10 godzin,
  2. utrzymywanie temperatury 150 ° C przez 7 godzin,
  3. dochodzenie do temperatury. 1000 ° C przez 10 godzin
  4. utrzymywanie w temperaturze 1000 ° C przez 4 godziny,
  5. Studzenie do temperatury pokojowej razem z piecem.

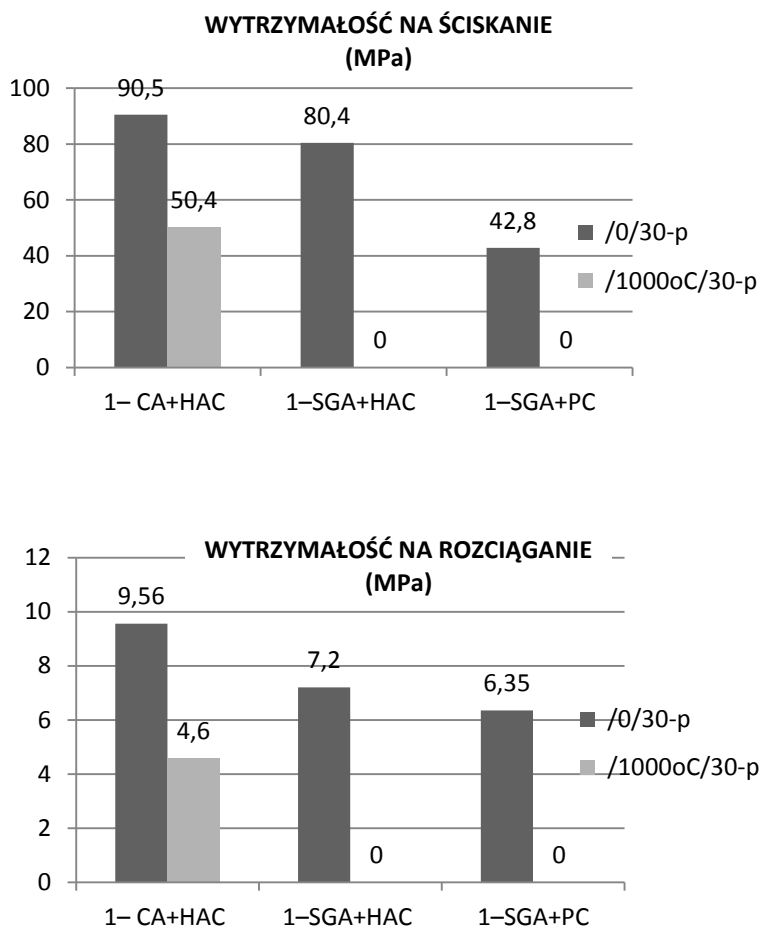
Widok próbek 30 dni od zakończenia wygrzewania drugiego etapu pokazano na Rys 6.



Rys. 6. Widok próbek po 30 dniach od zakończenia wygrzewania: a) widok ogólny, od lewej: próbka z kruszywem żwirowym, próbka z kruszywem granitowym, próbka z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej; b) zbliżenie na uszkodzenia próbki z kruszywem żwirowym

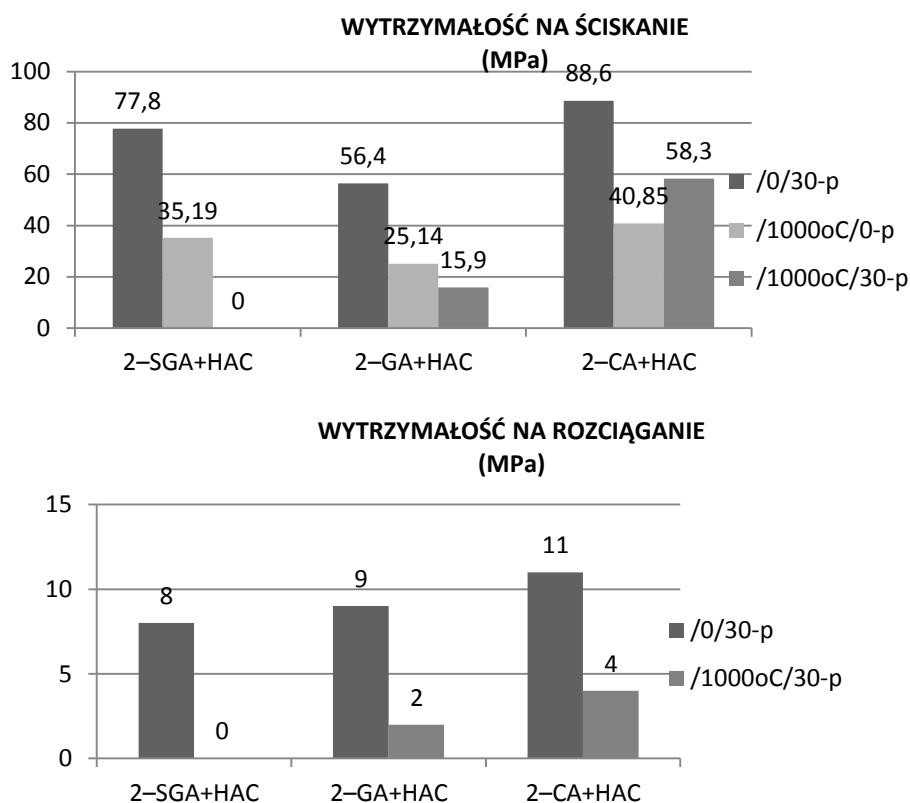
## 7.2 Wyniki badań wytrzymałościowych

Wyniki wytrzymałościowych badań betonów pierwszego etapu, zrealizowanych 30 dni od chwili wygrzewania przedstawiono na rys.7.



Rys.7 Wytrzymałość próbek pierwszego etapu badań: a) na ściskanie (próbki 40 x 40 x 40 mm), b) na rozciąganie (próbki 40 x 40 x 160 mm), opis oznaczeń podano w tablicy 3

Zestawienie wyników badań wytrzymałości betonów wygrzewanych w drugim etapie po 30 dniach od wygrzewania, przedstawiono w postaci wykresu rys.8.



Rys. 8 Wytrzymałość próbek drugiego etapie badań a) na ściskanie (próbki 40 x 40 x 40 mm), b) na rozciąganie (próbki 40 x 40 x 160 mm), opis oznaczeń podano w tablicy 3

Pełne zestawienie wyników badań wytrzymałościowych drugiego etapu podano w tablicy 3. Wyniki badań próbek cylindrycznych dla ujednolicenia systematyki wartościowania zostały tu sprowadzone do wyników badań na beleczkach.

Tab.3 Wyniki badań wytrzymałościowych etapu drugiego w odniesieniu do próbek kostkowych 40 x 40 x 40 mm

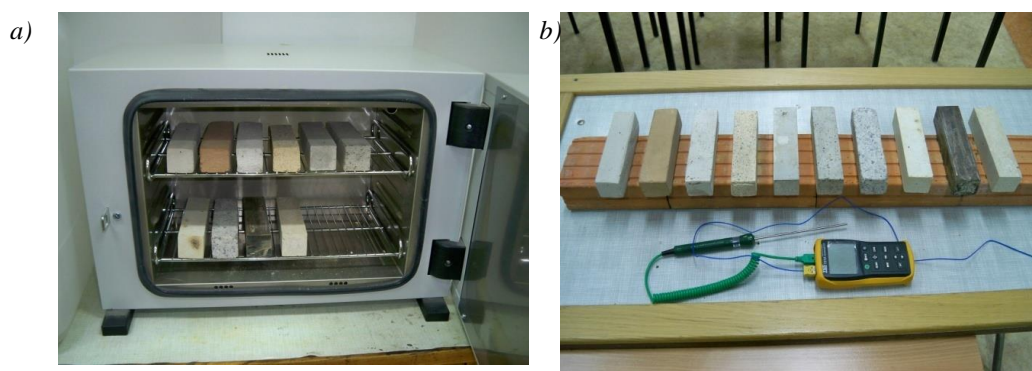
Lp	Seria	Próbki niewygrzewane /0/30-p		Bezpośrednio po wygrzewaniu /1000°C/0-c	30dni dni po wygrzewaniu /1000°C/30-p	
		ściskanie	rozciąganie	ściskanie	ściskanie	rozciąganie
1	2-SGA+HAC	77,8	8	35,19	0	0
2	2-GA+HAC	56,4	9	25,14	15,9	2
3	2-CA+HAC	88,6	11	40,85	58,3	4

Na podstawie zestawionych wyników badań drugiego etapu stwierdzić można, że:

- bezpośrednio po wygrzewaniu próbki betonu z kruszywem ceramicznym miały 46% wytrzymałości na ściskanie próbek niewygrzewanych, zaś w przypadku próbek z kruszywem granitowym było to 44%, a kruszywem żwirowym 45%,
- po 30 dniach od wygrzewania nastąpiła zmiana wytrzymałości – w przypadku próbek z kruszywem ceramicznym był to przyrost o 45% w stosunku do wytrzymałości badanej bezpośrednio powygrzewaniu, a w przypadku betonu na kruszywie granitowym spadek o 40%, a na kruszywie żwirowym 100%,
- wytrzymałości na ściskanie badane po 30 dniach od wygrzewania stanowiły w przypadku betonu na kruszywie ceramicznym 65% wytrzymałości betonu niewygrzewanego, zaś na kruszywie granitowym i żwirowym odpowiednio 26 i 0%,
- wytrzymałości na rozciąganie badane po 30 dniach od wygrzewania stanowiły w przypadku betonu na kruszywie ceramicznym 36% wytrzymałości betonu niewygrzewanego, zaś na kruszywie granitowym i żwirowym odpowiednio 20 i 0%.

#### **8. Badanie zdolności akumulacji ciepła przez beton na kruszywie ze stłuczki sanitarnej**

W celu zbadania zdolności akumulacji ciepła betonu sporządzonego na bazie kruszywa ze stłuczki ceramicznej, a przede wszystkim ustalenia szybkości emisji nagromadzonej w nim energii cieplnej w czasie stygnięcia, wykonano eksperyment własny [64].



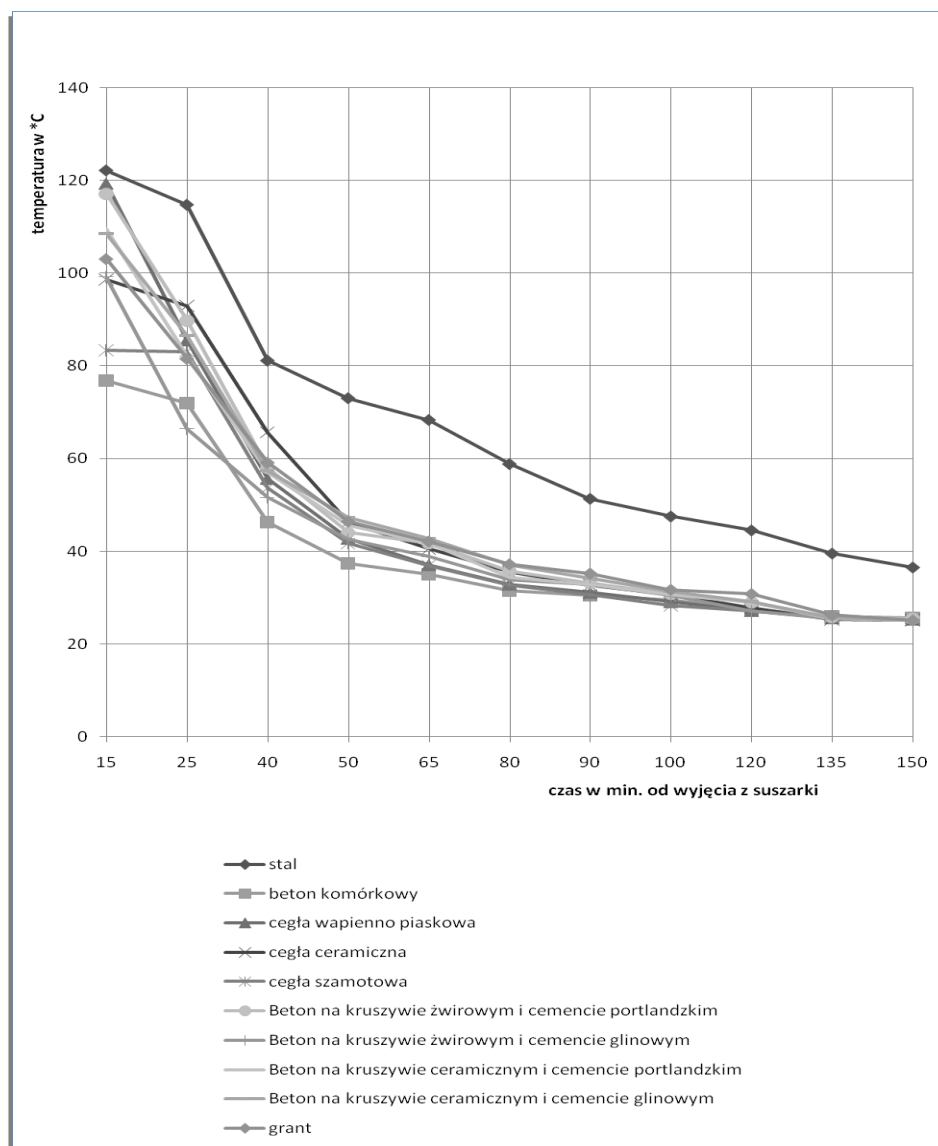
*Rys.9 Badania emisji ciepła*

*a) próbki w suszarce laboratoryjnej, b) stanowisko pomiaru temperatur*

Przygotowano dziesięć próbek o wymiarach  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm} (\pm 2 \text{ mm})$ , wykonanych z różnych materiałów budowlanych - oprócz próbek betonowych - próbki porównawcze dla prawidłowego przeanalizowania otrzymanych wyników. Wśród nich znalazły się: stal, beton komórkowy, cegła wapienno-piaskowa, cegła ceramiczna, cegła szamotowa, betony z kruszywem żwirowym (na cemencie portlandzkim i na cemencie glinowym) oraz betony

z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej (na cemencie portlandzkim i na cemencie glinowym). Próbki w większości przygotowano przez wycięcie z gotowych elementów budowlanych (bloczki, cegły, kostki brukowe). Próbki betonowe zaformowano w formach stalowych. Stanowisko badawcze i próbki przedstawiono na rys. 9.

Próbki umieszczono w suszarce laboratoryjnej, ustawiając jej maksymalną temperaturę pracy 230°C. Suszarka osiągnęła żądaną temperaturę po jednej godzinie i 15 minutach. W tej temperaturze próbki przebywały przez trzy godziny, po czym próbki z suszarki wyjęto i ułożono na podstawie ceramicznej. Temperaturę na powierzchni kolejnych próbek badano przy użyciu termometru elektronicznego przez przyłożenie czujnika do powierzchni próbki w połowie jej długości. Odczytane wartości przedstawiono w na rys.10 .

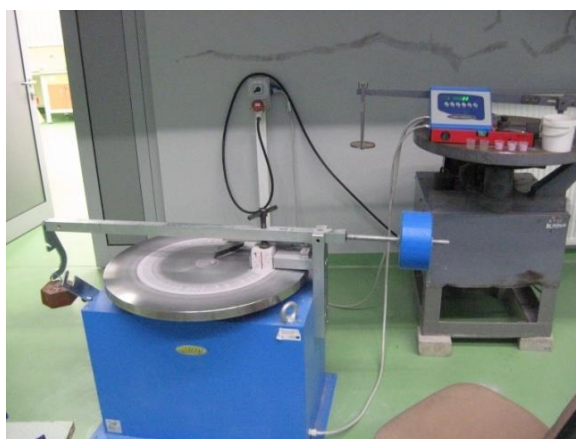


Rys.10 Wyniki badania emisji ciepła materiałów budowlanych – spadek temperatury w czasie ich stygnięcia

Na podstawie analizowanych parametrów stwierdzono beton sporządzony przy użyciu kruszywa z odpadów sanitarnych na cemencie glinowym, dzięki możliwości pracy w temperaturze do 1000 °C i wysokiej objętościowej pojemności cieplnej oraz wysokiej mocy cieplnej przy stygnięciu, można rekomendować do zastosowania jako efektywny akumulator ciepła.

### **9. Badanie ścieralności betonów na kruszywie ceramicznym**

Badanie ścieralności betonu sporządzonego na bazie odpadów ceramiki sanitarnej wykonano na podstawie normy PN-EN 14157:2005 [99].



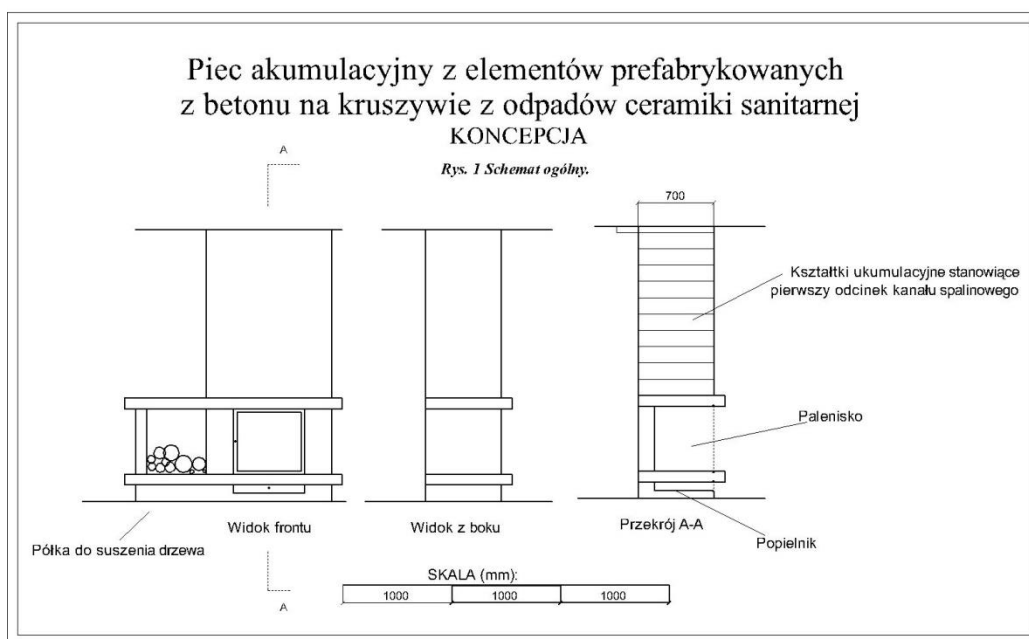
*Rys. 11 Stanowisko badania ścieralności betonu*

Wykonano badania dwóch betonów – na kruszywie ceramicznym i na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej. Stwierdzono, że odporność na ścieranie betonu z kruszywem z odpadów sanitarnych jest około 20% wyższa niż betonu sporządzonego na bazie kruszywa tradycyjnego.

### **10. Propozycje zastosowań betonu na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej**

Stwierdzone w badaniach cechy betonu sporządzonego na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej związane z odpornością na wysokie temperatury i zdolnością do akumulacji ciepła stanowią podstawę propozycji wykonywania z tego betonu prefabrykowanych kształtek do obudowy paleniska pieców czy kominków akumulacyjnych. Zastosowane uziarnienie kruszywa do 8 mm oraz zaprojektowany skład betonu, pozwalający na uzyskanie mieszanki urabialnej, daje możliwość formowania kształtek o niewielkich grubościach ścianek.

Koncepcja pieca, zawierającego elementy z betonu z kruszywem ceramicznym, zakłada uzyskanie efektu akumulacji ciepła (przez zastosowanie akumulatorów ciepła z betonu na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej) oraz efektu dopalania się spalin (przez podwyższenie temperatur występujących w palenisku oraz obniżenie prędkości ruchu gazów spalinowych). Schemat ogólny pieca pokazano na rysunkach 12.



Rys. 12 Schemat ogólny pieca akumulacyjnego z zastosowaniem kształtek akumulacyjnych z betonu na kruszywie ze stłuczki sanitarnej

## 11. Wnioski

Na podstawie studiów literaturowych oraz badań własnych można uznać tezy pracy postawione za udowodnione, a więc:

1. Odpady ceramiki sanitarnej mogą być wykorzystane do wytworzenia kruszywa do betonu. Takie kruszywo pozwala na komponowanie urabialnych mieszanek betonowych, które po stwardnieniu przekształcają się w beton o dobrych parametrach wytrzymałościowych.
2. Beton na kruszywie uzyskanym ze stłuczki sanitarnej charakteryzuje się niską ścieralnością, mniejszą niż betony na kruszywach tradycyjnych – żwirowych.
3. Zastosowanie kruszywa ze stłuczki sanitarnej ma korzystny wpływ na odporność betonu na wysokie temperatury. Odporność takiego betonu, wygrzewanego w temperaturze 1000°C, jest wyższa niż betonu na kruszywie tradycyjnym (żwirowym i granitowym). Można go zatem wykorzystywać jako beton pracujący w wysokich temperaturach.



4. Ze względu na wysoką objętościową pojemność cieplną oraz stosunkowo wysoką moc cieplną przy stygnięciu, beton na kruszywie uzyskanym z odpadów stłuczki sanitarnej może być wykorzystany do wytwarzania elementów akumulujących ciepło.

W przeciwieństwie do natrafionych w literaturze prób zastosowania stłuczki do betonu jako substytutu części kruszywa, w pracy niniejszej opracowano metodę wykorzystania jej jako jedyne kruszywa do betonu. Metoda ta obejmuje sposób wytworzenia kruszywa (przekruszenie w kruszarkach szczękowych i podział na frakcje 0÷4 mm oraz 4÷8 mm) oraz projekt składu urabialnej mieszanki betonowej.

Stwierdzone w przeprowadzonych badaniach specyficzne cechy odpadów ceramicznych oraz betonów z ich udziałem, stały się podstawą rekomendowania tych odpadów do wytworzenia betonów specjalnych – odpornych na działanie wysokich temperatur akumulujących ciepło oraz betonów trudnościeralnych.

Zastosowania stłuczki ceramicznej jako kruszywa do betonów specjalnych pozwala na uznanie takiego recydingu nie tylko za uzasadniony ekologicznie (zmniejszenie ilości odpadów ceramicznych na wysypiskach oraz zmniejszenie ilości kruszyw wydobywanych ze złóż naturalnych) ale również ekonomicznie (koszt uzyskania kruszywa będzie rekompensowany specyficznymi cechami betonu).

## **12. Propozycje dalszych kierunków badań**

Planuje się następujące kierunki dalszych prac badawczych:

1. Badania pozwalające na ustalenie zmian strukturalnych na granicy ziaren kruszywa ceramicznego i zaczynu cementowego zachodzących podczas wygrzewania (badania mikroskopowe i chemiczne)
2. Wykonanie prototypowego pieca akumulacyjnego z prefabrykowanymi kształtkami z betonu na odpadowym kruszywie ceramicznym:
  - a. sporządzenie projektu wykonawczego pieca,
  - b. wykonanie prototypowych kształtek prefabrykowanych,
  - c. wykonanie pieca oraz badanie jego efektywności;
3. Skomponowanie posadzkowej zaprawy trudnościeralnej
  - a. optymalizacji składu zaprawy,
  - b. badania uzyskanej zaprawy.

## Bibliografia

- [1] Alterman D.: *Metody diagnozowania betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych* Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa : (2003)
- [2] Andrés J., Medina C., Guerra M. I., Morán J., Aguado P., Sánchez de Rojas I., Frías M., Rodríguez O. : *Re-use of ceramic wastes in construction* Elsevier (2007)
- [3] Antoniewicz J.: *Własności dielektryków* Warszawa: Wydawnictwa Naukowo Techniczne (1971)
- [4] Awgustinik A.J. : *Ceramika*. Arkady, Warszawa
- [5] Bakinowska K.: *Podstawowe pomiary cieplne* Warszawa : Wydawnictwo Naukowo –Techniczne (1993)
- [6] Bieda W. Laurecka H. *Masy, betony i prefabrykaty ogniotrwale* Katowice : Wydawnictwo Śląsk, (1981)
- [7] Bieda W.: *Nowoczesne metody ceramiki przemysłowej*, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Kraków (1972)
- [8] Bieriensztejn P.I.: *Intensyfikacja obszyga izdzielij stroitielnoj kieramiki* Tiechniczeskija Informacija CnII Testrom ( 1968)
- [9] *Bochnak A., Buczkowski B.: Rzemiosło artystyczne w Polsce*, Arkady (1971)
- [10] Broniewski T, Fiertak M. *Chemia budowlana: materiały pomocnicze do wykładów* Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (1997)
- [11] *Calciners and Dryers in Mineral Industries*, U.S. Environmental Protection Agency, (1985)
- [12] Calka-Cybulska G.: *Zaprawa naprawcza do ochrony betonu w środowiskach agresywnych*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa (2005)
- [13] *Cementy*. Polski Cement (2006)
- [14] Czarnecki L.: *Chemia w budownictwie* Warszawa, Arkady (2010)
- [15] Czarnecki, L. Red. *Beton według normy PN-EN 206-1 : komentarz*, Polski Cement (2004)
- [16] De Brito J., Pereira A. S., Correia J. R.: *Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates*, Cement and Concrete Composites 27 (2005)
- [17] Dondelwski H., Januszewski A. *Betony cementowe: zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa (2008)
- [18] Dylla A. *Praktyczna fizyka ciepła budowli*: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz (2009)
- [19] Fiertak M., Dębska D., Stryzewska T.: *Chemia dla inżyniera budownictwa* Kraków Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki (2011)
- [20] Gajownik R.: *Termoizolacyjny beton*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa (1999)
- [21] Gibas T.: *Korund i jego zastosowanie w technice* Katowice : Wydawnictwo "Śląsk" (1971)
- [22] Górecka R.: *Teoria i technika eksperymentu* Kraków : Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (1995)
- [23] Grodzicka A.: *Odporność betonu wysokowartościowego na działanie mrozu* Warszawa Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej (2005)
- [24] Guerra I., Vivar I., Liams B., Juan A., Moran J.: *Eco-efficient concretes: The effect of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete*, Waste management 29 (2009)
- [25] Haase T. : *Keramik* Verlag fur Grundstoffindustire, Leipzig (1961)
- [26] Halicka A., Zegardło B.: *Analiza właściwości cieplnych betonu z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej* Budownictwo i Architektura 9 (2011)
- [27] Halicka A., Zegardło B.: *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu*, Przegląd Budowlany 7-8 (2011)
- [28] Halicka A., Zegardło B.: *Właściwości betonu z kruszywem uzyskanym z odpadów ceramiki sanitarnej*, Przegląd Budowlany 11 (2013)
- [29] Halliday D., Resnick J.: *Podstawy fizyki*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2011)
- [30] Jamróży Z. : *Beton i jego technologie* Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa (2006)
- [31] Jamróży Z.: *Betony specjalne konstrukcyjne : skrypt dla wyższych szkół technicznych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków (1988)
- [32] Kalinowski E. *Termodynamika* Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1994)
- [33] Karbowski A. *Beton w praktyce : definicje, wskazówki, komentarze* Polski Cement , Kraków ( 2003)
- [34] Kasprzycka-Guttman T.: *Elementy kalorymetrii statycznej i dynamicznej* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1993)
- [35] Kielski A. : *Ogólna technologia ceramiki*. Skrypty uczelniane Kraków (1970)
- [36] Kiernożycki W.: *Betonowe konstrukcje masywne : teoria, wymiarowanie, realizacja* , Polski Cement, Kraków (2003)
- [37] Kmiec A. *Procesy cieplne i ich aparaty*: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław ( 2005)

- [38] Kohutek Z. *Beton przyjazny środowisku* Kraków: Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce (2008)
- [39] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu : planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa (2006)
- [40] Koszałka L.: *Zbiór zadań i problemów z teorii identyfikacji, eksperymentu i rozpoznawania*: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (1991)
- [41] Kowecka E., Łosiowie M. I., Winogradow L.: *Polska porcelana*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich - Wydawnictwo, Wrocław (1975)
- [42] Kozakiewicz S. pod red.: *Słownik terminologiczny sztuk pięknych* Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1976)
- [43] Kucharczyk W., Mazurkiewicz A., Żurowski W.: *Nowoczesne materiały konstrukcyjne - wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom (2008)
- [44] Kurdowski W.: *Chemia cementu i betonu*, Polski Cement, Kraków (2010)
- [45] Lopez V., Llamas B., Juan A., Moran J.M., Guerra I.: *Eco-efficient Concretes: Impact of the Use of White Ceramic Powder on the Mechanical Properties of Concrete*, Biosystems Engineering 96 (2007)
- [46] Łukowski P.: *Domieszki chemiczne do zapraw i betonów*, Polski Cement, Kraków (1998)
- [47] Madejski J. *Teoria wymiany ciepła* Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin (1998)
- [48] Montgomery R. *Advanced Concrete Technology* Elsevier (2006)
- [49] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A.: *Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur*. Bezpieczeństwo i technika pożarowa, 1 (2012)
- [50] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A.: *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonów w konstrukcjach o wysokich wymaganiach w zakresie bezpieczeństwa pożarowego – Technika transportu Szynowego* 9 (2012)
- [51] Olszański S. *Termodynamika : laboratorium.*: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów (2011)
- [52] Pacheco-Torgal F., Jalali S.: *Reusing ceramic wastes in concrete*, Construction and Building Materials 24 (2010)
- [53] Pampuch R., Błazewicz S., Górny G.: *Materiały ceramiczne dla elektroniki.*: Wydawnictwa AGH, Kraków (1993)
- [54] Paprocki A. : *Betony komórkowe*, Arkady, Warszawa (1966)
- [55] Piasta J. i W.: *Rodzaje i znaczenie kruszywa w betonie*, XVII Konferencja Warsztat Pracy Projektanta konstrukcji Ustroń (2002)
- [56] Podolec P. *Fine fireclay – sposób na największą umywalkę*, Łazienka 12 (2008)
- [57] *Porcelana na dwa sposoby*. National Geographic Polska (2010)
- [58] Praca zbiorowa pod redakcją Korszniewicz W.: *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa (1991)
- [59] Pruziński Z.: *Beton i żelbet żaroodporny na cemencie portlandzkim*, Wydawnictwo PWN, Kraków (1954)
- [60] Przedziecki F. *Elektrotechnika i elektronika*, PWN, Warszawa (1982)
- [61] Richerson D.: *Modern Ceramic Engineering* (1992)
- [62] Roszak W., Kubiczek F.: *Betony z kruszyw lekkich*, Arkady, Warszawa (1989)
- [63] Rusin Z.: *Technologia betonów mrozoodpornych.*: Polski Cement, Kraków (2002)
- [64] Ryka W. : *Słownik petrograficzny*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa (1982)
- [65] Savage G.: *Porcelana i jej historia.*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa (1977)
- [66] Senthamarai R. M., Devadas Manoharan P.: *Concrete with ceramic waste aggregate* Cement and Concrete Composites 27 (2005)
- [67] Senthamarai RM., Devadas Manoharan P., Gobinath D.: *Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties*, Construction and Building Materials 25 (2011)
- [68] Shackelford F. *Ceramic and glass materials: structure, properties and processing*. Springer (2008)
- [69] Staszewski J.: *August III Sas*, Wrocław, Warszawa, Kraków - Ossolineum (1989)
- [70] Świtoński A.: *Struktura i wytrzymałość betonów wysokowartościowych*, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin (2004)
- [71] Szolginia W.: *Architektura*. Warszawa: Sigma NOT (1992)
- [72] *Sztuka świata, t.2* – Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2010
- [73] Szwabowski J.: *Technologia betonu samozagęszczalnego* Polski Cement, Kraków (2010)
- [74] Szymański E., Kołakowski J.: *Materiały budowlane z technologią betonu Cz. 1 i 2*, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej Białystok (1992)
- [75] Taler J.: *Teoria i praktyka identyfikacji procesów przepływu ciepła*. Wrocław : Zakład Narodowy im. Ossolińskich (1995)

- [76] Thorpe M., Edward T.: *A Dictionary of Applied Chemistry Volume I*. Longmans Green & Company, London (1890)
- [77] Tuszyńska L.: *Edukacja środowiskowa*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa (2005)
- [78] Umiński. T. , *Ekologia środowiska przyrody*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa (1995)
- [79] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach. Dz. U. z 2001 r. Nr 62, poz. 628
- [80] Waclawski M. *Zarys geologii i hydrogeologii* Kraków : Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej (2005)
- [81] Watson J.: *Elektronika* WKiŁ Warszawa (2006)
- [82] Węgrowski W., Przedziecka K.: *Szkło i ceramika* Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych Warszawa (1979)
- [83] Wiśniewski S. *Wymiana ciepła*. Warszawa : WNT (2009)
- [84] *Włochy północne*. Bielsko-Biała: Pascal sp. z o.o. (2008)
- [85] Zięba S.: *Historia myśli ekologicznej*, Wydawnictwo Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, Lublin (2004)
- [86] Zieliński K. *Podstawy technologii betonu* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań (2010)
- [87] Zieliński K. *Podstawy technologii betonów specjalnych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań (2009)
- [88] Ziółkowski A.: *Historia powszechna. Starożytność.*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2009)
- [89] PN-B-06714-40:1978 Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie wytrzymałości na miażdżenie
- [90] PN-EN-12350 -2:2002 Badanie konsystencji mieszanki betonowej. Metoda opadu stożka
- [91] PN-EN 1097-6 : 2011– Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 6: Oznaczenie gęstości ziaren i nasiąkliwości
- [92] PN-EN 1097-7:2001– Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 7: Oznaczenie gęstości wypełniacza – Metoda piknometryczna.
- [93] PN-EN 12390-1:2004 Badania betonu -- Część 1: Geometria próbek i form
- [94] PN-EN 12390-2:2006 Badania betonu -- Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [95] PN-EN 12390-3:2006 Badania betonu -- Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań
- [96] PN-EN 12390-4:2001 Badania betonu -- Część 4: Maszyny wytrzymałościowe
- [97] PN-EN 12390-5:2005 Badania betonu -- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań
- [98] PN-EN 12390-6:2000 Badania betonu -- Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań
- [99] PN-EN 14157:2005 - Oznaczanie odporności na ścieranie
- [100] PN-EN 196-1:2006 Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości
- [101] PN-EN 196-10:2008 Metody badania cementu -- Część 10: Oznaczanie w cemencie zawartości chromu (VI) rozpuszczalnego w wodzie
- [102] PN-EN 196-2:2006 Metody badania cementu -- Część 2: Analiza chemiczna cementu
- [103] PN-EN 196-3+A1:2011 Metody badania cementu -- Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości
- [104] PN-EN 196-5:2011 Metody badania cementu -- Część 5: Badanie pucolanowości cementów pucolanowych
- [105] PN-EN 196-6:2011 Metody badania cementu -- Część 6: Oznaczanie stopnia zmielenia
- [106] PN-EN 196-7:2009 Metody badania cementu -- Część 7: Metody pobierania i przygotowania próbek cementu
- [107] PN-EN 196-8:2010 Metody badania cementu -- Część 8: Ciepło hydratacji -- Metoda rozpuszczania
- [108] PN-EN 196-9:2010 Metody badania cementu -- Część 9: Ciepło hydratacji -- Metoda semiadiabatyczna
- [109] PN-EN 1992-3:2008 Eurokod 2 - Projektowanie konstrukcji betonowych [86]
- [110] *PN-EN 932-2 :2001* Badania podstawowych właściwości kruszyw. Metody pomniejszania próbek laboratoryjnych
- [111] PN-EN 933-1:2012 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania
- [112] PN-62/B-06257 Beton żaroodporny na cemencie portlandzkim lub hutniczym