

Mariusz KOSIŃ

Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

Krzysztof PAWŁOWSKIUniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

NUMERYCZNA ANALIZA ZŁĄCZA PRZEGRODY ZEWNĘTRZNEJ WYKONANEJ W TECHNOLOGII SZKIELETOWEJ DREWNIANEJ I STALOWEJ

W artykule przedstawiono analizę porównawczą mostka cieplnego połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju z nadprożem okiennym. Rozważono dwa przypadki obejmujące szkieletową konstrukcję drewnianą oraz lekki szkielet stalowy. Na drodze symulacji komputerowej dokonano analizy cieplno-wilgotnościowej badanego złącza przegrody zewnętrznej. Obliczenia numeryczne wykonano w oparciu o MES przy użyciu programu ANSYS.

Słowa kluczowe: lekkie konstrukcje szkieletowe, rozkład temperatur, parametry cieplno-wilgotnościowe, mostek liniowy, metoda elementów skończonych, symulacja numeryczna

WPROWADZENIE

Rozkład temperatur w przegrodach zewnętrznych, których warstwy są jednorodne w poszczególnych przekrojach poprzecznych ściany nie sprawia problemów obliczeniowych. Zastosowanie konstrukcji szkieletowej do budowy ściany wprowadza zaburzenia w rozkładzie temperatur i wymaga wnikliwej analizy [1]. Do określenia parametrów mostków cieplnych i rozkładu temperatur w takiej przegrodzie zasadne jest zastosowanie programów numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych (MES). W niniejszym artykule przedstawiono przykładowe analizy numeryczne dla przegród zewnętrznych wykonanych w technologii szkieletu drewnianego oraz lekkiego szkieletu stalowego, starając się uwydatnić wynikające z rozwiązań konstrukcyjnych różnice w parametrach fizykalnych obu analizowanych konstrukcji ścian.

Celem opracowania było określenie i porównanie obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych złącza przegrody zewnętrznej.

Zakres pracy obejmował wykonanie analizy numerycznej z wykorzystaniem MES w zakresie właściwości cieplno-wilgotnościowych zewnętrznych przegród w technologii szkieletu drewnianego oraz w technologii lekkiego szkieletu stalowego.

1. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO MOSTKA CIEPLNEGO

Charakterystykę materiałową dla analizowanych złączy budowlanych przedstawiono w tabeli 1. Ze względu na znikomy wpływ w obliczeniach dane odnośnie do folii paroprzepuszczalnej i paroizolacyjnej zostały pominięte. Natomiast na rysunkach 1 i 2 pokazano układ materiałowy rozpatrywanych złączy przegród zewnętrznych.

Tabela 1. Współczynniki przewodzenia ciepła dla przyjętych materiałów

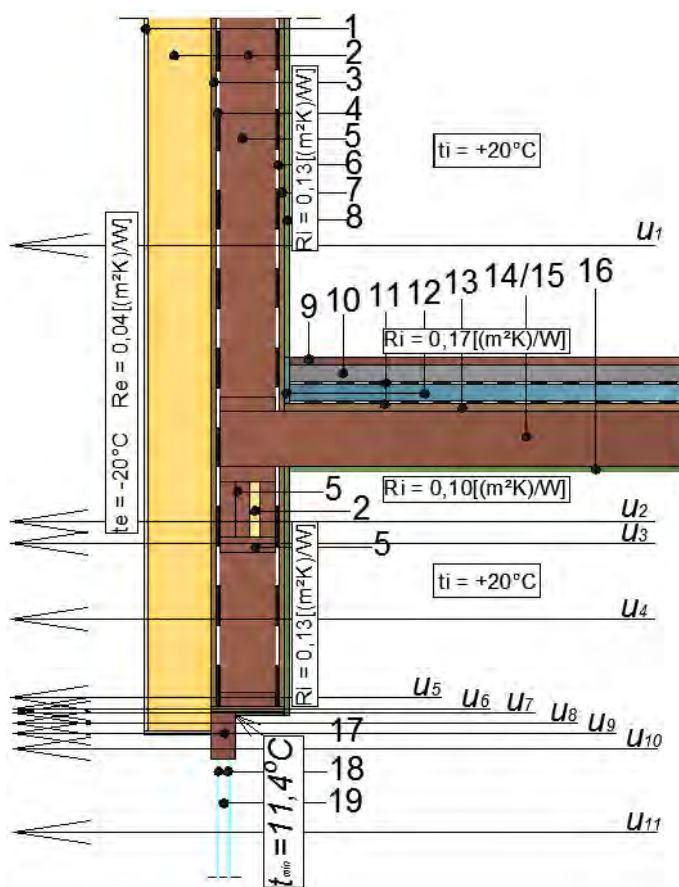
Lp.	Rodzaj materiału	Grubość d [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] ^{1), 2)}
1	Tynk cienkowarstwowy	0,005	0,7
2	Włna mineralna	0,16/0,14 ³⁾	0,035
3	Płyta cementowo-drzazgowa	0,012	0,215
4	Folia paroprzepuszczalna	–	–
5	Profil stalowy C140 / Profil drewniany KVH	0,0015	50 ⁴⁾ / 0,16 ⁵⁾
6	Folia paroizolacyjna	–	–
7	Płyta cementowo-drzazgowa	0,012	0,215
8	Płyta gipsowo-kartonowa	0,0125	0,25
9	Parkiet	0,02	0,16
10	Jastrych	0,05	1
11	Folia PE	–	–
12	Styropian EPS	0,05	0,04
13	Płyta cementowo-drzazgowa	0,02	0,215
14	Profil stalowy C140	0,0015	50
15	Włna mineralna	0,14	0,035
16	Płyta gipsowo-kartonowa	0,0125	0,25
17	Drewniana rama okienna	0,06	0,16
18	Szkło „float”	0,006	1
19	Argon	0,021	0,017

¹⁾ Wartości współczynników przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] przyjęto wg [2, 3],
²⁾ Wartość współczynnika przenikania ciepła okna $U_w = 1,3$ [W/(m²·K)] wg [4],
³⁾ Grubość wełny mineralnej pomiędzy profilami stalowymi,
⁴⁾ Współczynnik przewodzenia ciepła dla profilu stalowego,
⁵⁾ Współczynnik przewodzenia ciepła dla profilu drewnianego

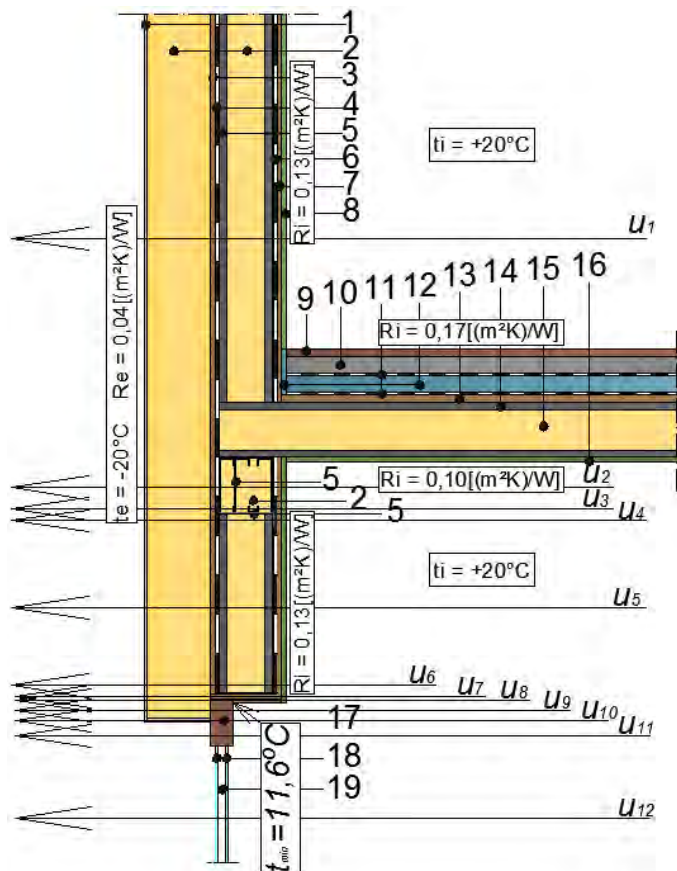
Postępując zgodnie z poniższym algorytmem, na drodze symulacji komputerowej wyznaczono współczynniki przenikania ciepła U_i [W/(m²·K)] poszczególnych części złącza [3]:

- obliczenie wartości średniej składowej poziomej gęstości strumienia ciepła odpowiednio dla części złącza q_i [W/m^2],
- obliczenie współczynnika przenikania ciepła poszczególnych części złącza na podstawie

$$U_i = q_i / (t_i - t_e) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]} \quad (1)$$



Rys. 1. Model obliczeniowy analizowanego mostka cieplnego przegrody w technologii szkieletu drewnianego: 1 - tynk cienkowarstwowy gr. 0,005 m, 2 - wełna mineralna gr. 0,16 m (wełna mineralna występuje jako ocieplenie zewnętrzne, jak też wypełnienie między profilami), 3 - płyta cementowo - drzazgowa gr. 0,012 m, 4 - folia paroprzepuszczalna, 5 - profil drewniany KVH 0,14 m, 6 - folia paroizolacyjna, 7 - płyta cementowo-drzazgowa gr. 0,012 m, 8 - płyta g-k gr. 0,0125, 9 - parkiet gr. 0,02 m, 10 - jastrzych gr. 0,05 m, 11 - folia PE, 12 - styropian EPS gr. 0,05 m, 13 - płyta cementowo - drzazgowa gr. 0,02 m, 14 - profil drewniany KVH gr. 0,14 m, 15 - wełna mineralna gr. 0,14 m, 16 - płyta g-k gr. 0,0125 m, 17 - drewniana rama okienna 0,06 m, 18 - szyba 0,006 m, 19 - argon 0,021 m, U_1 ÷ U_{11} - współczynniki przenikania ciepła poszczególnych części złącza



Rys. 2. Model obliczeniowy analizowanego mostka cieplnego przegrody w technologii lekkiego szkieletu stalowego: 1 - tynk cienkowarstwowy gr. 0,005 m, 2 - wełna mineralna gr. 0,16 m, 3 - płyta cementowo - drzazgowa gr. 0,012 m, 4 - folia paroprzepuszczalna, 5 - profil stalowy C140 gr. 0,0015 m, 6 - folia paroizolacyjna, 7 - płyta cementowo-drzazgowa gr. 0,012 m, 8 - płyta g-k gr. 0,0125, 9 - parkiet gr. 0,02 m, 10 - jastrzych gr. 0,05 m, 11 - folia PE, 12 - styropian EPS gr. 0,05 m, 13 - płyta cementowo-drzazgowa gr. 0,02 m, 14 - profil stalowy C140 gr. 0,0015 m, 15 - wełna mineralna gr. 0,14 m, 16 - płyta g-k gr. 0,0125 m, 17 - drewniana rama okienna 0,06 m, 18 - szyba 0,006 m, 19 - argon 0,021 m, $U_1 \div U_{12}$ - współczynniki przenikania ciepła poszczególnych części złącza

2. ZAŁOŻENIA OBLICZENIOWE

Analizę numeryczną wykonano przy użyciu programu ANSYS opartego na metodzie elementów skończonych [5, 6]. Model złącza w konstrukcji drewnianej składał się z 446 233 węzłów i 82 044 elementów, natomiast w konstrukcji szkieletowej stalowej zawierał 498 910 węzłów i 86 116 elementów. Analiza przeprowadzona została przy założeniu jednorodności i izotropii materiałów, z jakich wykonane są poszczególne warstwy.

Na podstawie [7] przyjęto wewnętrzną temperaturę $t_i = +20^\circ\text{C}$, natomiast wg [8] projektową temperaturę zewnętrzną $t_e = -20^\circ\text{C}$. Dla analizy MES przyjęto współczynniki przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej dla przepływu: poziomego $h_i = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, pionowego w dół $h_i = 5,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, pionowego w górę $h_i = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ i po stronie zewnętrznej $h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, które stanowią odwrotność oporów R_{si} , R_{se} $[(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$ [9, 10]. Do obliczeń minimalnej temperatury na wewnętrznej stronie przegrody t_{\min} $[\text{C}]$ oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} [-] stosuje się warunki brzegowe wg [11], które wynoszą $R_{si} = 0,13 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ dla ram i okien, a w pozostałych przypadkach $R_{si} = 0,25 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$.

3. OBLICZENIE PARAMETRÓW MOSTKÓW CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYCH ANALIZOWANYCH ZŁĄCZY PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH

Dzięki analizie numerycznej uzyskano wartości poszukiwanych częściowych strumieni ciepła Φ [W] (tab. 2). W dalszej części pozwala to na obliczenie gałęziowych liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ_i $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$. W przypadku analizowanych przegród całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła wyliczono z równania [9]

$$\Psi_i = \Psi_{iG} + \Psi_{iD} + \Psi_{iO} \text{ [W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (2)$$

gdzie:

Ψ_{iG} - liniowy współczynnik przenikania ciepła górnej gałęzi złącza $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,

Ψ_{iD} - liniowy współczynnik przenikania ciepła dolnej gałęzi złącza $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,

Ψ_{iO} - liniowy współczynnik przenikania ciepła stolarki okiennej $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$.

Gałęziowy liniowy współczynnik przenikania ciepła dla poszczególnych powierzchni złącza, tj. Ψ_{iG} , Ψ_{iD} i Ψ_{iO} , został obliczony z zależności (3) po wymiarach wewnętrznych l_i [m]

$$\Psi_{in} = L_n^{2D} - \left(\sum U_{in} \cdot l_i \right) \text{ [W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (3)$$

gdzie:

L_n^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego dla poszczególnych gałęzi złącza $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$,

l_i - długość mostka liniowego po stronie wewnętrznej [m].

Liniowy współczynnik sprzężenia L^{2D} $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ między dwoma środowiskami został obliczony z zależności

$$L^{2D} = \frac{\Phi}{l_i(t_i - t_e)} \text{ [W}/(\text{m} \cdot \text{K})] \quad (4)$$

Obliczone wartości parametrów cieplnych zestawiono w tabelach 3 i 4.

Oprócz parametrów cieplnych określono charakterystykę wilgotnościową rozpatrywanych mostków cieplnych według [11]. W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano wartości minimalne temperatury t_{\min} [°C] na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka termicznego. Minimalna temperatura dla przegrody w konstrukcji szkieletowej drewnianej równa jest $t_{\min} = 11,8^{\circ}\text{C}$ (rys. 1), a dla konstrukcji lekkiego szkieletu stalowego wynosi $t_{\min} = 12,1^{\circ}\text{C}$ (rys. 2). Następnie określono czynniki temperaturowe f_{Rsi} z zależności

$$f_{\text{Rsi,obl}} = \frac{t_{\text{si,min}} - t_e}{t_i - t_e}$$

gdzie:

$t_{\text{si,min}}$ - temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka termicznego [°C],

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego [°C],

t_i - temperatura powietrza wewnętrznego [°C].

Wartość czynnika temperaturowego dla konstrukcji w szkielecie drewnianym wynosi $f_{\text{Rsi,obl}} = 1,295$, natomiast dla przegrody w technologii lekkiego szkieletu stalowego $f_{\text{Rsi,obl}} = 1,303$. Według [7], wymagana wartość krytyczna współczynnika temperaturowego $f_{\text{Rsi,kryt}}$ wynosi 0,72. Jak widać w przypadku analizowanych złączy, wartości $f_{\text{Rsi,obl}}$ są większe od wartości krytycznej $f_{\text{Rsi,kryt}}$, tak więc nie pojawia się ryzyko występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody.

Tabela 2. Wartości strumienia ciepła analizowanych złączy - obliczenia własne

	Szkielet drewniany	Szkielet stalowy
Całkowity strumień ciepła Φ [W] przepływający przez złącze	29,36	30,227
Strumień napływający na górną część mostka Φ_{IG} [W]	4,584	5,079
Strumień napływający na dolną część mostka Φ_{ID} [W]	7,331	7,906
Strumień napływający na część okienną mostka Φ_{IO} [W]	17,445	17,242

Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń parametrów fizykalnych, złącze ściany w konstrukcji lekkiego szkieletu stalowego generuje niższe straty ciepła od przegrody wykonanej w technologii szkieletu drewnianego. I tak np. wartość całkowitego liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i [W/(m·K)] dla konstrukcji szkieletowej stalowej jest ok. 7% mniejsza od złącza w konstrukcji drewnianej (tab. 3 i 4).

Tabela 3. Charakterystyczne parametry cieplne analizowanego mostka cieplnego w konstrukcji szkieletowej drewnianej - obliczenia własne

Lp.	Charakterystyczne parametry cieplne analizowanego złącza o konstrukcji drewnianej	Wartości			
		¹⁾ U [W/(m ² ·K)]	²⁾ l _i [m]	³⁾ L ^{2D}	⁴⁾ Ψ _i [W/(m·K)]
1	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iG} górnej gałęzi złącza	U ₁ = 0,121	0,862	0,115	0,010
2	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iD} dolnej gałęzi złącza	U ₂ = 0,157	0,140	0,183	0,090
		U ₃ = 0,173	0,038		
		U ₄ = 0,121	0,647		
		U ₅ = 0,173	0,038		
		U ₆ = 0,180	0,012		
3	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iO} części okiennej	U ₇ = 0,193	0,0125	0,436	0,049
		U ₈ = 0,195	0,026		
		U ₉ = 1,815	0,005		
		U ₁₀ = 1,835	0,077		
		U ₁₁ = 0,704	0,327		
4	Całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła całego złącza ∑Ψ _i				0,149

¹⁾ Współczynnik przenikania ciepła poszczególnych części złącza, ²⁾ Długość poszczególnych części złącza, ³⁾ Liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego, ⁴⁾ Liniowy współczynnik przenikania ciepła poszczególnych gałęzi

Tabela 4. Charakterystyczne parametry cieplne analizowanego mostka cieplnego w konstrukcji szkieletowej stalowej - obliczenia własne

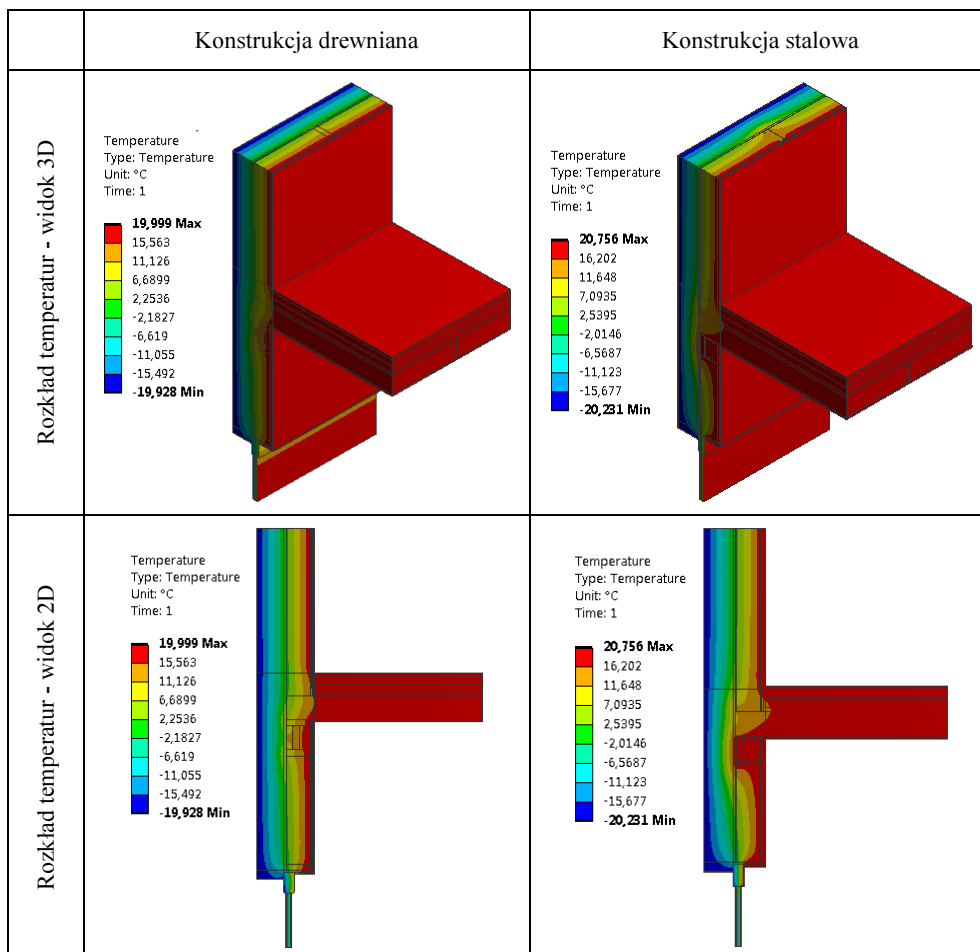
Lp.	Charakterystyczne parametry cieplne analizowanego złącza o konstrukcji drewnianej	Wartości			
		¹⁾ U _n [W/(m ² ·K)]	²⁾ l _{in} [m]	³⁾ L _n ^{2D}	⁴⁾ Ψ _{in} [W/(m·K)]
1	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iG} górnej gałęzi złącza	U ₁ = 0,139	0,862	0,127	0,007
2	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iD} dolnej gałęzi złącza	U ₂ = 0,114	0,104	0,198	0,087
		U ₃ = 0,116	0,018		
		U ₄ = 0,139	0,038		
		U ₅ = 0,139	0,606		
		U ₆ = 0,139	0,038		
		U ₇ = 0,180	0,012		
3	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ _{iO} części okiennej	U ₈ = 0,193	0,0125	0,431	0,044
		U ₉ = 0,195	0,026		
		U ₁₀ = 1,815	0,005		
		U ₁₁ = 1,835	0,077		
		U ₁₁ = 0,704	0,327		
4	Całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła całego złącza ∑Ψ _i				0,138

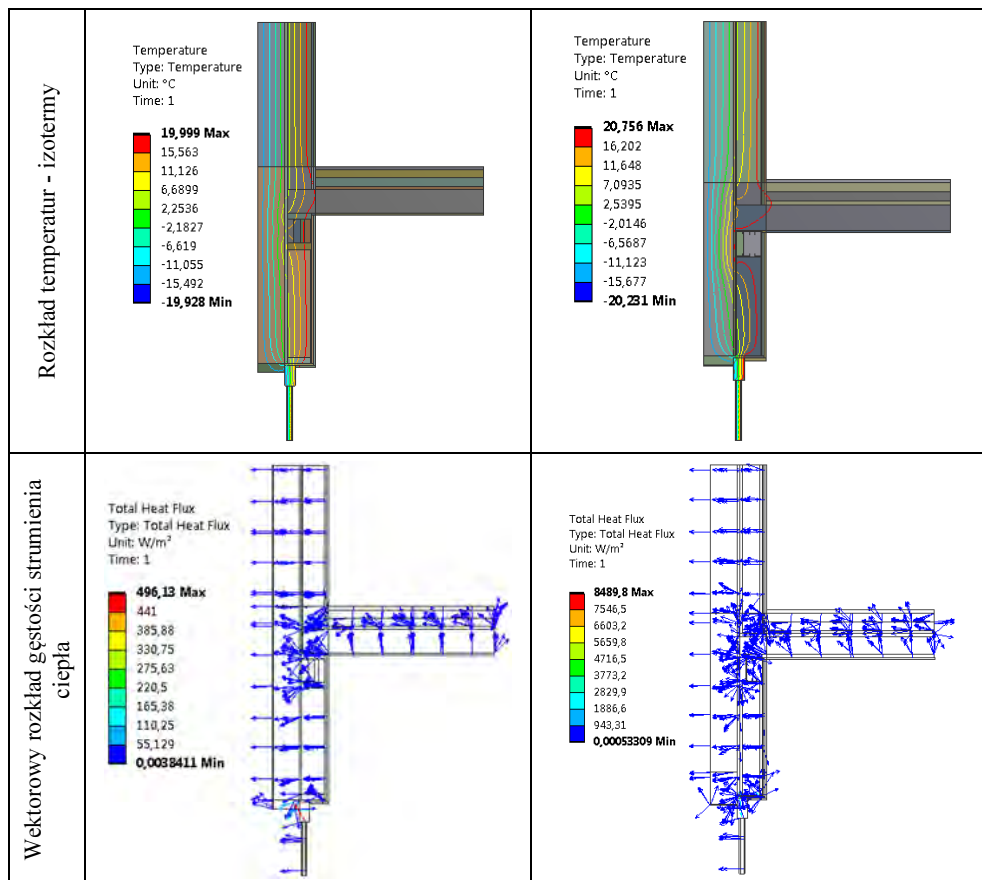
¹⁾ Współczynnik przenikania ciepła poszczególnych części złącza, ²⁾ Długość poszczególnych części złącza, ³⁾ Liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego, ⁴⁾ Liniowy współczynnik przenikania ciepła poszczególnych gałęzi

4. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

Graficzny rozkład temperatury pozwala między innymi na rozpoznanie w przegrodzie słabych miejsc pod względem utraty ciepła i poprawienie rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych. Dodatkowo dzięki wyznaczonym rozkładom temperatury można ocenić ryzyko powstania kondensacji na wewnętrznej stronie przegrody [9].

Porównując rozkład temperatur (rys. 3), można zaobserwować istotne różnice w ich rozkładzie między analizowanymi konstrukcjami w miejscu nadproża okiennego i połączenia ściany ze stropem. Konsekwencją występowania mostków cieplnych jest powiększenie dodatkowych strat ciepła z budynku, co skutkuje wzrostem kosztów eksploatacyjnych.





Rys. 3. Wyniki obliczeń numerycznych analizowanych złączy przegród zewnętrznych

PODSUMOWANIE

Numeryczne obliczenia dostarczają zarówno informacji na temat wartości parametrów fizycznych, jak i graficznie przedstawiają rozkład tych parametrów w analizowanej przegrodzie. Dzięki temu na etapie projektowym można dokonać rozpoznania słabych miejsc w przegrodzie pod względem utraty ciepła, co w konsekwencji daje możliwość poprawy przyjętych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że konstrukcja analizowanego złącza w technologii lekkiego szkieletu stalowego wykazuje korzystniejsze parametry cieplno-wilgotnościowe od konstrukcji drewnianej. Całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła całego złącza Ψ_i [W/(m·K)] dla konstrukcji w technologii lekkiego szkieletu stalowego jest niższy od konstrukcji w technologii drewnianej o ok. 7%. Również czynnik temperaturowy $f_{Rsi,obl}$ analizowanego złącza w techno-

logii lekkiego szkieletu stalowego jest korzystniejszy od czynnika temperaturowego $f_{R_{si,obl}}$ złącza w konstrukcji drewnianej.

Pomimo korzystniejszych parametrów konstrukcji w technologii lekkiego szkieletu stalowego nadal istnieją podstawowe bariery, które utrudniają w szerszym stopniu przyjęcie jej na rynku mieszkaniowym. Jedną z nich prawdopodobnie jest niechęć do przyjęcia alternatywnych metod i materiałów budowlanych.

LITERATURA

- [1] Major I., Technologia budowy domów szkieletowych - ekologiczna forma jednorodzinnego budownictwa mieszkaniowego, [w:] Jakościowe i ekologiczne aspekty w technologiach budowlanych, red. M. Ulewicz, J. Selejda, Częstochowa 2013, 86-102.
- [2] Major M., Kosiń M., Modelowanie rozkładu temperatur w przegrodach zewnętrznych wykonanych z użyciem lekkich konstrukcji szkieletowych, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym 2016, 2(18), 55-60.
- [3] Golaś A., Rys M., Gajda R., Badanie własności termoizolacyjnych okien z wykorzystaniem metody elementów skończonych, Modelowanie Inżynierskie 2011, 41, 91-98.
- [4] Domeko Włoszczowa, ulotka informacyjna.
- [5] ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide, 2013.
- [6] Madenci E., Guven I., The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®, Springer, 2007.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakimi powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, DzU z 2002 r., Nr 75, poz. 690.
- [8] PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach - Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
- [9] Pawłowski K., Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków, Grupa Medium, Warszawa 2016.
- [10] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania.
- [11] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania.

NUMERICAL ANALYSIS OF EXTERNAL WALL MADE IN WOOD AND STEEL STRUCTURE TECHNOLOGY

The article presents comparative analysis of the thermal bridge connecting the outer wall with the ceiling in cross-section with the window lintel. Two cases involving a skeleton wooden structure and a light steel skeleton were considered. On the computer simulation made the thermal and humidity analysis of the analyzed of the external wall. Numerical calculations are based on FEM using ANSYS.

Keywords: lightweight framing, temperature distribution, thermo-humidity parameters, thermal bridge, finite element method, numerical simulation