

Izolacyjność termiczna papierowych przegród budowlanych

Thermal insulation of paper building partitions

dr inż. Paweł Noszczyk (ORCID: 0000-0003-2810-5165), Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, mgr inż. arch. Agata Jasiołek (ORCID: 0000-0003-3368-7905), dr inż. arch. Jerzy Łątka (ORCID: 0000-0003-1122-0933), Katedra Architektury i Sztuk Wizualnych, Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska

DOI 10.5604/01.3001.0016.3263

Streszczenie: W artykule omówiono przykłady przegród budowlanych wykonanych z materiałów pochodzenia celulozowego. Przedstawiono różne sposoby konstrukcji tych przegród zewnętrznych oraz obliczono ich izolacyjność termiczną. Numeryczne obliczenia cieplne wykonano dla geometrii 2D z uwzględnieniem niejednorodności przegród i o przewodności cieplnej λ dla materiałów papierowych wyznaczonych na podstawie wcześniej wykonanych badań doświadczalnych. Łącznie zaproponowano geometrię 6 konstrukcji ścian zewnętrznych, dla których osiągnięto wartości współczynnika przenikania ciepła U_c poniżej $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ przy grubościach przegród nieprzekraczających 32 cm.

Słowa kluczowe: budownictwo zrównoważone, przegrody papierowe, celuloza, obliczenia cieplne, izolacyjność termiczna, symulacje cieplne 2D.

Abstract: The article discusses examples of building partitions made of materials of cellulose origin. Various methods of construction of these external partitions were presented and their thermal insulation was calculated. Numerical thermal calculations were performed for 2D geometry, taking into account the non-uniformity of partitions and the thermal conductivity λ for paper materials determined on the basis of previously performed experimental tests. In total, the geometry of 6 external wall structures was proposed, for which the values of the heat transfer coefficient U_c below $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ were achieved with partition thicknesses not exceeding 32 cm.

Keywords: sustainable construction, paper partitions, cellulose, thermal calculations, thermal insulation, 2D thermal simulations.

1. Wprowadzenie

Papier jest materiałem ekologicznym o wielorakim zastosowaniu, który może zostać recyklingowany do 7 razy. Odpowiednie komponenty papierowe w postaci tektury falistej, plastra miodu i sypkiej celulozy mogą pomóc tworzyć budownictwo zrównoważone [1]. Zastosowanie konstrukcji szkieletowej i lekkiej przegrody zewnętrznej budynku jest zwykle bardziej korzystne dla środowiska naturalnego niż budowanie z masywnych ścian nośnych. Obciążenie środowiska naturalnego można zmniejszyć, stosując materiały pochodzenia roślinnego, biodegradowalne i pochodzące z recyklingu o wysokich właściwościach termoizolacyjnych [2]. Jednym z materiałów, które mogą okazać się przydatne do produkcji przegród zewnętrznych, zmniejszając jednocześnie ślad węglowy, jest papier i wszelkie pochodne materiały bazujące na celulozie.

2. Rodzaje materiałów celulozowych

Produkcja papieru i produktów papierniczych jest obecnie wysokorozwinięta, zoptymalizowana i zunifikowana, a wytwarzane produkty powszechnie dostępne i tanie. Czyli jest to więc materiałem łączącym w sobie zarówno zalety

ekologiczne, jak i ekonomiczne. Spośród standardowych produktów oferowanych przez przemysł papierniczy zastosowanie w budownictwie znaleźć mogą przede wszystkim tektura falista, papierowe płyty o strukturze plastra miodu, tektura lita, tuleje papierowe i kształtki tekturowe (rys. 1). Tuleje oraz kształtki papierowe, produkowane poprzez warstwowe, spiralne klejenie arkuszy papieru, mogą być wykorzystywane jako elementy konstrukcyjne w przegrodach budowlanych.

Z kolei tektura falista, produkowana poprzez sklejenie naprzemiennie ułożonych płaskich i pofalowanych arkuszy papieru, wykazuje dobre właściwości termoizolacyjne. Izolacyjnością termiczną charakteryzują się również płyty o strukturze plastra miodu, w których heksagonalny rdzeń umieszczony jest pomiędzy dwoma arkuszami papieru. Płyty te wykazują również dużą wytrzymałość mechaniczną w kierunku prostopadłym do ich powierzchni. Ponadto w budownictwie od lat stosowana jest również sypka, wdmuchiwana izolacja celulozowa, produkowana z makulatury z dodatkiem substancji ogniochronnych. Zastosowanie odpowiedniej kombinacji nośnych oraz termoizolacyjnych materiałów papierowych, w połączeniu z powłokami ochronnymi i warstwami wykończeniowymi, pozwala na uzyskanie w pełni funkcjonalnej, przyjaznej środowisku obudowy budynku.

Rys. 1. Wybrane rodzaje materiałów celulozowych – kształtka tekturowa, tektura falista, tuleja papierowa i płyta o strukturze plastra miodu [1]



3. Metodyka badań

3.1. Przewodność cieplna materiałów celulozowych

Na wysoką izolacyjność termiczną przegród budowlanych wpływa przede wszystkim niski współczynnik przewodzenia ciepła materiałów, z których przegroda jest wykonana oraz jej geometria (grubość). Obszerne badania literaturowe dotyczące przewodności cieplnej materiałów pochodzenia celulozowego można znaleźć w interdyscyplinarnej pracy przeglądowej [1]. W przypadku tektury falistej i plastra miodu na przewodność cieplną λ wpływa geometria i proporcja materiału stałego (papieru) i zamkniętych niewentylowanych pustek (powietrza). Wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów pochodzenia celulozowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynnik przewodzenia ciepła materiałów celulozowych, na podstawie [1]

Nazwa materiału	Typ materiału	Przewodność cieplna [W/mK]
tektura lita	nd	0,14
panel honeycomb	grubość 50 mm	0,125
	grubość 25 mm	0,095
	grubość 12,5 mm	0,075
tektura falista	fala e	0,057
	fala c	0,053
	fala bc	0,050
	fala a	0,047
sypka celuloza	nd	0,039

Do obliczeń numerycznych założono parametr przewodności cieplnej λ dla materiałów papierowych wyznaczony na podstawie wcześniej wykonanych badań literaturowych [1] i doświadczalnych [3]. Przewodność cieplna materiałów celulozowych była w zakresie 0,039–0,125 W/mK, dla pozostałych komponentów składowych, takich jak drewno i niewentylowane warstwy powietrza – przewodność cieplną przyjęto na podstawie polskich norm [4–6].

3.2. Geometria przegród papierowych

Prezentowane badania przeprowadzono na sześciu rdzeniach przegród zewnętrznych budynków wykonanych z produktów papierowych. Przegrody są oryginalnymi projektami autorów, opartymi na wcześniejszych eksperymentach, przeglądach literatury, ocenie studiów przypadków i osobistych doświadczeniach autorów w pracy z materiałami papierowymi w zastosowaniach konstrukcyjnych i termoizolacyjnych. Dążąc do wiarygodnego porównania przegród o podobnych parametrach użytkowych, przyjęto ogólne wytyczne projektowe. Każda przegroda powinna być kompozytowa, samonośną konstrukcją z elementami nośnymi osadzonymi w warstwach termoizolacji. Ponadto konstrukcja powinna umożliwiać przymocowanie do niej z obu stron dodatkowych ochronnych warstw wykończeniowych. Głównym materiałem przegrody powinien być papier (minimum 90% objętości przegrody), pozostała część przegrody to materiały drewnopochodne (np. sklejkę lub płytę OSB) i drewno. Na podstawie przyjętych kryteriów zaproponowano sześć projektów rdzeni przegród (tab. 2). Gramatura ścian waha się od 24,9 do 97,0 kg/m², a ich grubość wynosi od 217 do 318 mm.

3.3. Procedura obliczeniowa izolacyjności cieplnej

Podczas obliczeń uwzględniono kierunek przepływu ciepła przez przegrodę poprzez dobór odpowiednich współczynników oporu cieplnego powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej oraz kierunek przepływu ciepła przez pustki powietrzne. Zalecane grubości początkowe zostały dobrane tak, aby stanowiły wielokrotność grubości półproduktów dostępnych na rynku oraz spełniały aktualne w Polsce wymagania prawne współczynnika przenikania ciepła U_e , które są zgodne z wymaganiami europejskimi (0,20 W/m²K dla ściany zewnętrznej). Znajdąc minimalne grubości jednorodnych przegród, zaproponowano układy konstrukcyjne poszczególnych przegród. Zaproponowane modele były niejednorodnymi przegrodami, składającymi się głównie z materiałów pochodzenia celulozowego i drewna. Dla wszystkich konstrukcji wybrano powtarzalny niejednorodny wycinek przegrody, który poddano analizie numerycznej 2D dla stacjonarnych warunków przepływu ciepła, przyjmując temperaturę powietrza wewnętrznego jako +20°C, a temperaturę

Tabela 2. Proponowane rozwiązania materiałowo-geometryczne papierowych ścian zewnętrznych

Symbol	Element konstrukcyjny	Materiał termoizolacyjny	Rysunek
1A	tektura falista z drewnianymi słupkami	sypka celuloza	
1B	panele z tektury falistej w kształcie litery c	sypka celuloza i tektura falista	
2A	panele o strukturze plastra miodu połączone z papierowymi tulejami	sypka celuloza i plaster miodu	
2B	tektura falista klejona wielowarstwowo	tektura falista	
3A	tuleje papierowe	tektura falista	
3B	tuleje papierowe	tektura falista	

tektura falista

tektura lita

plaster miodu

drewno

sypka celuloza

powietrza zewnętrznego jako -20°C . Tak dobrane warunki brzegowe pozwoliły na dodatkowe sprawdzenie ryzyka przekroczenia punktu rosy po wewnętrznej stronie przegrody z powodu obecności mostków termicznych.

4. Wyniki

Wynikiem obliczeń numerycznych była wartość Q , czyli gęstość strumienia ciepła przepływającego przez rozważany element w założonych warunkach brzegowych. Po podzieleniu wartości Q przez różnicę temperatur po obu stronach przegrody ($\Delta T 40^{\circ}\text{C}$) uzyskano wartość L_{2D} (współczynnik sprzężenia termicznego elementu dwuwymiarowego). Na podstawie wzoru 1 (wg ISO 10211) i przy założeniu, że wartość mostka termicznego Ψ wynosi zero, obliczono

współczynnik przenikania ciepła U analizowanej przegrody (zgodnie ze wzorem 2).

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad [\text{W/mK}] \quad (1)$$

gdzie

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła przez mostek termiczny $[\text{W/mK}]$,

L_{2D} – współczynnik sprzężenia termicznego elementu dwuwymiarowego $[\text{W/mK}]$,

U_j – współczynnik przenikania ciepła przegrody $[\text{W/m}^2\text{K}]$,

l_j – długość przyjętego wycinka przegrody do analizy numerycznej $[\text{m}]$,

Przyjmując, że Ψ jest równe 0 i przekształcając wzór 1, otrzymujemy poszukiwaną wartość współczynnika przenikania ciepła U pojedynczej niejednorodnej przegrody jako:

Tabela 3. Wyniki obliczeń numerycznych przepływu ciepła przez przyjęte geometrie ścian zewnętrznych

Symbol [-]	Długość modelu l [mm]	Q [W/m]	L_{2D} [W/mK]	Współczynnik przenikania ciepła U [W/m ² K]	Grubość przegrody [mm]
1A	632	5,031	0,1258	0,1990	217
1B	600	4,621	0,1155	0,1925	240
2A	1200	9,423	0,2356	0,1963	318
2B	1200	9,485	0,2371	0,1976	269
3A	1200	9,500	0,2375	0,1979	259
3B	1200	9,362	0,2341	0,1950	265

$$U = \frac{L_{2D}}{l} \text{ [W/mK]} \quad (2)$$

Po iteracyjnej optymalizacji konstrukcji przegrody w celu uzyskania współczynnika U dla ściany zewnętrznej poniżej wartości 0,20 W/m²K uzyskano wyniki współczynników przenikania ciepła U_c dla założonych geometrii przegród, podane w tabeli 3.

Wszystkie przyjęte modele geometryczne ścian zewnętrznych mają współczynnik przenikania ciepła U poniżej wartości granicznej 0,20 W/m²K. Ponadto wyniki analizy numerycznej nie wykazały problemów z powierzchniową kondensacją pary wodnej na wewnętrznej powierzchni przegrody (przekroczenie punktu rosy). Temperatury powierzchni wewnątrz dla wszystkich przypadków wynoszą powyżej 17°C.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania numeryczne i obliczenia analityczne pozwoliły wyciągnąć następujące wnioski:

- termiczne obliczenia numeryczne potwierdziły możliwość budowy energooszczędnych przegród budowlanych spełniających WT, których głównym materiałem budulcowym jest papier;
- przyjęta geometria i materiały ścian zewnętrznych nie powodują ryzyka kondensacji pary wodnej na powierzchni od wewnątrz przegrody w wyniku przekroczenia punktu rosy;
- ważnym aspektem w zachowaniu energooszczędnego charakteru ścian zewnętrznych (dobrej izolacyjności termicznej) jest zapewnienie dobrej szczelności na połączeniach modułów proponowanych rozwiązań ścian zewnętrznych;
- zaproponowane rozwiązania materiałowo-geometryczne papierowych ścian zewnętrznych nie przekraczają grubości 32 cm i pozwalają uzyskać większą powierzchnię użytkową projektowanych obiektów przy zachowaniu tej samej powierzchni zabudowy porównując do tradycyjnych ścian murowanych.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność stosowania materiałów pochodzenia celulozowego do budowy zewnętrznych przegród budowlanych i stosowania tych materiałów jako dobrych izolacji termicznych. Autorzy wskazują na następujące kierunki dalszych badań:

- optymalizację innych przegród budowlanych i zaproponowanie ich szczegółów połączeń w celu wyeliminowania mostków termicznych w obudowie termicznej budynków;
- analizę masy termicznej projektowanych przegród zewnętrznych, która pozwoli na dokładne modelowanie zapotrzebowania na energię i utrzymania komfortu cieplnego wewnątrz budynków podczas ich użytkowania w określonych lokalizacjach.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania dla całego zespołu interdyscyplinarnego projektu naukowego „Mobilny Proekologiczny Dom z Tektury – prace B+R nad zastosowaniem materiałów pochodzenia celulozowego w architekturze” (nr grantu LIDER/60/0250/L – 11/19/NCBR/2020) za motywację do podjęcia tematyki termoizolacyjności przegród papierowych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 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* 50/2022, DOI: 10.1016/j.jobee.2022.104135
- [2] Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., A review of unconventional sustainable building insulation materials, *Sustainable Materials and Technologies* 4/2015, DOI: 10.1016/j.susmat.2015.05.002
- [3] Noszczyk P., Łątka J., Jasiołek A., Termoizolacyjność materiałów pochodzenia celulozowego – tektura falista i plaster miodu, *Materiały Budowlane* 11/2022, DOI: 10.15199/33.2022.11.44
- [4] PN-EN ISO 6946: 1999: Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania
- [5] PN-EN ISO 6946: 2017-10: Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metody obliczania
- [6] PN-EN ISO 10077-1:2017-10: Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji – Obliczanie współczynnika przenikania ciepła – Część 1: Postanowienia ogólne