

# FAKTYCZNA IZOLACYJNOŚĆ TERMICZNA KASETOWEJ OBUDOWY HAL PRZEMYSŁOWYCH

## *THE ACTUAL THERMAL RESISTANCE OF CASSETTE WALL OF INDUSTRIAL BUILDING*

TOMASZ KISILEWICZ

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ

### STRESZCZENIE

W rozdziale poddano analizie obliczeniowej typowy przekrój kasetowej ściany budynków przemysłowych. Izolacja termiczna przegrody w tym chętnie stosowanym rozwiązaniu jest z trzech stron zamknięta w metalowej kasecie. W niniejszym tekście dowiedziono, że – ze względu na dysproporcję pomiędzy przewodnością cieplną stali i materiałem izolacji termicznej – blachy kaset w zaskakująco wyraźny sposób obniżają izolacyjność całej przegrody zewnętrznej.

### ABSTRACT

The typical cross-section of cassette wall of industrial building was analyzed. In this willingly applied solution, three sides of thermal insulation are wrapped in steel. It was shown that due to the disparity of thermal conductivity between steel and thermal insulation, steel cassette sheets in a surprisingly significant way decrease the actual thermal resistance of external wall.

### 9.1. Wprowadzenie

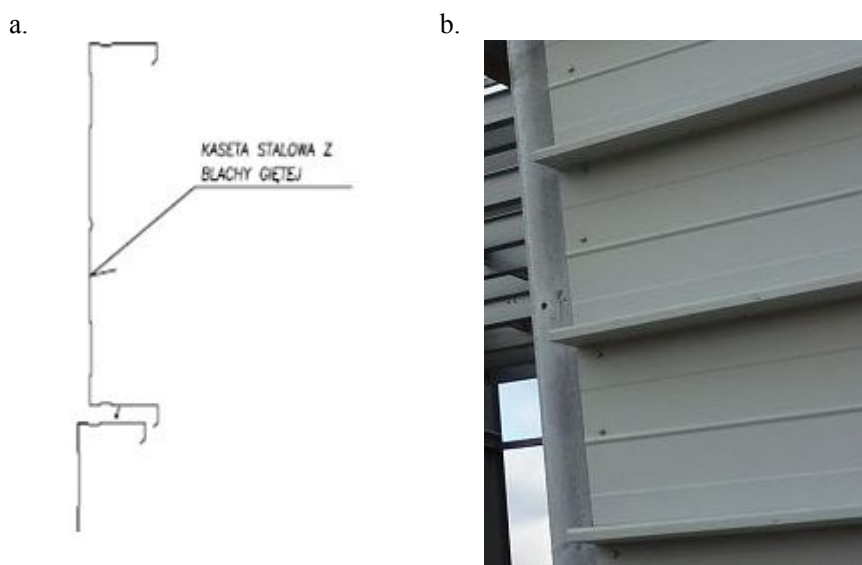
Wymagania dotyczące izolacyjności termicznej zewnętrznej obudowy ogrzewanych budynków, zgodnie z aktualnymi standardami środowiskowymi, są wysokie. Taki stan nie wiąże się z żadnym oporem kręgów projektowych czy wykonawczych. Użytkownicy natomiast interesują się zazwyczaj właściwościami budynków ze względu na koszt ich eksploatacji, komfort termiczny użytkownika, odporność na powstanie pleśni, występowanie zawilgocenia itp. Podstawowe kwestie związane z oporem cieplnym obudowy są wynikiem doboru rodzaju i grubości izolacji termicznej. Można je łatwo zrozumieć i poprawnie ocenić, nawet bez specjalnego przygotowania i bez stosowania bardziej zaawansowanych narzędzi. Więcej problemów nastroczają jednak różnego rodzaju niejednorodności przegród zewnętrznych, nazywane ogólnie mostkami termicznymi. Mają one na przykład postać kombinacji kilku różnych materiałów czy zaburzeń geometrycznych przegrody. Znaczenie mostków termicznych dla bilansu cieplnego budynków ulegało w miarę upływu czasu istotnym zmianom. W przypadku starych, źle izolowanych obiektów wpływ mostków na straty ciepłe z budynku był nieznaczny, natomiast dla użytkownika dotkliwy mógł być efekt zbyt niskiej lokalnie temperatury i związanych z tym problemów natury wilgotnościowej. W przypadku współczesnych przegród, o bardzo dużym oporze cieplnym, znaczenie mostków cieplnych ulega gwałtownej zmianie. Sumaryczny udział strat ciepła przez mostki, w odniesieniu do strat przez typowy przekrój dobrze zaprojektowanej przegrody, sięga co najmniej kilkunastu, a częściej nawet kilkudziesięciu procent. Natomiast błędy projektowe lub wykonawcze mogą ten wpływ łatwo podwyższyć do 100% i więcej.

Specyficzny i bardzo silny efekt mostkowy jest związany z zastosowaniem materiałów o silnie zróżnicowanej przewodności cieplnej. Współczynnik przewodzenia ciepła standardowego materiału izolacji termicznej ma wartość zbliżoną do  $0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , podczas gdy według PN-EN 12524 [1] wartość tego współczynnika dla zwykłej stali budowlanej wynosi aż  $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  – czyli jest on większy 1250 razy. Jeśli więc nawet udział geometryczny stali w przekroju przegrody będzie bardzo niewielki, to termiczny efekt jej obecności będzie zwykle bardzo istotny dla całej przegrody.

### 9.2. Kasetowa konstrukcja obudowy hal przemysłowych

Przykładem przegrody o mieszanej, stalowo-izolacyjnej budowie jest system kasetowych obudów hal przemysłowych. Poziome metalowe kasety (rysunek 9.1), zamocowane do monolitycznej albo szkieletowej warstwy konstrukcyjnej, stanowią konstrukcję wsporczą izolacji termicznej i warstwy elewacyjnej. Blachy kaset łączą się ze sobą bezpośrednio, poziome półki zachodzą jedna na drugą, a między nimi stosowane są piankowe przekładki uszczelniające miejsce styku. Po częściowym lub całkowitym wypełnieniu kaset materiałem izolacyjnym, ściana jest osłaniana warstwą elewacyjną, zwykle w postaci blachy trapezowej. Blacha elewacyjna jest mocowana do wywiniętej półki kaset wkrętami.

Wspomniane wyżej przekładki izolacyjne są również stosowane w miejscach styku kaset z główną konstrukcją ściany oraz w miejscach zamocowania warstwy osłaniającej ścianę od zewnątrz do kasety. Obecność przekładek w znacznej mierze utrudnia przepływ ciepła między kasetami a wewnętrzną konstrukcją budynku i warstwą elewacyjną. Wpływ obecności łączników mechanicznych (wkrętów) sprowadza się do punktowych (trójwymiarowych) mostków termicznych i ze względu na trudności obliczeniowe w 3D jest zwykle pomijany – nie wykonuje się symulacji, które potwierdziłyby prawidłowość takiego podejścia.



Rys. 9.1. a) Przykład ukształtowania kasety, b) Fragment ściany osłonowej szkieletowego budynku z kasetami stalowymi (jeszcze bez izolacji termicznej)

Dodatkową trudność w ocenie energetycznej kasetowej przegrody stanowi sposób jej osłonięcia od warunków zewnętrznych. Jak zasygnalizowano wyżej, w budynkach przemysłowych stosowana jest chętnie blacha trapezowa, ułożona prostopadłe do kaset. Ze względu na dyfuzję pary wodnej przez ścianę budynku oraz z praktycznych powodów wykonawczych związanych z obecnością fal, warstwa elewacyjna nie zamyka zwykle szczelnie przegrody. Pod blachą powstaje więc wentylowana szczelina, w której możliwy jest ruch powietrza. Zgodnie z praktyką obliczeniową wskazaną w PN-EN 6946 [2], w dobrze wentylowanej szczelinie przyjmuje się obecność środowiska zewnętrznego, ale obliczeniowy opór przyjmowania ciepła jest taki jak w środowisku wewnętrznym. Brak zamkniętej szczeliny powietrznej tylko w niewielkim stopniu obniża opór cieplny całej przegrody.

Poniżej pokazano dwa przykłady rozwiązań zastosowanych w obudowie rzeczywistych obiektów przemysłowych wraz z wynikami obliczeń ich faktycznej izolacyjności termicznej.

### **9.3. Izolacyjność termiczna ściany kasetowej 120 mm z izolacją o grubości 100 mm**

Przedmiotem badań jest powtarzalny moduł ściany złożony ze stalowych kaset wypełnionych materiałem izolacji termicznej, osłoniętych od zewnątrz powietrzną szczeliną wentylowaną i blachą trapezową.

Obliczenia wykonano przy użyciu programu symulacyjnego THERM i przy założeniu dwuwymiarowego przepływu ciepła przez przegrodę. Metoda obliczania współczynnika przenikania ciepła dla złożonych ustrojów z wielowymiarowym przepływem ciepła jest określona przez szereg wzajemnie

powiązanych norm. Sposób obliczania charakterystyki mostków liniowych przedstawiono w PN-EN ISO 10211-2 [3].

Zgodnie z aktualną praktyką obliczeniową, wpływ mostka termicznego na całość strat ciepłych budynku uwzględnia się, sumując zebrane po powierzchni straty ciepłe wynikające z wartości współczynnika przenikania ciepła oraz dodatkowe straty ciepłe zebrane na całej długości mostka liniowego [4]. Jednak ze względu na specyfikę analizowanej przegrody i strukturalny charakter mostków wywołanych obecnością stalowych kaset, zdecydowano się – dla potrzeb niniejszego artykułu – uwzględnić wpływ mostków na wartość skorygowanego współczynnika przenikania ciepła  $U_c$ . Podobnie uwzględnia się, biorąc pod uwagę wskazania PN-EN 6946 [2], straty ciepłe wywołane obecnością łączników mechanicznych oraz efekty spowodowane nieciągłością warstwy izolacji termicznej. Zgodnie z przyjętym podejściem, efekt obecności intensywnego mostka termicznego będzie pokazany jako wzrost wartości średniego, skorygowanego współczynnika przenikania ciepła.

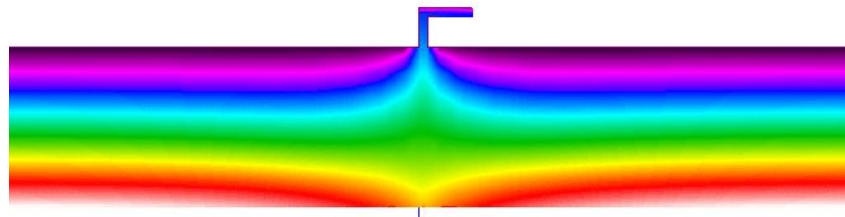
Pierwszy analizowany przypadek to kasetka o wysokości 600 mm i szerokości półki 120 mm, wypełniona jednak izolacją termiczną tylko częściowo, do grubości 100 mm. Przyjęcie w projekcie hali cieńszej, niż pozwalała na to kasetka, grubości izolacji wynikało być może ze względów oszczędnościowych i fałszywego przekonania, że jest to wystarczająca szerokość tej warstwy. Grubość blachy kaset wynosi 0,75 mm. Ze względu na modułowy charakter ściany, przedmiotem symulacji jest jej powtarzalny wycinek o wysokości 600 mm, w środku którego znajdują się dwie półki kaset. Założono, że pod osłonową blachą trapezową powstaje dobrze wentylowana szczelina powietrzna.

Do obliczeń przyjęto następujące wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla podstawowych materiałów składowych ściany:

- stal:  $\lambda = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,
- wełna mineralna:  $\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,
- uszczelki (dwa rodzaje):  $\lambda = 0,036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  i  $0,052 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Warunki brzegowe, zgodnie z PN-EN ISO 6946 i PN-EN ISO 10077-1, wynoszą:

- po stronie wewnętrznej  $R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,
- pod trapezową blachą osłonową  $R_{se} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .



Rys. 9.2. Rozkład temperatury w postaci kolorowych izoterm w powtarzalnym fragmencie badanej ściany kasetowej bez blachy osłonowej (ze względu na oszczędność miejsca, modelowany fragment ułożono na rysunku poziomo).

Wartość współczynnika przenikania ciepła  $U$  dla pełnego przekroju ściany z izolacją termiczną o grubości 100 mm jest równa  $0,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Wyliczenie nie uwzględnia wpływu mostków. W obliczeniu przyjęto, że nie ma przypadkowych szczelin powietrznych między idealnie ułożonymi płytami izolacji i że są one dobrze dociśnięte do blachy kasety.

Zgodnie z polskimi wymaganiami obowiązującymi w momencie projektowania analizowanego budynku – w tym wypadku przed 1 stycznia 2014 roku – maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła dla ścian w produkcyjnych budynkach ogrzewanych do temperatury z przedziału od  $+8^\circ\text{C}$  do  $+16^\circ\text{C}$  wynosiła  $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Zatem warstwa izolacji o grubości 100 mm teoretycznie ten warunek spełniała. W oryginalnym projekcie nie uwzględniono jednak wpływu stalowych kaset.

Rzeczywisty współczynnik przenikania ciepła  $U_c$  wyliczony w programie komputerowym, z uwzględnieniem dwuwymiarowego przepływu ciepła przez ścianki blaszanych kaset wynosi  $0,76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , co stanowi 230% wartości nominalnej. Przegroda ta nie spełniała więc w rzeczywistości wymagań stawianych przez polskie przepisy budowlane.

#### 9.4. Izolacyjność termiczna ściany kasetowej 150 mm

Drugi analizowany przypadek to kasetka o wysokości 600 mm i szerokości półki 150 mm, wypełniona izolacją termiczną o grubości 150 mm. Grubość blachy kaset wynosi 0,88 mm. Przyjęto, że pod blachą

trapezową powstaje dobrze wentylowana szczelina powietrzna. Do obliczeń numerycznych przyjęto następujące wartości współczynnika przewodzenia ciepła podstawowych materiałów składowych ściany:

- stal:  $\lambda = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,
- wełna mineralna:  $\lambda = 0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,
- uszczelki:  $\lambda = 0,036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

Warunki brzegowe, zgodnie z PN-EN ISO 6946 i PN-EN ISO 10077-1, wynoszą:

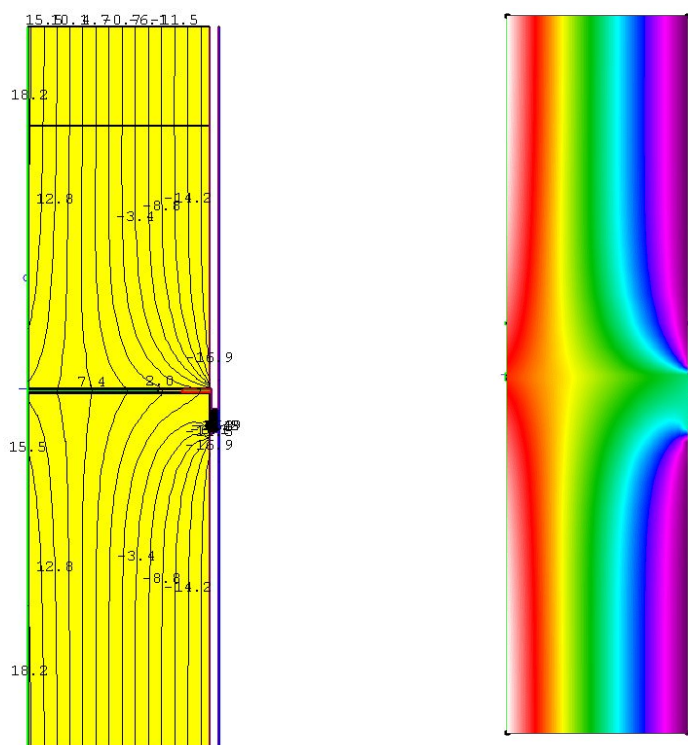
- po stronie wewnętrznej  $R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,
- pod trapezową blachą osłonową  $R_{se} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,

Wartość współczynnika przenikania ciepła  $U$  dla pełnego przekroju ściany z izolacją termiczną o grubości 150 mm jest równa  $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Wyliczenie nie uwzględnia wpływu mostków. Podobnie jak poprzednio, w obliczeniu przyjęto, że nie ma przypadkowych szczelin powietrznych między idealnie ułożonymi płytami izolacji i między wełną a ściankami kasety.

Zgodnie z aktualnymi polskimi wymaganiami, maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła dla ścian w produkcyjnych budynkach ogrzewanych do temperatury z przedziału od  $+8^\circ\text{C}$  do  $+16^\circ\text{C}$  wynosi  $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [5].

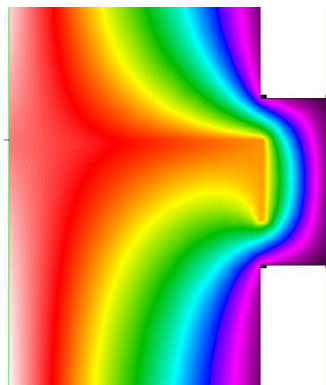
Rzeczywisty współczynnik przenikania ciepła  $U_c$  wyliczony z uwzględnieniem dwuwymiarowego przepływu ciepła przez ścianki blaszanych kaset, wynosi  $0,55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , a więc jest 2,4 razy większy od wartości nominalnej. Przekracza on także aktualne wymagania ochrony cieplnej stawiane przez polskie przepisy budowlane.

Na rysunku 9.3 zaprezentowano rozkład temperatury uzyskany w powtarzalnym module analizowanej przegrody po obliczeniach dwuwymiarowego przewodzenia ciepła. Dobrze widoczne jest tu rozległe zaburzenie wywołane obecnością blach przechodzących na wylot przez całą izolację termiczną. Efektem tego zaburzenia są nie tylko zwiększone straty ciepła, ale także obniżenie temperatury wewnętrznej powierzchni ściany. W obliczeniach symulacyjnych przyjęto, że we wnętrzu hali utrzymywana jest temperatura  $+16^\circ\text{C}$ , a na zewnątrz  $-20^\circ\text{C}$ . W tych warunkach, w środku wysokości kasety, gdzie wpływ stalowych pól nie jest zauważalny, temperatura powierzchni ściany wynosi  $+14,7^\circ\text{C}$ , natomiast w miejscu połączenia kaset tylko  $9^\circ\text{C}$ . Dość znaczna różnica temperatury powierzchni ( $5,7 \text{ K}$ ) może stwarzać problemy w warunkach podwyższonej wilgotności względnej powietrza. Mogą one wystąpić w związku z ewentualnymi mokrymi procesami technologicznymi w przemyśle.



Rys. 9.3. Rozkład izoterm w analizowanym fragmencie ściany kasetowej z blachą osłonową; po lewej stronie izotermi w formie linii, po prawej – izotermi w postaci kolorów

Istotne są pytania o to, czy i w jaki sposób można ograniczyć wpływ przewodzenia przez poziome półki kaset, oraz czy można uzyskać wartość współczynnika przenikania, która spełnia aktualne wymagania techniczne.



Rys. 9.4. Fragment symulowanego odcinka ściany, w którym zastosowano nakładkę izolacyjną z wełny mineralnej o grubości 4 cm i długości 10 cm

Na rysunku 9.4 przedstawiono rozkład izoterm w ścianie, w której zewnętrzny fragment kaset osłonięto paskiem izolacji termicznej o grubości 4 cm i długości 10 cm. Ta niewielka ilość materiału izolacyjnego dość skutecznie radzi sobie z ograniczeniem strumienia ciepłego przewodzonego przez kasety. Wartość średniego współczynnika przenikania ciepła tego wariantu ściany zmniejsza się do  $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , a więc spełnia obecne wymagania formalne. Minimalna temperatura powierzchni wzrasta do poziomu  $+12,2^\circ\text{C}$ .

### **9.5. Podsumowanie**

Ogromna dysproporcja w przewodności cieplnej, która występuje w przypadku metali i innych materiałów budowlanych, może być źródłem istotnych praktycznych problemów z izolacyjnością termiczną przegród i spełnieniem wymagań formalnych. Bardzo niewielki – w sensie geometrycznym – udział elementów stalowych w przekroju ściany kasetowej ponad dwukrotnie zwiększa przepływ ciepła przez te przegrody. Lekceważenie tego wpływu jest więc w projektowaniu niedopuszczalne.

Poprawa izolacyjności kasetowej przegrody może polegać na lokalnym odizolowaniu blach kasety od kontaktu termicznego ze środowiskiem zewnętrznym. Jest to osiągalne dzięki użyciu wąskich wkładek izolacyjnych w obszarze półek kasety. Bardziej kosztowne, ale także znacznie bardziej efektywne dla całości strat ciepłych byłoby zastosowanie ciągłej warstwy izolacji pomiędzy kasetami a warstwą elewacyjną.

### CYTOWANE NORMY I PRZEPISY BUDOWLANE:

- [1] PN-EN 12524:2003 *Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe – Tabełaryczne wartości obliczeniowe.*
- [2] PN-EN ISO 6946 *Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.*

- [3] PN-EN ISO 10211-2 *Mostki cieplne w budynkach – Obliczanie strumieni cieplnych i temperatury powierzchni – Część 2: Liniowe mostki cieplne.*
- [4] PN-EN ISO 13789:2008 *Cieplne właściwości użytkowe budynków – Współczynniki przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację – Metoda obliczania.*
- [5] *Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.*