

dr inż. Krzysztof Pawłowski, prof. PBS¹⁾
ORCID: 000-0002-6738-5764

Comparative analysis of the physical parameters of the joints of building parts of a low-energy building using prefabricated technology

Analiza porównawcza parametrów fizycznych złączy przegród budowlanych niskoenergetycznego budynku w technologii prefabrykowanej

DOI: 10.15199/33.2024.11.09

Abstract. Shaping the systems of material layers of external partitions and joints in low-energy buildings should not be random, but developed on the basis of detailed calculations and analyzes of physical parameters, taking into account heat flow in a two-dimensional (2D) field. The article presents an analysis of the physical parameters of selected joints of partitions of a low-energy building in prefabricated technology using various material systems.

Keywords: building envelope; low-energy building; construction joints; physical parameters.

Streszczenie. Kształtowanie układów warstw materiałowych przegród zewnętrznych budynków niskoenergetycznych i ich złączy nie powinno być przypadkowe, lecz opracowane na podstawie szczegółowych obliczeń i analiz parametrów fizycznych z uwzględnieniem przepływu ciepła w polu dwuwymiarowym (2D). W artykule przedstawiono analizę parametrów fizycznych wybranych złączy przegród budynku niskoenergetycznego w technologii prefabrykowanej z zastosowaniem zróżnicowanych układów materiałowych.

Słowa kluczowe: przegrody zewnętrzne budynków; budynek niskoenergetyczny; złącza budowlane; parametry fizyczne.

A low-energy building is one that has an annual demand for usable energy for heating purposes does not exceed the limit value $EU_{CO} \leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{year})$. According to [1] "building low energy consumption" meets the requirements formulated in the Act [2] especially regarding thermal protection ($U \leq U_{max.}$) and energy savings ($EP \leq EP_{max.}$) according to regulation [3] effective from January 1, 2021.

Design and construction of buildings to energy-saving standards (including low-energy buildings) should take into account:

- building architecture: compact building shape; minimum ratio shape of the A/V building; greenery on the plot construction; orientation of transparent partitions in relation to cardinal directions;
- thermal quality of the housing elements (limit value of the coefficient heat transfer U external partitions; minimizing the impact of thermal bridges; the use of innovative thermal insulation materials with a low thermal conductivity coefficient λ and other construction and material solutions limiting heat losses);
- central heating and hot water installation solutions and high-efficiency ventilation;
- use of renewable sources energy (RES).

Budynek niskoenergetyczny to taki, którego roczne zapotrzebowanie na energię użytkową na cele ogrzewania nie przekracza wartości granicznej $EU_{CO} \leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$. Zgodnie z [1] „budynek o niskim zużyciu energii” spełnia wymagania sformułowane w Ustawie [2] szczególnie dotyczące ochrony cieplnej ($U \leq U_{max.}$) oraz oszczędności energii ($EP \leq EP_{max.}$) wg rozporządzenia [3] obowiązujące od 1 stycznia 2021 r.

Projektowanie i wykonywanie budynków w standardzie energooszczędnym (w tym budynków niskoenergetycznych) powinno uwzględniać:

- architekturę budynku: zwarta bryła budynku; minimalny współczynnik kształtu budynku A/V; zielen na działce budowlanej; orientacja przegród przezroczystych względem stron świata;
- jakość cieplną elementów obudowy (graniczna wartość współczynnika przenikania ciepła U przegród zewnętrznych; minimalizacja wpływu mostków cieplnych; zastosowanie innowacyjnych materiałów termoizolacyjnych o niewielkim współczynniku przewodzenia ciepła λ oraz innych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ograniczających straty ciepła);
- rozwiązania instalacji c.o., c.w.u. oraz wentylacyjnej o dużej sprawności;
- zastosowanie odnawialnych źródeł energii (OZE).

Zmieniające się wymagania powodują, że na etapie projektowania i wykonywania pojawiają się nowe rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe przegród zewnętrznych. Najczęściej stosowanymi technologiami wznoszenia budynków

¹⁾ Politechnika Bydgoska im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; krzypaw@pbs.edu.pl

Changing requirements mean that new solutions appear at the design and implementation stages construction and materials of partitions external. The most frequently used building construction technologies in Poland are brick, wooden or prefabricated technology. In order to improve the process of constructing buildings, development began structural elements in plants prefabrication. An important role in the process. The construction of buildings is played by walls, which constitute the largest surface area of all partitions.

Partitions made of reinforced concrete or concrete are characterized by good accumulation heat, high resistance to chemical, humidity and temperature factors, which allows for the creation of a favorable microclimate. It stands out prefabricated reinforced concrete or solid concrete walls, layered, composite and combined with insulation (figure 1). Prefabrication is the answer to changing requirements buildings and is consistent with the idea of low-energy and sustainable construction.

The technological precision of elements made in prefabrication plants guarantees their compatibility and creation of a tight building with appropriate microclimate parameters interiors. Even though the initial costs of the components are higher in comparison with traditional brick technology, this in general costs are more favorable.

Related expenses go away with the construction of formwork, employee maintenance, which in general settlement are much greater than usage crane necessary for assembly. Moreover, prefabrication allows for effective management of the investment process and is practically independent of weather conditions, and the works finishing can be performed much faster and easier on precisely made concrete or reinforced concrete surfaces. It is also worth looking at prefabricated elements from a life cycle perspective. In the process their production is no longer used traditional concrete, using „new generation” concretes, including: expanded clay concrete, self-compacting, high-quality concretes with dispersed reinforcement during production, which use waste from various sectors of the economy, and their composition and technology guarantee good properties thermal, longer operation of the building, and the demolition process itself generates less harmful waste and ensures it easier segregation.

General rules performing calculations physical parameters construction joints

Comprehensive assessment of thermal quality elements of low-energy buildings in prefabricated technology includes the analysis of many physical parameters. For this purpose,

w Polsce są technologia murowana, drewniana lub prefabrykowana. W celu usprawnienia procesu wznoszenia budynków zaczęto opracowywać elementy konstrukcyjne w zakładach prefabrykacji. Istotną rolę w procesie wznoszenia budynków odgrywają ściany, które stanowią największą powierzchnię ze wszystkich przegród. Przegrody wykonane z żelbetu lub betonu charakteryzują się dobrą akumulacją ciepła, dużą odpornością na czynniki chemiczne, wilgotnościowe i temperaturowe, co pozwala na stworzenie korzystnego mikroklimatu. Wyróżnia się prefabrykowane ściany żelbetowe lub betonowe pełne, warstwowe, zespolone oraz zespolone z izolacją (rysunek 1). Prefabrykacja jest także odpowiedzią

na zmieniające się wymagania stawiane budynkom i wpisuje się w myśl budownictwa niskoenergetycznego i zrównoważonego.

Precyzyjność technologiczna wykonanych elementów w zakładach prefabry-

kacji gwarantuje ich kompatybilność i powstanie szczelnego budynku o odpowiednich parametrach mikroklimatu wnętrza. Pomimo że początkowo koszty elementów są większe w porównaniu z technologią tradycyjną murowaną, to w kosztach ogólnych kształtują się korzystniej. Odchodzą wydatki związane z wykonywaniem szalunków, utrzymaniem pracowników, które w ogólnym rozrachunku są o wiele większe niż użycie dźwigu niezbędnego do montażu. Ponadto prefabrykacja pozwala na efektywne zarządzanie procesem inwestycyjnym i jest praktycznie uniezależniona od warunków pogodowych, a prace wykończeniowe mogą być wykonywane o wiele szybciej i łatwiej na dokładnie wykonanych powierzchniach betonowych lub żelbetowych. Warto również spojrzeć na elementy prefabrykowane pod kątem cyklu życia. W procesie ich produkcji odchodzi się od używania betonu tradycyjnego, wykorzystując betony „nowej generacji”, m.in. keramzytobeton, betony samozagęszczalne, wysokowartościowe, ze zbrojeniem rozproszonym przy wytwarzaniu, w których używa się odpadów z różnych sektorów gospodarki, a ich skład i technologia gwarantują dobre właściwości cieplne, dłuższą eksploatację budynku, a sam proces rozbiórki generuje mniej szkodliwych odpadów i zapewnia ich łatwiejszą segregację.

Ogólne zasady wykonywania obliczeń parametrów fizycznych złączy budowlanych

Kompleksowa ocena jakości cieplnej elementów budynków niskoenergetycznych w technologii prefabrykowanej obejmuje analizę wielu parametrów fizycznych. W tym celu wykonuje się szczegółowe obliczenia, wykorzystując odpowiedni

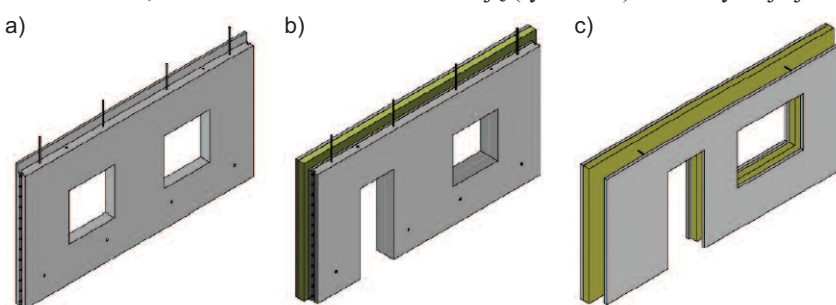


Fig. 1. Types of prefabricated concrete or reinforced concrete walls [4]: a) solid wall; b) sandwich wall; c) wall combined with insulation

Rys. 1. Rodzaje prefabrykowanych ścian betonowych lub żelbetowych [4]: a) ściana pełna; b) ściana warstwowa; c) ściana zespolona z izolacją

detailed calculations are performed using an appropriate computer program and an original computational algorithm presented, among others, in [5]. The procedure for numerical calculation of the physical parameters of the joints includes the following stages:

- adoption of the material system construction joint;
- performing numerical calculations: joint modeling; adopting boundary conditions taking into account internal air temperature (t_i) and external air temperature (t_e) and heat transfer resistance on the internal side (R_{si}) and external (R_{se}); determining the value of the thermal conductivity coefficient λ of building materials;
- determination of physical parameters junctions such as: heat flux Φ ; linear heat transfer coefficient Ψ ; minimum temperature on the inner surface of the partition at the thermal bridge t_{min} ; temperature factor f_{Rsi} ;
- criteria for assessing construction joints: thermal criterion (coefficient heat transfer U , linear heat transfer coefficient Ψ), humidity criterion (temperature factor f_{Rsi});
- selection of the correct material arrangement of the construction joint.

The obtained values of the physical parameters of construction joints depend on used structural building products, type and thickness thermal insulation and shape material structure of the analyzed material connectors. Using values approximate and indicative, e.g. in accordance with PN-EN ISO 14683:2008 [6], becomes unjustified because no they take into account changes in material systems and the type and thickness of thermal insulation. Accuracy of bridge calculation methods thermal energy is respectively [7]:

- numerical calculations: $\pm 5\%$;
- catalog of thermal bridges $\pm 20\%$;
- manual calculations $\pm 20\%$;
- guide values $0 \div 50\%$.

Therefore, it is recommended to perform individual numerical calculations of the analyzed construction joints in order to obtain reliable results calculation results to develop a low-energy building design and choosing the correct solution material, taking into account thermal and humidity requirements.

Example connectors

Calculation examples apply shaping material systems two joints: connection of the external wall with the window in the cross-section through the frame and connection of the external wall with the ceiling in the cross-section through wreath with floating floor. For calculations two types of external walls were selected in prefabricated technology: double-layer with insulation from inside, three-layer, as material solutions proposed by designer and manufacturer of contemporary modular (prefabricated) buildings. Achievement relatively small coefficient value heat transfer U_c of the external wall or window U_w does not guarantee the effect minimizing heat loss through penetration H_{Tr} and limitations of occurrence surface condensation (lowering temperature on the inner

program komputerowy oraz autorski algorytm obliczeniowy prezentowany m.in. w [5]. Procedura obliczeń numerycznych parametrów fizykalnych złącza obejmuje następujące etapy:

- przyjęcie układu materiałowego złącza budowlanego;
- wykonanie obliczeń numerycznych: modelowanie złącza; przyjmowanie warunków brzegowych uwzględniających temperaturę powietrza wewnętrznego (t_i) i zewnętrznego (t_e) oraz opór przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej (R_{si}) i zewnętrznej (R_{se}); określenie wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ materiałów budowlanych;
- określenie parametrów fizykalnych złącza, takich jak: strumień ciepły Φ ; liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ ; temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego t_{min} ; czynnik temperaturowy f_{Rsi} ;
- kryteria oceny złącza budowlanych: kryterium cieplne (współczynnik przenikania ciepła U , liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ), kryterium wilgotnościowe (czynnik temperaturowy f_{Rsi});
- wybór poprawnego układu materiałowego złącza budowlanego.

Uzyskane wartości parametrów fizykalnych złącza budowlanych zależą od zastosowanych konstrukcyjnych wyrobów budowlanych, rodzaju i grubości izolacji cieplnej oraz ukształtowania struktury materiałowej analizowanego złącza. Posługiwanie się wartościami przybliżonymi i orientacyjnymi, np. zgodnie z PN-EN ISO 14683:2008 [6], staje się nieuzasadnione, ponieważ nie uwzględniają one zmiany układów materiałowych oraz rodzaju i grubości termoizolacji. Dokładność metod obliczeń mostków cieplnych wynosi odpowiednio [7]:

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

W związku z tym zaleca się wykonywanie indywidualnych obliczeń numerycznych analizowanych złącza budowlanych, w celu uzyskania miarodajnych wyników obliczeń do opracowania projektu budynku niskoenergetycznego i wybrania poprawnego rozwiązania materiałowego z uwzględnieniem wymagań cieplno-wilgotnościowych.

Przykładowe złącza

Przykłady obliczeniowe dotyczą kształtowania układów materiałowych dwóch złącza: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę oraz połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec z podłogą pływającą. Do obliczeń wytypowano dwa rodzaje ścian wewnętrznych w technologii prefabrykowanej: dwuwarstwowa z ociepleniem od wewnątrz, trójwarstwowa, jako rozwiązania materiałowe proponowane przez projektanta oraz producenta współczesnych budynków modułowych (prefabrykowanych). Osiągnięcie stosunkowo niewielkiej wartości współczynnika przenikania ciepła U_c ściany zewnętrznej lub okna U_w nie gwarantuje efektu minimalizacji strat ciepła przez przenikanie H_{Tr} oraz ograniczenia występowania kondensacji powierzchniowej (obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody

surface partition) and interlayer. For calculations, in the TRISCO-KOBRU 86 computer program [8], the following assumptions (figures 2 and 3):

- external wall I: plasterboard 2 cm thick ($\lambda = 0.23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); foam polyurethane (sprayed – open-cell) 12, 15, 20 cm thick ($\lambda = 0.038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); concrete wall 12 cm thick ($\lambda = 1.70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- external wall II: plasterboard 2 cm thick ($\lambda = 0.23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 12 cm thick concrete wall ($\lambda = 1.70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); polyurethane foam (closed cell) 12

- thick, 15, 20 cm ($\lambda = 0.026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 6 cm thick concrete wall ($\lambda = 1.70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- window joinery with $U_w = 0.81 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
- floating floor: reinforced concrete ceiling 12 cm thick ($\lambda = 1.90 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 2 cm thick hardboard ($\lambda = 0.035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); concrete screed 3 cm thick ($\lambda = 1.00 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 2 cm thick wooden parquet ($\lambda = 0.18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- insulation of the lower surface of the ceiling, 3 cm thick (polyurethane foam spray – open cell);

- joint modeling was done in accordance with PN-EN ISO 10211:2017 [9];

- heat transfer resistance (R_{si}, R_{se}) was adopted according to PN-EN ISO 6946 [10] 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 upwards; $R_{si} = 0.17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – heat flow down; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$), PN-EN ISO 13788 [11] when calculating temperature and medium distribution temperature ($R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – for frames and glazing; $R_{si} = 0.25 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – for the remaining elements; $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$);

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

- values of the thermal conductivity coefficient of building materials λ [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$] according to the tables in [12].

First joint (wall connection external with window) were analyzed in four computational variants (figure 2, table 1):

- variant I – two-layer wall insulated from the inside (without jamb): $I_{(12)}, I_{(15)}, I_{(20)}$;
- variant II – two-layer wall insulated from the inside (with jamb): $I_{w(12)}, I_{w(15)}, I_{w(20)}$;

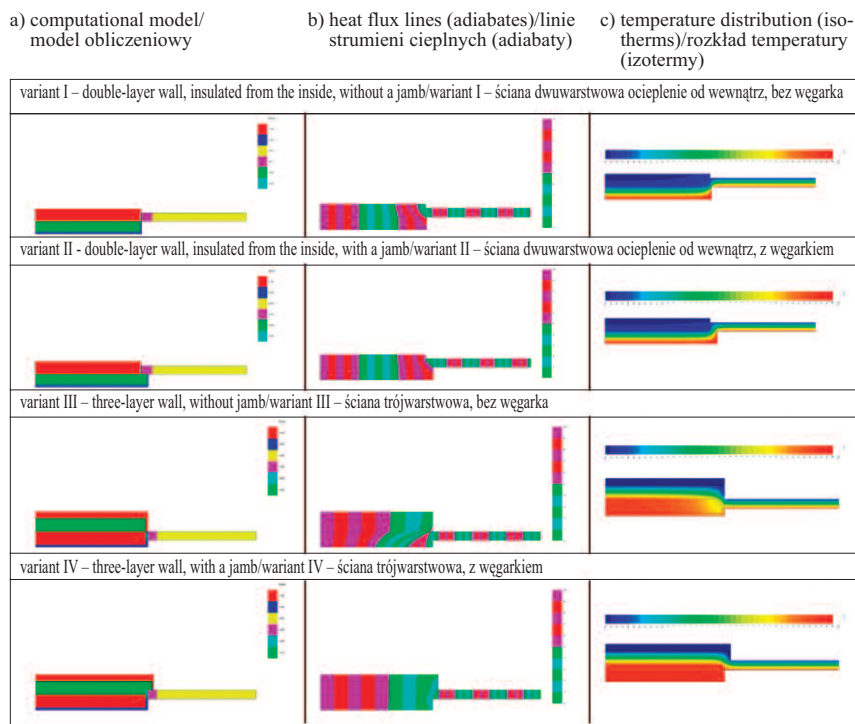


Fig. 2. Results of computer simulation of the connection of the external wall with the window in the cross-section through the frame – own study

Rys. 2. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę – opracowanie własne

- poliuretanowa (zamkniętokomórkowa) grubości 12, 15, 20 cm ($\lambda = 0,026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 6 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- stolarka okienna o $U_w = 0,81 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$;
- podłoga pływająca: strop żelbetowy grubości 12 cm ($\lambda = 1,90 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); płyta pilśniowa twarda grubości 2 cm ($\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); wylewka betonowa grubości 3 cm ($\lambda = 1,00 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); parkiet drewniany grubości 2 cm ($\lambda = 0,18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ocieplenie dolnej powierzchni stropu grubości 3 cm (pianka poliuretanowa natryskowa – otwartokomórkowa);

- modelowanie złączy wykonano zgodnie z PN-EN ISO 10211:2017 [9];

- opory przejmowania ciepła (R_{si}, R_{se}) przyjęto wg PN-EN ISO 6946 [10] przy obliczeniach strumieni ciepłych ($R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – w przypadku poziomego przepływu ciepła; $R_{si} = 0,10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – przepływ ciepła w górę; $R_{si} = 0,17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – przepływ ciepła w dół; $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$), PN-EN ISO 13788 [11] przy obliczeniach rozkładu temperatury i czynnika temperaturowego ($R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ – w przypadku ramy i oszklenia; $R_{si} = 0,25 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$; $R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$);

- 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 λ [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$] wg tabel z [12].

Pierwsze złącze (połączenie ściany zewnętrznej z oknem) analizowano w czterech wariantach obliczeniowych (rysunek 2, tabela 1):

dy) i międzywarstwowej. Do obliczeń, w programie komputerowym TRISCO-KOBRU 86 [8], przyjęto następujące założenia (rysunki 2 i 3):

- ściana zewnętrzna I: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); pianka poliuretanowa (natryskowa – otwartokomórkowa) grubości 12, 15, 20 cm ($\lambda = 0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- ściana zewnętrzna II: płyta g-k grubości 2 cm ($\lambda = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); ściana betonowa grubości 12 cm ($\lambda = 1,70 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$);

- variant III – three-layer wall (without jamb): $\Pi_{(12)}, \Pi_{(15)}, \Pi_{(20)}$;

- variant IV – three-layer wall (with jamb): $\Pi w_{(12)}, \Pi w_{(15)}, \Pi w_{(20)}$.

Results of calculations of physical parameters analyzed connectors in the program TRISCO-KO BRU 86 computer [8] are listed in table 1. Connection the external wall with the ceiling in the cross-section through the ring beam was analyzed in three calculation variants (figure 3, table 2):

- variant I – two-layer wall insulated from the inside: $I_{(12)}, I_{(15)}, I_{(20)}$;

- variant II – two-layer wall insulated from the inside, with additional insulation of the lower surface of the ceiling: $I a_{(12)}, I a_{(15)}, I a_{(20)}$;

- variant III – three-layer wall: $\Pi_{(12)}, \Pi_{(15)}, \Pi_{(20)}$.

Physical parameters of the analyzed ones connectors depend on their individual arrangement material layers. Significant importance has the location and thickness of the material thermal insulation. Improper shaping material layers (lack of thermal insulation or lack of continuity of thermal insulation) causes increased heat losses in the form of: heat flux Φ [W] and linear heat transfer coefficient Ψ_i [W/(m·K)] and temperature reduction on the inner surface of the partition in place of the thermal bridge, which may lead to the risk of surface condensation (table 1 and 2) and interlayer.

Based on the calculations performed (table 1), it is possible to state that the wall connection external with a window in cross-section through the door frame without a jamb (without securing the door frame by thermal insulation) generates greater heat losses (flux values thermal and linear coefficient heat transfer) and the risk of lowering the temperature on inner surface of the partition (risk of surface condensation) than the same connector only with a recess (drawing 2 and table 1). However, the connection double-layer external wall (insulated from the inside) with a ceiling and a floating floor, it is characterized by many different features greater heat losses than when using a wall exter-

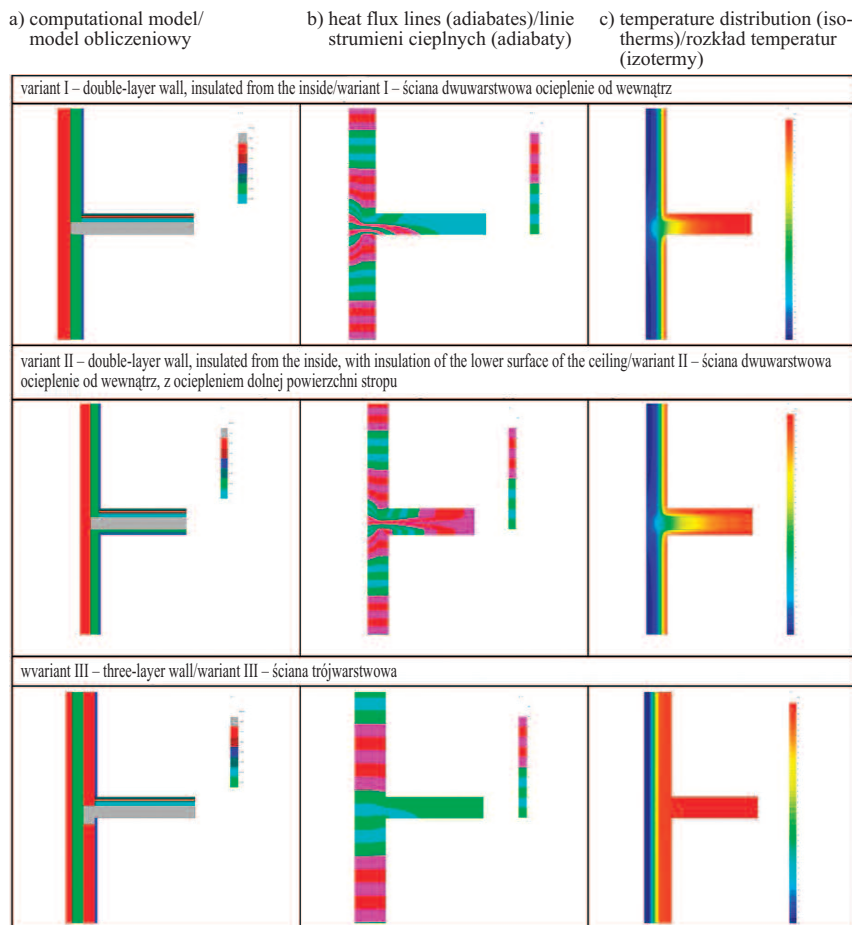


Fig. 3. Results of computer simulation of the connection of the external wall with the ceiling in the cross-section through a ring beam with a floating floor – own study

Rys. 3. Wyniki symulacji komputerowej połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec z podłogą pływającą – opracowanie własne

- wariant I – ściana dwuwarstwowa ocieplona od wewnątrz: $I_{(12)}, I_{(15)}, I_{(20)}$;

- wariant II – ściana dwuwarstwowa ocieplona od wewnątrz, z dodatkowym ociepleniem dolnej powierzchni stropu: $I a_{(12)}, I a_{(15)}, I a_{(20)}$;

- wariant III – ściana trójwarstwowa: $\Pi_{(12)}, \Pi_{(15)}, \Pi_{(20)}$.

Parametry fizyczne analizowanych złączy zależą od ich indywidualnego układu warstw materiałowych. Istotne znaczenie ma usytuowanie i grubość materiału termoizolacyjnego. Niewłaściwe kształtowanie warstw materiałowych (brak izolacji cieplnej lub brak ciągłości izolacji cieplnej) powoduje zwiększone straty ciepła w postaci: strumienia ciepła Φ [W] i liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i [W/(m·K)] oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego, co może prowadzić do ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej (tabela 1 i 2) oraz międzywarstwowej.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabela 1) można stwierdzić, że połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę bez węgarka (bez zabezpieczenia ościeżnicy przez izolację cieplną) generuje większe straty ciepła (wartości strumienia cieplnego i liniowego współczynnika przenikania ciepła) oraz ryzyko obniżenia temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody (ryzyko kondensacji powierzchniowej).

- wariant I – ściana dwuwarstwowa ocieplona od wewnątrz (bez węgarka): $I_{(12)}, I_{(15)}, I_{(20)}$;

- wariant II – ściana dwuwarstwowa ocieplona od wewnątrz (z węgarkiem): $I w_{(12)}, I w_{(15)}, I w_{(20)}$;

- wariant III – ściana trójwarstwowa (bez węgarka): $\Pi_{(12)}, \Pi_{(15)}, \Pi_{(20)}$;

- wariant IV – ściana trójwarstwowa (z węgarkiem): $\Pi w_{(12)}, \Pi w_{(15)}, \Pi w_{(20)}$.

Wyniki obliczeń parametrów fizycznych analizowanych złączy w programie komputerowym TRISCO-KOBRU 86 [8] zestawiono w tabeli 1. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec analizowano również w trzech wariantach obliczeniowych (rysunek 3, tabela 2):

Table 1. Results of calculations of the physical parameters of the connection between the external wall and the window in the cross-section through the frame (own study)

Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę (opracowanie własne)

Computational variant/ Wariant obliczeniowy	U/U_w [W/(m ² •K)]	Φ [W]	Ψ_i [W/(m•K)]	t_{min} [°C]	f_{Rsi} [-]
$I_{(12)}$	0,29/0,81	48,52	0,117	-1,52	0,462
$I_{(15)}$	0,24/0,81	46,60	0,122	-1,59	0,460
$I_{(20)}$	0,18/0,81	44,95	0,136	-3,44	0,414
$Iw_{(12)}$	0,29/0,81	43,96	0,044	10,31	0,758
$Iw_{(15)}$	0,24/0,81	41,92	0,049	10,23	0,756
$Iw_{(20)}$	0,18/0,81	39,87	0,055	10,06	0,752
$II_{(12)}$	0,20/0,81	50,14	0,256	12,36	0,809
$II_{(15)}$	0,16/0,81	48,87	0,263	12,49	0,812
$II_{(20)}$	0,12/0,81	47,60	0,271	12,62	0,815
$IIw_{(12)}$	0,20/0,81	39,95	0,025	17,18	0,930
$IIw_{(15)}$	0,16/0,81	38,48	0,028	17,39	0,935
$IIw_{(20)}$	0,12/0,81	37,01	0,031	17,59	0,940

U – heat transfer coefficient of the external wall, U_w – window heat transfer coefficient, Φ – heat flux flowing through the joint, Ψ_i – linear heat transfer coefficient (according to internal dimensions), t_{min} – minimum temperature on the inner surface of the partition, f_{Rsi} – temperature factor. External partitions that meet the thermal criterion are marked in green $U \leq U_{max}$, where accepted $U_{max} = 0,20$ W/(m²•K) – for the external wall, $U_{max} = 0,90$ W/(m²•K) – for window joinery.

U – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej; U_w – współczynnik przenikania ciepła okna; Φ – strumień ciepły przepływający przez złącze; Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych), t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody; f_{Rsi} – czynnik temperaturowy. Kolorem zielonym zaznaczono przegrody zewnętrzne spełniające kryterium cieplne $U \leq U_{max}$, gdzie U_{max} w przypadku ściany zewnętrznej wynosi 0,20 W/(m²•K), a w przypadku stolarki okiennej – 0,90 W/(m²•K)

Table 2. Results of calculations of the physical parameters of the connection between the external wall and the ceiling (own study)

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów fizycznych połączenia ściany zewnętrznej ze stropem (opracowanie własne)

Computational variant/ Wariant obliczeniowy	U [W/(m ² •K)]	Φ [W]	Ψ_i [W/(m•K)]	t_{min} [°C]	f_{Rsi} [-]
$I_{(12)}$	0,29	47,43	0,612	2,89	0,529
$I_{(15)}$	0,24	41,48	0,569	4,03	0,497
$I_{(20)}$	0,18	34,66	0,509	5,64	0,451
$Ia_{(12)}$	0,29	38,99	0,415	13,15	0,829
$Ia_{(15)}$	0,24	34,08	0,396	13,62	0,840
$Ia_{(20)}$	0,18	28,63	0,367	14,19	0,855
$II_{(12)}$	0,20	17,71	0,041	18,18	0,955
$II_{(15)}$	0,16	14,37	0,033	18,52	0,963
$II_{(20)}$	0,12	10,94	0,025	18,87	0,972

U – heat transfer coefficient of the external wall, Φ – heat flux flowing through the joint, Ψ_i – linear heat transfer coefficient (according to internal dimensions), t_{min} – minimum temperature on the inner surface of the partition, f_{Rsi} – temperature factor. External partitions that meet the thermal criterion are marked in green $U \leq U_{max}$, where accepted $U_{max} = 0,20$ W/(m²•K) – for the external wall.

U – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej; Φ – strumień ciepły przepływający przez złącze; Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych), t_{min} – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody; f_{Rsi} – czynnik temperaturowy. Kolorem zielonym zaznaczono przegrody zewnętrzne spełniające kryterium cieplne $U \leq U_{max}$, gdzie U_{max} w przypadku ściany zewnętrznej wynosi 0,20 W/(m²•K)

nal three-layer. You should notice the lack of continuity thermal insulation also causes significant temperature reduction on internal surface of the partition ($t_{min} = 2.89^{\circ}C/4.03^{\circ}C/5.64^{\circ}C$) – variant I (table 2). Additional shades not below and above the surface ceiling with thermal insulation material 3 cm thick minimizes this phenomenon – variant II (table 2).

wej) niż takie samo złącze tylko z węgarkiem (rysunek 2 i tabela 1). Natomiast połączenie ściany zewnętrznej dwuwarstwowej (ocieplonej od wewnątrz) ze stropem i podłogą pływającą charakteryzuje się znacznie większymi stratami ciepła niż w przypadku zastosowania ściany zewnętrznej trójwarstwowej. Należy zauważyć, że brak ciągłości izolacji cieplnej powoduje także znaczne obniżenie temperatury na wewnętrznej

To determine the risk of developing surface condensation (mold) at the bridge site thermal value is compared calculation factor tempera – in the place of the thermal bridge f_{Rsi} (table 1 and 2) with the value limit (critical) $f_{Rsi(critical)}$. In case it is fulfilled the inequality $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(critical)}$ does not occur risk of surface condensation (risk of mold growth).

The critical temperature factor $f_{Rsi(crit.)}$ can be determined:

- in a simplified way: $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, $f_{Rsi(crit.)} = 0.72$,
- thoroughly (taking into account outdoor air parameters and internal).

Calculation procedures $f_{Rsi(crit.)}$ presented, among others, in [12]. Value critical temperature factor $f_{Rsi(crit.)}$ in the case of the third room humidity class at $t_i = 20^\circ\text{C}$ is respectively: $f_{Rsi(crit.)} = 0.785$ for location in Bydgoszcz, $f_{Rsi(crit.)} = 0.789$ for the Warsaw location.

Results analysis

Based on the calculations performed (tables 1 and 2), it was found that in some calculation variants there is a risk of occurrence surface condensation (risk mold growth) because it was not inequality fulfilled: $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(crit.)}$. From the analysis of temperature distribution charts (isotherm distribution) in joints insulated from the inside (figures 2 and 3) shows that the concrete wall layer is located range below 0°C . This phenomenon contributes to the risk of condensation inside the partition (inside the construction joint). Verification risk of condensation interlayer in external partitions and construction joints requires computer simulation taking into account the parameters external and internal air in accordance with PN-EN ISO 13788 [11]. Detailed calculations and analyzes are presented, among others: in [13, 14].

The impact of thermal bridges on losses heat through a building element can be assessed based on the value of the linear transmittance coefficient heat Ψ and point coefficient heat transfer χ . Assessment of the Ψ value and χ has not been defined (standardized), but it is possible to formulate certain criteria in national regulations on building insulation. In regulation [3] no limit values for the linear and point coefficients were specified heat transfer while reducing coefficient limits heat transfer U single building partitions. High value of the linear heat transfer coefficient Ψ does not automatically mean significant thermal bridge. According to the definition, Ψ values are treated as correction factors for the calculation of one-dimensional heat losses, using whose geometric aspect (defined by adopting dimensions) should be taken into account, as well as the increase in heat flux. Example of classification of the impact of thermal bridges depending on the value of the linear heat transfer coefficient according to work [7] is as follows:

- very large impact if $\Psi \geq 0.50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- large impact if $\Psi = 0.25 \div 0.50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- small impact if $\Psi = 0.10 \div 0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- negligible impact if $\Psi < 0.10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

powierzchni przegrody ($t_{min.} = 2,89^\circ\text{C}/4,03^\circ\text{C}/5,64^\circ\text{C}$) – wariant I (tabela 2). Dodatkowe ocieplenie dolnej powierzchni stropu materiałem termoizolacyjnym grubości 3 cm minimalizuje to zjawisko – wariant II (tabela 2).

W celu określenia ryzyka rozwoju kondensacji powierzchniowej (pleśni) w miejscu mostka cieplnego porównuje się wartość obliczeniową czynnika temperaturowego w miejscu mostka cieplnego f_{Rsi} (tabela 1 i 2) z wartością graniczną (krytyczną) $f_{Rsi(kryt.)}$. W przypadku, gdy spełniona jest nierówność $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(kryt.)}$ nie występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej (ryzyko rozwoju pleśni).

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

- w sposób uproszczony: $t_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 50\%$, $f_{Rsi(kryt.)} = 0,72$,
- w sposób dokładny (uwzględniając parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego).

Procedury obliczeniowe $f_{Rsi(kryt.)}$ przedstawiono m.in. w [12]. Wartość krytyczna czynnika temperaturowego $f_{Rsi(kryt.)}$ w przypadku trzeciej klasy wilgotności w pomieszczeniu przy $t_i = 20^\circ\text{C}$ wynosi odpowiednio: $f_{Rsi(kryt.)} = 0,785$ dla lokalizacji Bydgoszcz, $f_{Rsi(kryt.)} = 0,789$ dla lokalizacji Warszawa.

Analiza wyników

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń (tabela 1 i 2) stwierdzono, że w niektórych wariantach obliczeniowych występuje ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej (ryzyko rozwoju pleśni), ponieważ nie została spełniona nierówność: $f_{Rsi} \geq f_{Rsi(kryt.)}$. Z analizy wykresów rozkładu temperatury (rozkład izoterm) w złączach ocieplonych od wewnątrz (rysunek 2 i 3) wynika, że warstwa muru z betonu znajduje się w zakresie poniżej temperatury 0°C . Takie zjawisko przyczynia się do ryzyka kondensacji wewnątrz przegrody (wewnątrz złącza budowlanego). Sprawdzenie ryzyka występowania kondensacji międzywarstwowej w przegrodach zewnętrznych i złączach budowlanych wymaga przeprowadzenia symulacji komputerowej z uwzględnieniem parametrów powietrza zewnętrznego i wewnętrznego zgodnie z PN-EN ISO 13788 [11]. Szczegółowe obliczenia i analizy prezentowane są m.in. w [13, 14].

Wpływ mostków termicznych na straty ciepła przez element budynku może być oceniony na podstawie wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ i punktowego współczynnika przenikania ciepła χ . Ocena wartości Ψ i χ nie została zdefiniowana (znormalizowana), ale istnieje możliwość sformułowania pewnych kryteriów w krajowych przepisach dotyczących izolacyjności budynków. W rozporządzeniu [3] nie określono wartości granicznych liniowego i punktowego współczynnika przenikania ciepła, jednocześnie obniżając wartości graniczne współczynnika przenikania ciepła U pojedynczych przegród budynku. 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 ciepłego. Przykładowa klasyfikacja wpływu mostków cieplnych

Depending on the linear value transfer coefficient Ψ (tables 1 and 2), the influence of the thermal bridge can be assessed according to the presented classification. It should be emphasized that one of the design guidelines for low-energy buildings (buildings with low energy consumption) is minimization the influence of thermal bridges in the aspect thermo-humidity (minimization of the linear coefficient value heat transfer Ψ and the risk of surface condensation - limiting the temperature drop on the internal surface of the partition at the thermal bridge).

Computational examples presented they do not exhaust all characters tangential joints or building partitions – low energy buildings in prefabricated technology. Justified it becomes necessary to perform parameter calculations physical properties of other construction joints and development of a catalog of exemplary ones construction and material solutions, which will be basic source of knowledge for designers and contractors. In the works [15 ÷ 18] it is presented results of calculations of physical parameters selected construction joints (in the case of other material solutions than in tables 1 and 2) along with the analysis their impact on thermal and humidity issues, i.e.: restriction of additional heat loss in a two-dimensional field; reducing the occurrence of condensation surface; impact of losses heat through thermal bridges on indicators energy performance of the building, e.g. EU.

Based on the analysis received results of calculations of physical parameters (table 1 and 2) it can be concluded that material solution of joints in the form of three-layer wall should be used in the design process and construction of low-energy buildings using prefabricated technology.

Summary and conclusions

A large range of modern construction and material solutions does not guarantee high thermal quality of the casing elements of a low-energy building. High awareness of the designer and contractor in the field of thermal and humidity phenomena when designing and carrying out works in accordance with the project makes it possible to achieve the expected effects. Prefabricated elements in the layout double-layer (with insulation from the inside) and three-layer fit in in material solutions of buildings low energy. There is a possibility obtaining a low coefficient value heat transfer U below the value border according to regulation [3] (table 1 and 2). At the design stage you should also analyze physical parameters construction joints in additional aspects heat loss (in the form of linear heat transfer coefficient Ψ) and the risk of surface condensation (i.e. temperature distribution and temperature factor f_{Rsi}) – table 1 and 2. Reliable calculations numerical physical parameters of the joints construction allow for selection correct material solutions in terms of temperature and humidity. Catalogs should be developed on their basis model external partitions and connectors of low-energy buildings in prefabricated technology.

w zależności od wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła wg pracy [7] przedstawia się następująco:

- bardzo duży wpływ, jeżeli $\Psi \geq 0,50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;
- duży wpływ, jeżeli $\Psi = 0,25\div 0,50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;
- mały wpływ, jeżeli $\Psi = 0,10\div 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;
- pomijalny wpływ, jeżeli $\Psi < 0,10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

W zależności od wartości liniowego współczynnika przenikania Ψ (tabela 1 i 2) można ocenić wpływ mostka cieplnego wg przedstawionej klasyfikacji. Należy podkreślić, że jedną z wytycznych projektowych budynków niskoenergetycznych (budynków o niskim zużyciu energii) jest minimalizacja wpływu mostków cieplnych w aspekcie cieplno-wilgotnościowym (minimalizacja wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ oraz ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej – ograniczenie obniżenia temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego).

Przedstawione przykłady obliczeniowe nie wyczerpują wszystkich charakterystycznych złączy przegród budowlanych niskoenergetycznego budynku w technologii prefabrykowanej. Zasadne staje się przeprowadzenie obliczeń parametrów fizykalnych innych złączy budowlanych i opracowanie katalogu wzorcowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, który będzie stanowił podstawowe źródło wiedzy dla projektantów i wykonawców. W pracach [15 ÷ 18] przedstawiono wyniki obliczeń parametrów fizykalnych wybranych złączy budowlanych (w przypadku innych rozwiązań materiałowych niż w tabeli 1 i 2) wraz z analizą ich wpływu na zagadnienia cieplno-wilgotnościowe, tj.: ograniczenie dodatkowych strat ciepła w polu dwuwymiarowym; ograniczenie występowania kondensacji powierzchniowej; wpływ strat ciepła przez mostki cieplne na wskaźniki charakterystyki energetycznej budynku, np. EU. Na podstawie analizy otrzymanych wyników obliczeń parametrów fizykalnych (tabela 1 i 2) można stwierdzić, że rozwiązania materiałowe złączy w postaci ściany trójwarstwowej powinny być stosowane w procesie projektowania i wznoszenia niskoenergetycznych budynków w technologii prefabrykowanej.

Podsumowanie i wnioski

Duży asortyment współczesnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych nie gwarantuje wysokiej jakości cieplnej elementów obudowany budynku niskoenergetycznego. Wysoka świadomość projektanta i wykonawcy w zakresie zjawisk cieplno-wilgotnościowych przy projektowaniu oraz wykonaniu prac zgodnie z projektem daje możliwość uzyskania zakładanych efektów.

Elementy prefabrykowane w układzie dwuwarstwowym (z ociepleniem od wewnątrz) oraz trójwarstwowym wpisują się w rozwiązania materiałowe budynków niskoenergetycznych. Istnieje możliwość uzyskania małej wartości współczynnika przenikania ciepła U poniżej wartości granicznej wg rozporządzenia [3] (tabela 1 i 2). Na etapie projektowania należy także przeanalizować parametry fizykalne złączy budowlanych w aspekcie dodatkowych strat ciepła (w postaci liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ) oraz ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej (określenie rozkładu temperatury i czynnika temperaturowego f_{Rsi}) – tabela 1 i 2. Miarodajne obliczenia numeryczne parametrów fizykalnych złączy

It becomes justified to specify it in the regulation [3] maximum linear value heat transfer coefficient Ψ_{\max} , 2D two-dimensional joints (in the case of newly designed buildings and modernized). I propose the limit value is also withdrawn temperature factor at the level of 0.72 from the regulation [2] and definition limit (critical) values in the case of the selected location of the building and the conditions of its use.

Received: 24.08.2024

Revised: 24.09.2024

Published: 25.11.2024

budowlanych pozwalają na wytypowanie poprawnych rozwiązań materiałowych w aspekcie ciepło-wilgotnościowym. Na ich podstawie należy opracować katalogi wzorcowych przegród zewnętrznych i złączy budynków niskoenergetycznych w technologii prefabrykowanej.

Zasadne staje się określenie w rozporządzeniu [3] wartości maksymalnej liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_{\max} złączy dwuwymiarowych 2D (w przypadku budynków nowo projektowanych i modernizowanych). Proponuje się także wycofanie wartości granicznej czynnika temperaturowego na poziomie 0,72 z rozporządzenia [2] i określenie wartości granicznych (krytycznych) w przypadku wybranej lokalizacji budynku oraz warunków jego użytkowania.

Artykuł wpłynął do redakcji: 24.08.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.09.2024 r.

Opublikowano: 25.11.2024 r.

Literature

[1] Uchwała Rady Ministrów z 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii”.

[2] Ustawa z 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. z 2013 r. poz. 1409, z późn.zm.).

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

[4] Podworska P. Analiza porównawcza parametrów technicznych budynku z uwzględnieniem wymagań budownictwa zrównoważonego, praca magisterska napisana pod kierunkiem dr. inż. Krzysztofa Pawłowskiego, Politechnika Bydgoska, Bydgoszcz 2022 r.

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

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

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

[8] Program komputerowy TRISCO-KOBRU 86.

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

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

[11] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepło-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania.

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

[13] Orlik-Koźdoń B. Projektowanie izolacji termicznej ścian zewnętrznych od wewnątrz w budynkach historycznych. W: Naprawy i wzmocnienia konstrukcji. Budownictwo ogólne. XXXVIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła, 9 - 12 kwietnia 2024. T. 1, Wykłady / Drobiec Łukasz (red.), 2024, Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa. Oddział w Bielsku-Białej, s. 375 ÷ 426.

[14] Orlik-Koźdoń B. Interior Insulation of Masonry Walls-Selected Problems in the Design. Energies. 2019, 12, 3895, s. 1 ÷ 22.

[15] Adamus J, Pomada, M. Analysis of the influence of external wall material type on the thermal bridge at the window-to-wall interface. Materials. 2023; 16(19), 6585.

[16] Krause P. The numeric calculation of selected thermal bridges in the walls of AAC. Cement Wapno Beton. 2017; 22, 371 ÷ 380.

[17] Kim H, Yeo M. Thermal bridge modeling and a dynamic analysis method using the analogy of a steady-state thermal bridge analysis and system identification process for building energy simulation: methodology and validation. Energies. 2020; 13(17), 4422.

[18] Lu J, Xue Y, Wang Z, Fan Y. Optimized mitigation of heat loss by avoiding wall-to-floor the thermal bridges in reinforced concrete buildings. Journal of Building Engineering. 2020; 30, 101214.