dr Barbara Pietruszka [1)*)]
ORCID: 0000-0003-3268-7997
dr inż. arch. Michał Gołębiewski [2)]
ORCID: 0000-0001-7206-0369
dr Olena Oleksiienko [3)]
ORCID: 0000-0002-5329-2217

Właściwości celulozy jako materiału termoizolacyjnego w przegrodach budowlanych

Properties of cellulose as a thermal insulation material in building partitions

DOI: 10.15199/33.2024.06.05

Streszczenie. Przy opracowywaniu nowych materiałów o lepszych parametrach termoizolacyjnych, stosowanych do poprawy efektywności energetycznej budynków ważna jest także niewielka energochłonność procesów produkcji. W tym kontekście zasadne jest badanie możliwości wykorzystania surowców z recyklingu. W artykule przedstawiono wyniki badań przewodności cieplnej celulozy w zależności od zawilgocenia, w dużym zakresie deklarowanej gęstości. Przewodność cieplna celulozy w stanie suchym jest prawie stała (średnia wartość $\lambda = 0{,}041$ W/(m·K)) i nie zależy od gęstości objętościowej. Zawilgocenie materiału przy 50% i 80% RH wykazuje wzrost przewodności cieplnej w zależności od gęstości. Otrzymane wyniki potwierdzają potencjał celulozy jako materiału termoizolacyjnego przegród budowlanych.
Słowa kluczowe: izolacja termiczna; celuloza; przewodność cieplna.

Abstract. When developing new materials with better thermal insulation parameters to improve the energy efficiency of buildings, low energy consumption of production processes is also important. In this context, it is justified to investigate the possibilities of use of recycled resources. This paper presents the results of testing the thermal conductivity of cellulose depending on moisture content, in a large range of declared densities. The thermal conductivity of cellulose in the dry state is almost constant (on average $\lambda = 0.041$ W/(m·K)) and does not depend on the apparent density. The rise of the moisture content of the material at 50% and 80% RH shows an increase in thermal conductivity, depending on the density. The obtained results confirm the potential of cellulose as a thermal insulation material in building partitions.
Keywords: thermal insulation; cellulose; thermal conductivity.

Izolacja termiczna przegród zewnętrznych skutecznie zmniejsza zapotrzebowanie budynków na energię w fazie ich użytkowania. Na rynku europejskim dostępne są materiały pochodzenia mineralnego i syntetycznego: wełna szklana (36%), wełna mineralna (22%), polistyren ekspandowany (27%) i ekstrudowany (6%) oraz pianki PUR i PIR (razem 8%) [1]. Charakteryzują się one zróżnicowanymi wartościami energii potrzebnej do ich wytworzenia, której wydatek należy brać pod uwagę przy ocenie efektywności energetycznej budynków w całym cyklu życia, np. w przypadku wełny szklanej i mineralnej odpowiednio: 16 – 31 i 21 – 66 MJ, a EPS – 44 – 78 MJ w przeliczeniu na 1 m^2 izolacji o oporze cieplnym 1 (m^2·K)/W i projektowanej żywotności 50 lat [2]. Ze względu m.in. na potrzebę optymalizacji parametrów środowiskowych materiałów i konieczność ograniczenia zużycia surowców nieodnawialnych oraz procesów technologicznych szkodliwych dla środowiska poszukuje się alternatywnych materiałów, szczególnie pochodzenia organicznego oraz z recyclingu [3]. Przegląd deklaracji środowiskowych [2] wskazuje na bardzo zróżnicowane wartości energii wbudowanej i śladu węglowego materiałów termoizolacyjnych. Szczególnie korzystnymi właściwościami charakteryzuje się celuloza pochodząca z surowców odnawialnych lub recyklingu, której średnia energia wbudowana jest mniejsza niż materiałów syntetycznych oraz wełny skalnej, a ślad węglowy mniejszy niż większości powszechnie stosowanych izolacji cieplnych [2, 4].

Termoizolacje celulozowe stosowane są od lat osiemdziesiątych XX w., a na polski rynek budowlany zostały wprowadzone w 1994 r. Celuloza do zastosowania jako termoizolacyja produkowana jest głównie w procesie recyklingu makulatury gazetowej i aplikowana metodą wdmuchiwania. Używa się jej jako izolacji termicznej stropów, dachów, stropodachów, ścian i podłóg (fotografia 1), płaszczyzn o złożonej geometrii, w tym łuków i krzywizn, np. w budynkach zabytkowych, nie są ko-

Fot. 1. Przykład zastosowania izolacji celulozowej na poddaszu nieużytkowym
Photo 1. Example of using cellulose insulation in an unused attic

[1)] Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Fizyki Cieplnej, Akustyki i Środowiska
[2)] Politechnika Warszawska, Wydział Architektury
[3)] LLC UKRCERTIFICATION
[*)] Adres do korespondencji: p.pietruszka@itb.pl

nieczne przycinki i nie powstają odpady technologiczne. Ok. 95% prac z zastosowaniem celulozy jest wykonywanych metodą wdmuchiwania na sucho, a pozostała część metodą natrysku na mokro [4]. Celuloza charakteryzuje się niewielkim współczynnikiem przewodzenia ciepła (λ = 0,037 ÷ 0,043 W/(m·K)), dużym ciepłem właściwym (2150 J/(kg·K)); dobrą szczelnością powietrzną [5, 6], a także korzystnymi parametrami tłumienia dźwięków powietrznych, dzięki metodzie aplikacji pozwalającej na szczelne wypełnienie izolowanej przestrzeni [4, 5]. W literaturze podkreślana jest odporność celulozy na wilgoć i rozwój grzybów ze względu na jej właściwości higroskopijne oraz niezapalność (klasa ogniowa B – wyroby palne niezapalne), co wpływa na brak rozgorzenia i ograniczony udział w rozprzestrzenianiu się ognia [4 ÷ 6]. Wymienione właściwości uzyskuje się także w wyniku dodatkowej impregnacji m.in. związkami boru, wodorotlenkiem glinu lub solami amonowymi [6].

Gęstość nasypowa wyrobów izolacyjnych z celulozy zależy od sposobu i parametrów aplikacji. Grubość warstwy materiału ulega zmniejszaniu w okresie użytkowania, aż do wartości docelowej, która jest o kilka-kilkanaście procent mniejsza niż początkowa. Wyróżnia się celulozę o gęstości nasypowej [6]:

- 25 ÷ 60 kg/m³ – stosowana w tzw. nadmuchu otwartym – na powierzchnie płaskie lub o kącie nachylenia do 10° (docieplanie stropodachów wentylowanych i stropów poddaszy nieużytkowych); jeżeli warstwa materiału nie zostanie zagęszczona, ulega osiadaniu;
- 38 ÷ 65 kg/m³ – wdmuchiwana w połacie dachowe pod kątem 45 ÷ 70° (wypełnienie przestrzeni pomiędzy warstwą wstępnego krycia a okładziną wewnętrzną); zastosowanie materiału o większej gęstości umożliwia uniknięcie jego osiadania i stabilność wymiarową izolacji;
- 40 ÷ 65 kg/m³ – wdmuchiwana w ściany; gęstość nasypowa jest większa niż w przypadku aplikacji na połacie dachów skośnych;
- 30 ÷ 55 kg/m³ – aplikowana metodą natrysku na mokro.

Zakres badań materiału celulozowego określa norma EN 15101-1:2013 [7]. Oceniane zgodnie z nią produkty otrzymują deklarację właściwości użytkowych i są uznane za bezpieczne, co pozwala na ich stosowanie jako izolacji termicznej i akustycznej przegród wewnętrznych i zewnętrznych budynków [6].

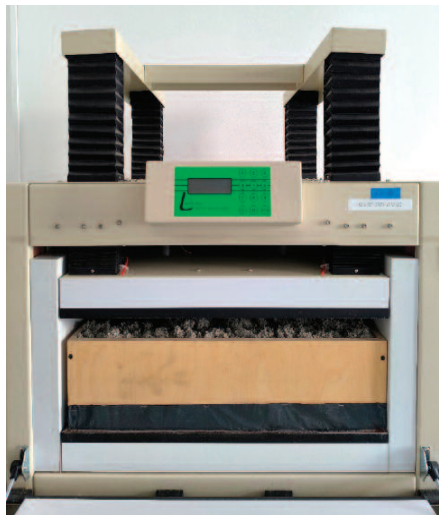
Procedura badań

Program badań zakładał pomiar współczynnika przewodzenia ciepła próbek celulozy o różnej gęstości nasypowej, po uprzednim kondycjonowaniu w różnych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych charakteryzujących warunki eksploatacji celulozy, a także kontrolę zmiany masy próbek i osiadania materiału. Procedurę badania przeprowadzono wg EN 15101-1:2013 [7], a pomiary współczynnika przewodzenia ciepła wg PN-EN 12667:2002 [8].

W celu umieszczenia próbki materiału w aparacie płytowym w stanie, w jakim występuje w przegrodzie budowlanej, przygotowano formy z drewna o wymiarach 600 x 600 x 150 mm odtwarzające przestrzeń przegrody, które wypełniono materiałem celulozowym, uzyskując próbki o początkowej gęstości nasypowej ρ = 35,3 ÷ 86,1 kg/m³ (fotografia 2). W pierwszym etapie próbki suszono w komorze klimatycznej w tempereaturze 70°C i wilgotności względnej ≤5% do uzyskania ich stałej masy w 3 kolejnych pomiarach. Następnie zabezpieczono je szczelnie folią i chłodzono w temperaturze 23°C przez ok. 30 min, po czym poddano badaniom. Pomiary współczynnika przewodzenia ciepła λ w warunkach ustalonego przepływu ciepła wykonano za pomocą aparatu płytowego typu FOX 600 (fotografia 3), z czujnikami gęstości strumienia cieplnego, o orientacji poziomej i położeniu próbki: spód. Realizowano je przy średniej temperaturze próbki 10°C, różnicy temperatury na grubości próbki 20 K i ruchu ciepła z dołu do góry, w temperaturze otoczenia 21,0 ÷ 23,6°C. W drugim etapie próbki celulozy kondycjonowano w temperaturze 23±2°C oraz wilgotności względnej 50±5% i oznaczono ich przewodność cieplną oraz osiadanie materiału. W trzecim etapie postępowano analogicznie, przy czym materiał kondycjonowano w temperaturze 23±1°C i wilgotności względnej 80±2%. Badania prowadzono przez 4 miesiące.

Fot. 2. Próbka celulozy przygotowana przez wdmuchanie materiału do formy – jednorodna mieszanina wypełnia całą pustą przestrzeń

Photo 2. Cellulose sample prepared by blowing the material into the test mold – a homogeneous mixture fills the entire empty space



Fot. 3. Próbka celulozy w aparacie płytowym podczas badania przewodności cieplnej

Photo 3. Cellulose sample placed in a plate apparatus during thermal conductivity test

Wyniki badań

Wyniki badań przewodności cieplnej próbek materiału celulozowego o zróżnicowanej gęstości nasypowej w momencie pomiaru oraz stopniu zawilgocenia w wyniku sezonowania w różnych warunkach cieplno-wilgotnościowych przedstawiono na rysunku 1. Uzyskano średni współczynnik przewodzenia ciepła w stanie suchym na poziomie 0,041 W/(m·K), co świadczy o potencjale jako materiału termoizolacyjnego, ponieważ wartość ta jest porównywalna z wartościami innych niekonwencjonalnych materiałów izolacyjnych obecnie dostępnych na rynku [9 ÷ 13]. Przewodność cieplna celulozy w stanie suchym jest niemal stała i nie zależy od gęstości objętościowej materiału. Przewodność cieplna materiału kondycjonowanego w warunkach podwyższonej wilgotności zwiększa się – średnio o 8% w przypadku wilgotności względnej 50±5%, oraz o 15% w przypadku wilgotności względnej 80±2%, co wiąże się z wypełnieniem porów materiału przez wilgoć. Ponadto zaobserwowano wzrost wartości współczynnika przewodzenia ciepła wraz ze wzrostem gęstości nasypowej.

Początkową gęstość nasypową oraz zmianę masy celulozy w zależności od warunków kondycjonowania przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 2. Gęstość próbek suchych oraz wyniki oznaczeń sedymentacji celulozy zestawiono w tabeli 2. Osiadanie celulozy po kondycjonowaniu zależy od początkowej gęstości nasypowej materiału – im jest większa, tym mniejsza podatność materiału na osiadanie.

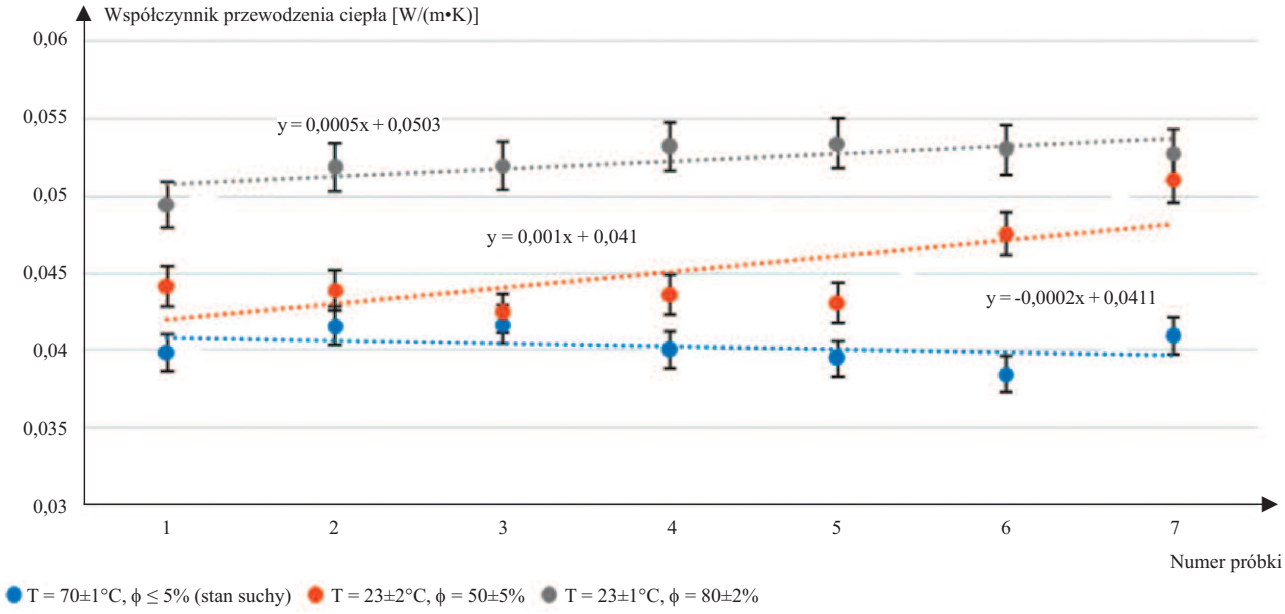
Wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła celulozy w stanie suchym są zbieżne z wynikami badań materiałów celulozowych przeprowadzonych w ITB w 2015 r. (badania własne, niepublikowane). Wyniki obliczeń i deklarowane wartości współczynnika przewodzenia ciepła zestawiono w tabeli 3.

Wnioski

Przedstawione wyniki badań wykazały, że celuloza charakteryzuje się niewielkim współczynnikiem przewodzenia ciepła w warunkach charakterystycznych dla użytkowania. Uwzględniając wiele zalet materiału, m.in. niewielką energochłonność na etapie produkcji, może stanowić efektywną ter-

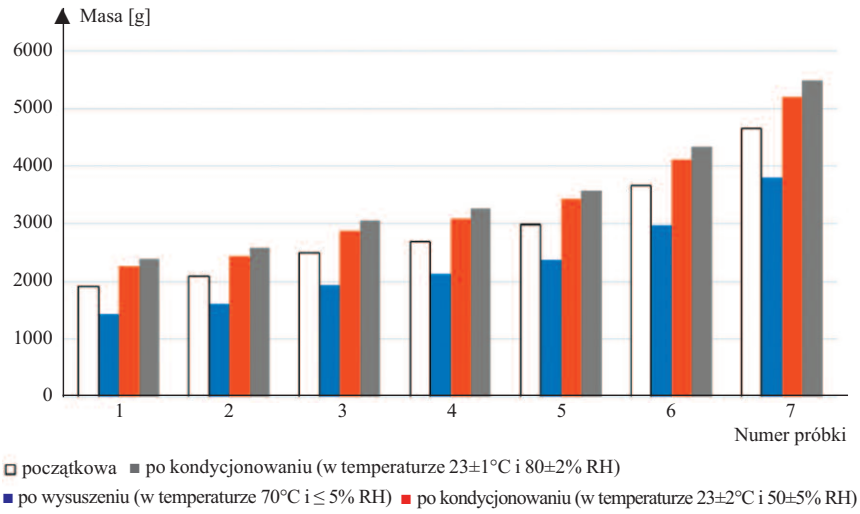
Tabela 1. Zmiana masy próbek celulozy w zależności od warunków cieplno-wilgotnościowych otoczenia (w odniesieniu do ich masy początkowej)
Table 1. Change in cellulose samples mass depending on ambient temperature and humidity conditions (in relation to their initial mass)

Nr próbki	Początkowa gęstość nasypowa próbki [kg/m^3]	Zmiana masy próbki po		
		jej wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 70°C ≤ 5% RH [%]	kondycjonowaniu do stałej masy w temperaturze 23±2 °C i 50±5% RH [%]	kondycjonowaniu do stałej masy w temperaturze 23±1°C i 80±2% RH [%]
1	35,3	-24,6	+19,2	+25,8
2	38,8	-22,7	+17,2	+24,0
3	46,2	-22,1	+16,0	+23,0
4	49,7	-20,3	+15,7	+22,0
5	55,2	-20,3	+15,5	+20,2
6	67,8	-18,6	+12,5	+18,9
7	86,1	-18,1	+11,8	+18,3



Niepewność rozszerzona, obliczona z wykorzystaniem współczynnika k = 2, co odpowiada poziomowi ufności ok. 95%; wynosi 3%

Rys. 1. Przewodność cieplna próbek celulozy o zróżnicowanej gęstości nasypowej w momencie pomiaru i stopniu zawilgocenia w wyniku sezonowania w różnych warunkach cieplno-wilgotnościowych otoczenia
Fig. 1. Thermal conductivity of cellulose samples with different bulk density at the time of measurement and the moisture content as a result of seasoning in various ambient temperature and humidity conditions



Rys. 2. Zmiana masy próbek celulozy w zależności od warunków cieplno-wilgotnościowych otoczenia
Fig. 2. Change in cellulose samples mass depending on ambient temperature and humidity conditions

Tabela 2. Gęstość nasypowa suchych próbek i podatność na osiadanie materiału celulozowego (zmiany w odniesieniu do początkowej grubości)
Table 2. Bulk density of dry samples and susceptibility to settling of cellulose material (changes in relation to the initial thickness)

Nr próbki	Gęstość nasypowa próbki po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 70°C i ≤ 5% RH [kg/m³]	Podatność na osiadanie	
		zmiana grubości warstwy materiału po kondycjonowaniu próbki suchej w temperaturze	
		23°C i 50% RH [%]	23°C i 80% RH [%]
1	26,6	-9,3	-18,0
2	30,0	-8,7	-16,7
3	36,0	-8,0	-14,7
4	38,9	-7,3	-13,3
5	43,7	-4,0	-7,3
6	55,2	nie zaobserwowano	nie zaobserwowano
7	70,5	nie zaobserwowano	nie zaobserwowano

moizolację w przegrodach budowlanych. Pomiary potwierdzają, że w przypadku celulozy o małej początkowej gęstości nasypowej grubość warstwy materiału izolacyjnego nadmuchanego na płaskie powierzchnie przegród będzie zmniejszać się w okresie trwałości użytkowej materiału. W przypadku materiału o większej gęstości nie zaobserwowano osiadania w wyniku kondycjonowania, co potwierdza jego przydatność do izolacji ścian i dachów o dużym kącie nachylenia.

Literatura

[1] European Commission, Joint Research Centre – Pavel C, Blagoeva D. Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings – Revised edition. Publications Office. 2018, DOI: 10.2760/750646.

[2] Grazieschi G, Asdrubali F, Thomas G. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. Cleaner Environmental Systems. 2021; https://doi.org/10.1016/j.cesys. 2021.100032.

[3] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. Sustainable Materials and Technologies. 2015; https://doi.org/10.1016/j. susmat. 2015.05.002.

[4] Zaorski R. Certyfikat CE dla celulozowych izolacji termicznych, na podstawie normy zharmonizowanej. Izolacje. 2014;5: 20 – 24.

[5] Drećka M. Ocieplanie przegród zewnętrznych celulozą w świetle nowych wymagań cieplnych. Izolacje. 2014;6: 58 – 62.

[6] Fabijańska M, Zaorski R. 2015. Ekologiczne aspekty wykorzystania wybranych materiałów stosowanych jako izolacje termiczne – polemika. Izolacje; 2.

[7] PN-EN 15101-1:2013-12. Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby z celulozy w postaci luźnej (LFCI) formowane in situ Część 1: Specyfikacja wyrobów przed zastosowaniem.

Tabela 3. Wyniki obliczeń i deklarowane wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów termoizolacyjnych z celulozy badanych w ITB w 2015 r.
Table 3. The calculation results and the declared values of the thermal conductivity coefficient of the cellulose thermal insulation materials tested in ITB in 2015

Oznaczona wartość	Celuloza (typ 1) [W/(m•K)]	Celuloza (typ 2) [W/(m•K)]
Zakres wartości współczynnika przewodzenia ciepła	0,0386 ÷ 0,0409	0,0407 ÷ 0,0425
$\lambda_{m,dry}$*	0,03947	0,04146
$S_{\lambda,dry}$**	0,000633	0,000583
k_{10}***	2,07	2,07
$\lambda_{90/90,dry}$****	0,0408	0,0427
$\lambda_{90/90,23/50}$*****	0,0423	0,0438

* $\lambda_{m,dry}$ – średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła obliczona z wartości λ_i w przypadku 10 próbek
** $s_{\lambda,dry}$ – odchylenie standardowe z wartości λ_i
*** k – współczynnik związany z liczbą wyników (k = 2,07 dla 10 wyników)
**** $\lambda_{90/90}$ – 90% kwantyl przy 90% poziomie ufności w przypadku współczynnika przewodzenia ciepła. Wartość $\lambda_{90/90}$ zaokrąglono w górę z dokładnością do 0,0001 W/(m·K) – obliczenia wg normy PN-EN ISO 10456:2009+AC:2010
*****) konwersja współczynnika przewodzenia ciepła z warunków suchych na 23°C i 50% RH, wykonana zgodnie z PN-EN ISO 10456:2009+AC:2010

[8] PN-EN 12667:2002. Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance.

[9] Soto M, Rojas C, Cárdenas-Ramírez JP. Characterization of a thermal insulating material based on a wheat straw and recycled paper cellulose to be applied in buildings by blowing method. Sustainability. 2023; https://doi.org/10.3390/su15010058.

[10] Schiavoni S, D'Alessandro F, Bianchi F, Asdrubali F. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2026; https://doi. org/10.1016/j. rser. 2016.05.045.

[11] Janowska-Renkas E, Król A, Pochwała S, Pałubski D, Adamska M, Klementowski I. The fire resistance and heat conductivity of natural construction material based on straw and numerical simulation of building energy demand. Energies. 2022; https://doi. org/10.3390/en15031155.

[12] Fedorik F, Zach J, Lehto M, Kymäläinen HR, Kuisma R, Jallinoja M, IllikainenK, Alitalo S. Hygrothermal properties of advanced bio-based insulation materials. Energy and Buildings. 2021; https://doi.org/10.1016/j.enbuild. 2021.111528.

[13] Viel M, Collet F, Prétot S, Lanos C. Hemp-straw composites: Gluing study and multi-physical characterizations. Materials. 2019; https://doi. org/10.3390/ma12081199

Przyjęto do druku: 04.06.2024 r.