

Ocena mostków termicznych w aspekcie cieplno-wilgotnościowym – studium przypadku

Assessment of thermal bridges in terms of heat and humidity – a case study



dr inż. Krzysztof Pawłowski, prof. PBŚ

Politechnika Bydgoska,
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
krzypaw@pbs.edu.pl
ORCID: 0000-0002-6738-5764

Streszczenie

Opisano zjawisko mostka termicznego (definicje, przykłady, konsekwencje, metody obliczeń i oceny). Zdefiniowano podstawowe parametry opisujące mostki termiczne w aspekcie cieplno-wilgotnościowym. Praktyczną część artykułu stanowią wariantowe obliczenia numeryczne parametrów fizy-

kalnych połączenia ściany zewnętrznej z płytą balkonową (w różnych wariantach obliczeniowych) oraz wskazanie jego poprawnych (preferowanych) rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych według autorskiego algorytmu. Na podstawie obliczeń i analiz sformułowano wnioski praktyczne.

Słowa kluczowe mostek termiczny, parametry cieplno-wilgotnościowe, kształtowanie układów materiałowych mostków termicznych

Abstract

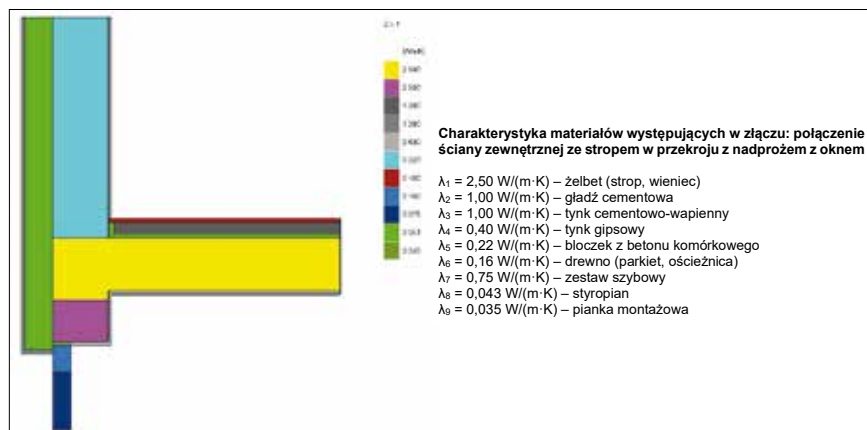
Described is the thermal bridge phenomenon (definitions, examples, consequences, calculation and assessment methods). The basic parameters describing thermal bridges are defined in terms of thermal and moisture properties. The practical part of the article consists of variant numerical calculations of the physical parameters of the con-

nection between the external wall and the balcony slab (in various calculation variants) and the indication of its correct (preferred) structural and material solutions according to the author's algorithm. Based on the conducted calculations and analyses, practical conclusions are drawn.

Keywords thermal bridge, thermal and humidity parameters, shaping of thermal bridge material systems

WPROWADZENIE

W literaturze przedmiotu występują różne definicje mostków termicznych (cieplnych). W pierwszej polskiej publikacji szerzej podejmującej problematykę fizyki budownictwa S. Kołodziejczyk [1] użył terminu „pomost cieplny” na oznaczenie mostka termicznego całkowitego. W. Żenczykowski [2] opisał mostki termiczne (cieplne) jako fragmenty konstrukcji wykonane z materiałów o wyższych wartościach współczynników przewodności ciepła λ (rys. 1).



Rys. 1. Charakterystyka mostka cieplnego

Rys. autora



Według normy PN-EN ISO 10211-1 [3] mostek cieplny to część budynku, w której składnią jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez:

- całkowite lub częściowe przebiecie obudowy budynku przez materiały o innej przewodności cieplnej;
- modyfikację grubości warstw materiału;
- różnicę między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami przegród, np. w przypadku połączeń ściana/podłoga/sufit.

W ujęciu praktycznym mostki cieplne to miejsca w obudowie zewnętrznej, w których obserwuje się obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni i wzrost gęstości strumienia ciepłego w stosunku do pozostałej części przegrody. Najczęściej występują one w ścianach zewnętrznych, głównie w ościeżach otworów okiennych i drzwiowych, na nadprożach okiennych i podokiennikach, na wieńcach w przypadku wspornikowych płyt balkonowych oraz węzłach konstrukcyjnych ścian zewnętrznych ze stropami – zwłaszcza nad piwnicą i pod poddaszem oraz w miejscu słupów w ścianach [4].

Mostki termiczne (złącza budowlane) stanowią integralną część obudowy obiektów. Na etapie projektowania należy dążyć do ograniczenia ich wpływu, zwłaszcza

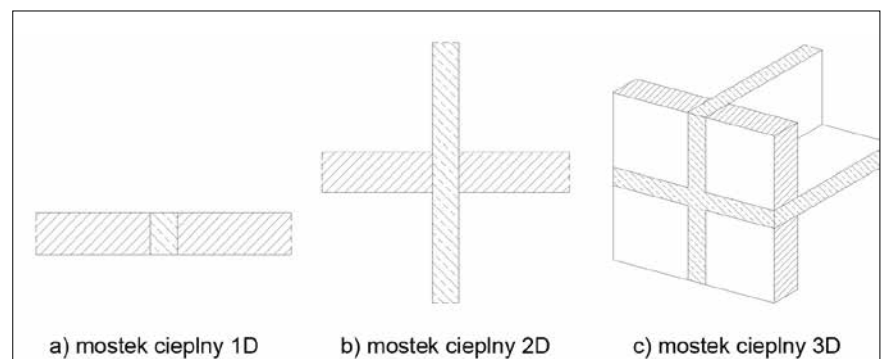
cza w aspekcie cieplno-wilgotnościowym. Zastosowanie profesjonalnych programów komputerowych przeznaczonych do obliczeń przepływu ciepła w polu dwu- i trójwymiarowym powinno być elementem wspomagającym podczas projektowania przegród budowlanych i mostków termicznych. Na podstawie wariantowych obliczeń ich parametrów fizykalnych (cieplno-wilgotnościowych) można wytypować poprawne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe obudowy budynków.

PODZIAŁ I METODY OCENY MOSTKÓW TERMICZNYCH

Mostki termiczne można podzielić na trzy grupy (rys. 2):

- **mostki pierwszego rzędu** – płaskie w obrysie przegrody zewnętrznej (1D);
- **mostki drugiego rzędu** – w miejscu połączenia przegród, w stykach, złączach, narożnikach (2D);
- **mostki trzeciego rzędu** – przestrzenne, zarówno w samej przegrodzie zewnętrznej, jak i ewentualnym złączu przestrzennym tej przegrody z dowiązującymi lub przebiegającymi ją ścianami albo stropami (3D).

Rozwiązaniem problemu mostka termicznego jest określenie rozkładu temperatur w jego obszarze, badanego najczęściej w warunkach ustalonego przepływu ciepła. Ważnym elementem oceny komfortu cieplnego pomieszczenia są temperatury na wewnętrznych powierzchniach mostka.



Rys. 2. Przykładowe mostki termiczne

Aby uwzględnić dodatkowe straty ciepła wywołane jego działaniem, niezbędna jest znajomość rozkładu temperatur na powierzchniach przegród od strony wnętrza.

Prawidłowe obliczenie mostka termicznego polega na:

- podaniu rozkładu temperatur w jego obszarze,
- określeniu temperatury minimalnej na powierzchniach wewnętrznych przegród,
- zbadaniu strefy dodatkowych strat ciepła.

Ze względu na negatywne skutki występowania mostków cieplnych (przede wszystkim dodatkowe straty energii oraz obniżenie temperatury na powierzchni przegrrody) warto wdrożyć następujące zasady:

- dążyć do ograniczenia strat ciepła i ryzyka kondensacji pary wodnej;
- mostki, których można uniknąć, eliminować na etapie projektowania lub budowy;
- mostki, których nie można uniknąć, tak projektować lub ocieplać, aby zminimalizować ich wpływ na straty ciepła i zjawisko kondensacji.

Mostki termiczne ocenia się metodami praktycznymi, takimi jak:

1) ocena eksperymentalna:

- **badania laboratoryjne** – prowadzone z użyciem znormalizowanych metod na dwóch identycznych elementach (jeden z mostkiem, drugi bez); metoda ta ma pewne ogranicze-

nia i służy głównie do wyznaczania punktowych współczynników przenikania ciepła elementów budowlanych;

- **badania in situ** – polegają na pomiarze temperatury środowiska i powierzchni po obu stronach elementu; ze względu na dynamiczne zmiany klimatu (temperatury, wilgotności, wiatru) zmiany temperatury w przegrodzie wykazują przesunięcie fazowe względem warunków zewnętrznych; wiarygodne rezultaty dają jedynie pomiary długotrwałe, a uzyskane średnie współczynniki należy interpretować ostrożnie;

2) ocena modeli teoretycznych (2D lub 3D):

- z użyciem specjalistycznych programów komputerowych;

- na podstawie katalogów mostków cieplnych.

Według pracy [5] dokładność poszczególnych metod wynosi:

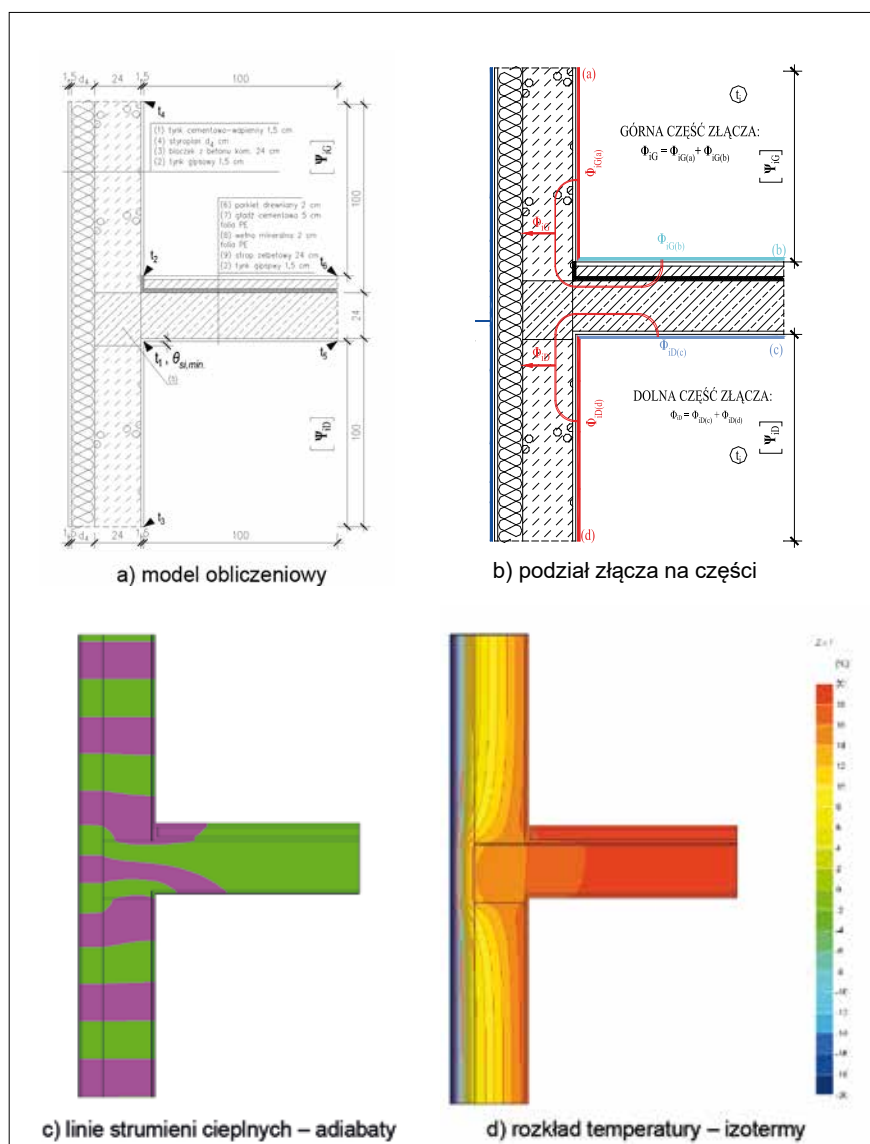
- obliczenia numeryczne: $\pm 5\%$,
- katalog mostków cieplnych: $\pm 20\%$,
- obliczenia ręczne: $\pm 20\%$,
- wartości orientacyjne: 0–50%.

Do podstawowych parametrów charakteryzujących mostki termiczne należą:

- **liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)]** – obliczany na podstawie normy PN-EN ISO 10211:2017 [6] lub przyjmowany zgodnie z wartościami z katalogu mostków cieplnych (np. załącznika do pracy [7]) oraz normy PN-EN ISO 14683:2017 [8];
- **punktowy współczynnik przenikania ciepła χ [W/K]** – wyznaczany według normy PN-EN ISO 10211:2017 [6] lub katalogu mostków cieplnych opartego na danych producentów;

- **czynnik temperaturowy f_{Rsi} ($f_{Rsi(2D)}$ – w polu dwuwymiarowym, $f_{Rsi(3D)}$ – w polu trójwymiarowym)** – określany zgodnie z normą PN-EN ISO 10211:2017 [6] z uwzględnieniem PN-EN ISO 13788:2003 [9], na podstawie temperatury minimalnej w miejscu mostka cieplnego.

Przy obliczaniu strat ciepła przez część obudowy budynku należy stosować wartości gałęziowe (częściowe) współczynnika przenikania ciepła Ψ . W opracowaniach i katalogach mostków cieplnych takich wartości brakuje, co uniemożliwia poprawne wykonanie obliczeń z zakresu fizyki budowli,



Rys. 3. Procedura obliczania parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec

np. współczynnika przenikania ciepła z uwzględnieniem mostków cieplnych U_k . Zwykle podawane są wartości dotyczące całej dodatkowej straty ciepła przez mostek.

W normie PN-EN 12831:2006 [10] wskazano potrzebę podziału tych wartości przy obliczeniach strat ciepła metodą „pomieszczenie po pomieszczeniu”. Norma ta sugeruje, aby wartości całkowite Ψ obliczone według PN-EN ISO 10211-1 [3] dzielić na dwa. Takie uproszczenie jednak często okazuje się błędem. Aby poprawnie wykonać obliczenia dla konkretnych fragmentów budynku, np. poszczególnych ścian, należy precyzyjnie przypisać wartości współczynnika Ψ do gałęzi złącza. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy podział złączy.

Procedura obliczania gałęziowych współczynników przenikania ciepła Ψ polega na:

- wydzieleniu wewnętrznych gałęzi mostka termicznego, przypisaniu warunków początkowych i brzegowych;
- obliczeniu (metodami numerycznymi, z zastosowaniem programu komputerowego) strumieni ciepła płynących przez wydzielone gałęzie (części) mostka;
- obliczeniu współczynników gałęziowych według odpowiednich zależności z zastosowaniem danych dla wydzielonych gałęzi.

Obliczenia i analizy w tym zakresie przedstawiono m.in. w pracy [11].

Wartość współczynnika Ψ [W/(m·K)] jest równa stracie ciepła na 1 m długości elementu budowlanego zawierającego mostek cieplny, zmniejszonej o stratę ciepła, która miałaby miejsce w przypadku braku mostka termicznego. Obliczenie powinno być zgodne ze wszystkimi innymi znormalizowanymi obliczeniami przenikania ciepła przy przyjęciu takich samych warunków brzegowych.

Wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ zależą od sposobu wymiarowania budynku zastosowanego w obliczeniach pola powierzchni, przez którą przepływa strumień ciepły. Dlatego należy podać system wymiarowania, na którym są oparte obliczenia:

- Ψ_i – z zastosowaniem wymiarów wewnętrznych,

Tab. 1. Klasyfikacja wpływu mostków cieplnych na straty ciepła – oprac. autora na podstawie [5]

Klasy wpływu mostka cieplnego oparte na ocenie wartości współczynnika Ψ			
C1	C2	C3	C4
$\Psi_{i,e} < 0,1$	$0,1 \leq \Psi_{i,e} < 0,25$	$0,25 \leq \Psi_{i,e} < 0,5$	$\Psi_{i,e} \geq 0,50$
wpływ pomijany	mały wpływ	duży wpływ	bardzo duży wpływ

- Ψ_{oi} – z zastosowaniem wymiarów osiowych,
- Ψ_e – z zastosowaniem wymiarów zewnętrznych.

Znacząca wartość współczynnika Ψ nie oznacza automatycznie istotnego mostka cieplnego. Zgodnie z definicją wartości Ψ traktowane są jako współczynniki korekcyjne do obliczeń jednowymiarowych strat ciepła, za pomocą których aspekt geometryczny (określony przez przyjęcie wymiarów) powinien być uwzględniony tak samo jak zwiększenie strumienia cieplnego. Przykładową klasyfikację wpływu mostków cieplnych w zależności od wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ (po wymiarach wewnętrznych i zewnętrznych) podano w tab. 1.

Ryzyko rozwoju pleśni w miejscu mostka cieplnego sprawdza się przez porównanie wartości obliczeniowej czynnika temperaturowego $f_{Rsi(2D)}$ w miejscu mostka cieplnego z wartością graniczną (krytyczną) $f_{Rsi(kryt)}$. Jeżeli spełniona jest nierówność $f_{Rsi(2D)} \geq f_{Rsi(kryt)}$, nie występuje ryzyko rozwoju pleśni i grzybów pleśniowych na wewnętrznej powierzchni przegrody.

Czynnik temperaturowy (w miejscu mostka cieplnego) $f_{Rsi(2D)}$ określa się według wzoru:

$$f_{Rsi(2D)} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

gdzie:

$\theta_{si,min}$ – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka cieplnego [°C],

θ_e – temperatura powietrza zewnętrznego [°C],

θ_i – temperatura powietrza wewnętrznego [°C].

Czynnik temperaturowy krytyczny $f_{Rsi(kryt)}$ można określić:

- w sposób uproszczony dla $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\phi_i = 50\%$, $f_{Rsi(kryt)} = 0,72$;

- w sposób dokładny, z uwzględnieniem położenia budynku oraz parametrów powietrza wewnętrznego i zewnętrznego.

Wartość krytyczna czynnika temperaturowego $f_{Rsi(kryt)}$ dla trzeciej klasy wilgotności w pomieszczeniu przy $t_i = 20^\circ\text{C}$ wynosi odpowiednio: dla lokalizacji Bydgoszcz – $f_{Rsi(kryt)} = 0,785$, dla lokalizacji Warszawa – $f_{Rsi(kryt)} = 0,789$.

KSZTAŁTOWANIE UKŁADU MATERIAŁOWEGO MOSTKÓW TERMICZNYCH – STUDIUM PRZYPADKU

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych opracowano algorytm obliczeniowy w zakresie kształtowania układów materiałowych przegród zewnętrznych i ich złączy w aspekcie cieplno-wilgotnościowym – rys. 4.

Kompleksowa ocena jakości cieplnej elementów budynków niskoenerygetycznych obejmuje analizę różnych parametrów fizycznych. Wykonanie szczegółowych obliczeń w programie komputerowym pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników parametrów fizycznych. Ich wartości zależą od użytego materiału budowlanego (konstrukcyjnego), rodzaju i grubości izolacji cieplnej oraz ukształtowania struktury materiałowej analizowanego złącza. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, np. na podstawie PN-EN ISO 14683:2008 [8], staje się nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają one zmiany układów materiałowych ani rodzaju i grubości izolacji cieplnej.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej z płytą balkonową. Dla czterech wariantów przeprowadzono obliczenia numeryczne z zastosowaniem programu TRISCO-KOBRU 86 [12], przyjmując następujące założenia:

- modelowanie złączy wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 10211:2017 [6];

KSZTAŁTOWANIE UKŁADU MATERIAŁOWEGO PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH I ICH ZŁĄCZY

- Przyjęcie wstępnego układu materiałowego złącza budowlanego
- Określenie charakterystyki materiałów występujących w złączu budowlanym – współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]

- Wykonanie obliczeń numerycznych parametrów fizycznych złącza budowlanego
 - modelowanie złącza budowlanego
 - przyjęcie warunków brzegowych: temperatura powietrza wewnętrznego (t_i), temperatura powietrza zewnętrznego (t_e), opory przejmowania ciepła na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody (R_{si} , R_{se})
 - wprowadzenie charakterystyki materiałowej – współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]
- Określenie parametrów fizycznych złącza budowlanego
 - strumień przepływu ciepła przez złącze Φ [W]
 - liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego L^{2D} [W/(m·K)]
 - liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)]
 - gałęziowy współczynnik przenikania ciepła (dla odpowiedniej części złącza) [W/(m·K)]; np. w przypadku połączenia ściany zewnętrznej z oknem przekroju można określić osobno straty ciepła dla ściany zewnętrznej (Ψ_{sc}) oraz okna (Ψ_o)
 - temperatura minimalna w złączu (2D lub 3D) $t_{min}(\theta_{si,min})$ [°C]
 - czynnik temperaturowy $f_{Rsi(2D)}$, $f_{Rsi(3D)}$ [–]

- Kryteria oceny przegród zewnętrznych i ich złączy
 - kryterium cieplne: współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych występujących w złączu U_c [W/(m²·K)], liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)]
 - kryterium wilgotnościowe: minimalna temperatura na wewnętrznej powierzchni złącza budowlanego $t_{min}(\theta_{si,min})$ [°C], czynnik temperaturowy $f_{Rsi(2D)}$, $f_{Rsi(3D)}$ określony na podstawie $t_{min}(\theta_{si,min})$ [°C], analiza możliwości występowania kondensacji międzywarstwowej w przegrodach zewnętrznych i ich złączach

WYBÓR POPRAWNEGO UKŁADU MATERIAŁOWEGO PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH I ICH ZŁĄCZY

Rys. 4. Algorytm kształtowania układu materiałowego przegród zewnętrznych i ich złączy w aspekcie cieplno-wilgotnościowym

- opory przejmowania ciepła (R_{si} , R_{se}) przyjęto zgodnie z PN-EN ISO 6946:2017 [13] przy obliczeniach strumieni cieplnych oraz PN-EN ISO 13788:2003 [9] przy obliczeniach rozkładu temperatur i czynnika temperaturowego $f_{Rsi(2D)}$;
- temperatura powietrza: wewnętrznego $t_i = 20^\circ\text{C}$ (pokój dzienny), zewnętrznego $t_e = -20^\circ\text{C}$ (III strefa);
- wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych λ [W/(m·K)] przyjęto na podstawie tabel z pracy [11];
- ściana zewnętrzna dwuwarstwowa: bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, styropian grafitowy gr. 15 cm; współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej określono według PN-EN ISO 6946:2017 [12] $U_c = 0,162$ W/(m²·K);

Tab. 2. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej z płytą balkonową

Wariant obliczeniowy	Φ [W]	Φ_g [W]	Φ_d [W]	Ψ_i [W/(m·K)]	$\Psi_{i,g}$ [W/(m·K)]	$\Psi_{i,d}$ [W/(m·K)]	$t_{si,min}$ [°C]	$f_{Rsi(2D)}$ [–]
I	30,35	10,37	19,98	0,436	0,097	0,339	10,69	0,767
II	16,30	7,04	9,26	0,084	0,015	0,069	17,13	0,928
III	45,65	24,26	21,39	0,478	0,105	0,373	9,95	0,749
IV	33,39	22,09	11,30	0,172	0,051	0,121	15,92	0,898

Φ – strumień ciepła przepływający przez złącze

Φ_g – strumień ciepła przepływający przez górną część złącza

Φ_d – strumień ciepła przepływający przez dolną część złącza

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła, określony po wymiarach wewnętrznych

$\Psi_{i,g}$ – liniowy współczynnik przenikania ciepła, określony po wymiarach wewnętrznych w odniesieniu do górnej części złącza

$\Psi_{i,d}$ – liniowy współczynnik przenikania ciepła, określony po wymiarach wewnętrznych w odniesieniu do dolnej części złącza

$t_{si,min}$ – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu występowania mostka cieplnego (2D)

$f_{Rsi(2D)}$ – czynnik temperaturowy, określany na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody

- drzwi balkonowe: rama okienna $U_f = 0,855 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, zestaw szybowy dwukomorowy $U_g = 0,503 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;
- łącznik izotermiczny o $\lambda = 0,10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Wyniki obliczeń parametrów fizycznych analizowanych złączy zestawiono w tab. 2.

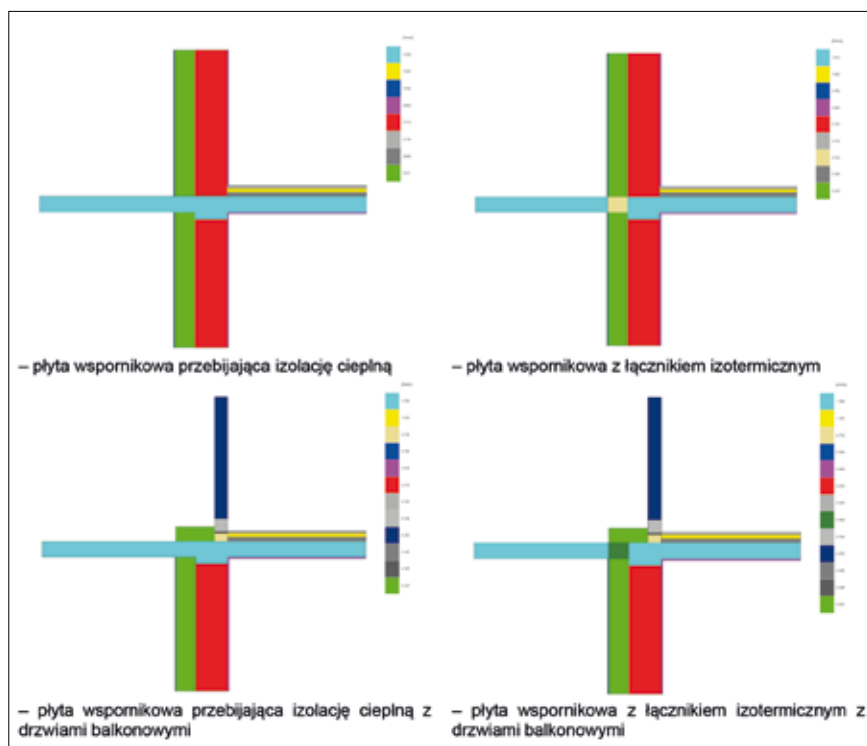
Na podstawie obliczeń (tab. 2) można stwierdzić, że analizowane złącze generuje dodatkowe straty ciepła w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła $\Psi_i = 0,084\text{--}0,478 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Według tab. 1 wpływ analizowanego mostka cieplnego dla wariantu II jest pomijalny, dla wariantu IV jest mały, natomiast dla wariantów I i III jest duży. W wariantach I i III występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej, ponieważ wartość $f_{\text{Rsi}(2D)}$ jest mniejsza od wartości granicznej $f_{\text{Rsi}(kryt)} = 0,785$.

Należy zauważyć, że zastosowanie łącznika izotermicznego w wariantach II i IV obniżyło wartości dodatkowych strat ciepła w złączu w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ i przyczyniło się do podwyższenia temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego w stosunku do typowego złącza (wariant I i III), w którym płyta balkonowa przebija izolację cieplną.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Mostki termiczne (złącza budowlane) stanowią integralną część obudowy budynku i pomijanie ich w obliczeniach cieplno-wilgotnościowych jest nieuzasadnione. Ich parametry cieplno-wilgotnościowe zależą od indywidualnych rozwiązań materiałowych (zwłaszcza rodzaju, grubości i usytuowania materiału termoizolacyjnego czy też zastosowania innowacyjnych rozwiązań technicznych, np. łączników izotermicznych).

Minimalizacja wpływu mostków termicznych polega na ograniczeniu dodatkowych strat ciepła w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ oraz ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej.



Rys. 5. Modele obliczeniowe połączenia ściany zewnętrznej z płytą balkonową

Zasadne staje się prowadzenie dalszych obliczeń oraz opracowanie katalogu mostków termicznych (złączy budowlanych) ze wskazaniem na rozwiązania materiałowe, które mogą być aplikowane do projektów budynków wznoszonych w różnych standardach energetycznych. Warto także sformułować w rozporządzeniu [14] wartości graniczne liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_{max} w celu eliminacji złączy budowlanych, które nie spełniają kryterium cieplnego w postaci: $\Psi \leq \Psi_{\text{max}}$. ■

Literatura

- [1] Kołodziejczyk S., *Fizyka konstrukcji budowlanych*, Łódź: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1962.
- [2] Żenczykowski W., *Budownictwo ogólne*, t. 3, „Ochrona cieplna budynków”, Warszawa: Wydawnictwo Arkady, 1987.
- [3] PN-EN ISO 10211-1:2005/Ap1:2006 Mostki cieplne w budynkach – Strumień cieplny i temperatura powierzchni – Ogólne metody obliczania.
- [4] Pogorzelski J.A., Awksientjuk J., *Katalog mostków cieplnych*, Warszawa: Wydawnictwo ITB, 2003.

- [5] Wouters P. i in., *Cieplno-wilgotnościowa ocena mostków cieplnych*, Warszawa: Wydawnictwo ITB, 2004.
- [6] PN-EN ISO 10211:2017 Mostki cieplne w budynkach – Strumień ciepła i temperatury powierzchni – Obliczenia szczegółowe.
- [7] Pawłowski K., *Projektowanie elementów obudowy budynku w aspekcie fizyki cieplnej budowy*, Warszawa: Grupa Wydawnicza Medium, 2024.
- [8] PN-EN ISO 14683:2017 Mostki cieplne w budynkach – Liniowy współczynnik przenikania ciepła – Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [9] PN-EN ISO 13788:2003 Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- [10] PN-EN 12831:2006 Instalacje grzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowanego obciążenia cieplnego.
- [11] Pawłowski K., *Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Obliczenia cieplno-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy*, Warszawa: Grupa Wydawnicza Medium, 2016.
- [12] Program komputerowy TRISCO-KOBRU 86 [oprogramowanie].
- [13] PN-EN ISO 6946:2017 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- [14] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz.U. z 2022 r. poz. 1225 ze zm.).