

mgr inż. Paweł Noszczyk^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2810-5165

dr inż. arch. Jerzy Łątka²⁾

ORCID: 0000-0003-1122-0933

mgr inż. arch. Agata Jasiołek²⁾

ORCID: 0000-0003-3368-7905

Termoizolacyjność materiałów pochodzenia celulozowego – tektura falista i plaster miodu

Thermal insulation of cellulosic materials – corrugated cardboard and honeycomb

DOI: 10.15199/33.2022.11.44

Streszczenie. W artykule opisano badania doświadczalne wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła materiałów pochodzenia celulozowego typu tektura falista i plaster miodu. Badania wykonano metodą stacjonarną w aparacie płytowym. Przeanalizowano wpływ wielkości pustek powietrznych oraz kierunku przepływu ciepła przez materiał na jego przewodność cieplną. Uzyskane wyniki wskazują na porównywalną termoizolacyjność do materiałów powszechnie stosowanych w budownictwie jako termoizolacje.

Słowa kluczowe: współczynnik przewodzenia ciepła; termoizolacja; plaster miodu; tektura falista; papier.

Abstract. The article describes the experimental tests to determine the thermal conductivity coefficient for materials of cellulosic origin, such as corrugated cardboard and honeycomb. The tests were performed using the stationary method in a plate apparatus. The influence of the size of the air voids and the direction of heat flow through the material on its thermal conductivity was analyzed. The obtained results indicate comparable thermal insulation to materials commonly used in construction as thermal insulation.

Keywords: thermal conductivity coefficient; thermal insulation; honeycomb; corrugated cardboard; paper.

Papier to materiał pochodzenia naturalnego. Jego głównym składnikiem jest włókno celulozowe, które jest najpopularniejszym naturalnym polimerem na świecie, a jego zasoby uważane są za niewyczerpalne. Papier jest materiałem naturalnym, biodegradowalnym i nadającym się do recyklingu. Może zostać przetworzony nawet do siedmiu razy, a w 2020 r. wskaźnik recyklingu papieru w Europie wyniósł ponad 73%. Obecnie wyroby papiernicze, takie jak tektura falista czy plaster miodu, są najczęściej wykorzystywane do produkcji różnego rodzaju opakowań i zabezpieczania produktów podczas transportu. Są one dobrze znane pod względem parametrów geometrycznych, gramatury, składu oraz wytrzymałości na zgniatanie i uderzenia. Rzadko spotykana kombinacja łatwej dostępności, niskiej ceny materiału oraz ograniczonego wpływu na środowisko naturalne czyni papier potencjalnie atrakcyjnym materiałem budowlanym. W obliczu postępującej degradacji środowiska, zmieniających

się przepisów budowlanych i rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa, niezbędne jest poszukiwanie nowych, bardziej zrównoważonych materiałów termoizolacyjnych. Ponadto materiały pochodzenia celulozowego są z powodzeniem stosowane w architekturze jako elementy konstrukcyjne i wypełniające przegrody budowlane [1]. Brakuje jednak komplementarnych badań nad wyrobami papierniczymi z punktu widzenia izolacyjności termicznej [2].

W przemyśle papierniczym istnieją 4 główne produkty pochodzenia celulozowego, które można wykorzystać w architekturze: tektura lita; tektura falista; tuleje oraz plaster miodu. Przy ich stosowaniu w budownictwie istotną kwestią jest spełnienie wymagań odpowiedniej izolacyjności termicznej. Znajomość współczynnika przewodności cieplnej materiałów pozwala na obliczenie współczynnika przenikania ciepła U przegrody, który ma bezpośredni wpływ na energochłonność budynku. Badania literaturowe wykazały, że przewodność cieplna tektury falistej i plastra miodu [3 – 6] lokuje te materiały pomiędzy drewnem a typowymi izolacjami termicznymi [7, 8]. W celu spełnienia polskich wymagań dotyczących współczynnika przenikania ciepła ściany ze-

wewnętrznej na poziomie $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ grubość przegrody z tektury falistej wynosiłaby ok. 25 cm, a z plastra miodu (o wysokości 25 mm) ok. 40 cm. Aktualny stan wiedzy na temat parametrów papieru można znaleźć w pracy [2], ale nie opisano w niej wpływu zawilgoceń materiału na jego przewodność cieplną, wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła w przypadku różnych kierunków przepływu ciepła w stosunku do pustek powietrznych, a także badania wpływu rodzaju fali (tektura falista) i wysokości pustek powietrznych (plaster miodu) na przewodność cieplną.

Na współczynnik przewodzenia ciepła (λ) materiału wpływają gęstość i grubość oraz temperatura i wilgotność [9], a w przypadku tektury falistej i plastra miodu również geometria niewentylowanych pustek powietrznych w ich wnętrzu. Metody pomiaru przewodności cieplnej można podzielić na dwie grupy: metodę stałego strumienia ciepła i metodę nieustalonego strumienia ciepła. Najbardziej znaną i powszechnie stosowaną jest **metoda stałego strumienia ciepła z wykorzystaniem aparatu płytowego**.

Celem prac badawczych było przeprowadzenie wstępnych badań nad wyznaczeniem przewodności cieplnej ma-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

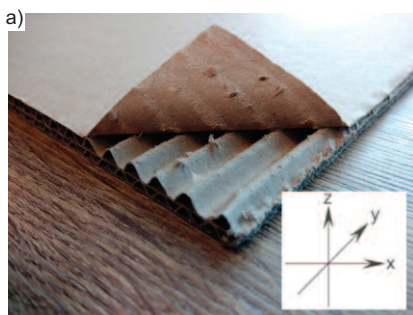
²⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury

*) Adres do korespondencji: pawel.noszczyk@pwr.edu.pl

materiałów pochodzenia celulozowego w kontekście ich zastosowania jako innowacyjnego materiału termoizolacyjnego w budownictwie. Przeanalizowano wpływ geometrii pustek powietrznych i kierunku przepływu ciepła przez te pustki na współczynnik przewodzenia ciepła.

Metoda badań

Badane próbki materiałów celulozowych były wykonane z tektury falistej i plastra miodu, które składają się ze szkieletu (materiału celulozowego) i wypełnienia (pustek powietrznych). Przekazywanie ciepła przez papier następuje wskutek przewodzenia, natomiast przez pustki powietrzne drogą złożonego przepływu (przewodzenie, promieniowanie i konwekcja). Pustki powietrzne stanowią znacznie większą objętościowo część badanego materiału celulozowego niż papier i to ich przewodność cieplna determinuje izolacyjność termiczną całego elementu. Wielkość pustek powietrznych oraz kierunek przepływającego przez nie ciepła wpływa na współczynnik przewodzenia ciepła. Łącznie zbadano 80 próbek o różnym kierunku przepływu ciepła przez pustki powietrzne, różnej ich wysokości oraz różnej liczbie elementów. W przypadku tektury falistej są możliwe 3 różne kierunki przepływu ciepła przez niewentylowane pustki powietrzne (fotografia a), tj. prostopadle do fali (kierunek Z), równoległe do pustek powietrznych (kierunek Y) oraz prostopadle do pustek powietrznych (kierunek X), natomiast w przypadku plastra miodu możliwe są 2 takie kierunki (fotografia b) równoległe do pustek powietrznych (kierunek Z) i prostopadle do pustek powietrznych (kierunek X i Y – kierunki tożsame).



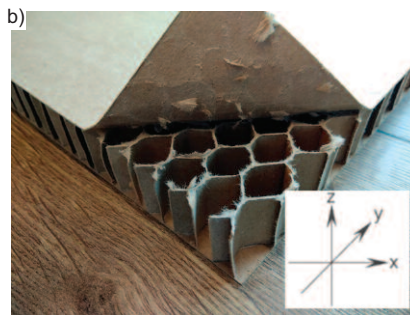
Możliwe kierunki przepływu ciepła przez materiał celulozowy: a) tektura falista; b) plaster miodu

Possible directions of heat flow through the cellulose material: a) corrugated cardboard; b) honeycomb panel

Warunki klimatyczne podczas magazynowania badanych materiałów celulozowych były zapisywane za pomocą rejestratora wilgotności względnej powietrza i temperatury powietrza z częstotliwością 15 min. Próbkę przechowywano w pomieszczeniu o wilgotności względnej powietrza 30 – 40% oraz temperaturze 22 – 24°C przez okres 3 miesięcy. Następnie próbki pomierzono, zważono z dokładnością do 0,01 mm oraz 0,01 g i obliczono ich gęstość objętościową. Badania przewodności cieplnej tektury falistej i plastra miodu wykonano metodą stacjonarną, przy użyciu aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną. Procedura pomiarowa była zgodna z wymaganiami PN-EN 12667:2002 [10]. Zmierzono współczynnik przewodzenia ciepła (λ) przy średniej temperaturze próbki 10°C (dolna płyta grzejna 20°C, górna płyta grzejna 0°C). Należy zwrócić uwagę, że otrzymane wyniki dotyczyły pionowego kierunku przepływu ciepła (w górę) i ze względu na występujące zjawisko przekazywania ciepła w pustkach powietrznych badanego materiału na drodze konwekcji przewiduje się, że wartości przewodności cieplnej na innych kierunkach będą się różniły. Stanowisko badawcze składało się z aparatu płytowego (FOX314), chłodziarki, laptopa oraz dodatkowo z wagi laboratoryjnej i suwmiarki elektronicznej. Ustabilizowanie przepływu ciepła i pomiar przewodności cieplnej materiałów celulozowych z dokładnością do 2% w trzech kolejnych blokach pomiarowych trwał ok. 60 min.

Wybrane wyniki badań

Otrzymane wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła przedstawiono w tabeli. Wszystkie podane wartości



Średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła [W/mK]

Average values of thermal conductivity coefficient [W/mK]

Rodzaj materiału	Kierunek przepływu ciepła		
	Z	Y	X
Tektura falista			
Typ fali B	0,039	nm	nm
Typ fali BC	0,044	0,090	0,084
Typ fali E	0,045	nm	nm
Typ fali EB	0,043	nm	nm
Typ fali EE	0,043	nm	nm
Plaster miodu panel			
Wysokość 10 mm	0,067	nd	nd
Wysokość 25 mm	0,105	nm	0,083
Wysokość 50 mm	0,135	nm	0,074

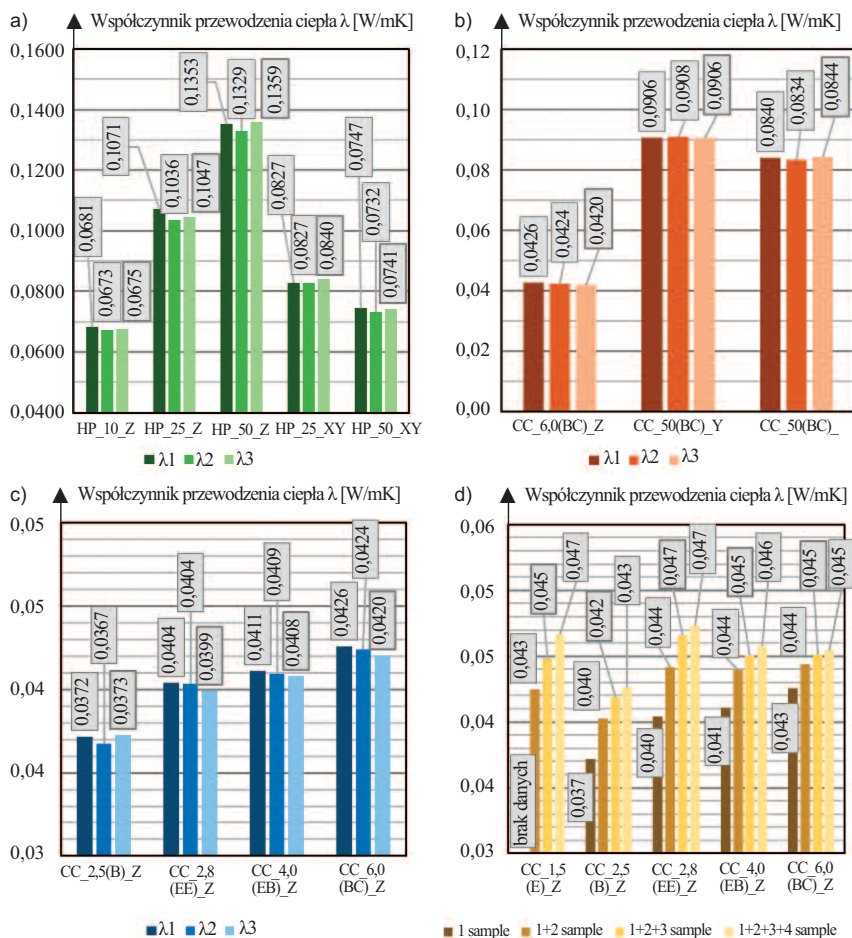
Oznaczenia: nd – nie dotyczy; nm – nie mierzono

są średnią arytmetyczną z pomiaru co najmniej trzech identycznych próbek. Na **rysunku a** przedstawiono wyniki w przypadku różnej wysokości plastra miodu, natomiast **rysunek b** pokazuje różnice otrzymanych wartości w zależności od kierunku przepływu ciepła przez tekturę falistą, **rysunek c** wpływ rodzaju fali (jej wysokości) na parametry termoizolacyjne, a **rysunek d** wpływ krotności fal na przewodność cieplną całego komponentu, rozumianą jako złożenie kilku tektur falistych na kierunku Z.

Podsumowanie i wnioski

Przewodność cieplna (λ) badanych materiałów jest zbliżona do tradycyjnych izolacji termicznych wykorzystywanych w budownictwie. W przypadku tektury falistej wynosi ona od 0,039 W/mK przy fali typu B do 0,045 W/mK przy fali typu E, natomiast w przypadku plastra miodu od 0,067 W/mK przy wysokości elementu 10 mm do 0,135 W/mK przy wysokości 50 mm. Ponadto stwierdzono wzrost współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze wzrostem wysokości niewentylowanych pustek powietrznych (rysunek c) oraz liczbą kolejnych warstw materiału (rysunek d), co jest spowodowane wpływem konwekcji. Tektura falista charakteryzuje się również znacznie lepszą (mniejszą) przewodnością cieplną w porównaniu z plastrzem miodu.

W przypadku plastra miodu o grubości większej od 10 mm, mniejszą przewodność cieplną uzyskuje się na kierunku



Oznaczenia: HP_10_Z – Honeycomb panel_wysokość próbki_kierunek przepływu ciepła wg fotografii 1; CC_6,0(BC)_Z – Corrugated cardboard_wysokość próbki (typ fali)_kierunek przepływu ciepła wg fotografii 1; 1+2+3+4 sample – testowana próbka składająca się z czterech takich samych elementów ułożonych na sobie
 Marking: HP_10_Z – Honeycomb panel_height of the sample_direction of heat flow as shown in Photo 1.; CC_6,0(BC)_Z – Corrugated cardboard_height of the sample (wave type)_direction of heat flow as shown in Photo 1., 1+2+3+4 samples – means a tested sample consisting of 4 identical elements stacked on top of each

Wybrane wyniki badania przewodności cieplnej: a) płyt plastra miodu (10 mm, 25 mm i 50 mm); b) tektury falistej typu BC w przypadku różnych kierunków przepływu ciepła; c) tektury falistej o różnej wysokości (typu fala); d) tektury falistej o rosnącej liczbie fal

Selected results of thermal conductivity tests: a) honeycomb panels (10 mm, 25 mm and 50 mm); b) BC type corrugated cardboard for different heat flow directions; c) different heights of corrugated cardboard (wave type); d) corrugated cardboard for an increasing number of waves

ku XY (rysunek a), a w przypadku tektury falistej najmniejsza przewodność cieplna jest na kierunku Z. Wartości na pozostałych dwóch kierunkach są zbliżone do siebie (rysunek b).

W przypadku zastosowania tektury falistej lub płyt plastra miodu jako izolacji termicznej należy zwrócić uwagę na ich ciężar – masa tektury niezbędnej do zapewnienia właściwej izolacyjności termicznej znacznie przewyższa masę konwencjonalnych, lekkich materiałów termoizolacyjnych, takich jak styropian lub pianka poliuretanowa. Z kolei zaletą materiałów celulozowych jest ich stosunkowo duża wytrzymałość mecha-

niczna, dzięki której mogą znaleźć zastosowanie np. w prefabrykowanych płytach warstwowych.

Badania przewodności cieplnej wykazały, że istnieje możliwość wykorzystania materiałów celulozowych, takich jak tektura falista i plaster miodu, jako materiałów termoizolacyjnych w budownictwie. Przy odpowiednio dobranym rodzaju tektury falistej oraz optymalnym układzie pustek powietrznych (fali) w stosunku do przepływającego strumienia ciepła można osiągnąć przewodność cieplną zbliżoną do typowych materiałów termoizolacyjnych. W dalszych badaniach nad materiałami celu-

lozowymi należałoby sprawdzić wpływ zawilgocenia materiału oraz starzenie na jego przewodność cieplną. Możliwość stosowania tego materiału w budownictwie zależy również od innych jego parametrów, takich jak: wytrzymałość mechaniczna, odporność na zawilgocenie (po wcześniejszej impregnacji), ogniotrwałość czy izolacyjność akustyczna.

Literatura

[1] Latka J. Paper in architecture Research by design, engineering and prototyping, A+BE Architecture and the Built environment. 2017; 19.
 [2] Łątka J, Jasiołek A, Karolak A, Niewiadomski P, Noszczyk P, Klimek A, Zielińska S, Misiurka Sz, Jezierska D. Properties of paper-based products as a building material in architecture – An interdisciplinary review. Journal of Building Engineering. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104135>.
 [3] Asdrubali F, Pisello AL, D’Alessandro F, Bianchi F, Cornicchia M, Fabiani C. Innovative Cardboard Based Panels with Recycled Materials from the Packaging Industry: Thermal and Acoustic Performance Analysis. In Proceedings of the Energy Procedia; Elsevier Ltd, 2015; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.652>.
 [4] Asdrubali F, Pisello AL, D’Alessandro F, Bianchi F, Fabiani C, Cornicchia M, Rotili A. Experimental and Numerical Characterization of Innovative Cardboard Based Panels: Thermal and Acoustic Performance Analysis and Life Cycle Assessment. Building and Environment. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.003>.
 [5] Čekon M, Struhala K, Slávik R. Cardboard-Based Packaging Materials as Renewable Thermal Insulation of Buildings: Thermal and Life-Cycle Performance. Journal of Renewable Materials. 2017; doi: 10.7569/JRM.2017.634135.
 [6] Salavatian S, D’Orazio M, di Perna C, di Giuseppe E. Assessment of Cardboard as an Environment-Friendly Wall Thermal Insulation for Low-Energy Prefabricated Buildings. In Proceedings of the Sustainable Building for a Cleaner Environment, Springer, Cham, 2019; https://doi.org/10.1007/978-3-319-94595-8_39.
 [7] PN-EN ISO 10456:2009 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabularyczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
 [8] PN-EN ISO 6946:1999 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania.
 [9] Firkowicz-Pogorzelska K. Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych. Building Research Institute – Quartely. 2001; 3 (119).
 [10] PN-EN 12667:2002 Właściwości cieplne materiałów i wyrobów budowlanych – Określanie oporu cieplnego metodami osłoniętej płyty grzejnej i czujnika strumienia cieplnego – Wyroby o dużym i średnim oporze cieplnym.

Przyjęto do druku: 03.10.2022 r.