

Marta Maciaszek*, Krzysztof Pawłowski*

KSZTAŁTOWANIE UKŁADÓW MATERIAŁOWYCH PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH I ZŁĄCZY BUDOWLANYCH BUDYNKU NISKOENERGETYCZNEGO – STUDIUM PRZYPADKU

1. WSTĘP

Projektowanie obiektów budowlanych koncentruje się przede wszystkim na spełnieniu wymogów bezpieczeństwa, odpowiada za nie warstwa nośna – konstrukcyjna przegród zewnętrznych. Istotnym zagadnieniem jest również odpowiedni dobór warstw izolacji cieplnej przegrody, która wpływa na komfort cieplny użytkowników.

Regulacje zawarte w postanowieniach Dyrektywy 2010/31/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków [1] dotyczą obszaru efektywnego wykorzystania energii w budynkach, poprzez nałożenie na kraje członkowskie obowiązku zwiększenia efektywności energetycznej w budownictwie. Dyrektywa wprowadziła pojęcie „budynek o niemal zerowym zużyciu energii” – nZEB, opisujące budynek o wysokiej charakterystyce energetycznej, określanej zgodnej z wytycznymi. Nowo wznoszone obiekty budowlane będą musiały cechować się wysoką charakterystyką energetyczną, co oznacza prawie zerowe zużycie energii. Zaleca się także, aby energia wytwarzana na miejscu – w budynku lub w jego pobliżu była pozyskiwana z odnawialnych źródeł. Uwzględniając postanowienia Dyrektywy 2010/31/UE opracowano „Krajowy plan działań” [10], według którego „budynek o niskim zużyciu energii” to taki budynek, który spełnia wymogi związane z oszczędnością energii i izolacyjnością zawarte w przepisach techniczno-użytkowych, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1 ustawy – Prawo budowlane [11], tj. w szczególności dział X oraz załącznik 2 do rozporządzenia [9] obowiązujące od 1 stycznia 2021 roku (w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością – od 1 stycznia 2019 r.).

Takie podejście oddziałuje na wzrost innowacyjności, wdrażanie nowych technologii w budownictwie oraz zapotrzebowania na nowoczesne materiały izolacyjne i coraz lepsze rozwiązania energooszczędne do wznoszenia budynków niskoenergetycznych.

2. WYMAGANIA CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE WEDŁUG OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW PRAWNYCH

Wprowadzona 1 stycznia 2014 r. nowelizacja Rozporządzenia Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniająca rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bu-

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J Śniadeckich w Bydgoszczy

dynki i ich usytuowanie [9] stopniowo zaostrza przepisy dotyczące m.in. wartości współczynnika przenikania ciepła U_c oraz wskaźnika obliczeniowego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną EP. Nowelizacja Rozporządzenia [9] określa wymagania ogólne oraz szczegółowe do projektowania i wykonywania budynków – przy czym dla nowo wybudowanych budynków konieczne jest jednocześnie spełnienie obu z nich (tj. $U_c \leq U_{c(max)}$ i $EP \leq EP_{max}$).

Od 1 stycznia 2017 r. obowiązują nowe wymagania prawne wprowadzone przez rozporządzenie [9], jest to drugi etap zmian, ostatni – trzeci etap obowiązywać będzie od 1 stycznia 2019 r. dla budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością, a dla pozostałych budynków od 1 stycznia 2021 r. Taki etapowy układ umożliwi uczestnikom procesu budowlanego płynne dostosowanie się do obowiązujących wymogów. W tabeli 1 przedstawiono wymagania szczegółowe wartości maksymalnych współczynnika przenikania ciepła $U_{c(max)}$ przegród zewnętrznych.

Tabela 1. Wymagania szczegółowe wartości maksymalnych współczynnika przenikania ciepła $U_{c(max)}$ przegród zewnętrznych

Charakterystyczne parametry przegrody		Współczynnik przenikania ciepła $U_{c(max)}$ [W/(m ² ·K)] przegród zewnętrznych budynku wg [9]		
		od 1.01.2014 r.	od 1.01.2017 r.	od 1.01.2021r. *)
Ściana zewnętrzna	$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,25	0,23	0,20
Dachy, stropodachy i stropy pod nieogrzewanymi poddaszami lub przejazdami	$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,20	0,18	0,15
Podłoga na gruncie	$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,30	0,30	0,30
Stropy nad piwnicami nieogrzewanymi i zamkniętymi przestrzeniami podłogowymi	$t_i \geq 16^\circ\text{C}$	0,25	0,25	0,25
Stropy nad ogrzewanymi pomieszczeniami podziemnymi i stropy międzykondygnacyjne	$\Delta t_i \geq 8^\circ\text{C}$	1,00	1,00	1,00
	$\Delta t_i < 8^\circ\text{C}$	bez wymagań	bez wymagań	bez wymagań
	oddzielające pomieszczenie ogrzewane od nieogrzewanego	0,25	0,25	0,25
Liniiowy współczynnik przenikania ciepła (mostków cieplnych) ψ [W/(m·K)]	pozostałe mostki cieplne	brak wymagań	brak wymagań	brak wymagań

t_i – Temperatura pomieszczenia ogrzewanego

*) Od 1.01.2019 r. – w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością.

źródło: opracowanie własne na podstawie Rozporządzenia [9]

Zmiany prawne obligują do projektowania oraz wykonywania budynków w standardzie niskoenergetycznym lub pasywnym – o prawie zerowym zużyciu energii. Najczęściej stosowane materiały termoizolacyjne – wełna mineralna oraz styropian (o pewnych grubościach warstw) nie wystarczają do spełnienia wymagań w zakresie ochrony ciepłno-wilgotnościowej. Ich wykorzystanie przestaje być również opłacalne pod względem ekonomicznym. Zasadne staje się zatem wykonywanie przegród zewnętrznych z zastosowaniem materiałów nowoczesnych – efektywnych cieplnie, np. w postaci izolacji poliuretanowych PUR, poliizocyanurowych PIR, płyt rezolowych lub aerożelu.

Niestety pomimo wprowadzania etapowych zmian obejmujących obniżanie tych wartości, wymagane wartości U_C nie uwzględniają wpływu przepływu ciepła w polu dwu- i trójwymiarowym (2D i 3D), wpływu mostków cieplnych (liniowych i przestrzennych) oraz wartości granicznych (maksymalnych) liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] dla mostków cieplnych. W związku z tym istnieje potrzeba określenia także tych wartości, w celu zweryfikowania poprawności projektowanych – rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych złączy przegród zewnętrznych.

Rozporządzenie [9] podaje także wymagania dotyczące spełnienia warunków w zakresie występowania powierzchniowej kondensacji pary wodnej. Ochrona wilgotnościowa jest nieodzownym elementem projektowania i wykonywania obiektów budowlanych, należy ją uwzględnić na wczesnym etapie prowadzonych prac, zapewniając ciągłość izolacji przeciwwodnej lub przeciwilgociowej. Spełnienie kryterium wilgotnościowego umożliwi ograniczenie kondensacji wewnątrz przegrody oraz pozwala wyeliminować kondensację powierzchniową. Wymagania zmieniające się w zakresie ochrony ciepłno-wilgotnościowej umożliwiają także zmniejszenie strat ciepła czy ryzyka występowania rozwoju pleśni i grzybów pleśniowych.

Czynnik temperaturowy f_{Rsi} , charakteryzuje zagadnienia wilgotnościowe na wewnętrznej powierzchni przegrody. Określany jest dla przegród zewnętrznych budynku oraz ich złączy (przy przepływie ciepła w polu 2D i 3D). Jego wartość należy obliczać zgodnie z normą PN EN ISO 13788:2003 [7] – dla przegród oraz w przypadku mostków cieplnych stosując model przestrzenny przegrody – według normy PN-EN ISO 10211:2008 [8]. Wartość czynnika temperaturowego f_{Rsi} powinna być nie mniejsza niż wartość krytyczna, obliczona zgodnie z normą [8]. Spełnienie warunku $f_{Rsi(obl.)} \geq f_{Rsi(kryt.)}$ powoduje wyeliminowanie wystąpienia ryzyka kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody. Rozporządzenie [9] pozwala na przyjęcie wartości krytycznej czynnika temperaturowego równej 0,72, jednak w praktyce projektowej unika się stosowania wartości krytycznej f_{Rsi} na tym poziomie. Prawidłowe zaprojektowanie przegrody wymaga określenia wartości $f_{Rsi(kryt)}$ obliczanej dla każdego miesiąca, uwzględniając przy tym parametry powietrza zewnętrznego (lokalizacja budynku) i wewnętrznego (zależnie od klasy wilgotności pomieszczeń), a następnie wybrania najwyższej wartości $f_{Rsi(kryt)}$ spośród 12 miesięcy. Wymagania przepisów prawnych [9] dopuszczają przypadek, w którym w okresie zimowym kondensa-

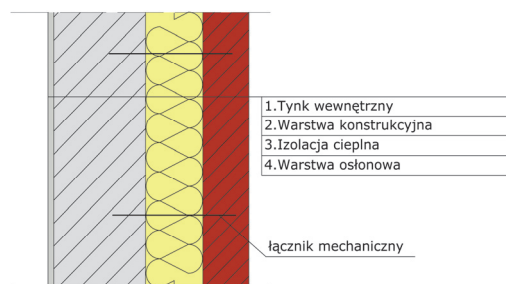
cja pary wodnej wewnątrz przegrody wystąpi, przy założeniu odpowiednich właściwości przegrody budowlanej, której struktura pozwoli w okresie letnim na wyparowanie kondensatu. Przy czym wskutek kondensacji nie można dopuścić do degradacji konstrukcyjno-materiałowej.

3. CHARAKTERYSTYKA ROZWIĄZAŃ MATERIAŁOWYCH ŚCIAN TRÓJWARSTWOWYCH I ICH ZŁĄCZY

Ściana zewnętrzna, jest pionową przegrodą, elementem (konstrukcyjnym lub osłonowym) budynku, która oddziela jego wnętrze od otoczenia zewnętrznego oraz towarzyszących mu wpływów fizykalnych. Pełni funkcję zabezpieczenia przeciwpożarowego oraz przed zagrożeniem wyjątkowym. Dla ścian zewnętrznych nośnych głównym zadaniem jest przeniesienie pionowych obciążeń od stropu oraz dachu, a także obciążeń poziomych, związanych z działaniem wiatru; na ściany fundamentowe, na które z kolei oddziałują siły przekazywane przez grunt. Istotne jest także zapewnienie odpowiedniej izolacji termicznej, akustycznej i wilgotnościowej. Ruchy ciepła, które przenikają przez przegrodę powstają wskutek różnicy temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Zmiany temperatury oraz wilgotności mogą powodować powstanie zjawiska dyfuzji pary wodnej, a także powierzchniowej kondensacji wilgoci lub kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody, dlatego niezbędna jest ochrona w tym zakresie.

Rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe bezpośrednio wpływają na cechy przegród pionowych. Wybór konkretnych surowców potrzebnych do wykonywania ścian powinien wynikać ze zmian w przepisach prawnych, prowadzą one przy tym do stosowania coraz nowszych materiałów budowlanych oraz tworzenia bardziej efektywnych układów konstrukcyjnych. Przy wznoszeniu ścian budynków najczęściej stosuje się elementy murowe lub drewniane. Ściany można podzielić z uwagi na rodzaj konstrukcji opisujący liczbę warstw, które składają się na przegrodę – jedno- lub wielowarstwowe.

Ściana trójwarstwowa (rys. 1) jest jednym z przykładów ściany wielowarstwowej. Tworzą ją trzy połączone ze sobą warstwy – nośna, ciepła i osłonowa, z których każda spełnia osobną funkcję. Najważniejszym elementem pod względem bezpieczeństwa konstrukcji, wytrzymałości oraz stabilności całej przegrody jest warstwa nośna, odpowiadająca za przenoszenie obciążeń (pionowych oraz poziomych). Zapewnia też stateczność termiczną budynku dzięki zwiększonej akumulacji ciepła. Warstwa izolacyjna ogranicza straty ciepła, wpływa nie tylko na właściwości termiczne, ale także akustyczne ściany. Ostatnim elementem jest warstwa osłonowa (elewacyjna, licowa). Z uwagi na jej bezpośredni kontakt ze środowiskiem zewnętrznym, jest odpowiedzialna za ograniczenie negatywnego wpływ czynników atmosferycznych dla całej przegrody. Warstwa ta stanowi również ochronę warstwy cieplnej przed uszkodzeniami, wpływa na walory estetyczne budynku.



Rys. 1. Układ warstw materiałowych trójwarstwowej ściany zewnętrznej – opracowanie własne

Warstwa nośna ścian trójwarstwowych może być wykonana np. z materiałów ceramicznych, silikatowych, betonowych, z autoklawizowanego betonu komórkowego oraz elementów keramzytobetonowych. Natomiast warstwa izolacji termicznej wykonywana jest najczęściej ze styropianu, wełny mineralnej, a także z płyt poliuretanowych lub użyciem nowych technologii – np. w postaci aerożelu. W pracy przedstawiono charakterystykę dwóch materiałów termoizolacyjnych, stosowanych do ścian zewnętrznych trójwarstwowych. Materiały izolacyjne charakteryzuje przede wszystkim współczynnik przewodzenia ciepła λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], określa on intensywność wymiany ciepła przez dany materiał. Parametr ten ma bezpośredni wpływ na opór cieplny przegrody oraz na grubość projektowanej termoizolacji, co wiąże się z wartością współczynnika przenikania ciepła U [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$].

Polistyren ekspandowany, spieniony (EPS z ang. Expanded PolyStyrene) jest materiałem termoizolacyjnym wykorzystywany najczęściej do ocieplenia ścian zewnętrznych. Powstaje w wyniku ekspandowania – spienienia granulek polistyrenu, które w wyniku tego procesu zwiększają swoją objętość. Gotowy produkt zawiera 98% powietrza zamkniętego w porach i 2% polistyrenu. Jego struktura wpływa na dobre właściwości cieplne. W zależności od gęstości, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 0,033\div 0,045$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]. Jest materiałem syntetycznym – nienasiąkliwym, trwałym i nie zawiera substancji, szkodliwych dla zdrowia. Odmianą polistyrenu ekspandowanego jest styropian grafitowy, który dzięki dodatkom w postaci materiału absorbującego np. grafitu, charakteryzuje się lepszymi właściwościami izolacyjnymi. Współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,031\div 0,033$ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]. Absorbowanie promieniowania słonecznego i ciepłego jest większe i wynika z ciemniejszego koloru styropianu, niestety jednocześnie nagrzewając materiał. Dlatego zewnętrzna warstwa produkowanych płyt jest niekiedy z jaśniejszego styropianu, który lepiej odbija promieniowanie UV [5].

Poliuretan jest nieorganicznym materiałem izolacyjnym. Otrzymywany jest z dwóch ciekłych składników połączonych ze sobą tzw. A i B. Materiał jest lekki i nienasiąkliwy. Charakteryzuje się trwałością oraz odpornością mechaniczną – dużą wytrzymałością na ściskanie, chemiczną i biologiczną. Zabezpiecza przed

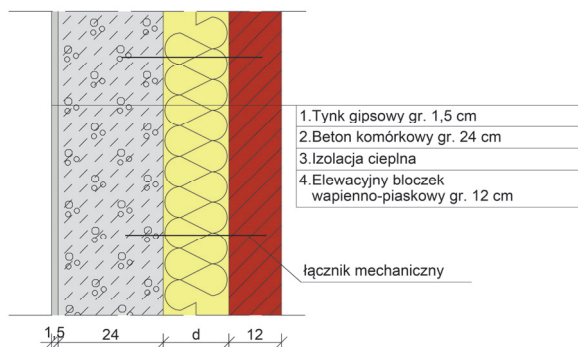
negatywnym działaniem szkodników. Niezależnie od formy ma wysokie właściwości termoizolacyjne. Uzyskuje się je dzięki wypełnieniu komórek gazem, a nie jak przypadku innych materiałów powietrzem. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 0,022 \div 0,040$ [W/(m·K)]. Materiały z poliizocyanuratu (PIR) wzbogacono o substancje chroniące przed działaniem ognia.

Warstwa elewacyjna może być wykończona tynkiem lub wykonana z gotowych wyrobów niewymagających otynkowania (np. cegieł klinkierowych, bloczków silikatowych, drewna). Ściana trójwarstwowa powstaje z dwóch warstw murowanych, połączonych ze sobą za pomocą specjalnych kotew – mechanicznych łączników ($5 \div 6$ sztuk/m² ściany). Ich dobór powinien zapewnić elastyczne połączenie, umożliwiające niezależną pracę poszczególnych warstw przegrody.

Najczęściej kotwy wykonane są ze stali nierdzewnej lub ocynkowanej. Trójwarstwowy układ materiałowy jest jednym z najtrwalszych rozwiązań ścian zewnętrznych. Jego zaletą jest wysoka zdolność akumulacji ciepła oraz mniejsza wrażliwość na uszkodzenia oraz możliwość dowolnego kształtowania fasady budynku z architektonicznymi detalami. Ściany trójwarstwowe są przegrodami bardziej skomplikowanymi pod względem technicznym, wymagają odpowiednich rozwiązań np. przy osadzaniu stolarki okiennej lub drzwiowej oraz wykonywaniu nadproży, które należy uwzględnić na etapie ich projektowania oraz wykonawstwa.

4. OBLICZENIA PARAMETRÓW FIZYKALNYCH WYBRANYCH ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH TRÓJWARSTWOWYCH I ICH ZŁĄCZY

Na pierwszym etapie wykonano obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_c , zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008 [6], dla ściany zewnętrznej trójwarstwowej z zastosowaniem dwóch materiałów termoizolacyjnych: styropian EPS $\lambda = 0,040$ [W/(m·K)], płyty z poliizocyanuratu PIR $\lambda = 0,022$ [W/(m·K)], przy zróżnicowanej grubości: 10, 12, 15 cm (rys. 2, tab. 2).



Rys. 2. Układ warstw materiałowych ściany zewnętrznej trójwarstwowej – opracowanie własne

Do obliczeń parametrów fizykalnych wybrano dwa złącza budowlane: połączenie ścian zewnętrznych w narożniku (Z1) oraz połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec (Z2), przyjmując następujące założenia:

- wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] przyjęto na podstawie [3], [4] oraz danych producentów,
- w obliczeniach liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] przyjęto założenia zgodnie z obowiązującymi procedurami wg PN-EN ISO 10211:2008 [7],
- warunki brzegowe przyjęte do obliczeń strumienia ciepłego ustalono na podstawie normy PN-EN ISO 6946:2008 [6],
- czynnik temperaturowy f_{Rsi} na wewnętrznej powierzchni określono na podstawie normy PN-EN ISO 13788:2003 [8],
- warunki brzegowe przyjęte do obliczeń oceny ryzyka rozwoju pleśni ustalono na podstawie normy PN-EN ISO 13788:2003 [8],
- wartość krytyczną czynnika temperaturowego określono z uwzględnieniem parametrów powietrza wewnętrznego – III klasa wilgotności, $t_i = 20^\circ\text{C}$ i zewnętrznego $t_e = -20^\circ\text{C}$ (Toruń), przyjęto $f_{Rsi,(kryt.)} = 0,778$.

Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości współczynnika przenikania ciepła U_c analizowanych ścian zewnętrznych trójwarstwowych

Wariant	Grubość warstwy izolacji d [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła warstwy izolacji λ [W/(m·K)]	Opór cieplny izolacji R [m ² ·K/W]	Całkowity opór cieplny ściany R_T [m ² ·K/W]	Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej U_c
I	0,10	0,040	2,50	4,36	0,23
II	0,12		3,00	4,86	0,21
III	0,15		3,75	5,61	0,18
IV	0,10	0,022	4,55	6,40	0,16
V	0,12		5,45	7,31	0,14
VI	0,15		6,82	8,68	0,12

Kolorem zielonym zaznaczono rozwiązania materiałowe, które spełniły kryterium $U_c \leq U_{c(\text{maks.})}$ określone dla ścian zewnętrznych po roku 2021.

źródło: opracowanie własne

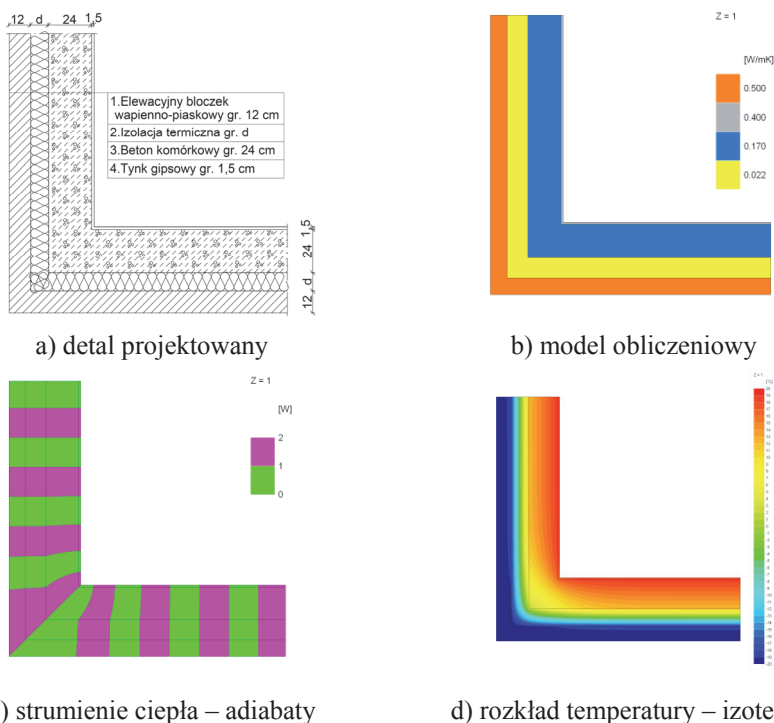
Obliczenia przeprowadzono z zastosowaniem programu komputerowego TRISCO [2] w kilku etapach: modelowanie złącza, przyjęcie warunków brzegowych, wygenerowanie wyników [4]. Określono następujące parametry fizykalne złącza:

- wielkość strumienia ciepłego przepływającego przez złącze Φ [W],
- liniowy współczynnik sprzężenia ciepłego L^{2D} [W/(m·K)],
- liniowy i gałęziowy współczynnik przenikania ciepła (określający dodatko-

we straty ciepła wynikające z występowania liniowych mostków cieplnych) Ψ [W/(m·K)],

- temperaturę minimalną na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego t_{\min} [°C],
- czynnik temperaturowy, określony na podstawie temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego f_{Rsi} [-].

Na rysunku 3 przedstawiono model obliczeniowy, linie strumieni ciepłych (adiabaty) oraz rozkład temperatur w narożniku ściany zewnętrznej trójwarstwowej.



Rys. 3. Wyniki obliczeń numerycznych połączenia ścian zewnętrznych w narożniku (Z1) – opracowanie własne na podstawie programu komputerowego TRISCO

W tabeli 3 zestawiono wyniki parametrów cieplnych narożników ścian zewnętrznych przy zróżnicowanym zastosowaniu izolacji termicznej.

W celu sprawdzenia ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej na wewnętrznej powierzchni przegrody określono temperaturę minimalną na wewnętrznej powierzchni przegrody $\theta_{si,\min}$ [°C] oraz wartości czynnika temperaturowego na podstawie $\theta_{si,\min}$ [°C] i wartość krytyczną czynnika temperaturowego $f_{Rsi,(kryt.)}$ – tabela 4.

Tabela 3. Wyniki obliczeń parametrów cieplnych połączenia ścian zewnętrznych w narożniku (Z1)

PARAMETRY CIEPLNE ZŁĄCZA BUDOWLANEGO (Z1)						
Wariant	d [m]	U_s [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	L^{2D} [W/(m·K)]	ψ_i [W/(m·K)]	ψ_e [W/(m·K)]
I	0,10	0,229	30,44	0,761	0,074	-0,144
II	0,12	0,206	27,49	0,687	0,069	-0,135
III	0,15	0,178	24,02	0,601	0,067	-0,120
IV	0,10	0,156	21,09	0,527	0,059	-0,089
V	0,12	0,137	18,60	0,465	0,054	-0,082
VI	0,15	0,115	15,83	0,396	0,051	-0,070

U_s – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej,

Φ – strumień cieplny przepływający przez złącze,

L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego,

ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (określony po wymiarach wewnętrznych),

ψ_e – liniowy współczynnik przenikania ciepła (określony po wymiarach zewnętrznych)

źródło: opracowanie własne

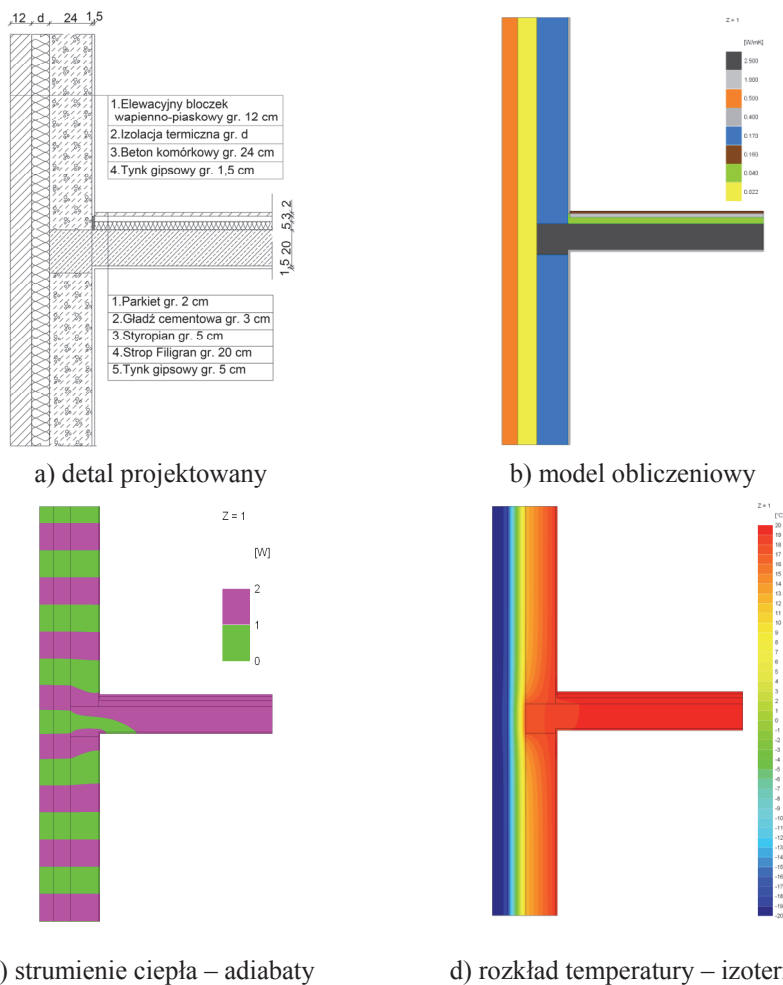
Tabela 4. Wyniki obliczeń czynnika temperaturowego f_{Rsi} połączenia ścian zewnętrznych w narożniku (Z1)

Wariant	d [m]	Temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody $\theta_{si,min}$ [°C]	Czynnik temperaturowy f_{Rsi} [-]	Czynnik temperaturowy $f_{Rsi,(kryt.)}$ [-]	Ryzyko kondensacji wilgoci na wewnętrznej powierzchni przegrody
I	0,10	14,58	0,865	0,778	nie wystąpi
II	0,12	15,00	0,875		nie wystąpi
III	0,15	15,50	0,888		nie wystąpi
IV	0,10	16,00	0,900		nie wystąpi
V	0,12	16,39	0,910		nie wystąpi
VI	0,15	16,85	0,921		nie wystąpi

źródło: opracowanie własne

Na rysunku 4 przedstawiono model obliczeniowy, linie strumieni cieplnych (adiabaty) oraz rozkład temperatur w złączu: połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec.

W przypadku połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec, istotne staje się indywidualne określenie strat ciepła dla górnej i dolnej części złącza, wprowadzając pojęcie gałęziowego współczynnika przenikania ciepła. Szczegółowe procedury obliczeniowe w tym zakresie przedstawiono w pracy [4]. Wyniki parametrów cieplnych dla analizowanego złącza zestawiono w tabeli 5.



Rys. 4. Wyniki obliczeń numerycznych połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec (Z2) – opracowanie własne na podstawie programu komputerowego TRISCO

W tabeli 6 zestawiono wyniki analizy w zakresie oceny występowania kondensacji powierzchniowej w analizowanym złączu: połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec.

Tabela 5. Wyniki obliczeń parametrów cieplnych połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec (Z2)

Parametry cieplne złącza budowlanego (Z2)							
Wariant	d [m]	U_s [W/(m ² ·K)]	Φ [W]	L^{2D} [W/(m·K)]	Ψ_{ig} [W/(m·K)]	Ψ_{id} [W/(m·K)]	Ψ_i [W/(m·K)]
I	0,10	0,229	32,00	0,800	0,009	0,101	0,110
II	0,12	0,206	28,53	0,714	0,007	0,087	0,094
III	0,15	0,178	24,55	0,614	0,006	0,073	0,079
IV	0,10	0,156	21,38	0,534	0,004	0,061	0,065
V	0,12	0,137	18,63	0,466	0,002	0,052	0,054
VI	0,15	0,115	15,63	0,391	0,002	0,043	0,045

U_s – współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej,

Φ – strumień cieplny przepływający przez złącze,

L^{2D} – liniowy współczynnik sprężenia cieplnego,

Ψ_{ig} – liniowy (gałęziowy) współczynnik przenikania ciepła (dla górnej części złącza),

Ψ_{id} – liniowy (gałęziowy) współczynnik przenikania ciepła (dla dolnej części złącza),

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła (dla całego złącza),

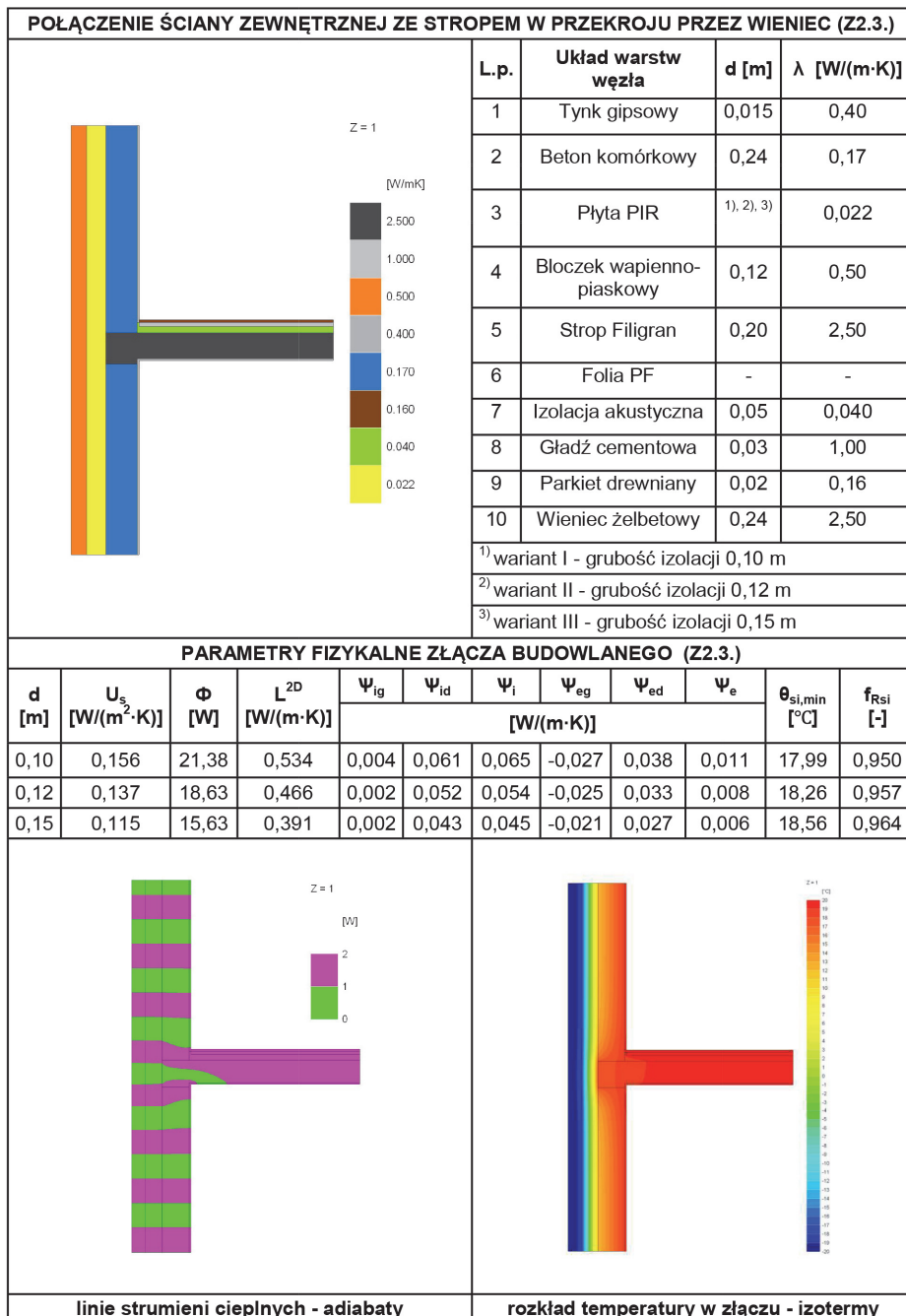
źródło: opracowanie własne

Tabela 6. Wyniki obliczeń czynnika temperaturowego f_{Rsi} połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec (Z2)

Wariant	d [m]	Temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody $\theta_{si,min}$ [°C]	Czynnik temperaturowy f_{Rsi} [-]	Czynnik temperaturowy $f_{Rsi,(kryt.)}$ [-]	Ryzyko kondensacji wilgoci na wewnętrznej powierzchni przegrody
I	0,10	16,84	0,921	0,778	nie wystąpi
II	0,12	17,22	0,931		nie wystąpi
III	0,15	17,64	0,941		nie wystąpi
IV	0,10	17,99	0,950		nie wystąpi
V	0,12	18,26	0,957		nie wystąpi
VI	0,15	18,56	0,964		nie wystąpi

źródło: opracowanie własne

Przykładową kartę katalogową połączenia ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec (Z2) przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykładowa karta katalogowa – połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec

5. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

Niektóre rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe analizowanych ścian zewnętrznych trójwarstwowych izolowane styropianem nie spełniają kryterium cieplnego: $U_C \leq U_{C(\text{maks.})}$, dla ścian zewnętrznym od początku 2021 roku (tab. 2). Zastosowanie materiału termoizolacyjnego o niższej wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)] powoduje uzyskanie niższej wartości współczynnika U_C .

Złącza ścian zewnętrznych (tab. 3÷6) powodują dodatkowe straty ciepła w postaci liniowego (gałęziowego) współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] oraz obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego $\theta_{\text{si,min}}$ [°C]. Zgodnie z rozporządzeniem [9] nie ma możliwości oceny złączy w zakresie dodatkowych strat ciepła, ponieważ nie określono wartości granicznych $\Psi_{\text{max.}}$.

Dla wszystkich analizowanych złączy wyznaczono temperaturę minimalną $\theta_{\text{si,min}}$ [°C] wymaganą do obliczeń czynnika temperaturowego f_{Rsi} . Kryterium $f_{\text{Rsi(obl.)}} > f_{\text{Rsi(kryt.)}} = 0,778$ zostało spełnione, zatem nie wystąpi ryzyko powstania kondensacji wilgoci na wewnętrznej powierzchni przegrody (tab. 4, 6).

6. PODSUMOWANIE I WNOSKI

Obliczenia numeryczne niewątpliwie wpisują się w nowoczesne podejście do projektowania przegród i złączy budowlanych budynków niskoenergetycznych. Rośnie zapotrzebowanie na wykonywanie szczegółowych i miarodajnych obliczeń parametrów fizykalnych, a także na opracowywanie katalogów mostków cieplnych złączy budowlanych, służących do oceny cieplnej przegród wewnętrznych i ich złączy oraz na poprawny wybór stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych budynków.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń parametrów fizykalnych sformułowano następujące wnioski:

- Zaostrzenie przepisów dotyczących m.in. izolacyjności cieplnej, wymusza od początku 2021 r. projektowanie i wykonywanie „budynków o niskim zużyciu energii”.
- Zaostrzone przepisy prawne implikują projektowanie rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych z zastosowaniem materiałów do izolacji cieplnej o niższych wartościach λ [W/(m·K)] w porównaniu z materiałami stosowanymi dotychczas, np. z płyt z pianki poliuretanowej PIR.
- Wzrost izolacyjności ściany zewnętrznej (niska wartość współczynnika przenikania ciepła U_C) zmniejsza wielkości strat ciepła przepływających przez dane złącze budowlane.
- Wartości parametrów fizykalnych złączy zależą od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego (parametrów cieplnych wykorzystanych materiałów) oraz systemu wymiarowania.

- Projektowanie przegród zewnętrznych wymaga holistycznego podejścia, uwzględniającego wpływ integralnych części analizowanej przegrody – złączy budowlanych w polu dwu- i trójwymiarowym (2D i 3D).
- Szczegółowe obliczenia cieplno-wilgotnościowe należy przeprowadzać przy zastosowaniu zaawansowanych i profesjonalnych programów komputerowych służących do określania przepływu ciepła i wilgoci.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa 2010/31/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [2] Instrukcja programu komputerowego TRISCO.
- [3] Maciaszek M., 2017. Analiza porównawcza parametrów fizykalnych złączy ścian zewnętrznych trójwarstwowych w świetle nowych wymagań cieplnych, praca magisterska napisana pod kierunkiem dr. inż. K. Pawłowskiego Bydgoszcz.
- [4] Pawłowski K., 2016. Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków. Obliczenia cieplno-wilgotnościowe przegród zewnętrznych i ich złączy. Grupa Medium Warszawa.
- [5] Pietruszka B., Wasilewska A.W., 2015. Styropian grafitowy – właściwości i zastosowanie. Izolacje 6.
- [6] PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [7] PN-EN ISO 13788:2003. Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa. Metoda obliczania.
- [8] PN-EN ISO 10211:2008. Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.
- [9] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2013 r. poz. 926 z późniejszymi zmianami.
- [10] Uchwała Rady Ministrów z dnia 22 czerwca 2015 r. w sprawie przyjęcia „Krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii”.
- [11] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (Dz.U. z 2013 r. poz. 1409, z późn. zm.).