

Analiza właściwości cieplnych betonu z kruszywem z odpadów ceramiki sanitarnej

Bartosz Zegardło¹, Anna Halicka²

¹ *Katedra Budownictwa, Wydział Nauk Technicznych, Collegium Mazovia, e-mail: bart.z@wp.pl*

² *Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: a.halicka@pollub.pl*

Streszczenie: Praca niniejsza stanowi kontynuację badań nad betonem wykonanym z użyciem kruszywa uzyskanego z odpadów ceramiki sanitarnej. Wcześniejsze badania dowiodły wysokiej wytrzymałości tego betonu i jego odporności na wysokie temperatury. Szukając optymalnych zastosowań takiego betonu dokonano badań i analiz jego zdolności do akumulacji cieplnej. W pracy zrelacjonowano eksperyment polegający na badaniu zachowania się, podczas studzenia, betonu na kruszywie ceramicznym na tle innych materiałów budowlanych. Na tej podstawie oraz wykonanych obliczeń oceniono jego zdolność do akumulacji cieplnej. Stwierdzono, że beton wykonany na bazie kruszywa z odpadów ceramiki sanitarnej można rekomendować jako materiał akumulujący ciepło.

Słowa kluczowe: akumulacja cieplna, beton żaroodporny, odpady ceramiki sanitarnej.

1. Wprowadzenie

1.1. Akumulacja cieplna

Akumulowanie ciepła oznacza zdolność materiału do gromadzenia i magazynowania w jego wnętrzu określonej porcji energii cieplnej, która następnie może być przez pewien okres czasu przez ten materiał oddawana. Szuka się więc sposobów gromadzenia ciepła wtedy, gdy jest jego nadmiar oraz wykorzystania, gdy występuje deficyt. Celem jest znalezienie optymalnych rozwiązań z punktu widzenia tzw. komfortu cieplnego, czyli uzyskania oraz utrzymania wewnątrz obiektów temperatur, niezbędnych do wygodnego funkcjonowania podczas niekorzystnych warunków zewnętrznych.

Przykładem może być tak zwana akumulacja sezonowa, polegająca na magazynowaniu energii cieplnej latem i wykorzystywaniu jej porą jesienno-zimową. Odwrotne procesy próbuje się wykorzystać do schładzania pomieszczeń w warunkach letnich. Innym przykładem, koncentrującym się na mniej globalnych i bardziej krótkotrwałych zjawiskach, są próby magazynowania dziennej energii ciepła słonecznego wykorzystywanej do ogrzewania w okresie chłodniejszych nocy. Wreszcie, zjawisko akumulacji cieplnej próbuje się wykorzystywać gromadząc nadmiar energii cieplnej powstającej wewnątrz paleniska kominka lub pieca, normalnie oddawanej ze spalinami przez komin i wykorzystanie jej do ogrzewania

po wygaszeniu paleniska. Przykładem są skandynawskie piece wykonane z naturalnego kamienia – steatytu (zbity minerał-talk o zielonoszarej barwie), który ma bardzo dobrą zdolność akumulacji cieplnej. W piecach tych dzięki zdolności akumulacyjnej steatytu oraz rozwiązaniom technicznym (kilkukrotny obieg i zawirowanie spalin) temperatura w palenisku osiąga około 1200°C (normalnie około 600°C), co umożliwia tzw. dopalanie spalin (spalanie sadz). Skutkuje to wysoką efektywnością pieca i ma pozytywny wpływ na środowisko.

1.2. Cel pracy

Tam, gdzie wykorzystuje się zjawisko akumulacji cieplnej często występują wysokie temperatury np. temperatury w piecach akumulacyjnych elektrycznych czy paleniskowych temperatury sięgają 400°C i więcej. Beton zwykły jako materiał do wykonywania obudów takich pieców wykorzystywany jest rzadko ze względu na niską odporność na takie temperatury (graniczną bezpieczną temperaturą jest 250°C [2]). Dlatego z reguły używa się tu znacznie bardziej odpornej na wysokie temperatury ceramiki, a w szczególności szamotu.

Celem niniejszej pracy jest próba odpowiedzi na pytanie, czy beton wykonany z użyciem kruszywa uzyskanego z odpadów ceramiki sanitarnej [3], który charakteryzuje się odpornością na działanie wysokich temperatur [4] ma również zdolność akumulowania ciepła. Pozwoliłoby to na stosowanie go nie tylko do wytwarzania elementów, w tym prefabrykatów, pracujących w podwyższonych temperaturach, ale także tam, gdzie takie elementy mogłyby akumulować i oddawać ciepło (np. obudowy palenisk i komików).

2. Przemiany cieplne i parametry opisujące zjawiska cieplne

2.1. Zasady przemian cieplnych

Aby sterować procesem akumulacji cieplnej, niezbędne jest zrozumienie istoty tego zjawiska i poznanie jego matematyczno-fizycznego modelu. W tym celu poniżej, na podstawie [1], zestawiono pojęcia i wielkości fizyczne opisujące zjawiska cieplne oraz zasady, na których opiera się kalorymetria tj nauka zajmującą się badaniem przemian cieplnych.

Zasady kalorymetrii można wyrazić w następujący sposób:

1. Ilość ciepła oddana przez ciało jest równa ilości ciepła pobranej przez otoczenie z tego ciała podczas jego stygnięcia.

2. Ilość ciepła pobrana przez ciało podczas jego ogrzewania jest równa ilości ciepła oddanego przez to ciało podczas jego stygnięcia (jeśli obie przemiany zachodzą w tym samym zakresie temperatur).

3. Ilość ciepła ΔQ pobrana przez ciało podczas jego ogrzewania lub oddana podczas jego stygnięcia jest proporcjonalna do iloczynu masy ciała m oraz różnicy temperatur tego ciała Δt przed i po przemianie cieplnej. Zasadę tą można zapisać w postaci:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta t, \quad [J] \quad (1)$$

Wielkość c , będąca w zależności (1) współczynnikiem proporcjonalności, nazywana jest ciepłem właściwym. W celu scharakteryzowania materiału pod względem ciepła właściwego podaną zależność przekształca się do postaci:

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta t} \quad [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (2)$$

Taka forma opisu ciepła właściwego pozwala sformułować uproszczoną, przytaczaną zwyczajowo definicję tej wielkości, która brzmi: ciepło właściwe jest to energia podnosząca (lub zmniejszająca) temperaturę ciała o jednostkowej masie o jednostkę temperatury.

2.2. Zdolność akumulacji cieplnej

Kolejną wielkością charakteryzującą materiały pod względem ich właściwości cieplnych jest objętościowa pojemność cieplna. Jej wartość b , oblicza się jako iloczyn ciepła właściwego c oraz gęstości materiału ρ , z którego wykonane jest ciało:

$$b = c \cdot \rho \quad [\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})] \quad (3)$$

Objętościowa pojemność cieplna jest więc ilością energii, jaką przyjmie podczas ogrzewania lub odda podczas studzenia 1 m^3 danego materiału, zmieniając swą temperaturę o jeden stopień. Inaczej, jest to energia podnosząca (lub zmniejszająca) temperaturę danego materiału o jednostkowej objętości o jednostkę temperatury.

W Tabeli 1 zestawiono liczbowe wartości ciepła właściwego, gęstości i objętościowej pojemności cieplnej różnych przykładowych materiałów, w tym materiałów budowlanych. Analizując zestawione tu dane stwierdzić można, że największą pojemnością cieplną nie charakteryzują się materiały o największej gęstości właściwej – objętościowa pojemność cieplna metali o gęstości $7\ 000 \div 9\ 000 \text{ kg}/\text{m}^3$ wynosi $1\ 500\ 000 \div 3\ 500\ 000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Na tym tle bardzo dobrymi zdolnościami akumulacyjnymi, przy małej gęstości, charakteryzuje się woda – jej objętościowa pojemność cieplna równa jest ok. $4\ 200\ 000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, a największą z zestawionych materiałów, przy jeszcze mniejszej gęstości ma benzen (ponad $15\ 000\ 000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$). Skały wylewne, wykorzystywane jako kruszywo w betonie, mają mniejszą objętościową pojemność cieplną niż metale (granit – ok. $1\ 800\ 000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$). Jeszcze mniejszą objętościową pojemnością cieplną charakteryzują się cegła i piasek – ok. $1\ 200\ 000 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$.

Objętościowa pojemność cieplna nie jest wystarczająca, aby opisać zdolność do akumulacji cieplnej. Dodatkowym parametrem, charakteryzującym efektywność zjawiska akumulacji materiału jest energia, jaką można zgromadzić w jednostce objętości danego materiału.

Odwołując się do wzorów (1) i (2), w których Δt jest różnicą pomiędzy temperaturą, do jakiej nagrzane zostało ciało, a temperaturą początkową (wyjściową) przed rozpoczęciem nagrzewania i zakładając, że temperaturą wyjściową jest temperatura pokojowa, a temperaturą końcową – maksymalna temperatura, do jakiej można wygrzać dany materiał, można obliczyć maksymalną energię, jaką można zgromadzić w jednostce objętości danego materiału b_{max} :

$$b_{max} = b \cdot \Delta t \quad [\text{J}/\text{m}^3] \quad (4)$$

Takie obliczenia wykonano dla różnych materiałów w Tabeli 2. Nietrudno zauważyć, że na ilość maksymalnej energii cieplnej zakumulowanej w jednostce objętości materiału w bardzo dużej mierze wpływa nie tylko jego objętościowa pojemność cieplna, ale także jego odporność na wysokie temperatury.

Tabela 1. Ciepło właściwe, gęstość i objętościowa pojemność cieplna różnych materiałów [1,5].
Table 1. Specific heat capacity, density and heat accumulation in various materials [1,5].

Lp.	Materiał	c [J/(kg·K)]	ρ [kg/m ³]	b [J/(m ³ ·K)]
1	benzen	17200	880	15 136 000
2	woda	4190	998	4 181 620
3	lód	2100	880	1 848 000
4	benzyna	2100	700	1 470 000
5	powietrze	1005	1,29	1 296
6	żelazo	449	7875	3 535 875
7	miedź	385	8933	3 439 205
8	mosiądz	377	8400	3 166 800
9	cynk	389	7130	2 773 570
10	glin	902	2720	2 453 440
11	beton	1130	2450	2 768 500
12	granit	670	2670	1 788 900
13	cegła	850	1400	1 190 000
14	piasek	800	1550	1 240 000
15	ceramika	880	2640	2 323 200
16	terrakota	920	2000	1 840 000
17	szkło	840	2500	2 100 000
18	styropian	1200	20	24 000

Tabela 2. Maksymalne ilości energii b_{max} możliwe do zmagazynowania w jednostce objętości danego materiału (t_p – temperatura wyjściowa, t_{max} – temperatura maksymalna).

Table 2. The maximum amount of energy possible to be stored in unit volume of the material (t_p – base temperature, t_{max} – maximum temperature).

Lp.	Materiał	b [J/(m ³ ·K)]	t_p	t_{max}	Δt	b_{max} [J/m ³]
1	Woda	4 181 620	20	100	80	334 529 600
2	Stal	3 535 875	20	1600	1580	5 586 682 500
3	Styropian	24 000	20	80	60	1 440 000
4	Granit	1 788 900	20	900	880	1 574 232 000
5	Cegła zwykła	1 190 000	20	380	360	428 400 000
6	Cegła szamotowa	1 190 000	20	1400	1380	1 642 200 000
7	Beton zwykły	2 768 500	20	250	230	636 755 000
8	Beton żaroodporny	2 768 500	20	1000	980	3 266 830 000

2.3. Emisja energii cieplnej podczas stygnięcia

Z rozważań przedstawionych powyżej wynika, że różne materiały budowlane mają różną zdolność do gromadzenia energii, której wartość stanowi o tym, czy dany materiał jest dobrym akumulatorem ciepła i czy może być jako taki użyty w systemach ogrzewania pomieszczeń. Kolejnym parametrem, decydującym o tym,

czy oddający ciepło materiał w sposób długotrwały będzie oddziaływał na temperaturę pomieszczenia, jest czas oddawania (emisji) zgromadzonej energii. Przy danej ilości zgromadzonej energii, czas jej emisji nie może być zbyt krótki (wtedy w jednostce czasu oddawane są zbyt duże ilości ciepła) ani zbyt długi (wtedy w jednostce czasu oddawane są zbyt małe ilości ciepła, niewystarczające np. do ogrzania pomieszczenia).

Opisem zależności cieplnych w czasie zajmuje się termodynamika. Określa ona wzajemne powiązania i przemiany różnych rodzajów energii ciepła i pracy. W opisach termodynamicznych [1] przestrzeń, w której zachodzi rozważany proces nazywa się układem termodynamicznym. Stan układu określa się przez podanie jego parametrów: temperatury, ciśnienia i objętości. Miarą stopnia uporządkowania układu jest entropia określająca kierunek przebiegu procesów spontanicznych. Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, jeżeli układ termodynamiczny przechodzi od jednego stanu równowagi do drugiego, bez udziału czynników zewnętrznych, to jego entropia zawsze rośnie. W układzie termodynamicznym (np. w izolowanym pomieszczeniu), w którym umieści się ciało o temperaturze wyższej niż temperatura pomieszczenia, entropia będzie dążyć do osiągnięcia maksymalnej wartości tj. stanu równowagi całego układu, czyli wyrównania temperatury w całym jego obszarze. Proces taki zawsze zachodzi spontanicznie i samorzutnie. Zjawisko przekazywania ciepła z ciała do układu nazywa się emisją energii cieplnej. Miarą emisji energii cieplnej jest moc cieplna P , którą określa zależność:

$$P = E/t \quad [J/s] \quad (5)$$

w której: E – emitowana energia, t – czas emisji.

Materiały akumulujące ciepło używane w praktycznych zastosowaniach powinny charakteryzować się względnie dużą mocą cieplną.

3. Objętościowa pojemność cieplna betonu

Obliczając (Tabela 2) w sposób szacunkowy objętościową pojemność cieplną betonu zwykłego, zakładając średnie wartości jego gęstości 2400 kg/m^3 i ciepła właściwego $840 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ uzyskuje się wartość $b = 2\,768\,500 \text{ J/(m}^3\cdot\text{K)}$. Przyjmując, że beton zwykły pracuje bez znacznej straty wytrzymałości w temperaturze do 250°C [1] ($\Delta t = 250^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 230^\circ\text{C}$), maksymalna energia cieplna zakumulowana w jednostce objętości wynosi jedynie $b_{max} = 636\,755\,000 \text{ J/m}^3$. W przypadku betonów odpornych na wysokie temperatury, przy takiej samej objętościowej pojemności cieplnej b można zakumulować znacznie więcej energii. Przyjmując jako graniczną temperaturę 1000°C otrzymuje się $\Delta t = 1000^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 980^\circ\text{C}$ oraz $b_{max} = 3\,266\,830\,000 \text{ J/m}^3$, co oznacza, że w betonach żaroodpornych można zakumulować około 5 razy więcej energii niż w betonach zwykłych.

Czynnikiem wpływającym na wartość objętościowej pojemności cieplnej betonów może być zastosowane kruszywo, bowiem pojemność ta dla betonu wynika z objętościowej pojemności cieplnej jego składników. Betony zawierające w swym składzie kruszywo o większej objętościowej pojemności cieplnej będą miały lepsze zdolności magazynowania energii cieplnej.

Poniżej wykonano dokładniejsze obliczenia dla konkretnych betonów, które były przedmiotem badań wcześniejszych [3,4] oraz opisanych w p. 4. Rozważono

beton zwykły na kruszywie tradycyjnym i beton na kruszywie wytworzonym z odpadów ceramiki sanitarnej. Betony te miały jednakowe składy procentowe: cement $C = 493,4 \text{ kg/m}^3$, kruszywo $K = 1387,9 \text{ kg/m}^3$ (w tym kruszywo frakcji $0 \div 4 \text{ mm} - 991,36 \text{ kg/m}^3$, frakcji $4 \div 8 \text{ mm} - 396,54 \text{ kg/m}^3$), woda $W = 201,4 \text{ kg/m}^3$. Wskaźnik w/c równy był $0,41$. W betonie na kruszywach tradycyjnych frakcje drobne stanowił piasek (ciepło właściwe $- 800 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, gęstość $- 1550 \text{ kg/m}^3$) natomiast kruszywo grube - żwir posiadający w swym składzie głównie ziarna granitu (ciepło właściwe $- 670 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, gęstość $- 2670 \text{ kg/m}^3$). Dla kruszywa z ceramiki sanitarnej niezależnie od frakcji (jednakowy składnik bazowy) przyjęto do obliczeń ciepło właściwe $- 880 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ na podstawie [5] i gęstość $- 2640 \text{ kg/m}^3$ (na podstawie badań własnych [3]). W tablicy 3 obliczono objętościowe pojemności cieplne składników betonów, a następnie objętościową pojemność cieplną betonu jako ich sumę przy uwzględnieniu ich udziałów w m^3 betonu. Z Tabeli 3 wynika, że objętościowa pojemność cieplna betonu na bazie kruszywa z ceramiki sanitarnej ($3\,378\,550 \text{ J/K}$) jest o około 22% większa od objętościowej pojemności cieplnej betonu na kruszywach tradycyjnych ($2\,768\,428 \text{ J/K}$). Biorąc pod uwagę dużo wyższy zakres temperatur, w których można stosować beton na kruszywie ceramicznym, maksymalna energia cieplna, którą można zgromadzić w jednostce objętości tego betonu ($b_{\max} = 3\,310\,978\,608 \text{ J}$) jest ponad 5 razy wyższa niż betonu na kruszywie tradycyjnym ($b_{\max} = 636\,738\,332 \text{ J}$).

Tabela 3. Obliczenie objętościowej pojemności cieplnej betonów na kruszywie tradycyjnym i kruszywie z ceramiki sanitarnej oraz maksymalnej energii, którą można w nich zakułować.

Table 3. Calculation of the concrete heat accumulation of two kind of concrete: concrete made using gravel aggregate and ceramic aggregate.

Składnik betonu		Beton zwykły			Beton na kruszywie z odpadów ceramiki sanitarnej	
		piasek	żwir	Zaczyn (c+w)	kruszywo ceramiczne	Zaczyn (c+w)
Ilość w 1 m^3 betonu g_i	[kg]	991,36	396,54	694,80	1 387,90	694,80
Gęstość ρ_i	[kg/m ³]	1 550,00	2 670,00	1 926,90	2 640,00	1 926,90
Udział w 1 m^3 betonu $v_i = g_i / \rho_i$	[m ³]	0,4909	0,1485	0,3606	0,6390	0,3606
Ciepło właściwe c_i	[J/(kg·K)]	800	670	2 726	880	2 726
Objętościowa pojemność cieplna 1 m^3 składnika $b_i = c_i \cdot \rho_i$	[J/(m ³ ·K)]	1 240 000	1 788 900	5 252 729	2 323 200	5 252 729
Objętościowa pojemność cieplna składnika zawartego w 1 m^3 betonu $b_i \cdot v_i$	[J/(K·m ³)]	608 721	265 682	1 894 025	1 484 525	1 894 025
Objętościowa pojemność cieplna betonu $b = \Sigma (b_i \cdot v_i)$	[J/(K·m ³)]		2 768 428		3 378 550	
Δt	[K]		230		980	
Maksymalna ilość energii gromadzonej w 1 m^3 $b_{\max} = (b_i \cdot v_i) \cdot \Delta t$	[J/m ³]		636 738 332		3 310 978 608	

4. Eksperyment własny – badania zachowania się nagranych materiałów w czasie stygnięcia

4.1. Przebieg badań

W celu zbadania, jak emitowana jest nagromadzona energia cieplna w czasie stygnięcia różnych materiałów wykorzystywanych w budownictwie, wykonano eksperyment własny. Przygotowano dziesięć próbek o wymiarach 4 x 4 x 16 cm ($\pm 0,2$ cm) z różnych materiałów budowlanych. Wśród nich znalazły się: stal, beton komórkowy, cegła wapienno-piaskowa, cegła ceramiczna, cegła szamotowa, cztery betony poddawane wcześniejszym badaniom [3,4] oraz granit. Badano 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 (błoczki, cegły, kostki brukowe). Próbki betonowe zaformowano w formach stalowych. Użyte w eksperymencie próbki wraz ze stanowiskiem badawczym przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Próbki użyte do badań: a) w suszarce laboratoryjnej, b) na stanowisku pomiaru temperatur.

Fig. 1. The specimens used in test: a) in the laboratory drier, b) in the place of temperature measurement.

Temperatura w pomieszczeniu wynosiła 25,4°C. Próbkę umieszczono w suszarce laboratoryjnej, ustawiając jej maksymalną temperaturę pracy 230°C. Suszarka osiągnęła żadaną 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 Tabeli 4. Wyniki zobrazowano też na Rys. 2.

Tabela 4. Wyniki pomiaru temperatur powierzchni materiałów podczas oddawania ciepła.
Table 4. Results of the measurement of the surface temperature of tested materials.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	122,2	76,8	119,4	98,6	83,4	117,2	99,1	109,6	108,6	103,1
25	114,8	71,9	85,6	92,9	83,1	89,8	66,4	82,2	86,6	81,6
40	81,2	46,3	55,7	65,6	53,6	58	51,6	57,1	57,4	59,2
50	73,1	37,4	42,8	46,3	41,7	44,1	42,6	45,6	47,3	46,5
65	68,4	35	37,1	40,6	36,9	41,7	38,8	41,8	42,9	42,2
80	58,9	31,5	32,9	35,5	32,7	35,8	33,8	34,3	37,1	37,3
90	51,4	30,4	31,1	32,7	30,6	33,2	32,8	32,9	34,2	35,3
100	47,6	29,4	29,1	30,6	28,4	30,8	30,4	30,6	31,4	31,8
120	44,6	27,5	27,2	27,8	27,2	29,1	27,1	28,9	29,3	30,9
135	39,6	26	25,6	25,3	25,6	25,8	25,4	25,4	25,7	26,3
150	36,6	25,6	25,3	25,1	25,3	25,5	25,1	25,1	25,2	25,2

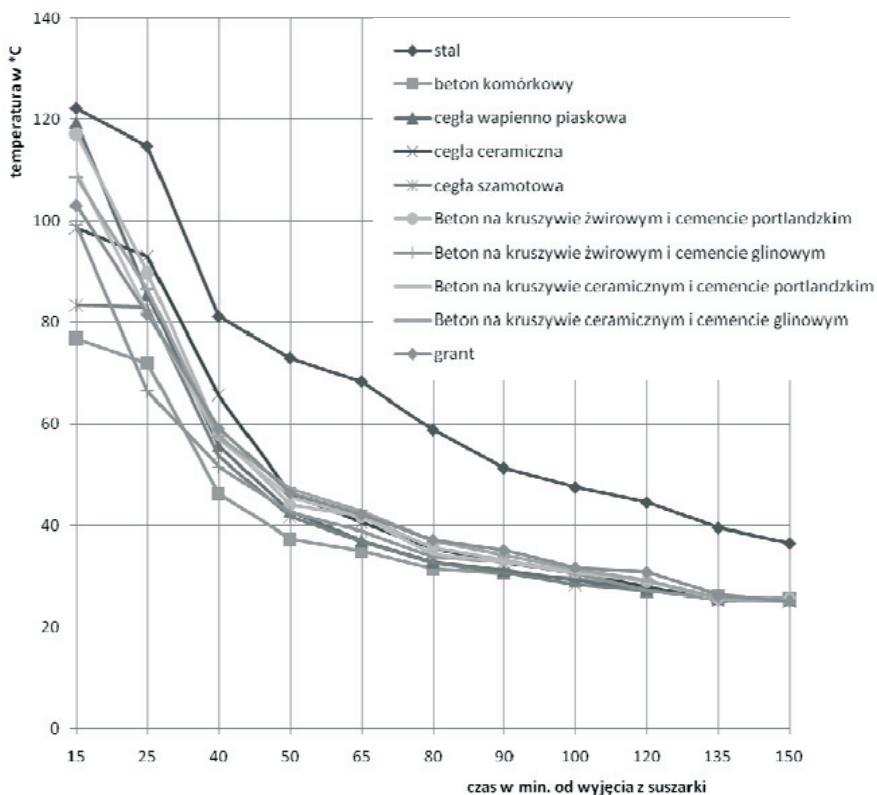
Objaśnienia kolumn Tabeli 4:

- 1 – Czas od chwili wyjęcia z suszarki, [min],
- 2 – Stal,
- 3 – Beton komórkowy,
- 4 – Cegła wapienno-piaskowa,
- 5 – Cegła ceramiczna,
- 6 – Cegła szamotowa,
- 7 – Beton na kruszywie żwirowym, na cemencie portlandzkim,
- 8 – Beton na kruszywie żwirowym, na cemencie glinowym,
- 9 – Beton na kruszywie ceramicznym, na cemencie portlandzkim,
- 10 – Beton na kruszywie ceramicznym, na cemencie glinowym,
- 11 – granit.

Próbki pomimo jednakowych rozmiarów oraz pozostawiania w jednakowych warunkach cieplnych po wyjęciu z suszarki miały różne temperatury. I tak po 15 minutach od zakończenia wygrzewania najwyższą temperaturę miała próbka ze stali (122,2°C), natomiast najniższą - próbka z betonu komórkowego (76,8°C).

Analiza spadków temperatur podczas dalszego stygnięcia potwierdza tę prawidłowość. Próbka stalowa pomimo tego, że po 15 minutach miała temperaturę bliską próbkom betonowym (stal – 122,2°C, beton tradycyjny – 117,2 °C), pozostawała najdłużej ciepła, a spadki temperatur w kolejnych przedziałach czasowych tej próbki były najniższe. Najszybciej stygła próbka z betonu komórkowego.

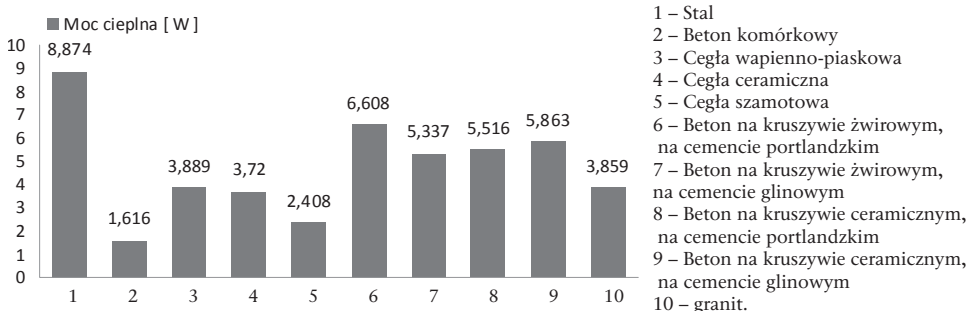
Analiza zachowania się pozostałych próbek wskazuje przewagę betonów (w tym betonów z kruszywem ceramicznym) nad ceramiką tradycyjną w aspekcie zagadnień akumulowania ciepła.



Rys. 2. Temperatury powierzchni badanych materiałów podczas oddawania ciepła.
 Fig. 2. The results of heat emission test - the temperature drop during the cooling of materials.

4.2. Moc cieplna próbek

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono moce cieplne poszczególnych próbek. Obliczenia wykonano w Tabeli 5, korzystając ze wzorów (1) i (5). Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie słupkowym: Rys 3. Analizując je zauważamy, że najwyższą mocą cieplną charakteryzuje się próbka stalowa (8,8 W), niższą – próbki betonowe (5,3÷6,6 W). Najniższą mocą cieplną charakteryzuje się próbka z betonu komórkowego (1,616 W) oraz cegły szamotowej (2,408 W).



Rys. 3. Wykres słupkowy obliczonych mocy cieplnych badanych materiałów.
 Fig. 3. Bar graph of the calculated heat capacity of various materials.

Tabela 5. Moce cieplne badanych próbek.
Table 5. Heat output of tested specimens.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m	[kg]	2,078	0,2515	0,465	0,536	0,439	0,574	0,5745	0,52	0,56	0,6655
c	[J/kg·K]	449	1130	800	850	850	1130	1130	1130	1130	670
Δt	[C]	85,6	51,2	94,1	73,5	58,1	91,7	74	84,5	83,4	77,9
E	[J]	79867	14551	35005	33487	21680	59478	48040	49652	52776	34734
t	[s]	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
P	[W=J/s]	8,874	1,616	3,889	3,720	2,408	6,608	5,337	5,516	5,863	3,859

Objaśnienia oznaczeń w wierszach w Tabeli 5:

m – masa próbki,

c – ciepło właściwe

Δt – różnica temperatur

$E = \Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta t$ – ilość wyemitowanej energii

t – czas emisji

$P = E/t$ – moc cieplna

Objaśnienia kolumn Tabeli 5:

1 – Stal,

2 – Beton komórkowy,

3 – Cegła wapienno-piaskowa,

4 – Cegła ceramiczna,

5 – Cegła szamotowa,

6 – Beton na kruszywie żwirowym, na cemencie portlandzkim,

7 – Beton na kruszywie żwirowym, na cemencie glinowym,

8 – Beton na kruszywie ceramicznym, na cemencie portlandzkim,

9 – Beton na kruszywie ceramicznym, na cemencie glinowym,

10 – granit.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Parametrami decydującymi o możliwości użycia materiału do akumulowania ciepła w zastosowaniach praktycznych są:

- objętościowa pojemność cieplna,
- ilość energii cieplnej, jaką jest w stanie przyjąć oraz zgromadzić materiał w jednostce swojej objętości,
- moc cieplna, opisująca zdolność materiału do oddawania zgromadzonej energii w określonym czasie.

2. Ważnym czynnikiem decydującym o zdolnościach akumulacyjnych materiału jest maksymalna temperatura, do jakiej można nagrzać materiał.

3. Beton sporządzony przy użyciu kruszywa z odpadów sanitarnych, dzięki możliwości pracy w temperaturze do 1000 °C ma zdolność go gromadzenia znacznych ilości energii (b_{max} wynosi ponad 3 000 MJ/m³). Wartość ta jest około 2 razy wyższa niż w przypadku ceramiki tradycyjnej i szamotu. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły również jego stosunkowo wysoką moc cieplną.

4. Wnioski 1÷3 pozwalają na stwierdzenie, że beton sporządzony przy użyciu kruszywa z odpadów sanitarnych efektywnie akumuluje ciepło. Przeprowadzone badania i analizy pokazały w tym aspekcie przewagę betonu sporządzonego przy użyciu kruszywa z odpadów sanitarnych nad ceramiką tradycyjną czy szamotem. Ich wyniki mogą być zatem punktem wyjścia do praktycznego zastosowania takiego betonu do obudowy pieców elektrycznych, czy obudowy wewnątrz kominków itp., zwłaszcza, że dodatkową jego zaletą jest łatwość formowania dowolnych kształtów i możliwość wbudowywania go w miejsce pracy bez konieczności wcześniejszego wypalania jak ma to miejsce w przypadku dotychczas stosowanej ceramiki.

Literatura

- [1] Kalinowski E., *Termodynamika*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [2] Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo naukowe PWN Warszawa 2006.
- [3] Halicka A., Zegardło B., *Odpady ceramiki sanitarnej jako kruszywo do betonu*, Przegląd Budowlany 7-8/2011.
- [4] Ogródnik 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 pożaricza, (przyjęty do druku).
- [5] Kucharczyk W., Mazurkiewicz A., Żurowski W., *Nowoczesne materiały konstrukcyjne - wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2008.

Analysis of thermal properties of concrete made using aggregate from sanitary ceramic wastes

Bartosz Zegardło¹, Anna Halicka²

¹ Collegium Mazovia, e-mail: bart.z@wp.pl

² Lublin University of Technology, e-mail: a.halicka@pollub.pl

Abstract: This paper is a continuation of research on concrete made using aggregates derived from sanitary ceramic wastes. Previous studies have shown that it is high strength concrete resistant to high temperatures. Looking for the optimal use of such concrete tests and analysis of its thermal accumulation were executed. The behavior during cooling of this concrete in comparison to other building materials was observed. The calculations of its thermal accumulation were made. It was found that concrete made on the basis of aggregate from waste sanitary ceramics can be recommended as a heat accumulating material.

Keywords: heat accumulators, heat-resistant concrete, ceramic sanitary waste.

