

dr inż. Krzysztof Pawłowski¹⁾
ORCID: 0000-0002-6738-5764

Analysis of thermal and humidity parameters of partitions and joints of a single-family building before and after insulation

Analiza parametrów cieplno-wilgotnościowych przegród i złączy w budynku jednorodinnym przed i po ociepleniu

DOI: 10.15199/33.2025.11.08

Abstract: The external partitions of single-family buildings erected before January 1, 2021, in many cases do not meet the thermal criterion: $U_e \leq U_{e(max.)}$ according to the regulation [1]. The adopted construction, material and installation solutions cause the energy performance indicators of buildings (EU, EK, EP) to be relatively high, often failing to meet the energy saving criterion: $EP \leq EP_{(max.)}$ according to [1].

Therefore, it becomes justified to carry out thermal modernization of buildings. The article presents the results of calculations of thermal and humidity parameters of selected partitions and building joints of a single-family building with single-layer walls made of aerated concrete before and after insulation (using various thermal insulation materials) and assesses the effectiveness of the adopted material solutions.

Keywords: thermal and humidity parameters; external building partitions; building joints; insulation; thermal modernization.

Thermal modernization of a building aims to reduce energy demand, which translates into improved thermal comfort, taking into account the thermal criteria set out in the regulation [1]. It is a set of measures aimed at eliminating or significantly reducing heat losses in a building. It generates financial benefits resulting from the work carried out, allowing, for example, coverage of the costs of other necessary projects.

Thermal modernization measures used in buildings can be divided into three basic groups:

- those related to reducing heat loss through building envelope – insulation of building envelope external (floors on the ground, ceilings, roofs, walls), replacement of windows and doors, taking into account the thermal requirements according to the regulation [1];
- regarding the reduction of losses and improvement of the efficiency of the installation system – replacement of radiators, replacement or modernization of the heating system (using underfloor heating, air heating, etc.), installation of thermostats, installation of modern weather-compensated or room controllers, insulation of domestic hot water and central heating

¹⁾ Politechnika Bydgoska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; krzypaw@pbs.edu.pl

Streszczenie: Przeglasy zewnętrzne budynków jednorodinnych wznoszonych przed 1 stycznia 2021 r. nie spełniają w wielu przypadkach kryterium cieplnego: $U_e \leq U_{e(max.)}$ wg rozporządzenia [1]. Przyjęte rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe oraz instalacyjne powodują, że wskaźniki charakterystyki energetycznej budynków (EU, EK, EP) kształtują się na stosunkowo wysokim poziomie, nie spełniając kryterium oszczędności energii: $EP \leq EP_{(max.)}$ wg [1]. W związku z tym zasadne staje się przeprowadzenie termomodernizacji budynków. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych wybranych przegród i złączy budowlanych budynku jednorodinnego ze ścianami jednowarstwowymi z betonu komórkowego przed i po ociepleniu (z zastosowaniem zróżnicowanych materiałów termoizolacyjnych) oraz dokonano oceny skuteczności przyjętych rozwiązań materiałowych. **Słowa kluczowe:** parametry cieplno-wilgotnościowe; przegrody zewnętrzne budynków; złącza budowlane; ocieplenie; termomodernizacja.

Termomodernizacja budynku ma na celu zmniejszenie zapotrzebowania na energię, co przekłada się na poprawę komfortu cieplnego z uwzględnieniem kryterium cieplnego wg rozporządzenia [1]. Stanowi zbiór zabiegów mających na celu wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie strat ciepła w budynku. Przynosi efekty finansowe uzyskane w wyniku przeprowadzonych prac pozwalające na np. pokrycie kosztów innych niezbędnych przedsięwzięć.

Działania termomodernizacyjne stosowane w budynkach można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- związane z redukcją strat ciepła przez przegrody – ocieplanie przegród zewnętrznych (podłogi na gruncie, stropów, dachów, ścian), wymiana stolarki okiennej i drzwiowej z uwzględnieniem wymagań cieplnych wg rozporządzenia [1];
- dotyczące redukcji strat ciepła oraz poprawy sprawności systemu instalacyjnego – wymiana grzejników, wymiana lub modernizacja systemu grzewczego (zastosowanie ogrzewania podłogowego, powietrznego itp.), instalacja termostatów, montaż nowoczesnych regulatorów pogodowych bądź pokojowych, izolacja przewodów c.w.u i c.o., wymiana/modernizacja systemu wytwarzania ciepłej wody, systemu wentylacji, np. zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (rekuperatora);

pipes, replacement/modernization of the hot water production system, ventilation system (e.g., use of mechanical ventilation with heat recovery – heat recovery unit);

• **design and implementation or modernization works focusing on the heat source** – design and installing or replacing a heat source (replacing the boiler with a new one with better efficiency or replacing the local source with a municipal heating network), changing the energy source (replacing the boiler with another one that generates energy by burning a different type of fuel; an exception is changing the fuel in the same boiler, which is adapted to burn several types of raw materials), and using: technology using renewable energy sources (RES) for heating purposes (e.g., heat pumps, biofuels, solar collectors); cogeneration (simultaneous production of electricity and heat – applies to cooperatives); and automation controlling the source.

Detailed analyses regarding thermal modernization and improving the energy efficiency of buildings are presented, among others, in [2, 3].

This article discusses issues related to the insulation of single-layer exterior walls made of aerated concrete and a solid flat roof, as well as the replacement of window frames in the analyzed single-family building. The market for thermal insulation materials is developing rapidly. The most common include: EPS and XPS polystyrene foam, PIR or PUR polyurethane foam, mineral wool, phenolic foams, aerogels, and VIP vacuum insulation [3, 4, 5]. The selection of window frames should take into account, among other things:

- the value of the heat transfer coefficient of the window $U_w \leq U_{w(max)}$ according to [1];
- designing sunshades to prevent overheating of rooms during the summer according to [1];
- minimizing the impact of thermal bridges at the junction between the external wall and the window.

Scope and method of performing calculations

A single-family house constructed using masonry technology using 36.5 cm thick aerated concrete blocks with $\lambda = 0.17$ W/(m·K) was selected for analysis. Its external partitions have the following heat transfer coefficients U :

- external wall – 0.43 W/(m²·K);
- flat roof – 0.37 W/(m²·K);
- floor on the ground – 0.40 W/(m²·K);
- window joinery – 1.30 W/(m²·K).

The analyzed external partitions do not meet the criterion of $U_c \leq U_{c(max)}$ according to the regulation [1], but they met the thermal requirements during the design and construction of the building (when $U_{c(max)}$ for the external wall – 0.50 W/(m²·K). Therefore, it was proposed to insulate the external walls and flat roof with graphite polystyrene ($\lambda = 0.031$ W/(m·K)) or PIR polyurethane foam boards ($\lambda = 0.024$ W/(m·K)) and replace the windows with ones with $U_w = 0.79$ W/(m²·K). To meet the $U_c \leq U_{c(max)}$ criterion [1], it was necessary to select the appropriate thickness of the recommended thermal insulation material. A comprehensive assessment of the thermal quality of the

• **prace projektowo-wykonawcze lub modernizacyjne skupiające się na źródle ciepła** – zaprojektowanie i zainstalowanie lub wymiana źródła ciepła (zamiana kotła na nowy cechujący się lepszą sprawnością bądź źródła lokalnego na miejską sieć ciepłowniczą), zmiana nośnika energii (zamiana kotła na inny, który wytwarza energię, spalając paliwo innego rodzaju; wyjątkiem jest zamiana paliwa w tym samym kotle, który jest przystosowany do spalania kilku rodzajów surowców) oraz zastosowanie: technologii wykorzystującej odnawialne źródła energii (OZE) na potrzeby grzewcze (np. pompy ciepła, biopaliwa, kolektory słoneczne); kogeneracji (jednoczesna produkcja prądu oraz ciepła); automatyki sterującej źródłem.

Szczegółowe analizy dotyczące termomodernizacji i poprawy efektywności energetycznej budynków przedstawiono m.in. w pracach [2, 3].

W artykule omówiono zagadnienia dotyczące ocieplenia jednowarstwowych ścian zewnętrznych z betonu komórkowego i stropodachu pełnego oraz wymiany stolarki okiennej w analizowanym budynku jednorodzinny. Rynek materiałów termoizolacyjnych rozwija się bardzo szybko. Do najbardziej znanych należą: styropian EPS i XPS; pianka poliuretanowa PIR lub PUR; wełna mineralna; piany fenolowe; aerozele; izolacje próżniowe VIP [3, 4, 5]. Dobór stolarki okiennej powinien uwzględnić m.in.:

- wartość współczynnika przenikania ciepła okna $U_w \leq U_{w(max)}$ wg [1];
- zaprojektowanie osłon przeciwsłonecznych, aby nie dopuścić do przegrzewania pomieszczeń w okresie letnim wg [1];
- minimalizowanie wpływu mostka cieplnego na styku połączenia ściany zewnętrznej z oknem.

Zakres i sposób wykonania obliczeń

Do analizy wybrano budynek jednorodzinny wzniesiony w technologii murowanej z bloczków z betonu komórkowego grubości 36,5 cm o $\lambda = 0,17$ W/(m·K), którego przegrody zewnętrzne charakteryzują się następującymi współczynnikami przenikania ciepła U :

- ściana zewnętrzna – 0,43 W/(m²·K);
- stropodach pełny – 0,37 W/(m²·K);
- podłoga na gruncie – 0,40 W/(m²·K);
- stolarka okienna – 1,30 W/(m²·K).

Analizowane przegrody zewnętrzne nie spełniają kryterium $U_c \leq U_{c(max)}$ wg rozporządzenia [1], lecz spełniały wymagania cieplne obowiązujące w trakcie projektowania i wznoszenia budynku (gdy $U_{c(max)}$ ściany zewnętrznej = 0,50 W/(m²·K). W związku z tym zaproponowano ocieplenie ścian zewnętrznych i stropodachu styropianem grafitowym ($\lambda = 0,031$ W/(m·K)) lub płytami z pianki poliuretanowej PIR ($\lambda = 0,024$ W/(m·K)) oraz wymianę stolarki okiennej na stolarkę o $U_w = 0,79$ W/(m²·K). W celu spełnienia kryterium $U_c \leq U_{c(max)}$ [1] należało dobrać odpowiednią grubość zalecanego materiału termoizolacyjnego. Kompleksowa ocena jakości cieplnej elementów budynku (przegrody i złączy budowlanych), obejmowała analizę wielu parametrów cieplno-wilgotnościowych. W tym celu wykonano szczegółowe obliczenia,

building elements (partitions and building joints) included the analysis of numerous thermal and humidity parameters. For this purpose, detailed calculations were performed using an appropriate computer program and a proprietary calculation algorithm presented in [6] among others. The procedure for numerical calculations of thermal and humidity parameters of building partitions and joints included:

- assuming the material layout of the partition and building joint;
- performing numerical calculations: modeling the joints, assuming boundary conditions (internal (t_i) and external (t_e) air temperatures and heat transfer resistance on the internal (R_{si}) and external (R_{se}) sides), as well as the thermal conductivity coefficient λ of the building materials;
- determination of thermal and humidity parameters of joints: heat flow Φ , heat transfer coefficient U , linear heat transfer coefficient Ψ , minimum temperature on the inner surface of the partition at the thermal bridge t_{min} , and temperature factor f_{Rsi} ;
- criteria for assessing building partitions and joints: thermal criterion (heat transfer coefficient U , heat flow Φ , linear heat transfer coefficient Ψ), moisture criterion (temperature factor f_{Rsi});
- selection of the correct material system for the building joint.

The obtained values of thermal and humidity parameters of building partitions and joints depend on the building products used (including structural ones), including the type and thickness of thermal insulation and the material structure of the joint being analyzed. Using approximate and indicative values, e.g., those in accordance with the PN-EN ISO 14683:2008 standard [7], becomes unjustified, as they do not take into account changes in material compositions and the type and thickness of thermal insulation. The accuracy of thermal bridge calculation methods is [8]:

- numerical calculations: $\pm 5\%$;
- thermal bridge catalog: $\pm 20\%$;
- manual calculations: $\pm 20\%$;
- approximate values: $0\text{--}50\%$.

Therefore, it is recommended to perform individual numerical calculations of the analyzed building joints (before and after insulation) to obtain reliable results for developing the insulation design and selecting the correct material solution, taking into account the thermal and humidity requirements.

Example calculations for the analyzed single-family building

The calculation examples concern the shaping of material arrangements of three (selected from our own research) joints: the connection of external walls at a corner; the connection of an external wall with a flat roof; and the connection of an external wall with a window in cross-section through the frame. Achieving a low heat transfer coefficient U of the external wall, flat roof, or window joinery does not guarantee the minimization of heat loss through heat transfer H_{Tr} or the limitation of surface condensation (reducing the temperature on the inner surface of the partition) and interlayer condensation. For the

wykorzystując odpowiedni program komputerowy oraz autorski algorytm obliczeniowy prezentowany m.in. w [6]. Procedura obliczeń numerycznych parametrów ciepłno-wilgotnościowych przegród i złączy budowlanych obejmowała:

- przyjęcie układu materiałowego przegrody i złącza budowlanego,
- wykonanie obliczeń numerycznych: modelowanie złączy, założenie warunków brzegowych (temperatury powietrza wewnętrznego (t_i) i zewnętrznego (t_e) oraz oporu przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej (R_{si}) i zewnętrznej (R_{se})), a także wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ materiałów budowlanych;
- określenie parametrów ciepłno-wilgotnościowych złączy: strumienia ciepłego Φ , współczynnika przenikania ciepła U , liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ , minimalnej temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka ciepłego t_{min} , oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} ;
- kryteria oceny przegród i złączy budowlanych: kryterium cieplne (współczynnik przenikania ciepła U , strumień ciepły Φ , liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ); kryterium wilgotnościowe (czynnik temperaturowy f_{Rsi});
- wybór poprawnego układu materiałowego złącza budowlanego.

Uzyskane wartości parametrów ciepłno-wilgotnościowych przegród i złączy budowlanych zależą od zastosowanych wyrobów (m.in. konstrukcyjnych), w tym rodzaju i grubości izolacji cieplnej oraz ukształtowania struktury materiałowej analizowanego złącza. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, np. zgodnie z normą PN-EN ISO 14683:2008 [7], staje się nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają one zmiany układów materiałowych oraz rodzaju i grubości termoizolacji. Dokładność metod obliczeń mostków cieplnych wynosi odpowiednio [8]:

- obliczenia numeryczne: $\pm 5\%$;
- katalog mostków cieplnych $\pm 20\%$;
- obliczenia ręczne $\pm 20\%$;
- wartości orientacyjne $0\text{--}50\%$.

W związku z tym zaleca się wykonywanie indywidualnych obliczeń numerycznych analizowanych złączy budowlanych (przed i po ociepleniu), aby uzyskać miarodajne wyniki do opracowania projektu ocieplenia i wybrać poprawne rozwiązanie materiałowe z uwzględnieniem wymagań ciepłno-wilgotnościowych.

Przykładowe obliczenia w analizowanym budynku jednorodzinnym

Przykłady obliczeniowe dotyczą kształtowania układów materiałowych trzech (wybranych z badań własnych) złączy: połączenia ścian zewnętrznych w narożniku; połączenia ściany zewnętrznej ze stropodachem oraz połączenia ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę. Osiągnięcie niewielkiej wartości współczynnika przenikania ciepła U ściany zewnętrznej, stropodachu lub stolarki okiennej nie gwarantuje efektu minimalizacji strat ciepła przez przenikanie H_{Tr} oraz ograniczenia występowania kondensacji powierzchniowej (obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody) i międzywarstwowej. Do obliczeń, w programie komputerowym

calculations in the TRISCO-KOBRU 86 computer program [9], the following assumptions were made (Figures 1, 2, and 3):

- external wall made of aerated concrete 36.5 cm thick ($\lambda = 0.17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) with $U = 0.43 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, insulated with graphite polystyrene 10, 12, and 15 cm thick ($\lambda = 0.031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) or polyurethane foam boards 10, 12, and 15 cm thick ($\lambda = 0.024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) (Tables 1, 2, and 3);
- solid flat roof: 12 cm thick reinforced concrete floor ($\lambda = 1.70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) and 12 cm thick polystyrene board ($\lambda = 0.04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) with $U = 0.37 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, insulated with 12 cm thick graphite polystyrene ($\lambda = 0.031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) with

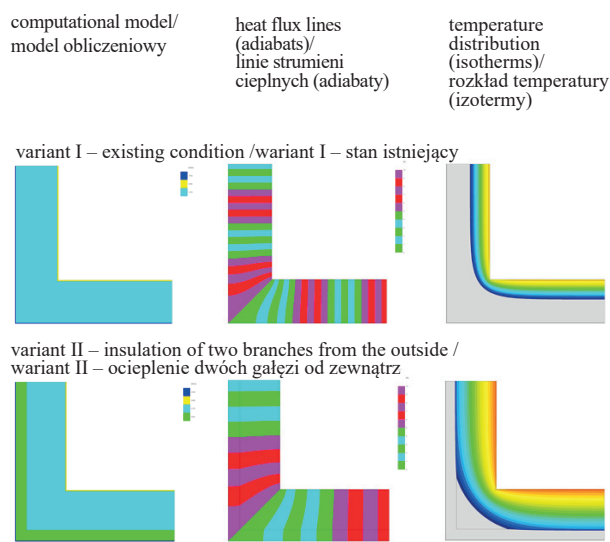


Fig. 1. Results of computer simulation of the external walls connection in the corner

Fig.: own study
Rys. 1. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ścian zewnętrznych w narożniku
Rys.: opracowanie własne

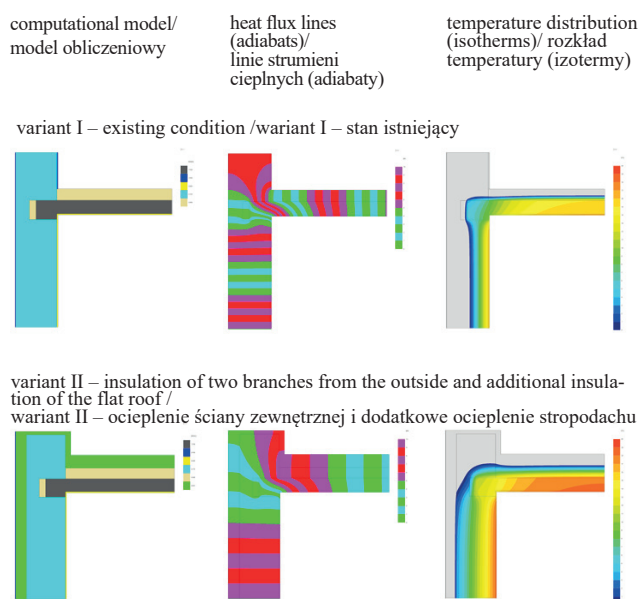


Fig. 2. Results of computer simulation of the connection of the external wall with the flat roof

Fig.: own study
Rys. 2. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej ze stropodachem
Rys.: opracowanie własne

wym TRISCO-KOBRU 86 [9], przyjęto następujące założenia (rysunki 1, 2 i 3):

- ściana zewnętrzna z betonu komórkowego grubości 36,5 cm ($\lambda = 0,17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) o $U = 0,43 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, ocieplona styropianem grafitowym grubości 10, 12 i 15 cm ($\lambda = 0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) lub płytami z pianki poliuretanowej grubości 10,12 i 15 cm ($\lambda = 0,024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) (tabele 1, 2 i 3);
- stropodach pełny: strop żelbetowy grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) i płyta styropianowa grubości 12 cm

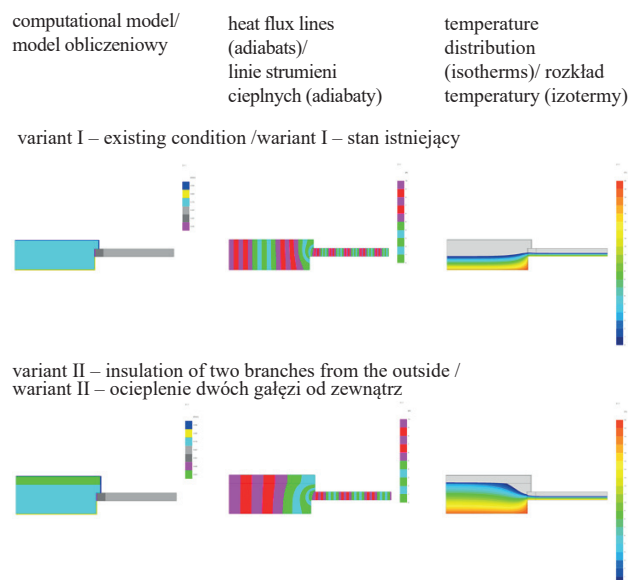


Fig. 3. Results of computer simulation of the connection between the external wall and the window in the cross-section through the frame

Fig.: own study
Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę
Rys.: opracowanie własne

($\lambda = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) o $U = 0,37 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, ocieplony styropianem grafitowym grubości 12 cm ($\lambda = 0,031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) o $U = 0,15 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ lub płytami z pianki poliuretanowej grubości 12 cm ($\lambda = 0,024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) o $U = 0,13 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$;

- stolarka okienna o $U_w = 1,30 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, po wymianie $U_w = 0,79 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

- modelowanie złączy wykonano zgodnie z PN-EN ISO 10211:2017 [10];

- opory przejmowania ciepła (R_{si} , R_{se}) przy obliczeniach strumieni cieplnych przyjęto wg PN-EN ISO 6946 [11] ($R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ w przypadku poziomego przepływu ciepła; $R_{si} = 0,10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ w przypadku przepływu ciepła w górę; $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$) oraz wg PN-EN ISO 13788 [12] przy obliczeniach rozkładu temperatury i czynnika temperaturowego ($R_{si} = 0,25 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$; $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$);

- temperatura powietrza wewnętrznego $t_i = 20^\circ\text{C}$ (pokój dzienny); temperatura powietrza zewnętrznego $t_e = -20^\circ\text{C}$ (III strefa);

- wartości współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych $\lambda \text{ [W/(m}\cdot\text{K)]}$ przyjęto na podstawie tabel z pracy [13].

W przypadku połączenia ścian zewnętrznych w narożniku (rysunek 1, tabela 1) rozpatrywano dwa warianty obliczeniowe:

Table 1. Results of calculations of the thermal and humidity parameters of the connection of external walls in the corner *Own study*
Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych połączenia ścian zewnętrznych w narożniku *Opracowanie własne*

Calculation variant/ Wariant obliczeniowy	U [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	Ψ _i [W/(m·K)]	t _{min.} [°C]	f _{Rsi} [-]
I	0,43	37,45	0,085	11,55	0,789
II _{a(10)}	0,18	17,39	0,076	15,32	0,883
II _{a(12)}	0,16	15,78	0,073	15,69	0,892
II _{a(15)}	0,14	13,88	0,069	16,19	0,903
II _{b(10)}	0,15	15,12	0,071	15,85	0,896
II _{b(12)}	0,14	13,58	0,067	16,21	0,905
II _{b(15)}	0,12	11,79	0,062	16,64	0,916

U – heat transfer coefficient of the external wall/współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej, Φ – heat flux flowing through the joint/strumień ciepły przepływający przez złącze, Ψ_i – linear heat transfer coefficient (by internal dimensions)/liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych), t_{min.} – minimum temperature on the inner surface of the partition /temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody, f_{Rsi} – temperature factor/czynnik temperaturowy

Table 2. Calculation results of thermal and humidity parameters of the connection between the external wall and the flat roof *Own study*
Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych połączenia ściany zewnętrznej ze stropodachem *Opracowanie własne*

Calculation variant/ Wariant obliczeniowy	U _{sc.} / U _{s.} [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	Ψ _i [W/(m·K)]	t _{min.} [°C]	f _{Rsi} [-]
I	0,43 / 0,37	40,23	0,220	9,89	0,747
II _{a(10)}	0,18 / 0,15	18,46	0,133	14,56	0,864
II _{a(12)}	0,16 / 0,15	17,60	0,130	14,74	0,869
II _{a(15)}	0,14 / 0,15	16,62	0,127	14,96	0,874
II _{b(10)}	0,15 / 0,13	16,23	0,125	15,05	0,876
II _{b(12)}	0,14 / 0,13	15,43	0,122	15,23	0,881
II _{b(15)}	0,12 / 0,13	14,52	0,119	15,44	0,886

U_{sc.} – heat transfer coefficient of the external wall/współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej, U_{s.} – heat transfer coefficient of the flat roof/współczynnik przenikania ciepła stropodachu, Φ – heat flux flowing through the joint/strumień ciepły przepływający przez złącze, Ψ_i – linear heat transfer coefficient (by internal dimensions)/liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych), t_{min.} – minimum temperature on the inner surface of the partition/temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody, f_{Rsi} – temperature factor/czynnik temperaturowy

Table 3. Calculation results of the thermal and humidity parameters of the connection between the external wall and the window in the cross-section through the frame *Own study*

Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych połączenia ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę *Opracowanie własne*

Calculation variant/ Wariant obliczeniowy	U _{sc.} / U _{w.} [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	Ψ _i [W/(m·K)]	t _{min.} [°C]	f _{Rsi} [-]
I	0,43 / 1,30	69,50	0,046	11,78	0,795
II _{a(10)}	0,18 / 0,79	40,42	0,076	14,13	0,853
II _{a(12)}	0,16 / 0,79	39,82	0,077	14,22	0,856
II _{a(15)}	0,14 / 0,79	39,13	0,083	14,33	0,858
II _{b(10)}	0,15 / 0,79	39,56	0,078	14,28	0,857
II _{b(12)}	0,14 / 0,79	39,00	0,083	14,36	0,859
II _{b(15)}	0,12 / 0,79	38,38	0,088	14,46	0,861

U_{sc.} – heat transfer coefficient of the external wall/współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej, U_{w.} – heat transfer coefficient of window joinery/współczynnik przenikania ciepła stolarki okiennej, Φ – heat flux flowing through the joint/strumień ciepły przepływający przez złącze, Ψ_i – linear heat transfer coefficient (by internal dimensions)/liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych), t_{min.} – minimum temperature on the inner surface of the partition/temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody, f_{Rsi} – temperature factor/czynnik temperaturowy

$U = 0.15 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ or 12 cm thick polyurethane foam boards ($\lambda = 0.024 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) with $U = 0.13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$;

- window joinery with $U_w = 1.30 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, after replacement $U_w = 0.79 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

- joint modeling was performed in accordance with PN-EN ISO 10211:2017 [10];

- heat transfer resistances (R_{si} , R_{se}) were adopted according to PN-EN ISO 6946 [11] when calculating heat fluxes ($R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$; in the case of horizontal heat flow; $R_{si} = 0.10 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ – heat flow upward; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$) and PN-EN ISO 13788 [12] when calculating the temperature distribution and temperature factor ($R_{si} = 0.25 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$);

- indoor air temperature $t_i = 20^\circ\text{C}$ (living room); outdoor air temperature $t_e = -20^\circ\text{C}$ (zone III);

- the thermal conductivity coefficient values of building materials $\lambda \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]}$ were adopted based on the tables from [13].

For the connection of external walls at a corner (Figure 1, Table 1), two calculation variants were considered:

- variant I – a corner made of aerated concrete of 36.5 cm thickness, without insulation;

- variant II – a corner made of aerated concrete of 36.5 cm thickness, insulated from the outside:

- a) graphite polystyrene boards 10, 12, and 15 cm thick;

- b) polyurethane foam boards 10, 12, and 15 cm thick.

The connection of the external wall to the flat roof (Figure 2, Table 2) was analyzed in two calculation variants:

- variant I – existing condition: external wall made of aerated concrete, thickness 36.5 cm, solid flat roof: 12 cm thick reinforced concrete floor ($\lambda = 1.70 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) and 12 cm thick polystyrene board ($\lambda = 0.04 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$);

- variant II – insulation of the external wall and flat roof:

- a) graphite polystyrene boards of 10, 12, and 15 cm thickness – external wall, 12 cm thick – flat roof,

- b) polyurethane foam boards of 10, 12, and 15 cm thickness – external wall and 12 cm thick – flat roof.

The connection between the external wall and the window in the cross-section through the frame (Figure 3, Table 3) was also analyzed in two calculation variants:

- variant I – existing condition: external wall made of aerated concrete, thickness of 36.5 cm, window joinery $U_w = 1.30 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

- variant II – replacement of window joinery and insulation of the external wall:

- a) graphite polystyrene boards of 10, 12, and 15 cm thickness – external wall; window joinery with $U_w = 0.79 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

- b) polyurethane foam boards of 10, 12, and 15 cm thickness – external wall; window joinery with $U_w = 0.79 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Based on the calculations performed (Tables 1, 2, and 3), it can be concluded that the insulation of the external wall and flat roof, as well as the replacement of the window joinery, resulted in the analyzed partitions meeting the thermal criterion: $U_c \leq U_{c(\max.)}$ according to the regulation [1] ($U_{c(\max.)} = 0.20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ for the external wall and $U_{c(\max.)} = 0.15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ for the flat roof and $U_{c(\max.)} = 0.90 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ for the window joinery).

The thermal and humidity parameters of the analyzed joints depend on the material layer arrangement (especially the type

- wariant I – narożnik z betonu komórkowego grubości 36,5 cm bez ocieplenia;

- wariant II – narożnik z betonu komórkowego grubości 36,5 cm ocieplony od zewnątrz:

- a) płytami ze styropianu grafitowego grubości 10, 12 i 15 cm;

- b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 10, 12 i 15 cm; Połączenie ściany zewnętrznej ze stropodachem (rysunek 2, tabela 2) analizowano w dwóch wariantach obliczeniowych:

- wariant I – stan istniejący: ściana zewnętrzna z betonu komórkowego grubości 36,5 cm, stropodach pełny – strop żelbetonowy grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) i płyta styropianowa grubości 12 cm ($\lambda = 0,04 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$);

- wariant II – ocieplenie ściany zewnętrznej i stropodachu:

- a) płytami ze styropianu grafitowego grubości 10, 12 i 15 cm – ściana zewnętrzna, grubości 12 cm – stropodach,

- b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 10, 12 i 15 cm – ściana zewnętrzna i grubości 12 cm – stropodach.

Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę (rysunek 3, tabela 3) analizowano również w dwóch wariantach obliczeniowych:

- wariant I – stan istniejący: ściana zewnętrzna z betonu komórkowego grubości 36,5 cm, stolarka okienna $U_w = 1,30 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

- wariant II – wymiana stolarki okiennej i ocieplenie ściany zewnętrznej:

- a) płytami ze styropianu grafitowego grubości 10, 12 i 15 cm – ściana zewnętrzna; stolarka okienna o $U_w = 0,79 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;

- b) płytami z pianki poliuretanowej grubości 10, 12 i 15 cm – ściana zewnętrzna; stolarka okienna o $U_w = 0,79 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabele 1, 2 i 3) stwierdzono, że ocieplenie ściany zewnętrznej i stropodachu oraz wymiana stolarki okiennej sprawiło, że analizowane przegrody spełniają kryterium cieplne: $U_c \leq U_{c(\max.)}$ wg rozporządzenia [1] ($U_{c(\max.)} = 0,20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ w przypadku ściany zewnętrznej i $U_{c(\max.)} = 0,15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ w przypadku stropodachu oraz $U_{c(\max.)} = 0,90 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ – stolarki okiennej).

Parametry cieplno-wilgotnościowe analizowanych złączy zależą od układu warstw materiałowych (szczególnie rodzaju i grubości materiału termoizolacyjnego). Zaprojektowanie izolacji cieplnej ściany zewnętrznej i stropodachu (rysunki 1 i 2, tabele 1 i 2) powoduje zmniejszenie strat ciepła przez przenikanie (Φ , U , Ψ) oraz podwyższenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody ($t_{\min.}$) w miejscu mostka cieplnego. Podobne efekty uzyskuje się w przypadku ocieplenia ściany zewnętrznej i wymiany stolarki okiennej (rysunek 3, tabela 3).

Duża wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła 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. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz strat ciepła w polu dwuwymiarowym (2D) zauważono, że wprowadzenie izolacji cieplnej oraz wymiana

and thickness of the thermal insulation material). Designing thermal insulation for the external wall and flat roof (Figures 1 and 2, Tables 1 and 2) reduces heat loss through transmission (Φ , U , Ψ) and increases the temperature on the internal surface of the partition ($t_{\min}$) at the thermal bridge. Similar effects are achieved by insulating the external wall and replacing the window frames (Figure 3, Table 3).

A high value of the linear heat transfer coefficient Ψ does not automatically indicate a significant thermal bridge. By definition, Ψ values are treated as correction factors for one-dimensional heat loss calculations, which should take into account the geometrical aspect (defined by the adopted dimensions), as well as the increase in heat flux. Based on the performed calculations and analyses of heat losses in a two-dimensional (2D) field, it was observed that the introduction of thermal insulation and the replacement of window frames with $U_w = 0.79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ result in a significant reduction in the heat flux value Φ compared to joints without insulation. Therefore, assessing a joint such as an external wall-to-window connection in the cross-section through the frame solely based on the linear heat transfer coefficient Ψ is unjustified (Table 3).

The risk of mold growth at the thermal bridge is assessed by comparing the calculated value of the temperature factor at the thermal bridge f_{Rsi} (Tables 1, 2, and 3) with the limit (critical) value $f_{\text{Rsi, (critical)}}$. If the inequality: $f_{\text{Rsi}} \geq f_{\text{Rsi, (critical)}}$ is met, there is no risk of surface condensation (risk of mold growth).

The critical temperature factor $f_{\text{Rsi, (critical)}}$ can be determined:

- simplified for $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$, $f_{\text{Rsi, (critical)}} = 0.72$,
- precisely (taking into account outdoor and indoor air parameters).

Calculation procedures in this regard are presented, among others, in [13]. The critical value of the temperature factor $f_{\text{Rsi, (critical)}}$ for the third room humidity class at $t_i = 20^\circ\text{C}$ is: $f_{\text{Rsi, (critical)}} = 0.785$ (Bydgoszcz), $f_{\text{Rsi, (critical)}} = 0.789$ (Warsaw). Based on the calculations performed (Tables 1, 2 and 3), it can be concluded that in the case of connecting the external wall with the ceiling (without insulation – with incorrect connection of the two partitions), there is a risk of surface condensation (risk of mold development), because the inequality: $f_{\text{Rsi}} \geq f_{\text{Rsi, (critical)}}$ is not met.

Checking the risk of interstitial condensation in external partitions and building joints requires computer simulations taking into account external and internal air parameters in accordance with PN-EN ISO 13788 [12], which is the next stage of our own research.

The presented calculation examples do not exhaust all the characteristic building joints of a building before and after insulation. It is advisable to develop catalogs of building partitions and joints, which will be used during the design and thermal modernization of buildings.

Final conclusions

Based on our own research and analyses of the thermal and humidity parameters of building partitions and joints in buildings undergoing thermal insulation, the following final conclusions can be drawn:

stolarki okiennej na stolarkę o $U_w = 0.79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ powodują znaczne obniżenie wartości strumienia ciepła Φ w stosunku do złączy bez ocieplenia. W związku z tym ocena złącza typu połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę tylko na podstawie liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ jest nieuzasadniona (tabela 3).

Sprawdzenie ryzyka rozwoju pleśni w miejscu mostka cieplnego przeprowadza się przez porównanie wartości obliczeniowej czynnika temperaturowego w miejscu mostka cieplnego f_{Rsi} (tabele 1, 2 i 3) z wartością graniczną (krytyczną) $f_{\text{Rsi, (kryt.)}}$. Jeżeli spełniona jest nierówność $f_{\text{Rsi}} \geq f_{\text{Rsi, (kryt.)}}$ nie występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej (ryzyko rozwoju pleśni).

Krytyczny czynnik temperaturowy $f_{\text{Rsi, (kryt.)}}$ można określić:

- w sposób uproszczony w przypadku $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$, $f_{\text{Rsi, (kryt.)}} = 0.72$,
- w sposób dokładny (uwzględniając parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego).

Procedury obliczeniowe w tym zakresie przedstawiono m.in. w pracy [13]. Wartość krytyczna czynnika temperaturowego $f_{\text{Rsi, (kryt.)}}$ w przypadku trzeciej klasy wilgotności w pomieszczeniu przy $t_i = 20^\circ\text{C}$ wynosi odpowiednio: $f_{\text{Rsi, (kryt.)}} = 0.785$ (Bydgoszcz), $f_{\text{Rsi, (kryt.)}} = 0.789$ (Warszawa). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabele 1, 2 i 3) można stwierdzić, że w przypadku połączenia ściany zewnętrznej ze stropodachem (bez ocieplenia – przy niepoprawnym połączeniu dwóch przegród) występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej (ryzyko rozwoju pleśni), ponieważ nie została spełniona nierówność: $f_{\text{Rsi}} \geq f_{\text{Rsi, (kryt.)}}$.

Sprawdzenie ryzyka występowania kondensacji międzywarstwowej w przegrodach zewnętrznych i złączach budowlanych wymaga przeprowadzania symulacji komputerowej z uwzględnieniem parametrów powietrza zewnętrznego i wewnętrznego zgodnie z PN-EN ISO 13788 [12], co stanowi następny etap prowadzonych badań własnych.

Przedstawione przykłady obliczeniowe nie wyczerpują wszystkich charakterystycznych złączy budowlanych budynku przed i po ociepleniu. Zasadne jest opracowanie kart katalogowych przegród i złączy budowlanych, które będą stosowane podczas projektowania i termomodernizacji budynków.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz parametrów cieplno-wilgotnościowych przegród i złączy budowlanych budynków poddawanych ociepleniu stwierdzono, że:

- przy projektowaniu ocieplenia przegród i złączy budowlanych należy wykonać wielowariantowe obliczenia parametrów cieplno-wilgotnościowych, uwzględniając m.in. kryterium cieplne oraz wilgotnościowe i na ich podstawie wybrać poprawne rozwiązanie materiałowe;
- wprowadzenie dodatkowych materiałów termoizolacyjnych do budynków jednorodzinnych, ze ścianami jednowarstwowymi z betonu komórkowego, powoduje zmniejszenie strat ciepła przez przenikanie oraz ograniczenie lub wyeliminowanie ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej;

- when designing the insulation of building partitions and joints, multi-variant calculations of thermal and humidity parameters should be performed, taking into account, among others, thermal and humidity criteria, and based on them, the correct material solution should be selected;

- introducing additional thermal insulation materials into single-family buildings with single-layer walls made of aerated concrete reduces heat loss through transmission and reduces or eliminates the risk of surface condensation;

- insulating building envelope and joints is just one of the thermal modernization measures; improving the building's installations and heat source will improve its energy efficiency (which will be the next stage of the author's calculations).

- docieplenie przegród i złączy budowlanych stanowi tylko jedno z działań termomodernizacyjnych. Usprawnienie instalacji i źródła ciepła w budynku pozwoli na poprawę jego efektywności energetycznej, co będzie stanowiło następny etap obliczeń.

Received: 21.07.2025
Revised: 08.09.2025
Published: 21.11.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 21.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.09.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (DzU z 2017 r. poz. 2285 z późn. zmianami; DzU z 2022 r., poz. 248).

[2] Kasperkiewicz K. Termomodernizacja budynków. Ocena efektów energetycznych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.

[3] Praca zbiorowa pod kierunkiem dr. inż. Szymona Firląga. Kompleksowa termomodernizacja budynków jednorodzinnych. Fundacja Ziemia i Ludzie, Warszawa 2019.

[4] Pawłowski K. Zasady projektowania budynków energooszczędnych. Grupa Wydawnicza Medium, Warszawa 2018.

[5] Praca zespołowa pod redakcją Jerzego Sowcy. Budynek o niemal zerowym zużyciu energii. Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2017.

[6] Pawłowski K. Przykład kształtowania układów materiałowych elementów obudowy budynków niskoenergetycznych. Materiały Budowlane 2023; 4: 41-44.

[7] PN-EN ISO 14683:2017 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.

[8] Wouters P., Schietecata J., Standaert P., Kasperkiewicz K. Ciepłno-wilgotnościowa ocena mostków cieplnych. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2004.

[9] Program komputerowy TRISCO-KOBRU 86.

[10] PN-EN ISO 10211:2017 Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.

[11] PN-EN ISO 6946:2017 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.

[12] 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.

[13] Pawłowski K. Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy. Grupa MEDIUM Warszawa 2016.