

dr inż. Beata Wilk-Słomka¹⁾

ORCID: 0000-0001-9527-3279

dr inż. Janusz Belok¹⁾

ORCID: 0000-0002-8828-5076

dr inż. Bożena Orlik-Koźdoń¹⁾

ORCID: 0000-0002-4905-3037

dr inż. Tomasz Steidl^{1)*}

ORCID: 0000-0002-9277-1392

Badanie efektywności folii refleksyjnych w przegrodach budowlanych w zależności od warunków wymiany ciepła

Testing the effectiveness of foils reflective films in building partitions building envelopes in relation to depending on heat transfer conditions

DOI: 10.15199/33.2023.04.07

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczących oceny skuteczności działania folii refleksyjnych w systemach ściennych i dachowych, pod względem poprawy ich izolacyjności cieplnej. W przypadku wybranych rozwiązań przegród pionowych (z folią i bez folii), stosując metodę skrzynki grzejnej, wyznaczono współczynniki przejmowania ciepła przez powierzchnie z powłokami refleksyjnymi na podstawie pomiaru temperatury i gęstości strumienia ciepła. Celem badań było określenie efektywności działania folii refleksyjnych w określonych warunkach wymiany ciepła, biorąc pod uwagę charakter dominującego źródła ciepła w pomieszczeniu.

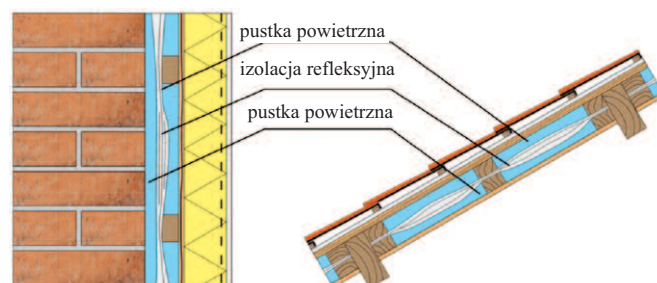
Słowa kluczowe: przepływ ciepła przez przegrodę budowlaną; folia refleksyjna; współczynnik emisyjności; opór przejmowania ciepła; opór cieplny.

Abstract. The authors simply refer to the results of research on the evaluation of reflective technologies in walls and roof systems, in terms of improving the thermal insulation of these elements. For selected vertical partition solutions (with foil, without foil) using the heat box method, heat transfer coefficients for surfaces with reflective coatings were determined based on temperature measurements and heat flux density. The purpose of the study was to determine the effectiveness of reflective foils under specific heat transfer conditions taking into account the nature of the dominant heat source in the room.

Keywords: heat flow through the building envelope; reflective foil; emissivity coefficient; heat flow resistance; thermal resistance.

Zgodnie z definicją RIMA (*Reflective Insulation Manufacturers Association*), izolacja refleksyjna to rodzaj izolacji składającej się z jednej lub kilku warstw o małej emisyjności, ograniczających jedną lub więcej zamkniętych przestrzeni powietrznych [1, 2]. Izolacje refleksyjne są coraz częściej wykorzystywane w wielowarstwowych przegrodach budowlanych i konstrukcjach szkieletowych [3], ze względu na ich zalety związane z obniżeniem wartości współczynnika emisyjności promieniowania cieplnego przegrody ϵ [-] [4, 5], a tym samym zmniejszeniem strat ciepła. Zgodnie z prawem Kirchhoffa promieniowanie padające na powierzchnię ciała może zostać pochłonięte, odbite lub przepuszczone: $\alpha + \rho + \tau = 1$ [6].

Zadaniem izolacji refleksyjnych w przegrodach budowlanych jest ograniczenie wymiany ciepła przez promieniowanie w szczelinie lub szczelinach między izolacją refleksyjną a sąsiadującymi warstwami materiałowymi (rysunek 1) [7, 8]. Przepływ ciepła w drodze promieniowania jest silnie uzależniony od rodzaju systemu grzewczego. W budynkach ogrzewanych tradycyjnie za pomocą centralnego ogrzewania wodnego dominują procesy konwekcji i przewodzenia, a wymiana ciepła w drodze promieniowania ma bardzo niewielki udział. W obiektach ogrzewanych za pomocą promienników



Rys. 1. Przykładowe miejsca wbudowania izolacji refleksyjnej w wielowarstwową przegrodę budowlaną

Fig. 1. Examples of places of embedding reflective insulation in a multi-layer building partition

podczerwienu w miejsce konwekcji wkracza promieniowanie. Dyskusyjna wydaje się opinia o skuteczności stosowania folii refleksyjnych w każdej sytuacji (niezależnie od miejsca montażu i warunków eksploatacji).

W EN 16012:2012+A1:2015 [9] opisano zestaw procedur badawczych służących do określania deklarowanych właściwości cieplnych wyrobów izolacji refleksyjnej. Badania w przypadku tego typu wyrobów są często prowadzone metodą in situ w warunkach najbardziej zbliżonych do warunków panujących w czasie normalnej eksploatacji budynków [10, 11].

W artykule skupiliśmy się na określeniu jakości cieplnej przegrody zewnętrznej, w której zastosowano powłokę refleksyjną. Podczas badań zidentyfikowano wpływ folii re-

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

^{*}) Adres do korespondencji: tomasz.steidl@pols.pl

fleksyjnej na opór przejmowania ciepła w zależności od charakteru procesu wymiany ciepła (konwekcja lub promieniowanie). Ponadto podano wyniki badań weryfikujących współczynnik emisyjności folii stosowanych w budownictwie.

Model matematyczny

Na powierzchni ciała stałego zanurzonego w ośrodku gazowym, w tym na powierzchniach przegród budowlanych, obserwujemy jednoczesną wymianę ciepła przez promieniowanie i konwekcję oraz w niewielkim stopniu przez przewodzenie, a więc złożoną wymianę ciepła. Na potrzeby analizy złożonej wymiany ciepła przyjęto założenie, że gęstość strumienia ciepłego na badanej powierzchni jest równa sumie gęstości strumieni ciepłych przekazywanych przez konwekcję i promieniowanie [12, 13, 14]:

$$q = q_c + q_r \quad (1)$$

gdzie:

q – całkowita gęstość strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę [W/m^2];

q_c – gęstość konwekcyjnego strumienia ciepła [W/m^2];

q_r – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła [W/m^2].

Rozpatrzmy warunki przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody, która wymienia ciepło z powietrzem wewnętrznym przez konwekcję oraz przez promieniowanie z innymi powierzchniami znajdującymi się w pomieszczeniu:

$$q = q_c + q_r = (h_c + h_r) \cdot (t_i - t_s) \quad (2)$$

gdzie:

h_c, h_r – współczynniki przenoszenia ciepła przez konwekcję i promieniowanie [$W/(m^2 \cdot K)$];

t_i – temperatura powietrza wewnętrznego [$^{\circ}C$];

t_s – temperatura powierzchni [$^{\circ}C$].

Najprostsza formuła opisująca konwekcyjny współczynnik przenoszenia ciepła na powierzchni przegrody, wzdłuż której nie zachodzi przepływ powietrza, bazuje na równaniu kryterialnym [15, 16].

$$Nu = 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (3)$$

gdzie:

Nu – liczba Nusselta; Gr – liczba Grashofa; Pr – liczba Prandtla

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2} \quad (4)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie [m^2/s];

l – charakterystyczny wymiar liniowy [m];

β – współczynnik rozszerzalności objętościowej [$1/K$];

ΔT – różnica temperatury [K];

ν – kinematyczny współczynnik lepkości [m^2/s].

$$Pr = \nu/a \quad (5)$$

a – współczynnik wyrównania temperatury (dyfuzyjność cieplna) [m^2/s],

$$a = \lambda/c \quad (6)$$

gdzie:

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$W/(m \cdot K)$];

c – właściwa pojemność cieplna [$J \cdot kg/K$];

ρ – gęstość [kg/m^3].

Podstawiając do równań (4) i (5) wartości liczbowe parametrów λ i ν powietrza w temperaturze $20^{\circ}C$, a następnie otrzymany wynik do równania (3), otrzymamy uproszczony

wzór wyrażający konwekcyjny współczynnik przenoszenia ciepła [5]:

$$h_c = 1,66 \cdot \Delta T^{1/3} \quad (7)$$

Na podstawie badań eksperymentalnych Chu i inni [16] przedstawili zależność współczynnika h_c dla ruchu turbulentnego w temperaturze do $15^{\circ}C$.

$$h_c = \begin{cases} 1,34(\Delta T/H)^{1/4} & \Delta TH^3 < 3,5 \text{ m}^3K \\ 1,33(\Delta T^{1/3} - 0,474/H) & \Delta TH^3 > 3,5 \text{ m}^3K \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:

H – wysokość (wymiar) przegrody [m];

ΔT – różnica temperatury (powierzchnia – powietrze) [K].

Z kolei w pracy [17] autorzy zaproponowali inną zależność wyrażoną wzorem (8):

$$h_c = \left[\left(1,51 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{1/4} \right)^6 + \left(1,33 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{1/3} \right)^6 \right]^{1/6} \quad (9)$$

Natomiast w [6, 18] przedstawiono badania ściany pokrytej powłoką aluminiową w warunkach rzeczywistych, uzyskując zależność:

$$h_c = 1,57 \cdot \Delta T^{0,31} \quad (10)$$

Druga składowa złożonej wymiany ciepła, odnosząca się do wymiany ciepła przez promieniowanie, zależy od różnicy temperatury w skali bezwzględnej i rodzaju powierzchni. Powierzchnia szara emituje promieniowanie cieplne w ilości określonej wzorem na gęstość strumienia ciepła q_r :

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \Delta T^4 \quad (11)$$

gdzie:

ε – współczynnik emisyjności powierzchni;

σ – stała Stefana-Boltzmannia $5,67 \cdot 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$;

ΔT – różnica temperatury powierzchnia – powierzchnia [K].

W przypadku dużych powierzchni równoległych, ograniczających szczelinę powietrzną, wartość radiacyjnego strumienia ciepła wyznacza się, stosując emisyjność zastępczą obliczaną ze wzoru (12):

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (12)$$

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (13)$$

Współczynnik przenoszenia ciepła przez promieniowanie h_r opisuje równanie (14).

$$h_r = \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (t_{s1}^4 - t_{s2}^4)}{(t_{s1} - t_{s2})} \quad (14)$$

gdzie:

t_{s1}, t_{s2} – temperatura powierzchni [K].

Opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej przegrody R_{si} jest wyrażony wzorem:

$$R_{si} = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (15)$$

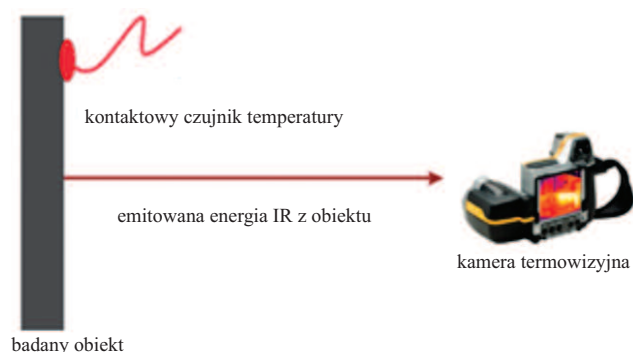
gdzie:

R_{si} – opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej [$(m^2 \cdot K)/W$].

Badania przedstawione w pracach [11, 18, 19] wykazują, że straty ciepła przez przegrodę w dużym stopniu zależą od wartości współczynników przenoszenia ciepła lub oporu przejmowania ciepła powierzchni R_s . Ich wartości charakteryzują się rozrzutem sięgającym $20 \div 40\%$. Ostatecznie na podstawie naszych wcześniejszych doświadczeń, do dalszych obliczeń przyjęto wzory na współczynnik przenoszenia ciepła (7) i (14).

Metoda badań

Współczynnik emisyjności. Pomiary emisyjności powierzchni można przeprowadzić metodą pośrednią i bezpośrednią [6, 19 ÷ 21]. Metoda pomiaru emisyjności powierzchni obiektu polega na porównaniu wyniku pomiaru temperatury kamerą termowizyjną z pomiarem wykonanym za pomocą czujnika kontaktowego (rysunek 2). Wartość emisyjności ręcznie ustawiona w kamerze termowizyjnej reprezentuje emisyjność powierzchni badanego obiektu. Wartość ta powinna być wcześniej rozpoznana przez operatora kamery termowizyjnej. Taki pomiar emisyjności można łatwo przeprowadzić, jeżeli równoległe z kamerą termowizyjną działa stykowy pomiar temperatury.



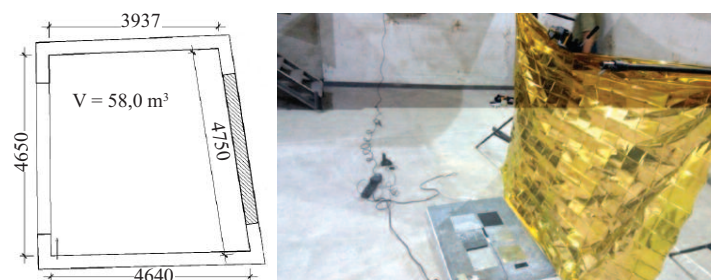
Rys. 2. Schemat pomiaru emisyjności powierzchni z wykorzystaniem kamery termowizyjnej oraz czujnika kontaktowego
Fig. 2. Schematic of emissivity measurement on the surface using a thermal vision camera and a contact sensor

Do wyznaczenia współczynnika emisyjności folii wykorzystano kamerę termowizyjną Flir B-355, która umożliwiła wizualizację pola temperatury badanej powierzchni.

Dane znamionowe:

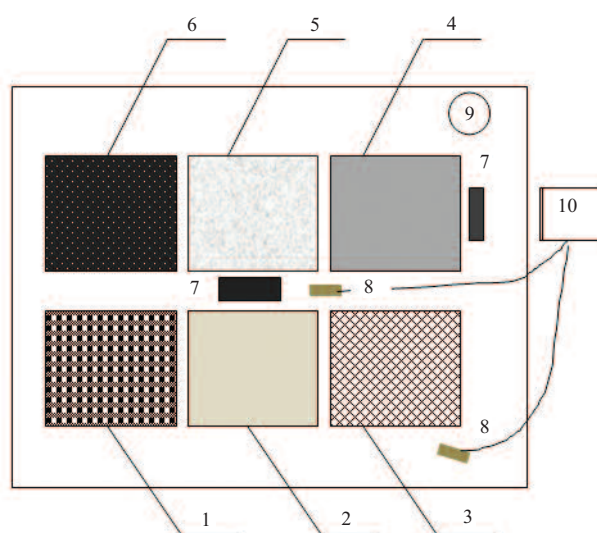
- zakres pomiaru temperatury $-20^{\circ}\text{C} \div 1200^{\circ}\text{C}$;
- rozdzielczość $320 \cdot 240$;
- termiczna zdolność rozdzielcza (przy 30°C) $0;05 \text{ K}$;
- średni błąd pomiaru (zgodnie z danymi producenta) $+ 2\%$ wielkości mierzonej;
- przestrzenna zdolność rozdzielcza $1,36 \text{ mrad}$;
- przedział widmowej czułości $7,5 \div 13 \mu\text{m}$.

Stanowisko badawcze usytuowano w pomieszczeniu ze ścianami betonowymi oraz ścianą z tynkowanymi pustakami ceramicznymi (rysunek 3). Wszystkie ściany miały jednolity szary kolor. W pomieszczeniu nie zlokalizowano żadnych źródeł ciepła; temperatura powietrza wynosiła $16,5 \div 17^{\circ}\text{C}$, a wilgotność względna powietrza mierzona na poziomie ok. 1 m nad poziomem posadzki 50% . Do badań wytypowaliśmy pięć rodzajów folii metalizowanych stosowanych w budownictwie mieszkaniowym (rysunek 4).



Rys. 3. Szkic komory i fotografia stanowiska do pomiaru emisyjności folii metalizowanych

Fig. 3. Sketch of the chamber and photo of the test stand for measuring the emissivity of metallised foils



Rys. 4. Badane folie: 1 – folia zbrojona (dachowa) metalizowana; 2 – folia dachowa metalizowana, 3 – folia zagrzejnikowa; 4 – folia półprzezroczysta metalizowana; 5 – folia aluminiowa, 6 – czarny karton; 7 – taśma wzorcowa o emisyjności $\epsilon = 0,92$; 8 – czujniki Pt100; 9 – płyta stalowa podgrzewana; 10 – rejestrator wielokanałowy typu Almemo 5690-2

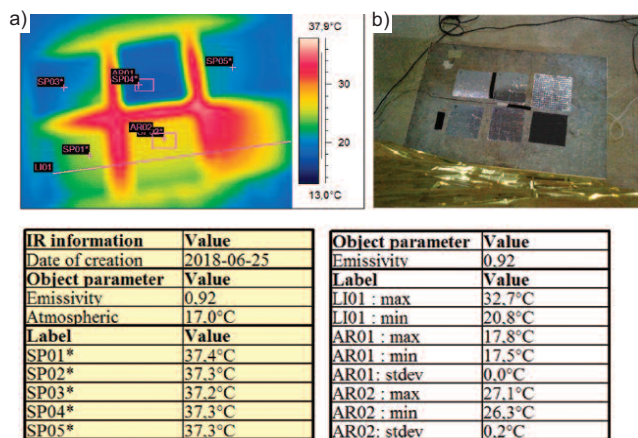
Fig. 4. Tested foils: 1 – metallised reinforced (roof) foil; 2 – metallised roof foil; 3 – radiator foil; 4 – semi-transparent metallised foil; 5 – aluminum foil; 6 – black cardboard; 7 – reference tape with emissivity $\epsilon = 0,92$; 8 – Pt100 sensors; 9 – heated steel plate; 10 – Almemo 5690-2 multi-channel recorder

Stanowisko badawcze składało się z:

- podgrzewanej płyty stalowej z naklejonymi próbkami folii metalizowanych (rysunek 4);
- rejestratora temperatury typu Pt100 z czujnikami kontaktowymi do pomiaru temperatury powierzchni płyty i powietrza;
- folii ekranującej (rysunek 3);
- kamery termowizyjnej umieszczonej na statywie (rysunek 2).

Wyniki pomiaru termowizyjnego przedstawiono na fotografii 1. Temperaturę powierzchni płyty stalowej ustabilizowano na poziomie $+ 37,3^{\circ}\text{C}$.

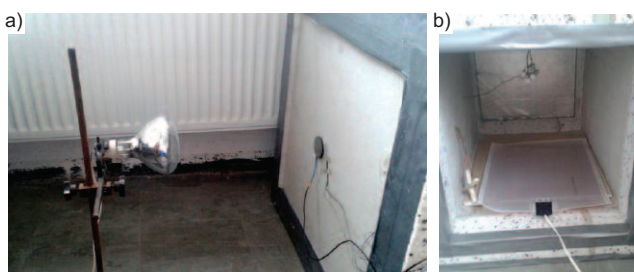
Opór przejmowania ciepła. Pomiary wykonano na stanowisku pomiarowym w Laboratorium Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Badania prowadzono metodą skrzynki grzejnej [12, 22]. Mierzono temperaturę powietrza, powierzchni analizowanych elementów oraz gęstość strumienia ciepła przepływającego przez badane elementy. Pomiary odbywały się z krokiem czasowym wynoszącym 1 h, aż do mo-



Fot. 1. Przykładowy wynik pomiaru termowizyjnego: a) termogram; b) badane próbki

Photo 1. An example of a thermovision measurement result: a) thermogram; b) the tested samples

mentu ustabilizowania się gęstości strumienia ciepła. Badano dwa warianty konstrukcyjne. W pierwszym (W_1) wykorzystano płytę drewnopochodną grubości 1,8 cm o deklarowanej przewodności cieplnej $\lambda = 0,10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Płytę pokryto powłoką refleksyjną o współczynniku emisyjności $\varepsilon = 0,08$ [-], natomiast w wariantcie drugim (W_2) zastosowano wyłącznie płytę drewnopochodną. Oba warianty badano w przypadku dwóch różnych źródeł ciepła, jedno o charakterze konwekcyjnym (fotografia 2b, rysunek 5), a drugie – radiacyjnym. Pomiar przeprowadzono przy różnicy temperatur odpowiednio: $\Delta T = 10\text{K}$ oraz $\Delta T = 15\text{K}$.



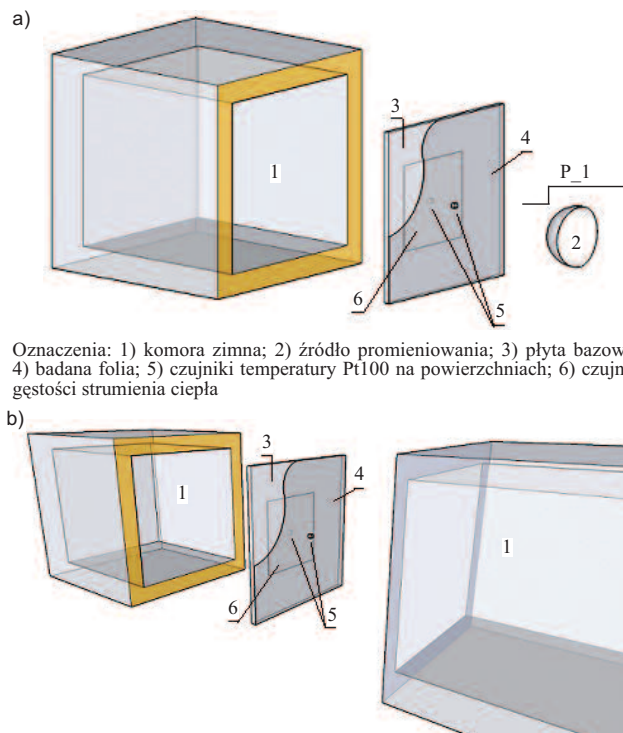
Fot. 2. Pomiar gęstości strumienia ciepła i temperatury powierzchni w przypadku: a) źródła radiacyjnego; b) źródła konwekcyjnego

Photo 2. Measurement of heat flux density and surface temperatures for: a) radiation source; b) convective source

Wyniki badań

Pomiary współczynnika emisyjności ε folii wykazały znaczące różnice pomiędzy nimi. Wartość ε wahała się od 0,08 do 0,45. Uśrednione wyniki 5 serii badań podane zostały w tabeli 1. Średni błąd pomiaru współczynnika emisyjności ε nie przekroczył 5% wartości mierzonej. Do badań oporu przejmowania ciepła przyjęto folię refleksyjną o współczynniku emisyjności $\varepsilon = 0,08$ [-]. W pierwszym etapie badań w skrzynce grzejnej zmierzono opór cieplny (konduktancję) próbek. Na rysunku 6 pokazano przykładowe wyniki pomiarów płyty z folią – W_1. Był on zgodny z wartością oporu cieplnego obliczonego teoretycznie ze wzoru: $R_{mat} = d_{plyty} / \lambda_{plyty} + d_{folii} / \lambda_{folii}$.

W przypadku próbek z powłoką refleksyjną (W_1) oczekiwanym efektem było zwiększenie wartości oporu przejmowania ciepła w odniesieniu do typowych wartości normowych



Oznaczenia: 1) komora zimna; 2) źródło promieniowania; 3) płyta bazowa; 4) badana folia; 5) czujniki temperatury Pt100 na powierzchniach; 6) czujnik gęstości strumienia ciepła

Oznaczenia: 1) komora zimna; 2) komora gorąca; 3) płyta bazowa; 4) badana folia; 5) czujniki temperatury Pt100 na powierzchniach; 6) czujnik gęstości strumienia ciepła

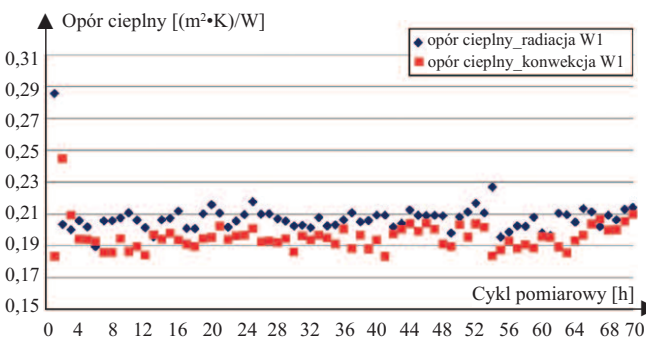
Rys. 5. Schemat stanowiska do badań: a) z radiacyjnym źródłem ciepła: powierzchnia P1, nazwana powierzchnią zewnętrzną, pokryta jest folią i skierowana w stronę źródła ciepła; b) z konwekcyjnym źródłem ciepła

Fig. 5. Scheme of the stand for research with a radiant heat source: a) the surface P1, called the outer surface, is covered with foil and directed towards the heat source; b) convective heat source

Tabela 1. Współczynnik emisyjności ε wybranych badanych folii refleksyjnych

Table 1. Emissivity coefficient ε of selected tested reflective films

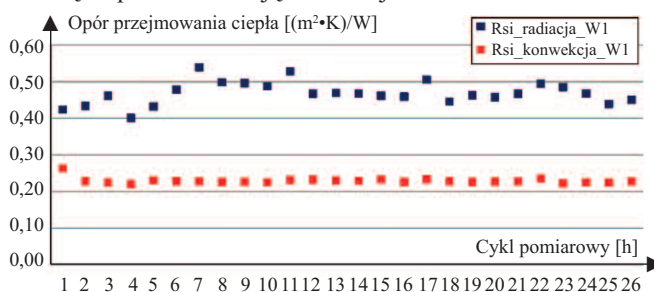
Folia					Materiał
dachowa zbrojona (1)	dachowa typowa (2)	zagrzejnikowa_1 (3)	półprzezroczysta z powłoką aluminiową (4)	aluminowa zwykła (spożywcza) (5)	
0,40	0,45	0,13	0,08	0,15	współczynnik emisyjności ε [-]



Rys. 6. Wyniki pomiarów oporu cieplnego próbek z folią (W_1), z uwzględnieniem charakteru wymiany ciepła

Fig. 6. Measurement results of the thermal resistance of the sample with the foil (W_1), taking into account the nature of the heat exchange

(rysunek 7). Niezależnie od charakteru źródła ciepła nastąpiło zwiększenie oporu przejmowania ciepła: w przypadku źródła konwekcyjnego do wartości średniej 0,22 [(m²·K)/W], a źródła radiacyjnego do 0,47 przy ΔT = 10K. Wraz ze wzrostem różnicy temperatury ΔT = 15K, składowa radiacyjna przyjmowała wartość 0,65 [(m²·K)/W] (tabela 2). W ocenie skuteczności stosowania folii refleksyjnych posłużyliśmy się również dostępnymi modelami empirycznymi do wyznaczenia oporu przejmowania ciepła na powierzchni elementów. Ocenę skuteczności przeprowadzono w przypadku dwóch wariantów próbek (W_1, W_2), przyjmując jako pierwszą wymianę ciepła z dominacją konwekcji.



Rys. 7. Zmiany oporu przejmowania ciepła w zależności od charakteru źródła ciepła w przypadku przegrody z folią (W_1) przy różnicy temperatury ΔT = 10K

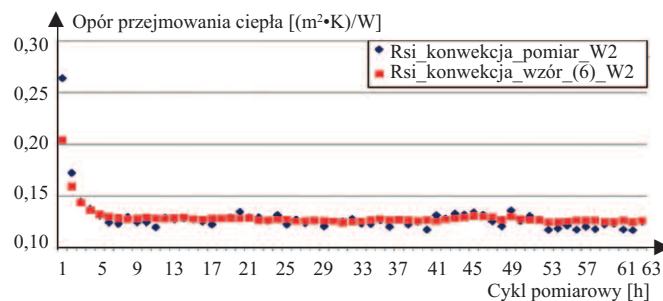
Fig. 7. Changes in heat transfer resistance depending on the nature of the heat source for a partition with foil (W_1) at the temperature difference ΔT = 10K

Tabela 2. Zestawienie wyników badań
Table 2. Summary of research results

Rodzaj próbki	Opór cieplny (materiałowy) R [(m ² ·K)/W]		Opór przejmowania ciepła R _{si} [(m ² ·K)/W]	
	pomiar	obliczenia	konwekcja (ΔT=10K)	radiacja (ΔT ₁ =10K; ΔT ₂ =15K)
Płyta drewno-pochodna	~0,19	0,18*	0,13	0,20; 0,47 model (wzór 6)
Płyta drewno-pochodna + folia	~0,19	0,18*	0,22	0,47; 0,65 model (wzór 13)

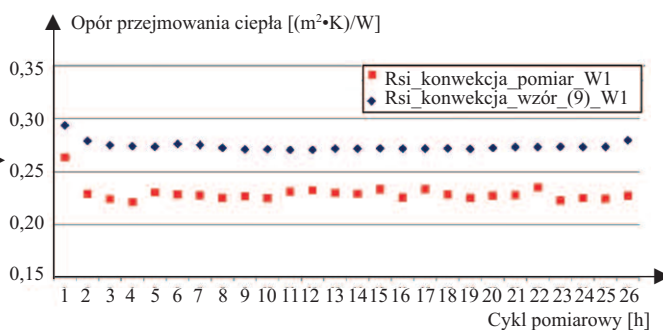
Wyniki obliczeń teoretycznych, wykonanych z wykorzystaniem równania (7), wykazują dużą zgodność (rysunek 8) teoretycznych wartości współczynnika przenoszenia ciepła h_c (R_{si} = 1/h_c) z wartościami uzyskanymi z pomiaru [23, 24]. Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami zmierzonymi i obliczeniowymi jest na poziomie 0,98. Wyniki naszych badań potwierdzają, że spotykane w literaturze zależności empiryczne mogą być bezpiecznie stosowane w rozważaniach teoretycznych. Podobne rozważania (rysunek 9) prowadzone były w przypadku przegrody z powłoką refleksyjną (W_1) wg zależności (9), uwzględniając wpływ tej powłoki na współczynnik przenoszenia ciepła h_c.

Pojawiające się rozbieżności w wartościach oporu przenoszenia ciepła na poziomie 0,05 [(m²·K)/W], pomiędzy pomiarami i obliczeniami, wynikają prawdopodobnie z różnicy między współczynnikiem emisyjności badanej folii refleksyjnej i powłoki aluminiowej prezentowanej przez równanie (10). Celowo przeprowadziliśmy pomiar współczyn-



Rys. 8. Porównanie wyników pomiarów w przypadku próbki bez folii (W_2) z wartościami obliczonymi ze wzoru (6) w przypadku konwekcyjnego źródła ciepła

Fig. 8. Comparison of the measurement results for the sample without foil (W_2) with the values calculated from the formula (6) for a convective heat source



Rys. 9. Porównanie wyników pomiaru w przypadku próbki z folią (W_1) z wartościami obliczonymi ze wzoru (10) przy konwekcyjnym źródle ciepła

Fig. 9. Comparison of the measurement results for the sample with foil (W_1) with the values calculated from the formula (10) for a convective heat source

nika emisyjności wybranych folii, aby wykazać istotne różnice w parametrze charakteryzującym materiał określany jako „refleksyjny”.

Podsumowanie




- W przypadku obu wariantów próbki (W_1, W_2), niezależnie od źródła ciepła, mierzony opór cieplny był na stałym poziomie 0,19 [(m²·K)/W].

- Wielkością, którą należy się posługiwać przy ocenie skuteczności działania folii refleksyjnych, jest współczynnik emisyjności (tabela 1). Należy zaznaczyć, że wartość współczynnika emisyjności ε przekłada się na opór cieplny przegrody. Zależy on od określonej wymiany ciepła na powierzchni elementu z warstwą folii oraz od sposobu wbudowania folii w analizowaną przegrodę, np. ściana szczelinowa czy przegroda z systemem barier radiacyjnych.





- Wykorzystując symulację komputerową, oszacowano efekty stosowania izolacji radiacyjnej w przypadku różnych konstrukcji przegrody i różnego miejsca jej lokalizacji w przegrodzie. W obliczeniach [18, 23] posłużono się wartością emisyjności uzyskaną w badaniach (ε = 0,08). Tabela 3 zawiera zestawienie wyników symulacji pokazujących zmianę gęstości strumienia ciepła z folią refleksyjną i bez folii, przy tej samej grubości i rodzaju materiałów. Efektem stosowania folii refleksyjnych jest znaczne zmniejszenie udziału radiacyjnego strumienia ciepła w całkowitej wymianie ciepła przez

Tabela 3. Efekt cieplny stosowania folii refleksyjnej w trzech przykładowo wybranych układach konstrukcyjnych ścian

Table 3. The thermal effect of using reflective film in three exemplary selected structural arrangements of walls

Parametr			
Szczelina bez folii refleksyjnej przy grubości szczeliny ok. 2 cm			
q_{tot} [W/m ²]	7,51	7,42	33,56
q_r [W/m ²]	6,31	6,19	24,05
Udział % strumienia radiacyjnego	84,09	83,42	71,66
Szczelina z folią radiacyjną od strony płaszczyzny ściany			
q_{tot} [W/m ²]	6,95	6,91	27,63
q_r [W/m ²]	1,70	1,29	4,03
Udział % strumienia radiacyjnego	24,51	18,739	14,58
Efekt końcowy wprowadzenia folii refleksyjnej do konstrukcji przegrody			
Zmiana % q_{tot} wywołana wprowadzeniem folii radiacyjnej	7,40	6,79	17,65

Oznaczenia:

 tynk/płyta elewacyjna;  niewentylowana szczelina powietrzna;
 mur z pustaka ceramicznego;  izolacja termiczna.

szczelinę. W odniesieniu do całej przegrody zmiana całkowitego strumienia ciepła kształtuje się na poziomie 7% w przypadku konstrukcji dobrze zaizolowanej cieplnie i 18% w przypadku konstrukcji pozbawionej izolacji termicznej. Sytuacja ta wynika ze zmiany rozkładu temperatury w przekroju przegrody po zastosowaniu folii.

Przedstawiony model **przepływu energii** w postaci promieniowania jest bardzo uproszczony, ale jednocześnie bardzo zbliżony do procesów rzeczywistych. Zjawiska pochłaniania i odbicia zależą w dużym stopniu od rodzaju powierzchni, przy czym decydujące znaczenie ma jej emisyjność.

W przegrodach z klasyczną warstwą termoizolacyjną wprowadzenie folii refleksyjnej ma mniejsze znaczenie w redukcji strat ciepła niż w przypadku przegród nieocieplonych. Wykazany efekt wpływu folii radiacyjnej na całkowitą izolacyjność przegrody odnosi się do ekstremalnych warunków temperatury ($t_e = -20^\circ\text{C}$, $t_i = 20^\circ\text{C}$). W przypadku mniejszej różnicy temperatury efekt wywołany wprowadzeniem folii ulegnie zmianie ze względu na zmianę rozkładu temperatury w przegrodzie.

Przy obecnych wymaganiach dotyczących izolacyjności cieplnej przegród coraz większego znaczenia nabiera udział oporu przyjmowania ciepła w wartości całkowitego oporu cieplnego przegrody. Wpływ folii refleksyjnej jest zauważalny w sumarycznym oporze cieplnym przegrody m.in. jako zmiana oporu przyjmowania ciepła na powierzchni ograniczającej szczelinę powietrzną w konstrukcji ściany. Folia ułożona na chłodniejszej bądź cieplejszej powierzchni wydzielającej szczelinę powietrzną zwiększa opór przyjmowania ciepła i tym samym poprawia parametry cieplne całej przegrody.

Literatura

- [1] Martin J, Tenpierik Evert Hasselaar. Reflective multi-foil insulations for buildings: A review. *Energy and Buildings*. 2013; 56: 233 – 243.
- [2] Schaub M, Kriegel M, Brandt S. Experimental investigation of heat transfer by unsteady natural convection at a vertical flat plate; *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 136: 1186 – 1198.
- [3] Sau Wai Lee, Chin Haw Lim, Elias Ilias Bin Salleh. Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 65: 643 – 661.
- [4] Orlik-Koźdoń B, Belok J. Experimental and numerical study on the effective thermal conductivity of channel thermal insulation plate; *-Int. J. Heat Mass Transf.* 2017; 106: 1097 – 1106. bibliogr. 48 poz.
- [5] Vereecken E, Janssen H. A determination methodology for the spatial profile of the convective heat transfer coefficient on building components; *Indoor and Built Environment*. 2018; 27 issue: 4: 512 – 527.
- [6] Panigrahi PK, Nigam NC. Emissivity measurement. *Heat and Mass Transfer*.
- [7] Al-Hazmy M: Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks; *Energy and Buildings*. 2006; Volume 38. Issue 5: 515 – 521.
- [8] Joudi A. Harald Svedung, Mathias Cehlin, Mats Rönnelid: Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*. 2013; Volume 103: 562 – 570.
- [9] EN 16012:2012+A1:2015 Izolacja cieplna budynków. Wyroby do izolacji refleksyjnej. Określanie deklarowanych cieplnych właściwości użytkowych.
- [10] Belusko M, Bruno F, Saman W. Investigation of the thermal resistance of timber attic spaces with reflective foil and bulk insulation. *heat flow up Applied Energy*. 2022; 88. Issue 1: 127 – 137.
- [11] Hernández-Pérez I, Álvarez G, Xamán J, Zavala-Guillén I, Arce J, Simá E. Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components-A review. *Energy and Buildings*. 2014; 80: 81 – 105.
- [12] Experiment 2. India; http://home.iitk.ac.in/~panig/ME341_EXP2.pdf.
- [13] Fathaliana A, Kargarsharifabadab H. Actual validation of energy simulation and investigation of energy management strategies (Case Study: An office building in Semnan. Iran). *Case Studies in Thermal Engineering*. 2018; volume 12: 510 – 516.
- [14] Fisher DE. An Experimental Investigation of Mixed Convection Heat Transfer in a Rectangular Enclosure. PhD Thesis. University of Illinois. 1995. Urbana USA.
- [15] Hamed H. Saber: Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications; *Building and Environment*. 2012; 52: 32 – 44.
- [16] Shi-Jie C, Hua-Yan D. Investigation of temperature regulation effects on indoor thermal comfort, air quality, and energy savings toward green residential buildings. *Science and Technology for the Built Environment*. 2019; 25(3): 309 – 321.
- [17] Chen HY, Chen C. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer. *Construction and Building Materials*. 2016; Volume 126: 130 – 137.
- [18] Clark JD. Modeling of transport processes for the reduction of energy use in commercial buildings. 2013. repositories.lib.utexas.edu.
- [19] Honner M, Litoš P, Švantner M. Thermography analyses of the hole-drilling residual stress measuring technique; *Infrared Physics & Technology*. 2004; Volume 45. Issue 2: 131 – 142.
- [20] ISO 6781 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method.
- [21] Theodore L Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt: Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer. 1st Edition. Global Edition. 2017.
- [22] EN-ISO 8990:2007. Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box.
- [23] Asadi S, Hassan MM. Evaluation of the thermal performance of a roof-mounted radiant barrier in residential buildings: Experimental study. 2017. *Energy and Buildings*. 150. pp. 546-557.
- [24] Beausoleil-Morrison I. The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces; *Building and Environment*. 2002; volume 37. Issues 8-9: 791 – 806.

Przyjęto do druku: 09.02.2023 r.