

mgr inż. arch. Michał Gołębiewski<sup>1)</sup>  
dr inż. Barbara Pietruszka<sup>2)</sup>

# Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytów konopno-wapiennych wytworzonych metodą ubijania

*The coefficient of thermal conductivity of hemp-lime composites manufactured by tamping*

DOI: 10.15199/33.2019.08.09

**Streszczenie.** Kompozyt konopno-wapienny stosowany głównie jako materiał wypełniająco-izolacyjny charakteryzuje się niewielką wytrzymałością mechaniczną, małymi współczynnikami przewodzenia ciepła oraz oporu dyfuzyjnego i walorami ekologicznymi. Współczynnik przewodzenia ciepła kompozytu zawiera się w przedziale  $0,06 \div 0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , w zależności od jego odmiany, przy czym w przypadku typowej aplikacji na ściany jego wartość wynosi zazwyczaj  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

W artykule zaprezentowano wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła kompozytów o różnej gęstości będącej efektem różnego stopnia zagęszczenia mieszanki, a także zróżnicowanego składu spoiwa i różnej proporcji komponentów. Otrzymane wyniki są porównywalne z wynikami innych badań i potwierdzają dobrą izolacyjność cieplną tego materiału.

**Słowa kluczowe:** hempcrete; kompozyt konopno-wapienny; przewodność cieplna.

**Abstract.** The hemp-lime composite, used mainly as an filling and insulating material, is characterized by low mechanical strength, low thermal conductivity, low diffusion resistance coefficient and high ecological value. The thermal conductivity of the composite is in the range from about  $0,06$  to about  $0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  for its different variations, wherein its value of the composites for typical wall applications varies around  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

In this study, the results of thermal conductivity tests are presented of the composites with different densities resulting from varying degrees of compression of the mix, made with the use of differential composition of the binder and with different proportions of component. The obtained results are in the range of results from comparable studies and prove good properties of the material in the terms of its thermal insulation.

**Keywords:** hempcrete; hemp-lime composite; thermal conductivity.

Głównymi składnikami kompozytów konopno-wapiennych są: paździerz konopny (zdrewniałe cząstki łodygi konopi przemysłowych) oraz wapno hydratyzowane modyfikowane dodatkami. Materiał ten jest stosowany przede wszystkim jako wypełnienie ścian nośnych o szkielet konstrukcyjnym, izolacja podłóg, poddaszy, dachów i istniejących ścian nienośnych. Techniki wykonywania przegród pionowych obejmują: ubijanie mieszanki w dwustronnym szalunku lub natryskiwanie materiału na jednostronny szalunek oraz murowanie z bloczków i prefabrykację elementów ścian. Kompozyt konopno-wapienny zyskuje popularność przede wszystkim na ryn-

ku tzw. budownictwa naturalnego i przy renowacji obiektów zabytkowych, ale także w masowym budownictwie dzięki korzystnym właściwościom fizycznym i doskonałym walorom ekologicznym [4, 5].

Podstawową właściwością kompozytu konopno-wapiennego, określającą jego przydatność jako izolacji cieplnej, jest współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Celem badań było określenie współczynnika  $\lambda$  kompozytów wytworzonych metodą ubijania, o gęstości odpowiedniej do zastosowania przy wznoszeniu przegród pionowych, z uwzględnieniem różnic będących efektem różnego stopnia mechanicznej kompresji podczas formowania, a także wynikających z zastosowania różnych mieszanek (innych składników spoiwa i innych proporcji komponentów kompozytu).

Analiza literatury [1, 2, 3, 7, 9, 10, 11] wskazuje na istotny zakres zmienności współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$

(tabela 1) m.in. od gęstości [9, 10], będącej wynikową udziału poszczególnych komponentów w mieszance i stopnia jej kompresji (zależnej m.in. od techniki budowy). W [2] ustalono zależność w przypadku określonych proporcji mieszanki:

$$\lambda = 0,0002 \times \text{gęstość} + 0,0194 \text{ [W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$$

Większy udział paździerza w mieszance powoduje nieliniowy spadek współczynnika  $\lambda$  [8]. Badania [9] nie potwierdzają istotnego wpływu różnicy długości włóków na przewodność cieplną kompozytu, aczkolwiek występowanie zbyt długich włóków prowadzi do powstawania pustek mogących zwiększać jego przewodność. Istnieją też różne stanowiska dotyczące zależności przewodności cieplnej kompozytu od rodzaju zastosowanego spoiwa: w [7] wykazano taką zależność, a w [10] nie stwierdzono istotnej różnicy między kompozytami, w których zastosowano różne spoiwa, chociaż trend

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska; Wydział Architektury  
<sup>2)</sup> Instytut Techniki Budowlanej; Zakład Fizyki Ciepłej, Akustyki i Środowiska

\* Adres do korespondencji:  
m.w.golebiewski@gmail.com

**Tabela 1. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła kompozytów konopno-wapiennych prezentowane w literaturze**  
*Table 1. The values of the thermal conductivity coefficient of hemp-lime composites presented in the literature*

Źródło	Paździerz konopny	Spoivo	Proporcje P:S:W paździerz : spoivo : woda	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]	Uwagi
[11]	Chanvribat®	TRADICAL PF70®/Thermo	od 1 : 2,2 : 3 do 1 : 2,2 : 4	280 – 320	0,076 – 0,085	informacje producenta
[10]	produkcji francuskiej (prawdopodobnie Chanvribat)	70% CL <sup>1)</sup> ; 20% NHL3 <sup>2)</sup> ; 10% PC <sup>3)</sup>	2 : 1 : 3,1	627	0,138	kolejność dodawania składników: spoivo + woda, paździerz; czas mieszania 8 min.; próbki 1000 x 900 x 300 mm; warunki sezonowania przez 1 rok: temperatura 16°C ± 2°C, następnie 6 tygodni w warunkach laboratoryjnych. Badanie po 13,5 miesiąca
		100% CB <sup>4)</sup>	2 : 1 : 2,9	627	0,138	
		70% CL <sup>1)</sup> ; 30% GGBS <sup>5)</sup>	2 : 1 : 3,1	564	0,126	
		70% CL <sup>1)</sup> ; 30% GGBS <sup>5)</sup> ; 0,5% MC <sup>6)</sup>	2 : 1 : 3,1	569	0,129	
		80% CL, 20% Metakaolin	2 : 1 : 3,3	508	0,117	
		80% CL <sup>1)</sup> ; 20% Metakaolin; 0,5% MC <sup>5)</sup>	2 : 1 : 3,1	531	0,123	
[1]	paździerz o długości 2 [mm]	wapno hydrauliczne i wapno hydratyzowane w proporcjach 4 : 1	udział paździerza 20%	603	0,1406	próbki prostokątne o wymiarach ok. 290 x 290 x 40 lub 60 mm rozformowane po 4 dniach, sezonowane w komorze termostatycznej w temperaturze 50°C przez 6 dni pomiędzy 11 i 18 dniem
				611	0,1408	
			udział paździerza 30%	449	0,1033	
				415	0,0972	
	paździerz o długości 4 [mm]		udział paździerza 20%	605	0,1321	
				608	0,1366	
			udział paździerza 30%	475	0,1038	
				472	0,1079	
udział paździerza 40%	369	0,0947				
	377	0,0899				
[3]	BCB Chanvribat	100% CB	1 : 2,125 : 3,125	417	0,179	próbki wytworzone przez natryskiwanie (zmieszanie na wylocie) w ilości 0,2 kg/s z prędkością na wylocie 150 m/s, z odległości 0,5 – 3 m; próbki cylindryczne o średnicy 80 i wysokości 25 mm; badanie po 30 dniach
				475	0,421	
				496	0,542	
				551	0,485	

Objaśnienia: <sup>1)</sup> CL – wapno powietrzne, hydratyzowane; <sup>2)</sup> NHL3 – naturalne wapno hydrauliczne; <sup>3)</sup> PC – cement portlandzki; <sup>4)</sup> CB – spoivo producenta europejskiego (najprawdopodobniej Tradical PF70 lub zbliżone); <sup>5)</sup> GGBS – granulowany szlam wielkopiecowy (produkt uboczny wytwarzania żelaza i stali); <sup>6)</sup> MC – metyloceluloza

sugerował, że większa zawartość spoiw hydraulicznych może skutkować mniejszą przewodnością.

## Przygotowanie próbek

Do badań przygotowano trzy różne mieszanki (tabela 2), identyczne jak w przypadku wcześniejszego badania wytrzymałości na ścislenie [6]. Wszystkie zawierały paździerz konopny odmiany białobrzeszkiej wyprodukowany w woj. podlaskim. Do mieszanek T i TL użyto spoiva Tradical PF 70 o składzie ogólnym: 75% – wapno hydratyzowane, 15% – spoivo hydrauliczne, 10% – pulcolany oraz inne składniki w mniejszej ilości, natomiast do mieszanki B spoiw ogólnodostępnych w następujących proporcjach: 75% – wapno hydratyzowane, 15% – wapno hydrauliczne i 10% – cement CEM II/B-V 42,5 N. Zachowano proporcje składników wg [10]. Początkowa gęstość próbek T wynikała z charakteru technologii budowlanej:

**Tabela 2. Charakterystyka próbek przygotowanych do badania przewodności cieplnej (P : S : W – paździerz : spoivo : woda)**

*Table 2. Characteristics of samples prepared for the thermal conductivity test (P : S : W – hemp shiv : binder : water)*

Symbol próbki	Proporcje wagowe P:S:W	Spoivo	Gęstość zarobu [kg/m <sup>3</sup> ]
T750	1 : 2 : 2,9	100% Tradical PF 70	750
T650	1 : 2 : 2,9	100% Tradical PF 70	650
T550	1 : 2 : 2,9	100% Tradical PF 70	550
TL550	1 : 1,5 : 2,175	100% Tradical PF 70	550
B650	1 : 2 : 3,1	75% wapno hydratyzowane 15% wapno hydrauliczne 10% cement	650

ok. 750 kg/m<sup>3</sup>, to maksymalna gęstość, jaką można było uzyskać w procesie ręcznego zagęszczania, ok. 550 kg/m<sup>3</sup> mini-

malna gęstość pozwalająca zapewnić integralność próbki, natomiast 650 kg/m<sup>3</sup> – wartość pośrednia, najbardziej prawdopodobna przy wykonywaniu rzeczywistej przegrody w warunkach budowy.

Procedura wykonywania próbek obejmowała następujące etapy:

- mieszanie spoiva z wodą (2 – 3 min);
- dozowanie paździerza konopnego i dalsze mieszanie do ujednorodnienia mieszanki (5 – 6 min);
- uformowanie próbek prostokątnych o wymiarach 30 x 30 x 8 cm przez mechaniczne zagęszczenie mieszanki w formie z wodoodpornej sklejkowej metodą ubijania, za pomocą drewnianego ubijaka o wymiarach 7,5 x 7,5 cm i masie 1 kg oraz dodatkowe ręczne jej ugniatanie w celu dokładnego wypełnienia narożników formy;
- rozformowanie próbek po 1 – 2 h;
- sezonowanie próbek przez 28 dni w komorze klimatycznej o temperaturze 18 ± 2°C i wilgotności względnej

75% ± 10% oraz przez 72 dni w temperaturze 23 ± 2°C i wilgotności względnej 55 ± 10%.

### Metoda badania

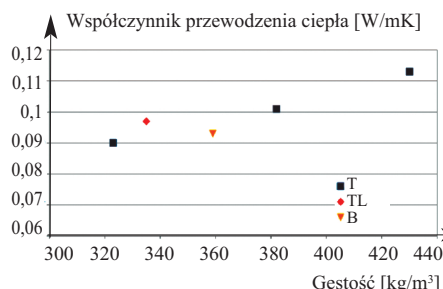
Badania współczynnika przewodzenia ciepła wykonano wg normy PN-EN 12664:2002 [8] na próbkach sezonowanych przez 90 dni od daty ich wytworzenia. Bezpośrednio przed badaniem próbki klimatyzowano do stałej masy w temperaturze 20°C i przy wilgotności względnej powietrza 0 – 90%. Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła λ przeprowadzono w warunkach ustalonego przepływu ciepła przy użyciu jednopróbkowego aparatu płytowego Fox 314 z czujnikami gęstości strumienia cieplnego, w zamkniętej komorze pomiarowej o ścianach izolowanych termicznie, w orientacji poziomej. Pomiar wykonano przy średniej temperaturze próbki 10°C, różnicy temperatury na grubości próbki 20°C i ruchu ciepła z dołu do góry. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia 22,2 ± 22,7°C. W przypadku każdego typu kompozytu badano trzy próbki i jako wynik podano wartość uśrednioną. Otrzymane współczynniki przewodzenia ciepła wyniosły 0,080 ± 0,123 W/(m·K).

### Wyniki badań

Badane kompozyty w stanie suchym charakteryzowały się gęstościami od 309 kg/m<sup>3</sup> w przypadku T550 do 410 kg/m<sup>3</sup> dla T750 i były niemal dwukrotnie lżejsze niż po uformowaniu na skutek odparowania znacznej ilości wody. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła kompozytów typu T (próbki klimatyzowane do stałej masy w temperaturze 20°C i 50% wilgotności względnej powietrza) zwiększa się wraz z gęstością materiału, a zależność ma charakter zbliżony do liniowego. Kompozyt typu B wykazał nieznacznie mniejszą, a kompozyt typu TL nieznacznie większą wartość współczynnika λ, ale różnice są bardzo niewielkie (rysunek). Wyniki uzyskane w badaniu (tabela 3) są zbliżone do wartości wg [1, 2, 3, 7, 9, 10, 11].

### Podsumowanie

Wyniki badań są zgodne z prezentowanymi w literaturze. Kompozyty konopno-wapienne charakteryzują się przeszło



### Wartości współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od gęstości kompozytu (próbki klimatyzowane do stałej masy w temperaturze 20°C i RH 50%)

The values of thermal conductivity coefficient depending on the density of the composite (samples conditioned to constant weight at 20°C and 50% RH)

Tabela 3. Wyniki badania współczynnika przewodzenia ciepła próbek kompozytu (próbki klimatyzowane do stałej masy w temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza RH 0 – 90%)

Table 3. Results of thermal conductivity coefficient tests of composite samples (samples conditioned to a constant mass at 20°C and relative humidity RH 0 – 90%)

Rodzaj próbki	Parametr RH [%]	Wartość			
		0	50	80	90
T750	gęstość [kg m <sup>-3</sup> ]	412	434	439	452
	przewodność cieplna [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,098	0,113	0,111	0,123
T650	gęstość [kg m <sup>-3</sup> ]	366	384	388	399
	przewodność cieplna [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,088	0,102	0,105	0,111
T550	gęstość [kg m <sup>-3</sup> ]	346	361	366	375
	przewodność cieplna [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,084	0,094	0,100	0,106
B650	gęstość [kg m <sup>-3</sup> ]	317	336	341	349
	przewodność cieplna [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,084	0,098	0,096	0,108
TL550	gęstość [kg m <sup>-3</sup> ]	309	324	328	335
	przewodność cieplna [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,080	0,091	0,096	0,101

dwukrotnie mniejszą izolacyjnością termiczną niż typowe materiały termoizolacyjne. Wyniki badania kompozytów na bazie paździerzia pochodzenia rodzimego potwierdziły ich dobrą izolacyjność cieplną i znaczny potencjał do wykorzystania tego surowca w budownictwie zrównoważonym. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ kompozytów o średniej gęstości, wytworzonych metodą ubijania, pozwalają na ich stosowanie do budowy monolitycznych, jednowarstwowych ścian zewnętrznych o grubości ok. 40 cm, spełniających obecne wymagania współczynnika przenikania ciepła przegrody zewnętrznej U<sub>cm</sub> w budownictwie mieszkaniowym.

### Literatura

[1] Benfratello Salvatore, Cinzia Capitano, Giorgia Peri, Gianfranco Rizzo, Gianluca Scaccianoce,

Giancarlo Sorrentino. 2013. „Thermal and structural properties of a hemplime biocomposite”. *Construction and Building Materials* 48: 745 – 754.

[2] Cerezo Veronique. 2005. „Proprietes mecaniques, thermiques et acoustiques d’un materiau a base de particules vegetales: approche experimentale et modelisation theorique”. Report. Ecole Nationale des Travaux Publics de l’Etat, L’Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[3] Elfordy S., F. Lucas, Franc Tancret, Y. Scudeller, L. Goudet. 2008. „Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete („hempcrete”) manufactured by a projection process”. *Construction and Building Materials* 22: 2116 – 2123.

[4] Gołębiwski Michał. 2016. „Kompozyty konopno-wapienne (hempcrete)”. *Materiały Budowlane* 527 (7): 91 – 94. DOI: 10.15199/33.2016.07.29.

[5] Gołębiwski Michał. 2017. „Rola kompozytów konopno-wapiennych w rozwoju zrównoważone-

go budownictwa”. *Materiały Budowlane* 540 (8): 197 – 199. DOI: 10.15199/332017.08.56.

[6] Gołębiwski Michał, Grzegorz Adamczewski. 2018. „Wytrzymałość na ściskanie kompozytów konopno-wapiennych wytworzonych metodą ubijania”. *Materiały Budowlane* 553 (9): 86 – 88. DOI: 10.15199/33.2018.09.24.

[7] Gourlay Etienne, Laurent Arnaud. 2010. *Comportement hygrothermique des murs de beton de chanvre*. Proceedings of the Actes ducongres SFT.

[8] PN-EN 12664:2001 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego – Suche i wilgotne wyroby o średnim i małym oporze cieplnym.

[9] Stevulova Nadezda, Lucia Kidalova, Josef Junak, Julia Cigasova, Eva Terpakova. 2012. „Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites”. *Procedia Engineering* 42: 496 – 500.

[10] Walker Rossane, Sara Pavia. 2014. „Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes”. *Construction and Building Materials* 64: 270 – 276.

[11] www.bcb-tradical.com (dostęp: 05.06.2015 r.).

Przyjęto do druku: 12.06.2019 r.