ACTA SCIENTIARUM POLONORUM *Architectura 10 (4) 2011, 33–41*

BETON ZWYKŁY JAKO MATERIAŁ DO AKUMULACJI CIEPŁA W BUDOWNICTWIE ENERGOOSZCZĘDNYM

Gabriela Rutkowska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Daniel Zaradkiewicz

Streszczenie. W artykule przedstawiono właściwości cieplne betonu zwykłego jako materiału akumulującego ciepło. Badania pojemności cieplnej oraz przewodności cieplnej przeprowadzono na betonach zwykłych różnych klas wytrzymałościowych i na betonie z dodatkiem uszczelniającym. Badania wykonano sondą TP01 w Centrum Wodnym. Analiza wyników, jakie otrzymano, wskazała, że przy wzroście współczynnika przewodności cieplnej wzrasta także objętościowa pojemność cieplna. Przy zbliżonych gęstościach betonu zwykłego zauważono, że im większa pojemność cieplna, tym mniejszą wartość ciepła właściwego posiadają betony zwykłe.

Słowa kluczowe: beton zwykły, pojemność cieplna, akumulacja cieplna

WSTĘP

Według danych statystycznych [Wnuk 2006], w polskich gospodarstwach domowych do ogrzewania wnętrz budynków zużywane jest średnio 71,5% energii. Wymagania, jakie zostały zawarte w znowelizowanym w listopadzie 2008 roku rozporządzeniu Ministra Infrastruktury do spraw warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, zostały zaostrzone. Obejmują one zaprojektowanie przegród zewnętrznych pod względem cieplno-wilgotnościowym w taki sposób, aby wyeliminowane zostało niebezpieczeństwo pojawienia się porażeń pleśniowych i zapewniona została właściwa izolacyjność cieplna [Stachowicz 2002]. Określono także, dla różnych przegród budowlanych, maksymalny współczynnik przenikania ciepła (U_{max}). Wprowadzenie ograniczenia w 2008 roku dla wartości U_{max} ma powiązanie z minimalizacją przenikania strat ciepła przez przegrody. Skutkuje to mniejszym zużyciem energii na ogrzewanie w projektowanych, nowych budynkach. W przepisach nie poruszono zagadnienia związanego z aku-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Gabriela Rutkowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Inżynierii Budowlanej, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: gabriela_rutkowska@sggw.pl

mulacją ciepła w tych budynkach. Dzięki właściwej pojemności cieplnej materiałów użytych do budowy bilans energetyczny może być zdecydowanie lepszy. Duża pojemność cieplna materiałów poprawia funkcjonalność budynków w okresach grzewczych oraz nie pozwala na przegrzewanie się pomieszczeń w okresach letnich. Jednym z priorytetów w budownictwie energooszczędnym jest stosowanie materiałów akumulujących ciepło. Jako przykłady takich materiałów podaje się cegłę pełną, beton i kamień.

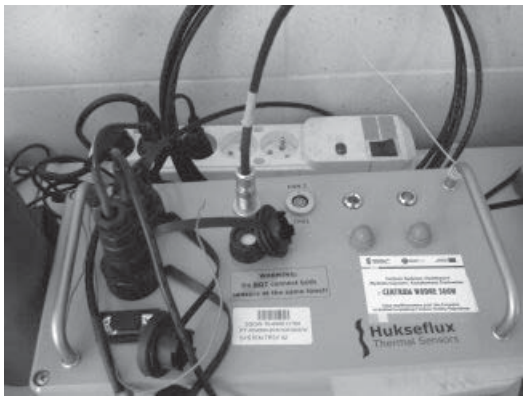
Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie właściwości termicznych badanych materiałów i przeanalizowanie relacji między przewodnością cieplną, pojemnością objętościową ciepła i gęstością objętościową danych próbek. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie ciepła właściwego badanych materiałów i ocenienie ich roli jako materiałów akumulujących ciepło w budownictwie energooszczędnym.

Badania pojemności cieplnej oraz przewodności cieplnej przeprowadzono na betonach zwykłych o dwóch różnych klasach wytrzymałościowych i betonie z dodatkiem uszczelniającym. Wykorzystano również żel agarowy oraz glicerynę do przetestowania działania sprzętu, porównując wartości badanego współczynnika między sobą oraz z wartościami λ, zgodnymi z literaturą fachową.

Beton zwykły to materiał wykonany z kruszywa, cementu oraz wody, którego gęstość objętościowa jest zawarta w przedziale $2000 \leq \rho_o \leq 2600$ kg·m^{-3}. Jego wytrzymałość na ściskanie wynosi od 15 do 60 MPa. By polepszyć właściwości mieszanki tego materiału, stosuje się domieszki chemiczne oraz dodatki mineralne [Stefańczyk 2009].

MATERIAŁ I METODYKA

Badania wykonano sondą TP01 (rys. 1) w laboratorium Centrum Wodnego. Jest to niestacjonarna sonda służąca przede wszystkim do długoterminowego monitorowania przewodnictwa cieplnego gleby, dyfuzyjności i pojemności cieplnej. Zakres λ, jaki mierzy ten sprzęt, mieści się w granicach od 0,3 do 4,0 W·(m·K)$^{-1}$. Dyfuzyjność jest oznaczona jako a [m^2·s^{-1}·10^{-6}]. Sonda może być stosowana na szeroką skalę. Technika jej wykorzystania polega na pomiarze temperatury w pewnym obszarze drutem grzewczym.



Rys. 1. Sonda TPO1
Fig. 1. TP01 sounder

W badaniach wykorzystano następujące próbki: beton C30/37 (z dodatkiem plastyfikatora 1%), beton C20/25, beton C20/25 (z dodatkiem uszczelniającym). Próbki pomierzono elektryczną suwmiarką w milimetrach), z dokładnością jednego miejsca po przecinku, oraz zważono trzy razy wagą (w gramach), z dokładnością do jednego miejsca po przecinku. Następnie obliczono objętość próbek (V_I, V_{II}) i gęstość (ρ_I, ρ_{II}). Uzyskane dwie gęstości tych samych materiałów uśredniono ($\overline{\rho}$).

Właściwości cieplne nie są związane z trwałością betonu, ale mają bardzo duży wpływ na jego zachowanie podczas różnych warunków eksploatacyjnych. Mają także duże znaczenie w planowaniach wykonania konstrukcji z masywnego betonu. Wielkości, które mają największe znaczenie, to przenikanie ciepła i ciepło właściwe.

Przenikanie ciepła (δ) jest to prędkość, przy jakiej następują zmiany temperatury w ośrodku materiału. Określa to wskaźnik informujący, jak beton znosi zmianę temperatury. Istnieje pewna zależność między przewodnością a przenikaniem ciepła:

$$\delta = \frac{K}{c\rho_o} \quad [m^2 \cdot h^{-1}] \tag{1}$$

gdzie: δ – przenikanie ciepła,
K – przewodność,
ρ_o – gęstość objętościowa,
c – ciepło właściwe.

Z tego wzoru wynika, że zmienność przenikania i przewodności cieplnej jest taka sama. Dla betonów zwykłych wartość przenikania ciepła mieści się w zakresie od 0,002 do 0,006 $m^2 \cdot h^{-1}$.

Ciepło właściwe (c) określa ilość ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania materiału o masie 1 kg, aby jego temperatura podniosła się o 1 stopień [°C, K]. Wyrażane jest w $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$. Jest zależne od zawartości wilgoci w betonie, a także od temperatury. Wraz ze wzrostem zarówno wilgoci, jak i temperatury pojemność cieplna betonu wzrasta. Mały wpływ na wartość ciepła właściwego ma charakter mineralogiczny kruszywa. Dla zwykłego betonu jego wartość powinna zawierać się w przedziale od 840 do 1179 $J \cdot (kg \cdot C)^{-1}$. Ciepło to charakteryzuje zdolność danego materiału do akumulowania ciepła podczas podgrzania. Można je obliczyć ze wzoru:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (t_1 - t_2)} \quad [J \cdot (kg \cdot K)^{-1}] \tag{2}$$

gdzie: c – ciepło właściwe,
Q – ilość ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania danej próbki od temperatury t_1 do t_2,
m – masa materiału.

Beton, wraz ze wzrostem ciepła właściwego (c), więcej ciepła może przechowywać po przerwaniu ogrzewania oraz magazynować w czasie grzania.

Pojemność cieplna jest to zdolność materiału do pochłaniania pewnej ilości ciepła (Q) podczas ogrzewania od temperatury t_1 do t_2 i kumulowania go później. Ilość ciepła wyraża się w dżulach i określa wzorem:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_1 - t_2) \ [\text{J}] \tag{3}$$

Pojemność cieplna (*C*) charakteryzuje stałość ciepła przegród budowlanych wykonanych z odpowiednich materiałów i wyrażana jest w J·(kg·K)$^{-1}$. Można też ją określić w sposób objętościowy z zależności:

$$C = c \cdot \rho \ [\text{J} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}]^{-1} \tag{4}$$

W takim przypadku *C* oznacza objętościową pojemność cieplną wyrażoną J·(m^3·K)$^{-1}$. Taka wielkość oznacza energię potrzebną do podwyższenia temperatury jednostki objętościowej materiału o 1 K [Neville 2000, Kostkowski 2006, Furmański i in. 2006, Kaleta 2009, Garbalińska i Bochenek 2011].

WYNIKI BADAŃ

Badania odbywały się w laboratorium budynku Centrum Wodnego Katedry Inżynierii Budowlanej SGGW w Warszawie. Temperatura panująca w pomieszczeniu wynosiła około 22°C.

W tabelach 1, 2 i 3 przedstawiono wyniki badań podstawowych wymiarów (długość, szerokość, wysokość) oraz masę każdej badanej próbki betonu. Otrzymane wyniki uśredniono. Następnie obliczono objętość próbek (V_I, V_{II}) i gęstość (ρ_I, ρ_{II}). Uzyskane dwie gęstości tych samych materiałów uśredniono $(\overline{\rho})$.

Tabela 1. Wymiary i masa betonów C30/37
Table 1. Dimensions and masses of the C30/37 concrete blocks

Nr miejsca No of place	Beton I				Beton II			
	długość [mm] length	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass	długość [mm] length	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass
1	149,7	150,2	74,5	3723,0	150,6	150,0	73,6	3717,3
2	149,6	150,3	74,3	3723,0	150,4	150,8	73,5	3717,3
3				3723,0				3717,3
Średnia Mean	149,7	150,2	74,4	3723,0	150,5	150,4	73,5	3717,3

$$V_I = \frac{149,7 \cdot 150,2 \cdot 74,4}{1000^3} = 0,0017 \text{ m}^3$$

$$\rho_I = \frac{m}{V} = \frac{3,723}{0,0017} = 2190,00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$V_{II} = \frac{150,5 \cdot 150,4 \cdot 73,5}{1000^3} = 0,0017 \text{ m}^3$$

$$\rho_{II} = \frac{m}{V} = \frac{3,7173}{0,0017} = 2186,6 \quad \text{kg·m}^{-3}$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_I + \rho_{II}}{2} = 2188,3 \quad \text{kg·m}^{-3}$$

Tabela 2. Wymiary i masa betonów C20/25
Table 2. Dimensions and masses of the C20/25 concrete blocks

Nr miejsce No of place	Beton I				Beton II			
	długość [mm] length	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass	długość [mm] lengt	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass
1	150,4	150,4	150,1	7789,3	150,3	150,1	149,8	7817,3
2				7789,3				7817,2
3				7789,2				7817,1
Średnia Mean	150,4	150,4	150,1	7789,3	150,3	150,1	149,8	7817,2

$$V_I = \frac{150,4 \cdot 150,4 \cdot 150,1}{1000^3} = 0,0034 \text{ m}^3$$

$$\rho_I = \frac{m}{V} = \frac{7,7893}{0,0034} = 2291,0 \quad \text{kg·m}^{-3}$$

$$V_{II} = \frac{150,3 \cdot 150,1 \cdot 149,8}{1000^3} = 0,0034 \text{ m}^3$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_I + \rho_{II}}{2} = 2295,1 \quad \text{kg·m}^{-3}$$

Tabela 3. Wymiary i masa betonów C20/25 z dodatkiem *x*
Table 3. Dimensions and masses of the C20/25 concrete blocks with addition *x*

Nr miejsca No of place	Beton I				Beton II			
	długość [mm] length	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass	długość [mm] length	szerokość [mm] width	wysokość [mm] height	masa [g] mass
1	150,7	150,1	149,9	7632,4	149,9	150,7	149,9	7633,9
2				7632,3				7633,8
3				7632,4				7633,9
Średnia Mean	150,7	150,1	149,9	7632,4	149,9	150,7	149,9	7633,9

$$V_I = \frac{150,7 \cdot 150,1 \cdot 149,9}{1000^3} = 0,0034 \text{ m}^3$$

$$\rho_I = \frac{m}{V} = \frac{7,6324}{0,0034} = 2244,8 \text{ kg·m}^{-3}$$

$$V_{II} = \frac{149,9 \cdot 150,7 \cdot 149,9}{1000^3} = 0,0034 \text{ m}^3$$

$$\rho_{II} = \frac{m}{V} = \frac{7,6339}{0,0034} = 2245,3 \text{ kg·m}^{-3}$$

$$\overline{\rho} = \frac{\rho_I + \rho_{II}}{2} = 2245,1 \text{ kg·m}^{-3}$$

Otrzymane wyniki gęstości objętościowej betonu C30/37, C20/25 oraz C20/25 z dodatkiem uszczelniającym są prawidłowe, bowiem zawieraja się w przedziale $2000 \leq \rho_o \leq 2600$ kg·m^{-3}.

Badania przeprowadzone Sondą TP01 na betonach klas: C30/37, C20/25 i C20/25 z dodatkiem *x*, pozwoliły na ocenę zależności pojemności cieplnej i przewodności od gęstości. Wyniki parametrów termicznych otrzymanych z kilku różnych miejsc na danych próbkach uśredniono i zapisano w formie tabelarycznej (tab. 4, 5 i 6).

Tabela 4. Wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej, gęstości objętościowej oraz ciepła właściwego dla betonu zwykłego C30/37

Table 4. Results of investigations of the coefficients of heat conductivity, volumetric heat capacity, volumetric mass density and specific heat for C30/37 normal concrete

Wyszczególnienie Specification	Numer próby Number of test	Współczynnik λ [W·(m·K)$^{-1}$] Coefficient λ	Pojemność cieplna (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Heat capacity (c·ρ)	Średnie λ [W·(m·K)$^{-1}$] Average λ	Średnie (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Average (c·ρ)	Gęstość [kg·m^{-3}] Mass density	Średnie ciepło właściwe (c) [J·(kg·K)$^{-1}$] Average specific heat (c)
Beton C30/37	1	1,572	2,954·10^6	1,593	3,010·10^6	2229,622	1350,0
	2	1,612	3,031·10^6				
	3	1,653	3,185·10^6				
	4	1,589	3,009·10^6				
	5	1,577	2,964·10^6				
	6	1,552	2,918·10^6				

Tabela 5. Wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej, gęstości objętościowej oraz ciepła właściwego dla betonu zwykłego C20/25
Table 5. Results of investigations of the coefficients of heat conductivity, volumetric heat capacity, volumetric mass density and specific heat for C20/25normal concrete

Wyszczególnienie Specification	Numer próby Number of test	Współczynnik λ [W·(m·K)$^{-1}$] Coefficient λ	Pojemność cieplna (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Heat capacity (c·ρ)	Średnie λ [W·(m·K)$^{-1}$] Average λ	Średnie (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Average (c·ρ)	Gęstość [kg·m^{-3}] Mass density	Średnie ciepło właściwe (c) [J·(kg·K)$^{-1}$] Average specific heat (c)
Beton C20/25	1	1,627	3,058·10^6	1,643	3,073·10^6	2303,942	1333,8
	2	1,604	3,014·10^6				
	3	1,674	3,117·10^6				
	4	1,761	3,248·10^6				
	5	1,593	2,994·10^6				
	6	1,599	3,006·10^6				

Tabela 6. Wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej, objętościowej pojemności cieplnej, gęstości objętościowej oraz ciepła właściwego dla betonu zwykłego C20/25 z dodatkiem x
Table 6. Results of investigations of the coefficients of heat conductivity, volumetric heat capacity, volumetric mass density and specific heat for C20/25 with addition x

Wyszczególnienie Specification	Numer próby Number of test	Współczynnik λ [W·(m·K)$^{-1}$] Coefficient λ	Pojemność cieplna (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Heat capacity (c·ρ)	Średnie λ [W·(m·K)$^{-1}$] Average λ	Średnie (c·ρ) [J·(m^3·K)$^{-1}$] Average (c·ρ)	Gęstość [kg·m^{-3}] Mass density	Średnie ciepło właściwe (c) [J·(kg·K)$^{-1}$] Average specific heat (c)
Beton C20/25 z dodatkiem x Beton C20/25 with addition x	1	1,501	2,822·10^6	1,576	2,952·10^6	2253,035	1310,23
	2	1,545	2,903·10^6				
	3	1,581	3,007·10^6				
	4	1,556	2,925·10^6				
	5	1,633	3,026·10^6				
	6	1,639	3,031·10^6				

PODSUMOWANIE

Analiza wyników, jakie otrzymano za pomocą sondy TP01, wskazała, że przy wzroście współczynnika przewodności cieplnej wzrasta także objętościowa pojemność cieplna. Przy zbliżonych gęstościach betonu zwykłego zauważono, że im większa pojemność cieplna, tym mniejszą wartość ciepła właściwego posiadają betony zwykłe.

Betony, które mają dużą ilość porów powietrza, osiągają pozytywne właściwości izolacji termicznej. Niestety przy dużych porach zmniejsza się akumulacyjność cieplna. Związane jest to z małą objętościową pojemnością cieplną powietrza. Najlepszy do budownictwa energooszczędnego jest taki materiał, który ma dużą możliwość przejmowania ciepła oraz może to ciepło przez długi czas magazynować i oddawać do pomieszczeń w okresach chłodnych. Beton zwykły jest dobrym akumulatorem ciepła i stosuje się go do budowy ścian wewnętrznych budynków. W budownictwie energooszczędnym zewnętrzne mury powinny spełniać warunki przenikania ciepła. Dlatego też stosuje się materiały o niskim współczynniku przewodności cieplnej (λ), jakim charakteryzują się na przykład betony komórkowe. Badania prowadzone na tych betonach dowiodły, że im mniejsza jest gęstość danych materiałów, tym mniejsza jest ich pojemność cieplna.

PIŚMIENNICTWO

Budownictwo ogólne, 2009. Tom I. Materiały i wyroby budowlane. Red. B. Stefańczyk. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.

Furmański P., Wiśniewski T.S., Banaszek J., 2006. Izolacje cieplne. Mechanizmy wymiany ciepła, właściwości cieplne i ich pomiary. Instytut Techniki Cieplnej – Politechnika Warszawska, Warszawa.

Garbalińska H., Bochenek M., 2011. Czasopismo techniczne – Izolacyjność termiczna a akumulacyjność cieplna wybranych materiałów ściennych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Kaleta A., 2009. Podstawy techniki cieplnej w inżynierii rolniczej. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Kostkowski E., 2006. Przepływ ciepła. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

Materiały budowlane. Podstawy technologii i metody badań, 2008. Red. J. Małolepszy. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.

Neville A.M., 2000. Właściwości betonu. Polski Cement Sp. z.o.o., Kraków.

PN-EN 12524:2003. Materiały i wyroby budowlane, właściwości cieplno-wilgotnościowe, tabelaryczne wartości obliczeniowe.

PN-EN 206-1:2003. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2004 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. nr 75, poz. 690, z późn. zm.

Stachowicz A., 2002. Budownictwo energooszczędne. Energodom, Kraków – Zakopane.

Wnuk R., 2006. Budowa domu pasywnego w praktyce. Opolgraf S.A., Warszawa.

Wnuk R., 2007. Instalacje w domu pasywnym i energooszczędnym. Opolgraf S.A., Warszawa.

REGULAR CONCRETE AS A MATERIAL USED TO ACCUMULATE HEAT IN THE ENERGY-SAVING BUILDING

Abstract. The paper presents the heat features of a normal concrete as a material able to accumulate heat. The investigations of heat capacity and conductivity were carried out on normal concretes of various classes of mechanical resistance and on a concrete with sealing additive. The investigations were carried out with the TP01 sounder in the Water Centre of

WULS. The analysis of the obtained results shows that the increase of heat conductivity coefficient evokes the increase of volumetric heat capacity. If the mass densities of a normal concrete are similar to each other, there can be noticed that the greater is the heat capacity, the smaller is the specific heat.

Key words: regular concrete, heat capacity, heat accumulation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 13.01.2012