UNIWERSYTET
TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

pt. „EFEKTYWNOŚĆ ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH I ICH ZŁĄCZY W ASPEKCIE CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYM"

Autor: mgr inż. Krzysztof Pawłowski

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Dylla, prof. nadzw. UTP

BYDGOSZCZ
2008

UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

„EFEKTYWNOŚĆ ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH I ICH ZŁĄCZY W ASPEKCIE CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYM"

AUTOR: mgr inż. Krzysztof Pawłowski

PROMOTOR: dr hab. inż. Andrzej Dylla, prof. nadzw. UTP

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
000000134529

BYDGOSZCZ, 2008

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
D 327

OBD 99/1

SPIS TREŚCI

1.	**WPROWADZENIE**	5
2.	**CEL, TEZY I ZAKRES PRACY**	10
3.	**OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH**	12
3.1.	Wiadomości ogólne	12
3.2.	Mostki termiczne (słabe miejsca) występujące w zewnętrznych przegrodach budowlanych	14
3.2.1.	Przegląd historyczny metod uwzględniania mostków termicznych w obliczeniach cieplno-wilgotnościowych w Polskich Normach i przepisach	18
3.3.	Wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujące w Polsce	26
3.4.	Wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujące w krajach Europy	29
3.5.	Ocena cieplno-wilgotnościowa ścian zewnętrznych analizowanego budynku według obowiązujących wymagań	34
4.	**PODSTAWY PRZENOSZENIA CIEPŁA I WILGOCI**	44
4.1.	Przepływ wilgoci	44
4.2.	Przepływ ciepła	45
4.2.1.	Podstawy przenoszenia ciepła	45
4.2.2.	Równania opisujące przewodnictwo cieplne	46
5.	**BADANIA WŁASNE**	55
5.1.	Zasady modelowania	55
5.2.	Warunki brzegowe	57
5.3.	Określenie charakterystyki materiałowej mostków cieplnych	58
5.4.	Obliczenie parametrów cieplno-wilgotnościowych mostków cieplnych	59
5.4.1.	Określenie parametrów cieplnych złączy	60
5.4.2.	Gałęziowy współczynnik przenikania ciepła	63
5.4.3.	Charakterystyka wilgotnościowa mostków cieplnych	67
5.4.4.	Opracowanie katalogu mostków cieplnych	68
5.5.	Ocena cieplno-wilgotnościowa ścian zewnętrznych i ich złączy według własnych algorytmów	71
5.5.1.	Obliczenie współczynnika przenikania ciepła U_k ścian zewnętrznych analizowanego budynku według własnego algorytmu	72
5.5.2.	Analiza wilgotnościowa ścian zewnętrznych analizowanego budynku według własnego algorytmu	80
6.	**KRYTERIA OCENY ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH**	85
7.	**PODSUMOWANIE I WNIOSKI**	89
	BIBLIOGRAFIA	92

ZAŁĄCZNIKI

KATALOG MOSTKÓW CIEPLNYCH

OZNACZENIA

Litery łacińskie

duże

A	pole powierzchni	m^2
C	koncentracja masowa	kg/kg
D	współczynnik dyfuzji pary wodnej w materiale porowatym	m^3/m^3
D_T	współczynnik związany z dyfuzją pary wodnej w materiale porowatym	$kg/(m^2 \cdot s)$
D_w	współczynnik związany z dyfuzją pary wodnej w materiale porowatym	$kg/(m^2 \cdot s)$
E	wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzania budynku	$kWh/(m^2 \cdot a)$
E_0	graniczny wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzania budynku	$kWh/m^2 \cdot a)$
H_T	współczynnik strat ciepła przez przenikanie	W/K
H_U	współczynnik strat ciepła przez przenikanie przez przestrzenie nieogrzewane	W/K
L	współczynnik sprzężenia cieplnego przez obudowę budynku	W/K
L_D	bezpośredni współczynnik sprzężenia między przestrzenią ogrzewaną i otoczeniem zewnętrznym przez obudowę budynku	W/K
L^{2D}	liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego	$W/(m \cdot K)$
L_s	stacjonarny współczynnik sprzężenia cieplnego przez grunt	W/K
Q	ilość ciepła	J
R	opór cieplny	$(m^2 \cdot K)/W$
R_j	opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody	$(m^2 \cdot K)/W$
$R_{min.}$	minimalny opór cieplny podłóg układanych na gruncie	$(m^2 \cdot K)/W$
R_t	opór cieplny od powierzchni do powierzchni	$(m^2 \cdot K)/W$
R_T	całkowity opór cieplny przegrody złożonej z płaskich warstw jednorodnych	$(m^2 \cdot K)/W$
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej	$(m^2 \cdot K)/W$
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	$(m^2 \cdot K)/W$
R_w	opór ścian stykających się z gruntem	$(m^2 \cdot K)/W$
U	współczynnik przenikania ciepła	$W/(m^2 \cdot K)$
U_c	skorygowany współczynnik przenikania ciepła	$W/(m^2 \cdot K)$
U_{ci}	współczynnik przenikania ciepła zewnętrznych przegród budowlanych	$W/(m^2 \cdot K)$
U_k	współczynnik przenikania ciepła uwzględniający wpływ mostków cieplnych	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_{k,max.}$	maksymalny współczynnik przenikania ciepła	$W/(m^2 \cdot K)$
U_{Li}	liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka liniowego o numerze „i”	$W/(m \cdot K)$
U_m	współczynnik przenikania ciepła obliczony dla przegrody w miejscu mostka cieplnego	$W/(m^2 \cdot K)$
U_{pj}	punktowy współczynnik przenikania ciepła mostka punktowego o numerze „j”	W/K
U_0	współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania mostków cieplnych liniowych i punktowych	$W/(m^2 \cdot K)$
V	kubatura ogrzewanej części budynku z pominięciem wydzielonych klatek schodowych, szybów windowych i otwartych części budynku (logi, tarasów, balkonów)	m^3
V	objętość	m^3
W	koncentracja objętościowa	m^3/m^3
Z	ciepło koncentracji	J/kg

małe

b	szerokość mostka cieplnego	m
c	ciepło właściwe	$J/(kg \cdot K)$
c_p	ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu	$J/(kg \cdot K)$
c_v	ciepło właściwe przy stałej objętości	$J/(kg \cdot K)$
c_ρ	pojemność cieplna materiału	$J/(m^3 \cdot K)$
d	grubość przegrody	m
f	czynnik temperaturowy na wewnętrznej powierzchni wg PN-EN ISO 13788	-
h	współczynnik przejmowania ciepła	$W/(m^2 \cdot K)$
h_e	współczynnik przejmowania ciepła na części zewnętrznej	$W/(m^2 \cdot K)$
h_i	współczynnik przejmowania ciepła na części wewnętrznej	$W/(m^2 \cdot K)$

k_l	współczynnik przepuszczalności wody	kg/(m·s·Pa)
l	długość	m
l_i	długość liniowego mostka cieplnego	m
l_j	długość, w ramach modelu dwuwymiarowego, do której ma zastosowanie U_j	m
l_k	długość, do której ma zastosowanie wartość Ψ_k	m
p_s	ciśnienie kapilarne	Pa
t	temperatura	°C
t_e	temperatura powietrza zewnętrznego	°C
t_i	temperatura powietrza wewnętrznego	°C
$t_{min.}$	krytyczna (najniższa)temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody, na wewnętrznej powierzchni mostka cieplnego	°C
t_s	temperatura punktu rosy	°C
q	gęstość strumienia cieplnego	W/m^2
q	gęstość strumienia cieplnego	W/m^2
q_l	liniowa gęstość strumienia cieplnego	W/m

Litery greckie

duże

Φ	strumień cieplny	W
Φ_0	strumień cieplny, bez uwzględnienia mostków cieplnych	W
Φ_L	przyrost strumienia cieplnego z uwagi na wpływ mostków cieplnych liniowych	W
Φ_P	przyrost strumienia cieplnego z uwagi na wpływ mostków cieplnych punktowych	W

małe

φ_e	wilgotność powietrza zewnętrznego	%
φ_i	wilgotność powietrza wewnętrznego	%
θ_e	temperatura powietrza zewnętrznego	°C
θ_i	temperatura powietrza wewnętrznego	°C
λ	współczynnik przewodzenia ciepła materiału	W/(m·K)
λ_e	równoważny współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
Ψ	liniowy współczynnik przenikania ciepła	W/(m·K)
Ψ_e	liniowy współczynnik przenikania ciepła, przy zastosowaniu wymiarów zewnętrznych	W/(m·K)
Ψ_i	liniowy współczynnik przenikania ciepła, przy zastosowaniu wymiarów wewnętrznych	W/(m·K)
Ψoi	liniowy współczynnik przenikania ciepła, przy zastosowaniu ogólnych wymiarów wewnętrznych	W/(m·K)
Ψ_k	liniowy współczynnik przenikania ciepła k-tego liniowego mostka cieplnego	W/(m·K)
χ_j	punktowy współczynnik przenikania ciepła j-tego punktowego mostka cieplnego	W/K
$\vartheta_{i,m}$	najniższa temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody z mostkami cieplnymi	°C
ϑ_i	temperatura wewnętrzna powierzchni przegrody bez mostków cieplnych	°C
η	współczynnik bezwymiarowy,	-
ΔU_0	dodatek wyrażający wpływ mostków cieplnych	W/(m^2·K)
ΔU	dodatek wyrażający wpływ mostków cieplnych	W/(m^2·K)
ΔU_f	poprawka na łączniki mechaniczne	W/(m^2·K)
ΔU_g	poprawka na nieszczelności	W/(m^2·K)
ΔU_r	poprawka na wpływ odpadów dla dachów o odwróconym układzie warstw	W/(m^2·K)
Δt_j	różnica temperatury na powierzchni warstwy j	°C
$\Delta\theta_{e,j}$	różnica temperatur	°C
τ	czas	S
ρ	gęstość	kg/m^3
ρ_w	gęstość właściwa wody	kg/m^3

1. WPROWADZENIE

Efektywność to rezultat podjętych działań, opisywany relacją uzyskanych efektów do poniesionych nakładów. Według Sadowskiego [23] może ona dotyczyć różnych aspektów, np. ekonomicznych, technicznych, techniczno-ekonomicznych.

Efektywność ekonomiczna definiowana jest jako ekonomiczny rezultat działalności określony przez stosunek otrzymanego efektu finansowego do nakładów finansowych.

Natomiast efektywność techniczna to takie efekty, jak: dobre rozwiązania funkcjonalne, przystosowanie do środowiska, dobre cechy eksploatacyjne i plastyczne, izolacja od uciążliwości otoczenia, prawidłowe wykorzystanie cech fizycznych materiałów oraz trafność i technologiczność rozwiązań konstrukcyjnych.

Efektywność techniczno-ekonomiczna jest określana przez stosunek efektów technicznych do poniesionych nakładów finansowych [23].

Efektywność techniczna może być rozpatrywana w aspekcie cieplno-wilgotnościowym zewnętrznych przegród budowlanych i ich złączy poprzez:

- wykonanie prawidłowych obliczeń cieplno-wilgotnościowych i projektu technicznego w świetle obowiązujących przepisów i norm, z właściwie założonymi warunkami brzegowymi, na podstawie prostych metod inżynierskich,
- wykonanie detali konstrukcyjnych ze szczególnym zwróceniem uwagi na geometrię przegrody, lokalizacji ocieplenia, poziome i pionowe warstwy izolacji.

Projektowanie zewnętrznych przegród budowlanych i ich złączy w zakresie cieplno-wilgotnościowym odbywa się często intuicyjnie bez przeprowadzenia określonych obliczeń. Projekty budowlane zawierają obliczenia cieplno-wilgotnościowe w formie uproszczonej i ogólnej, z reguły w oparciu o poprzednie doświadczenie, bez głębszej analizy szczegółowej. Dlatego dobór warstw jest często przypadkowy, np. ze względów ekonomiczno-finansowych.

Przykładem niepoprawnego projektowania pod względem cieplno-wilgotnościowym jest w wielu przypadkach ściana zewnętrzna i jej złącza. Jej podstawowych parametrem cieplnym jest współczynnik przenikania ciepła U. Według Rozporządzenia [66]: *„...2) przegrody zewnętrzne odpowiadają wymaganiom izolacyjności cieplnej oraz innym wymaganiom związanym z oszczędnością energii, określonym w załączniku do rozporządzenia"*:*„ Wartości współczynnika przenikania ciepła U ścian, stropów i stropodachów, obliczone zgodnie z Polską Normą, nie mogą być większe niż wartości U_{max}, określone w tabelach..."*. Cytowane Rozporządzenie zaleca obliczać współczynnik przenikania ciepła U według PN-EN ISO 6946 [81], PN-EN ISO 10211-1 [84], PN-EN ISO 10211-2 [85] , PN-EN ISO 14683 [92], PN-EN ISO 13789 [90].

Do 2004 roku obowiązywał także załącznik krajowy (informacyjny) do normy PN-EN ISO 6946 [81], który regulował uwzględnianie liniowych mostków cieplnych w obliczeniach współczynnika U według wzoru:

$$U_k = U_c + \sum_i \frac{\Psi_i \cdot l_i}{A} \tag{1.1}$$

gdzie:

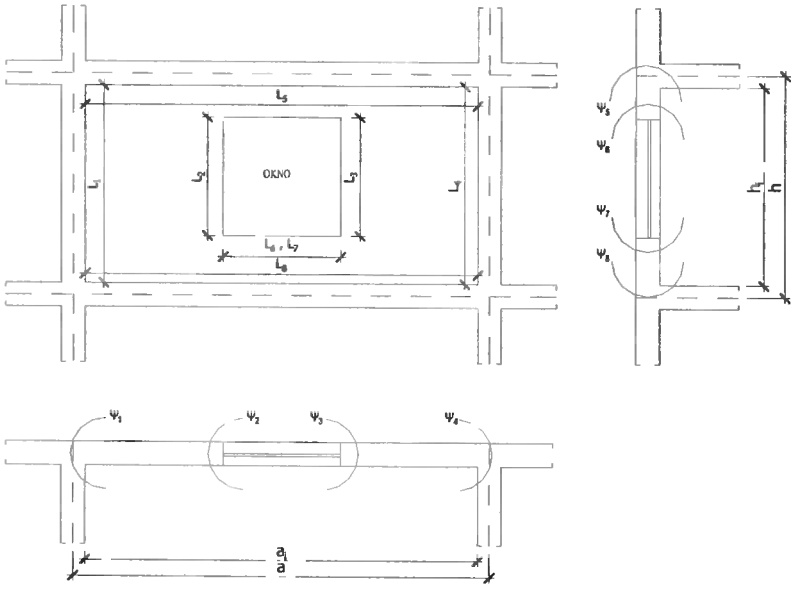
U_c – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania wpływu mostków cieplnych liniowych, obliczany wg załącznika D normy PN-EN ISO 6946 [81], $W/(m^2 \cdot K)$,

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego o numerze „i", $W/(m \cdot K)$,

l_i – długość mostka liniowego o numerze „i", m,

A – pole powierzchni przegrody w osiach przegród do niej prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi balkonowych obliczone w świetle ościeży, m^2.

Interpretację graficzną parametrów Ψ_i, l_i, A (w odniesieniu do powszechnie spotykanych w praktyce węzłów konstrukcyjnych) stanowi rysunek 1.1.



Rysunek 1.1. Mostki liniowe i powierzchnia przegrody w pomieszczeniu [81]

Dodatkowego wyjaśnienia wymaga także określenie „przegród do niej prostopadłych". Wg Laskowskiego [13] przez przegrodę budowlaną rozumie się element budowli oddzielający ją od otoczenia lub wydzielający w niej pomieszczenia. Pole powierzchni ściany zewnętrznej definiowane w osiach jest często źle interpretowane i obliczane. W praktyce liczone jest w świetle przegród do niej prostopadłych. W ten sposób uzyskujemy wydzieloną powierzchnię np. ściany zewnętrznej – jako pojedynczej przegrody. Rozbieżności w definiowaniu pola prowadzi do błędnego określania współczynnika przenikania ciepła U_k.

Poprawne określenia współczynnika przenikania ciepła U_k jest możliwe rozpoczynając obliczenia od określenia współczynnika sprzężenia cieplnego między przestrzenią ogrzewaną i otoczeniem zewnętrznym przez obudowę budynku L_D według wzoru 1.2.:

$$L_D = U_{ci} \cdot A_i + \sum_i \Psi_i \cdot l_i \qquad (1.2)$$

gdzie:

U_c – współczynnik przenikania ciepła i – tej przegrody bez uwzględniania wpływu mostków cieplnych liniowych, obliczany wg załącznika D normy PN-EN ISO 6946 [81], $W/(m^2 \cdot K)$,

A_i – pole powierzchni i – tej przegrody uczestniczącej w przenikaniu (w świetle przegród do niej prostopadłych) pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi balkonowych obliczone w świetle ościeżnicy, m^2,

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego o numerze „i", $W/(m \cdot K)$,

l_i – długość mostka liniowego o numerze „i", m.

Następnie, po określeniu pola powierzchni A, wyznacza się współczynnik przenikania ciepła U_k z zależności 1.3.:

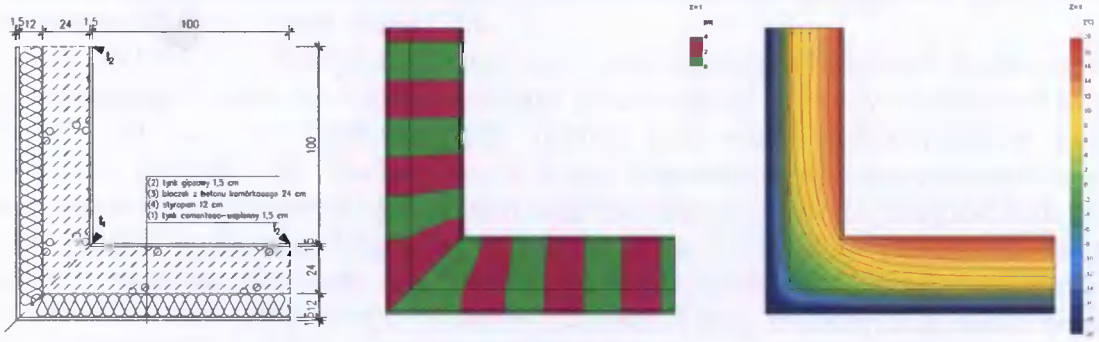
$$U_k = \frac{L_D}{A} = U_c \cdot \frac{A_i}{A} + \frac{\sum_i \Psi_i \cdot l_i}{A} \qquad (1.3)$$

gdzie:

A – pole powierzchni i – tej przegrody w osiach przegród do niej prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi balkonowych obliczone w świetle ościeżnicy, m^2.

Wzór (1.1) przedstawiony w załączniku krajowym normy [81] – wycofanym w 2004 roku i w literaturze przedmiotowej [13], [15], [18], [20], [51] zawiera błędy, co prowadzi do wyznaczenia niedokładnej wartości współczynnika przenikania ciepła U_k.

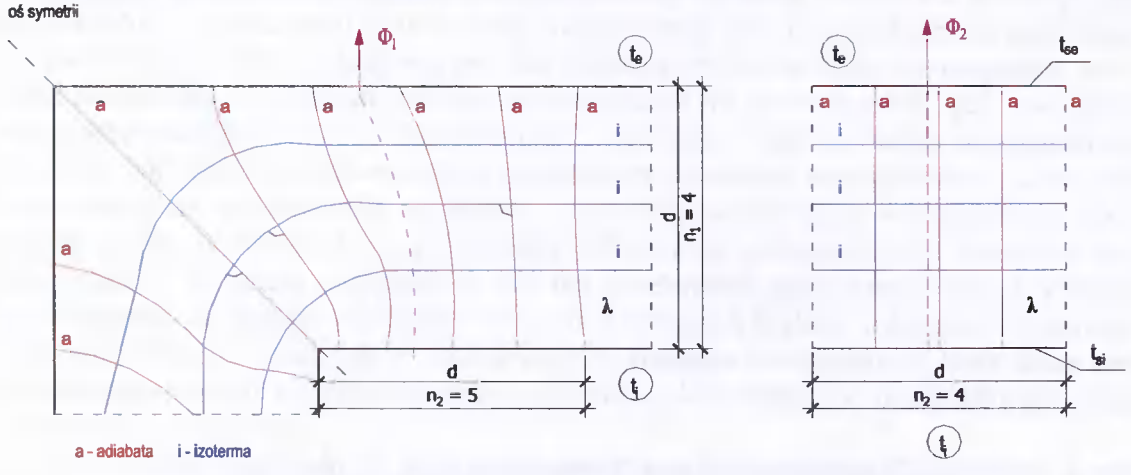
Następnym problemem jest przyjmowanie wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i, który określa dodatkową wartość strumienia ciepła (strata – plus, zysk – minus) wywołaną przez mostek cieplny i podaną na 1 mb jego długości. Wartość Ψ dotyczy całej dodatkowej straty przez mostek, co oznacza w przypadku np. narożnika straty obu gałęzi (po powierzchni minimum 2d – w obie strony od narożnika wewnętrznego [6]. Na rysunku 2 przedstawiono linie strumieni cieplnych (adiabaty) oraz rozkład temperatur (izotermy) dla narożnika ściany zewnętrznej dwuwarstwowej.



a) model obliczeniowy **b) linie strumieni cieplnych (adiabaty)** **c) rozkład temperatur (izotermy)**

Rysunek 2. Linie strumieni cieplnych i rozkład temperatur w narożniku

Występujące w rzeczywistości pole dwu i trójwymiarowe powinno zostać każdorazowo określone dla konkretnych warunków brzegowych, a uzyskane wyniki determinują jakość cieplną analizowanych przegród zewnętrznych z należytą dokładnością. Mechanizm zjawiska i stosowaną powszechnie procedurę prowadzenia obliczeń ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Dwuwymiarowe i jednowymiarowe pole temperatur [6]

Na rysunku 3 przedstawiono po lewej stronie rysunku siatkę izoterm (i) i adiabat (a) w narożniku symetrycznym przegród zewnętrznych oraz dla porównania po prawej stronie wycinek przegrody o takich samych parametrach fizycznych i geometrycznych, z dala od narożnika. Linie strumienia ciepła (a) ulegają zagęszczeniu w złączu dwuwymiarowym (narożnik). Na określoną powierzchnią narożnika napływa więcej ciepła ($n_2 = 5$) w porównaniu z wycinkiem przegrody przepływem jednowymiarowym ($n_1 = 4$). Złącze narożnikowe generuje zwiększony strumień ciepła $\Phi_1 > \Phi_2$, co oznacza większe straty:

$$\Phi_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \lambda \cdot (t_{si} - t_{se}) \tag{1.4}$$

gdzie:

n_1, n_2 – odpowiednio liczba przedziałów między adiabatami i izotermami.

Stosunek $\frac{n_2}{n_1}$, nazywany „współczynnikiem kształtu układu", który określa, o ile zmienia się strumień ciepła przewodzony przez badany obszar dwuwymiarowy w odniesieniu do pola jednowymiarowego przy niezmienności pozostałych parametrów wpływających na wymianę ciepła [36].

W obliczeniach praktycznych korzysta się najczęściej z liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ. Często występuje jednak nakładanie się w przegrodzie kilku mostków. W takim przypadku nie jest możliwe sumowanie współczynników Ψ dla konkretnej geometrii np. filarka: okno – ściana dołączająca. W opracowaniach mających służyć profesjonalnym obliczeniom cieplno-wilgotnościowym przegród budowlanych z reguły podawane są wartości współczynników Ψ_i (L_i) w odniesieniu do całego złącza z mostkiem cieplnym, uczestniczącym w przepływie ciepła [15], [92]. Dopiero odpowiedni podział złącza daje możliwość uzyskania przy zastosowaniu metod numerycznych wartości Ψ_i dla jego części (gałęzi). Ich znajomość jest niezbędna do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej przegrody zewnętrznej. Istnieje więc potrzeba wykonania szeregu obliczeń dla wielu złączy budowlanych i opracowania katalogów mostów cieplnych.

Opisane problemy w procedurze obliczeniowej powodują, że w wielu przypadkach poprawne określenie współczynnika przenikania ciepła ściany jest niemożliwe bądź błędne, a sprawdzenie wymagania sformułowanego w Rozporządzeniu [66] nierealne.

Podobne problemy projektowe można spotkać w przypadku sprawdzenia kryterium w zakresie uniknięcia kondensacji powierzchniowej. Według załącznika do Rozporządzenia [66]: *„...w budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego, budynku użyteczności publicznej, a także w budynku produkcyjnym opór cieplny nieprzezroczystych przegród zewnętrznych powinien umożliwiać utrzymanie na wewnętrznych jej powierzchniach temperatury wyższej co najmniej o 1 °C od punktu rosy powietrza w pomieszczeniu, przy obliczeniowych wartościach temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz przy obliczeniowej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu, obliczonej zgodnie z Polską Normą dotyczącą parametrów obliczeniowych powietrza wewnętrznego"*. W wielu przypadkach nie ma możliwości sprawdzenia tego kryterium (wymagania). W dostępnych opracowaniach, katalogach brakuje informacji (zestawienia) temperatur minimalnych w analizowanych złączach budowlanych. Brak także kart katalogowych wielu, często stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ścian zewnętrznych budynku.

Od stycznia 2009 roku w myśl przepisów Prawa budowlanego [70] zostanie wprowadzony obowiązek certyfikacji energetycznej budynków. Dzięki temu systemowi uzyska się czytelne informacje o energochłonności nieruchomości w postaci przypisanej jej

klasy w skali od A do G. Charakterystyka energetyczna budynku jest zbiorem danych i wskaźników dotyczących obliczeniowego zapotrzebowania na energię na centralne ogrzewanie (c.o.), ciepłą wodę użytkową (c.w.u.), wentylację (klimatyzację) a w przypadku budynków użyteczności publicznej również oświetlenie. Na podstawie obliczeń dokonuje się określenia zintegrowanej charakterystyki (EP) na podstawie której wyznacza się klasę energetyczną budynku. Jednak poprawne określenie certyfikatu energetycznego budynku wymaga przeprowadzenia dokładnych obliczeń cieplnych. Istnieje więc potrzeba opracowania ścisłych algorytmów i procedur projektowych. Obecnie tworzony jest cały system przepisów i norm związanych z certyfikacją energetyczną budynków: Rozporządzenie [68], projekt Rozporządzenia [69], przygotowywane zmiany Rozporządzenia [66], oraz normy [80]. Wszystkie te działania wymagają uzgodnień i działań środowiskowych oraz przygotowania osób upoważnionych do wykonywania certyfikatów energetycznych.

Przedstawione powyżej problemy w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej przegród zewnętrznych i ich złączy są podstawowymi argumentami, aby podjąć badania własne oraz zaproponować algorytmy i procedury projektowe.

2. CEL, TEZY I ZAKRES PRACY

Przedmiotem analizy stanowiącym temat rozprawy jest ściana zewnętrzna i jej złącza. Wymagania i procedury obliczeniowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujące w Polsce są nieprecyzyjne i budzą wiele wątpliwości. W związku z tym projektowanie ścian zewnętrznych jest niepoprawne a w wielu przypadkach jest niemożliwe.

Podstawowym **celem pracy** jest opracowanie własnych algorytmów efektywności cieplno-wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy w formie prostych metod inżynierskich.

Oryginalnym i istotnym elementem pracy jest także wykonanie obliczeń gałęziowych współczynników przenikania ciepła typowych złączy budowlanych oraz opracowanie katalogu mostków cieplnych niezbędnego do poprawnego projektowania i wykonywania obliczeń w aspekcie cieplno-wilgotnościowym.

Sformułowano następujące **tezy rozprawy**:

1) Kompleksowa ocena ścian zewnętrznych powinna dotyczyć jednocześnie przegrody jak i jej złączy według kryterium cieplnego i wilgotnościowego.
2) Racjonalnym parametrem do określania strat ciepła przez ściany zewnętrzne budynku traktowane jako jedna obudowa jest średni współczynnik przenikania ciepła $U_{k,śr.}$
3) Obliczenie współczynnika U_k dla pojedynczej ściany budynku wymaga znajomości lub obliczenia gałęziowych współczynników Ψ. Wprowadzenie i określenie takiego wskaźnika Ψ dla części złącza, odzwierciedla rzeczywiste starty ciepła odniesione do analizowanego fragmentu przegrody.

Zakres **badań własnych** obejmuje:

1) Zasady modelowania, przyjmowania warunków brzegowych i określania charakterystyki materiałowej mostków cieplnych.
2) Obliczenia parametrów cieplnych złączy budowlanych. Określenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła dla poszczególnych części analizowanego złącza.
3) Charakterystykę wilgotnościową mostków cieplnych.
4) Opracowanie katalogu mostków cieplnych.
5) Opracowanie własnych algorytmów efektywności cieplno-wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy w formie prostych metod inżynierskich.

Realizacja podstawowego celu i tez rozprawy obejmuje dwa etapy: teoretyczny i badania własne.

W pierwszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie, a w następnym sformułowano cele, tezy oraz zakres pracy. Rozdział trzeci stanowi charakterystykę i wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej zewnętrznych przegród budowlanych i ich złączy. Zdefiniowano także mostki termiczne i przedstawiono przegląd historyczny metod ich uwzględniania w obliczeniach z zakresu fizyki budowli w Polskich Normach i w przepisach krajów Europy. Wykazano mankamenty i niejasności w procedurach obliczeniowych i wymaganiach. W rozdziale czwartym przedstawiono podstawy przenoszenia ciepła i wilgoci oraz metody rozwiązywania tych zagadnień. W następnym rozdziale zaprezentowano metodykę badań własnych: zasady modelowania, przyjmowania warunków brzegowych, określenie charakterystyki materiałowej złączy budowlanych, określenie parametrów cieplno-wilgotnościowych mostków ciepl-

nych, procedurę wyznaczania gałęziowych współczynników przenikania ciepła i opracowania katalogu mostków cieplnych. Obliczenia wykonano przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO [103]. Ponadto przedstawiono własne algorytmy oceny cieplnej i wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy i wykonano obliczenia dla wybranego budynku. W rozdziale szóstym zaprezentowano kompleksową ocenę różnych ścian zewnętrznych. Ostatni rozdział pracy stanowi podsumowanie i wnioski. W załączniku do pracy – katalog mostków cieplnych zestawiono wyniki obliczeń parametrów cieplnych i wilgotnościowych wybranych mostków cieplnych.

3. CHARAKTERYSTYKA ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

3.1. WIADOMOŚCI OGÓLNE

Ustawa Prawo budowlane [70] zobowiązuje wszystkich uczestników procesu inwestycyjnego do projektowania, wznoszenia i użytkowania obiektów budowlanych w sposób zapewniający spełnienie wymagań podstawowych dotyczących:

- bezpieczeństwa konstrukcji,
- bezpieczeństwa pożarowego,
- bezpieczeństwa użytkowania,
- odpowiednich warunków higienicznych i zdrowotnych oraz ochrony środowiska,
- ochrony przed hałasem i drganiami,
- oszczędności energii i odpowiedniej izolacyjności cieplnej.

Szczególne znaczenie w spełnieniu przedstawionych wymagań mają zewnętrzne przegrody budowlane. W fizyce budowli przez zewnętrzną przegrodę budowlaną najczęściej rozumie się przegrodę, oddzielającą dwa środowiska: wewnętrzne kształtowane sztucznie przez człowieka i zewnętrzne – naturalne, niezależne od człowieka, zdeterminowane przez określoną strefę geograficzną (klimat). Budowa, struktura i właściwości zewnętrznych przegród budowlanych zależą od spełnienia jej podstawowych funkcji oraz optymalizacji parametrów mikroklimatu pomieszczeń. Do podstawowych funkcji zewnętrznych przegród budowlanych należą:

- ochrona przed niepożądanym wpływem środowiska zewnętrznego (funkcja osłonowa: izolacja termiczna, izolacja akustyczna, osłona przed działaniem wiatru, nasłonecznienia),
- przenoszenie obciążeń – jako element nośny konstrukcji, przenoszący obciążenia z innych elementów (stateczność całej konstrukcji, lub samonośność).

Natomiast do głównych parametrów mikroklimatu pomieszczeń można zaliczyć:

- temperaturę,
- wilgotność,
- prędkość ruchu powietrza,
- poziom natężenia dźwięków,
- stopień jonizacji,
- natężenie oświetlenia,
- stopień szkodliwości substancji gazowych,
- skład chemiczny powietrza,
- drgania.

Jako przedmiot analizy pracy została wybrana ściana zewnętrzna budynku z uwzględnieniem liniowych mostków termicznych.

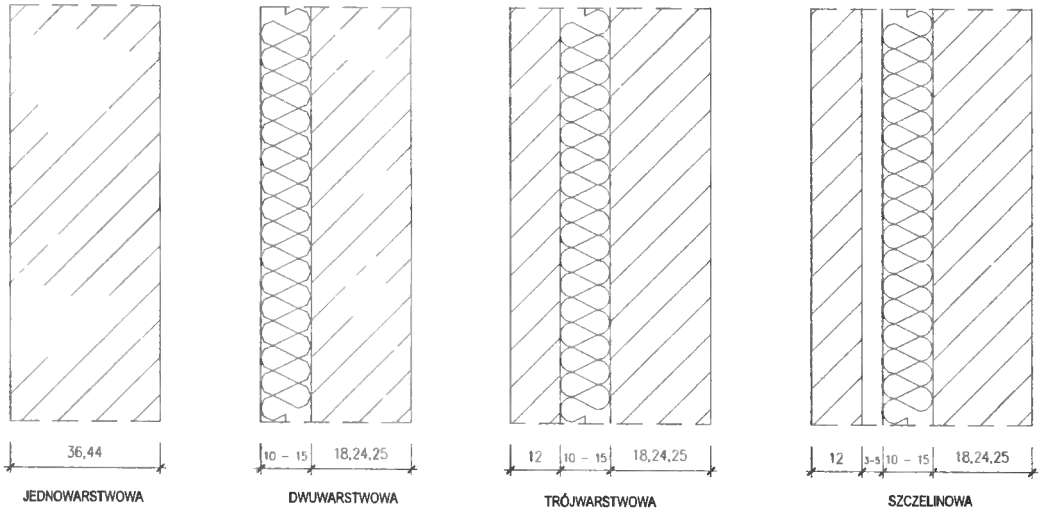
Wacław Żenczykowski podaje następującą definicję ściany; „ Ściana jest to element konstrukcyjny służący do przenoszenia obciążeń (głównie pionowych) oraz stanowiących przegrodę oddzielającą pomieszczenia między sobą (ściany wewnętrzne) lub środowiska zewnętrznego (ściany zewnętrzne)" [28], [29].

W literaturze można spotkać wiele podziałów i klasyfikacji ścian w budynku. W tabeli 3.1. przedstawiono ich podział w zależności od usytuowania w budynku.

Tabela 3.1. Podział ścian murowanych w zależności od usytuowania ścian w budynku – opracowanie własne na podstawie [1]

PODZIAŁ OGÓLNY	PODZIAŁ SZCZEGÓŁOWY	CHARAKTERYSTYKA ŚCIAN
ŚCIANY ZEWNĘTRZNE	NOŚNE	• przenoszą ciężar własny i obciążenia przekazywane przez stropy, • narażone są na działanie czynników atmosferycznych,
	SAMONOŚNE	• przejmują oddziaływania podobne do występujących w ścianach nośnych, z wyjątkiem przenoszenia obciążeń od stropów,
	OSŁONOWE	• przenoszą ciężar własny tylko w obrębie jednej kondygnacji, • narażone są na działanie czynników atmosferycznych,
ŚCIANY WEWNĘTRZNE	NOŚNE	• przenoszą ciężar własny i obciążenia przekazywane przez stropy,
	SAMONOŚNE	• przenoszą ciężar własny na całej wysokości,
	WYPEŁNIAJĄCE	• przenoszą ciężar własny w obrębie jednej kondygnacji.

Przykładowe układy materiałowe ścian zewnętrznych murowanych przedstawiono na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Przykładowe układy materiałowe ścian zewnętrznych budynku

Prezentowane w literaturze podziały ścian są kontrowersyjne, często nie uwzględniają zagadnień z zakresu fizyki budowli. Ściany zewnętrzne są poddane zasadniczym oddziaływaniom przedstawionym w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Podstawowe oddziaływania na ściany zewnętrzne – opracowanie własne

RODZAJ ODDZIAŁYWANIA	FORMA ODDZIAŁYWANIA
Wilgoć	• opady atmosferyczne (deszcz, śnieg, grad), • wilgoć technologiczna pochodząca np. od wilgotności materiałów, wody zarobowej, • wilgoć eksploatacyjna, wywołana wilgotnością powietrza w użytkowanym wnętrzu i wynikającą stąd różnicą ciśnienia pary wodnej we wnętrzu i otoczeniu budynków,
Temperatura zewnętrzna i zmiany temperatury zewnętrznej	• temperatura w czasie lata i w czasie zimy, • promieniowanie słoneczne, • zmiany temperatury zewnętrznej: sezonowe, dzienne, krótkotrwałe, • wynikające z tych zmian zmiany długości przegrody,
Oddziaływanie mechaniczne	• budowlane podczas cyklu budowy, • użytkowe, wynikające z obciążeń działających na przegrodę, odkształcenia i zarysowania wynikające np. ze skurczu technologicznego materiałów, • zróżnicowanie osiadania poszczególnych części budynku, • obciążenie od wiatru,
Ogień	• od zewnątrz, np. od płomienia iskier lub bardzo silnego promieniowania cieplnego, • od wnętrza, np. przez rozprzestrzenianie się ognia z pietra na piętro poprzez okna,
Hałas zewnętrzny	
Inne	• fotomechaniczne (np. promieniowanie UV), • wypłukiwanie przez deszcz różnych substancji z powierzchni ściany, • osadzanie się kurzu i brudu

Układ warstw materiałów ścian zewnętrznych ma istotny wpływ na kilka podstawowych procesów w szczególności cieplno-wilgotnościowych.

3.2. Mostki termiczne (słabe miejsca) występujące w zewnętrznych przegrodach budowlanych

W literaturze przedmiotowej [2], [4], [5], [9], [10], [11], [14], [16], [24], [28] spotkać można wiele definicji mostków termicznych (cieplnych).

W pierwszej polskiej publikacji szerzej podejmującej problematykę fizyki budowli, Kołodziejczyk [11], używa terminu pomost cieplny na oznaczenie mostka termicznego całkowitego.

Wg [28] mostki termiczne (cieplne) są to fragmenty konstrukcji wykonane z materiałów o większych wartościach współczynników przewodności ciepła λ niż pozostała część konstrukcji.

Wg [4], [5] mostek termiczny powstaje w wyniku naruszenia ciągłości struktury wewnętrznej przegrody, w związku z występowaniem materiałów budowlanych różniących się, najczęściej znacznie, wielkością współczynników przewodności cieplnej.

Wg [2] przez mostek termiczny (cieplny) rozumie się obszar wzmożonego przepływu ciepła w przegrodzie (tj. wzmożonych strat ciepła). Objawia się to obniżeniem temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody, co prowadzi do różnorakich konsekwencji.

Wg [15] mostkami cieplnymi nazywamy miejsca w obudowie zewnętrznej, w których obserwuje się obniżenie temperatury wewnętrznej powierzchni i wzrost gęstości strumienia cieplnego w stosunku do pozostałej części przegrody; występują one najczęściej w ścianach zewnętrznych, głównie w ościeżach otworów okiennych i drzwiowych, na nadprożach okiennych i podokiennikach, na wieńcach w przypadku wspornikowych

płyt balkonowych oraz węzłach konstrukcyjnych ścian zewnętrznych ze stropami – zwłaszcza nad piwnicą i pod poddaszem oraz miejscu słupów w ścianach.

Definicje i charakterystykę mostków termicznych podają także normy przedmiotowe.

Wg normy PN- EN ISO 10211-1 [84] mostek cieplny to część budynku, w której skądinąd jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez:

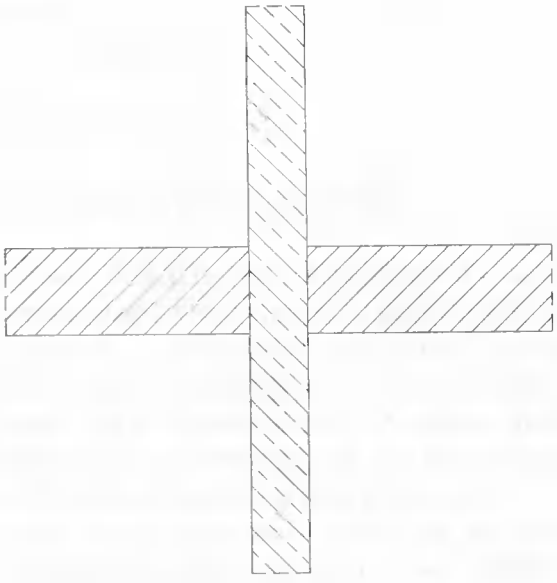
- całkowite lub częściowe przebicie obudowy budynku przez materiały o innej przewodności cieplnej,
- zmianę grubości warstw materiału,
- różnicę między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami przegród, jak to miejsce w przypadku połączeń – ściana/podłoga/sufit.

W normie PN-EN ISO 14683 [92] podaje się, że mostki termiczne w przegrodach budowlanych powodują zmiany strumienia cieplnego i temperatury powierzchni w stosunku do tych wielkości w przegrodach bez mostków. Wartości tych strumieni cieplnych i temperatur powierzchni można dokładnie określić na drodze obliczeń komputerowych, zgodnie z PN-EN ISO 10211-1 (trójwymiarowy strumień cieplny) lub PN-EN ISO 10211-2 (dwuwymiarowy strumień cieplny), co stanowi podstawową i główną część pracy. Jednak w przypadku liniowych mostków cieplnych, w celu oszacowania ich liniowego współczynnika przenikania ciepła, często stosowane są metody uproszczone. Wpływ powtarzających się mostków cieplnych, które są częścią jednolitego elementu budowlanego, takich jak kotwy ścienne, przebijające warstwę izolacji cieplnej, lub spoiny zaprawy w murze z lekkiego betonu komórkowego powinien być uwzględniony w obliczeniach współczynnika przenikania ciepła poszczególnych elementów budowlanych.

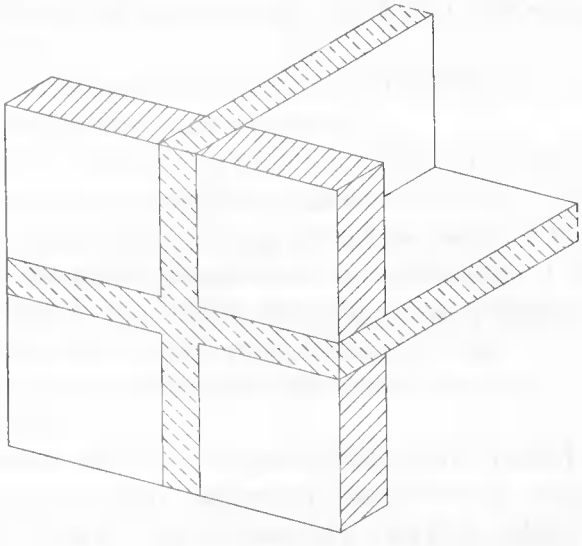
Wg [4], [5] autor zaproponował jednolitą klasyfikację mostków, uwzględniającą zarówno geometrię miejsca występowania mostka, jak i charakter jego oddziaływania na przegrodę lub ewentualne złącze przegród. Mechanizm fizyczny zjawiska, polegający na zwiększeniu gęstości strumienia cieplnego, należy rozważać w obrysie geometrycznym środkowej, z reguły „zimniejszej" ($\lambda_2 > \lambda_1$) części mostka oraz sąsiadujących z nią obustronnie stref zakłóceń w przegrodzie. Mostki termiczne można podzielić ogólnie na trzy grupy:

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

Rysunek 3.2. Przykładowy mostek cieplny 1D



Rysunek 3.3. Przykładowy mostek cieplny 2D



Rysunek 3.4. Przykładowy mostek cieplny 3D

Ze względu na przyczynę występowania mostki termiczne można podzielić na:

- mostki termiczne powstające w wyniku zmiany geometrii układu (narożniki przegród zewnętrznych),
- mostki termiczne powstające w wyniku zmiany układu materiałowego, spowodowane występowaniem materiałów budowlanych różniących się, najczęściej znacznie, wielkością współczynników przewodności cieplnej (wzmocnienia, przewiązki, łączniki).

Ze względu na miejsce występowania możemy wyodrębnić dwie grupy mostków termicznych:

- mostki termiczne wewnątrz komponentów budowlanych,
- mostki termiczne na połączeniu komponentów budowlanych.

W niektórych publikacjach stosowane są inne zasady ich klasyfikacji. Typowymi przykładami mostków termicznych są:

- spoiny wypełnione zaprawą w ścianach murowanych z elementów drobnowymiarowych,

- słupy i rygle w ścianach,
- żebra w ścianach warstwowych,
- nadproża,
- złącza elementów prefabrykowanych,
- naroża ścian,
- połączenie ściany zewnętrznej z płytą balkonową,
- ościeża okienne.

Udowodniono negatywne oddziaływanie niewłaściwie ocieplonych mostków na całokształt zjawisk fizycznych, zachodzących w przegrodzie lub na jej powierzchni. Nazwa zjawiska „mostek termiczny" wskazuje na jego istotę – wzmożony przepływ ciepła przez obrys geometryczny części „zimniejszej" w przegrodzie. Tę część nazywa się „rdzeniem mostka". Zakłócenie strumienia ciepła występuje również w częściach przegrody bezpośrednio sąsiadujących z rdzeniem, po obu jego stronach. Mostek termiczny tworzy więc rdzeń wraz ze strefami zakłóceń pola temperatur.

Rozwiązaniem mostka termicznego będzie podanie jego rozkładu temperatur, badanego najczęściej w warunkach ustalonego przepływu ciepła. Istotną role w ocenie warunków komfortu cieplnego pomieszczenia spełniają temperatury na powierzchniach wewnętrznych mostka. Dla uwzględnienia dodatkowych strat ciepła, spowodowanych działaniem mostka, konieczna jest znajomość rozkładu temperatur na powierzchniach wewnętrznych przegród.

Tak więc poprawne wykonanie obliczeń mostka termicznego polega na:

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

W miejscach tych występuje zwiększony przepływ ciepła, a na ich wewnętrznej powierzchni utrzymuje się niższa temperatura w porównaniu z temperaturą pozostałej części przegrody. Wskutek tego często następuje wykraplanie się pary wodnej na powierzchni mostków i powstają mokre plamy, a nawet pleśń.

Mostki termiczne można ocenić metodami praktycznymi:

1) ocena eksperymentalna:
- badanie laboratoryjne, przy użyciu znormalizowanych metod badań, przeprowadzonych na dwóch identycznych elementach budowlanych, jeden zawierający mostek cieplny, drugi bez mostka; jest to metoda z której wynikają ograniczenia; metoda wykorzystywana do określania punktowych współczynników przenikania ciepła elementów budowlanych, według norm [73], [74], [75], [76], [77],
- badanie „in situ", ocenia wyłącznie wartości temperatury środowiska i powierzchni po obydwu stronach elementu budowlanego; na skutek dynamicznych zmian klimatu zewnętrznego i wewnętrznego (temperatura, wilgotność, prędkość ruchu powietrza lub wiatru), zmiany temperatury w elemencie budowlanym charakteryzują się przesunięciem fazowym względem warunków klimatycznych po obydwu stronach elementu; sensowny rezultat jest przy pomiarach długotrwałych, w których uzyskane średnie współczynniki temperaturowe powinny być interpretowane ostrożnie,

2) ocena modeli teoretycznych (dwu-lub trójwymiarowych) mostków cieplnych:
- przy użyciu programów komputerowych,
- przyjmowanie wartości charakterystycznych przy zastosowaniu katalogów mostków cieplnych.

Według [27] dokładność metod obliczeń mostków cieplnych wynosi odpowiednio:

- obliczenia numeryczne: ± 5%,
- katalog mostków cieplnych ± 20%,

- obliczenia ręczne ± 20%,
- wartości orientacyjne 0 ÷ 50%.

Omawiając zagadnienia związane z mostkami termicznymi można przywołać następujące postulaty:

- należy dążyć do ograniczenia wartości niekorzystnego wpływu na straty ciepła i ryzyko kondensacji wszystkich występujących mostków cieplnych;
- wszystkie mostki termiczne, których można uniknąć, należy wyeliminować na etapie projektowania lub podczas realizacji budynku;
- wszystkie mostki, które nie mogą być usunięte lub istniejące mostki cieplne powinny być skonstruowane lub ocieplone, aby ich wpływ na straty ciepła był minimalny oraz ryzyko kondensacji było minimalne.

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. Należy zwrócić uwagę, że ocena wartości Ψ i χ nie jest zdefiniowana (znormalizowana) istnieje możliwość sformułowania pewnych kryteriów w krajowych przepisach dotyczących izolacyjności budynków.

Wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła zależą od sposobu wymiarowania budynku zastosowanego w obliczeniach pola powierzchni, przez którą przepływa strumień cieplny, stąd przy obliczeniach liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ, należy podać system wymiarowania, na którym są one oparte:

- Ψ_i – przy zastosowaniu wymiarów wewnętrznych,
- Ψ_{oi} – przy zastosowaniu wymiarów osiowych,
- Ψ_e – przy zastosowaniu wymiarów zewnętrznych.

W przypadku obliczania strat ciepła przez część obudowy budynku należy stosować wartości gałęziowych (częściowych) współczynników przenikania ciepła Ψ, dokonując podziału złącza budowlanego. W opracowaniach i katalogach mostków cieplnych brak wartości takiego parametru, co uniemożliwia poprawne wykonanie obliczeń z zakresu fizyki budowli np. współczynnika przenikania ciepła U_k.

3.2.1. Przegląd historyczny metod uwzględniania mostków termicznych w obliczeniach cieplno-wilgotnościowych w Polskich Normach i przepisach

Problematyka izolacyjności termicznej i ochrony przed występowaniem kondensacji powierzchniowej po raz pierwszy pojawiła się w kraju - PN-57/B-02405 [96]. Celem pojawienia się normy w tym zakresie było:

- ograniczenie zużycia paliwa,
- zachowanie na wewnętrznej powierzchni ściany minimalnej temperatury takiej, aby nie występowało wykroplenie pary wodnej z powietrza, a ciało człowieka nie wypromieniowywało zbyt wiele ciepła [29].

Według normy PN-74/B-03404 [97] w miejscu występowania mostka cieplnego należało obliczyć współczynnik przenikania ciepła ze wzoru:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e}} \tag{3.1}$$

gdzie:

h_i – współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody, $W/(m^2 \cdot K)$,

h_e – współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni przegrody, $W/(m^2 \cdot K)$,

R – opór przewodzenia ciepła przegrody, $(m^2 \cdot K)/W$.
Obliczona wartość współczynnika przenikania ciepła U w miejscu występowania mostka cieplnego o przekroju prostokątnym lub kwadratowym jak nadproże, słup, rygiel albo żebro występujące poza złączem, nie powinna być większa niż wartość maksymalna podana w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła U w miejscu mostków cieplnych w przegrodach budowlanych według normy PN-74/B-03404 [97]

Rodzaj przegrody	Stosunek szerokości mostka do grubości przegrody	Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m²·K)]
Ściany zewnętrzne i stropy nad nieogrzewanymi piwnicami [1)]	• nie więcej niż ¼	1,86
	• nie więcej niż ¾	1,63
	• więcej niż ¾	1,40
Stropodachy, stropy, poddasza i stropy na przejazdami	• nie więcej niż ¼	1,51
	• nie więcej niż ¾	1,16
	• więcej niż ¾	0,93
[1)] *Mostki cieplne w narożnikach należy traktować jako mostki o szerokości większej niż ¾ grubości przegrody*		

Tego rodzaju podejście do zagadnień związanych z występowaniem mostków cieplnych pozwalało ograniczyć minimalną temperaturę na powierzchni przegrody, ale tylko w miejscach występowania mostków cieplnych wewnątrz elementów budowlanych. Następnym krokiem w normalizacji w zakresie fizyki budowli była norma PN-82/B-02020 [99], w której wprowadzono metodę obliczania najniżej temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody z mostami termicznymi $\vartheta_{i,m}$ utworzonym z materiału o współczynniku $\lambda \leq 1,7$ W/(m·K). Dla najczęściej spotykanych układów połączeń o różnej izolacyjności cieplnej opracowano tabelę wartości parametru η. Parametr uwzględniał wartość obniżenia temperatury na powierzchni zależnie od wymiarów złącza:

- przy stosunku b/d > 1,5 (b – szerokość mostka, d – grubość przegrody):

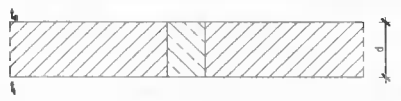
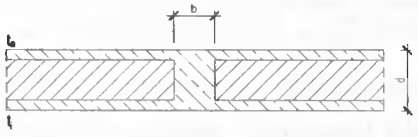
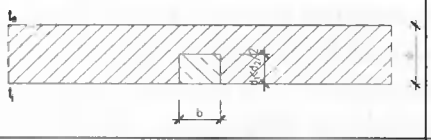
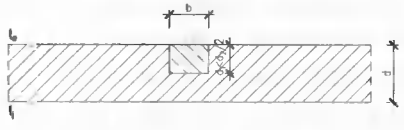
$$\vartheta_{i,m} = t_i - U_m(t_i - t_e)R_i \tag{3.2}$$

- przy stosunku b/d ≤ 1,5 (b – szerokość mostka, d – grubość przegrody):

$$\vartheta_{i,m} = t_i - [U + \eta(U_m - U)](t_i - t_e)R_i \tag{3.3}$$

gdzie:
U – współczynnik przenikania ciepła obliczony dla przegrody w miejscu poza mostkiem cieplnym, $W/(m^2 \cdot K)$,
U_m – współczynnik przenikania ciepła obliczony dla przegrody w miejscu mostka cieplnego, $W/(m^2 \cdot K)$,
η – współczynnik bezwymiarowy, którego wartość może być przyjmowana według tabeli 3.4. w zależności od stosunku b/d.

Tabela 3.4. Wartości bezwymiarowego współczynnika η wg normy PN-82/B-02020 [99]

Schematy mostków termicznych	Stosunek wymiarów mostka b/d ≤ 1,5								
	0,02	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5
	0,12	0,24	0,38	0,55	0,74	0,83	0,87	0,90	0,95
	0,07	0,15	0,26	0,42	0,62	0,73	0,81	0,85	0,94
	0,25	0,50	0,96	1,26	1,27	1,21	1,16	1,10	1,00
	0,04	0,10	0,17	0,32	0,50	0,62	0,71	0,77	0,89

Na początku lat dziewięćdziesiątych pojawiła się nowa norma z zakresu fizyki budowli PN-91/B-02020 [102] według której współczynnik przenikania ciepła przegród z mostkami cieplnymi należało obliczać według wzoru:

$$U = U_0 + \sum_i \frac{U_{Li} \cdot l_i}{A} + \sum_j \frac{U_{pj}}{A} \tag{3.4}$$

gdzie:

U_0 – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania mostków cieplnych liniowych i punktowych, W/(m^2·K),

U_{Li} – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka liniowego o numerze „i", W/(m·K),

l_i – długość mostka liniowego o numerze „i", m,

U_{pj} – punktowy współczynnik przenikania ciepła mostka punktowego o numerze „j", W/K,

A – pole powierzchni przegrody w świetle przegród do niej prostopadłych z potrąceniem pola powierzchni ewentualnych okien i drzwi balkonowych, obliczanego w świetle ościeży, m^2.

Wartości liniowego i punktowego współczynnika przenikania ciepła należało określać eksperymentalnie lub obliczać przy użyciu programów numerycznych.

Norma podawała alternatywnie uproszczony sposób obliczania współczynnika przenikania ciepła U przegród z mostkami cieplnymi można było stosować przy projektowaniu budynków o kubaturze do 1500 m^2, korzystając ze wzoru:

$$U = U_0 + \Delta U_0 \tag{3.5}$$

gdzie:

U_0 – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania mostków cieplnych liniowych i punktowych, W/(m^2·K),

ΔU_0 – dodatek wyrażający wpływ mostków cieplnych, W/(m^2·K).

Wartości dodatku ΔU_0 podano w tabeli 3.5.

Tabela 3.5. Wartości dodatku ΔU_0 wyrażającego wpływ mostków cieplnych wg normy PN-91/B-02020 [102]

l.p.	Rodzaj przegrody	ΔU_0 [W/(m^2·K)]
1	Ściany zewnętrzne bez okien i drzwi balkonowych, stropy poddasza, stropodachy, stropy pod piwnicami	0,10
2	Ściany zewnętrzne z oknami	0,15
3	Ściany zewnętrzne z oknami i drzwiami balkonowymi lub wejściowymi do budynku	0,20
4	Ściany zewnętrzne ze wspornikami balkonowymi przenikającymi ścianę	0,25

W zakresie ochrony wilgotnościowej norma podaje, aby temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego ϑ_m była określana eksperymentalnie lub obliczana przy użyciu programów numerycznych.

Pod koniec lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku pojawiła się nowa norma z zakresu fizyki budowli PN-EN ISO 6946 [81], w której zagadnienia uwzględniania liniowych mostków cieplnych w obliczeniach cieplno-wilgotnościowych zostały zamieszczone w załącznikach krajowych NA. Według załącznika, współczynnik przenikania ciepła U_k, przegród z liniowymi mostkami cieplnymi służy do obliczania mocy grzewczej i sezonowego zapotrzebowania na ciepło lub do porównywania z wymaganiami przepisów i należy go obliczać z wzoru:

$$U_k = U_c + \sum_i \frac{\Psi_i \cdot l_i}{A} \tag{3.6}$$

gdzie:

U_c – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania wpływu mostków cieplnych liniowych, obliczany wg załącznika D normy PN-EN ISO 6946 [81], W/(m^2·K),

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego o numerze „i", W/(m·K),

l_i – długość mostka liniowego o numerze „i", m,

A – pole powierzchni przegrody w osiach przegród do niej prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi balkonowych obliczone w świetle ościeżnicy, m^2.

Wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ obliczało się z użyciem programów numerycznych lub korzystało się z katalogów mostków cieplnych. W projektowaniu indywidualnym dopuszczało się nie wykonywanie szczegółowych obliczeń współczynnika przenikania ciepła z mostkami cieplnymi z uwzględnianiem wartości współczynnika Ψ_i, wyznaczając wartość U_k w sposób uproszczony, korzystając ze wzoru:

$$U_k = U_c + \Delta U \tag{3.7}$$

gdzie:

U_c – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania wpływu mostków cieplnych liniowych, obliczany wg załącznika D normy PN-EN ISO 6946 [81], W/(m^2·K),

ΔU – dodatek do współczynnika U_c, wyrażający wpływ mostków cieplnych, podany według tabeli 3.6., W/(m^2·K).

Tabela 3.6. Wartości dodatku ΔU wyrażającego wpływ mostków cieplnych wg normy PN-EN ISO 6946 – załącznik krajowy NA [81]

l.p.	Rodzaj przegrody	ΔU [W/(m²·K)]
1	Ściany zewnętrzne pełne, stropy poddasza, stropodachy, stropy nad piwnicami	0,00
2	Ściany zewnętrzne z otworami okiennymi i drzwiowymi	0,05
3	Ściany zewnętrzne z otworami okiennymi i drzwiowymi oraz płytami balkonów lub loggii przenikającymi ścianę	0,15

W załączniku krajowym normy znajdowała się adnotacja dotycząca wartości dodatku ΔU podane w tabeli powyżej odnoszą się do poprawnie rozwiązanych detali konstrukcyjnych przegród zewnętrznych; wpływ liniowych motków cieplnych w przypadku niepoprawnie rozwiązanych detali może być znacznie wyższy, niż wynika to z danych podanych w tabeli 3.8.W celu sprawdzenia warunku uniknięcia kondensacji powierzchniowej, temperaturę wewnętrznej powierzchni przegrody bez mostków cieplnych liniowych ϑ_i należy obliczać z wzoru:

$$\vartheta_i = t_i - U_c(t_i - t_e)R_i \tag{3.8}$$

gdzie:
t_i – temperatura obliczeniowa powietrza wewnętrznego, °C,
t_e – temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego, °C,
U_c – współczynnik przenikania ciepła przegrody, W/(m²·K),
R_i – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody, (m²·K)/W.
Temperaturę wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka cieplnego należy określać na postawie eksperymentów lub obliczać z zastosowaniem programów numerycznych; można również wykorzystywać katalogów mostków cieplnych. Przy sprawdzaniu minimalnej temperatury wewnętrznej powierzchni przegród nieprzezroczystych należy przyjmować wartość R_i równą 0,167 (m²·K)/W, niezależnie od rodzaju przegrody.

W listopadzie 2004 roku wprowadzono nową wersję normy PN-EN ISO 6946 [81], która zastępowała pierwotną wersję omawianej powyżej normy z 1999 roku. Podstawą zmianą jest wycofanie z normy załączników krajowych NA, NB, NC, ND., dotyczących m.in. określania wpływu liniowych mostków termicznych. Obecna wersja normy podejmuję metodykę obliczania współczynnika przenikania ciepła przegród bez uwzględniania mostków cieplnych.

Zjawisko mostka cieplnego jest zwykle niedostrzegalne i pomijane przez projektantów, architektów i konstruktorów. Ogrzewnicy mają wystarczające przygotowanie w kwestii przenoszenia ciepła przez przegrody budowlane, ale w normie PN-B-03406:1994 [72] było stwierdzenie o nieuwzględnianiu mostków cieplnych w obliczeniach obciążenia cieplnego. Sytuacja może teraz ulec zmianie w wyniku ustanowienia normy PN-EN 12831:2006 [79]. W tablicy 3 normy PN-EN 12831:2006 [79] – Parametry do obliczeń wartości U – wymienione są explicite mostki cieplne wśród parametrów uwzględnianych w obliczeniach. Również na rysunku 1 w PN-EN 12831:2006 [79] – Procedura obliczeniowa dla przestrzeni ogrzewanej podany jest krok d) – obliczenie projektowych strat ciepła przez przenikanie, jako iloczyn projektowanego współczynnika strat ciepła przez przenikanie i różnicy temperatur [55]. Jednak w załączniku C normy „Przykład obliczeń projektowanego obciążenia cieplnego" pod tabelą z wartościami liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ, pojawia się dyskusyjny zapis: *„Dane dotyczące mostków cieplnych zostały obliczone zgodnie z EN ISO 10211-1 z uwzględnieniem, że w EN ISO 10211-1 podano całkowitą wartość współczynnika Ψ_i w odniesieniu do każdego mostka cieplnego. W niniejszej normie przeprowadza się ob-*

liczenia metodą pomieszczenie po pomieszczeniu, w związku z czy, każdy mostek cieplny (z wyjątkiem mostków cieplnych związanych z osadzeniem drzwi i okien) jest uwzględniany dwa razy w obliczeniach (jednokrotnie w odniesieniu do każdego pomieszczenia po dwu stronach mostka cieplnego). W związku z tym całkowite wartości Ψ_i obliczone według EN ISO 10211-1 zostały podzielone na dwa w celu otrzymania wartości podanych w Tablicy T C.4. ..." Dzielenie wartości współczynnika Ψ_i na dwie równe części w wielu przypadkach jest podstawowym błędem. Wykonując obliczenia zgodnie z normą EN ISO 10211-1 przy zastosowaniu programów komputerowych istnieje możliwość dokładnego podziału złącza i określenie dokładnych wartości Ψ_i dla jego części.

W zakresie oceny wilgotnościowej obecnie często stosuje się normę PN-EN ISO 13788 [89] według której kryterium kondensacji powierzchniowej sformułowano, przyjmując zasadę uniknięcia kondensacji kapilarnej w porach.

W normie PN-EN ISO 13788 [89] podano metody:

1) obliczania temperatury powierzchni wewnętrznej komponentu budowlanego lub elementu budynku, powyżej której prawdopodobny jest rozwój pleśni, przy zadanej temperaturze i wilgotności powietrza wewnętrznego – metodę można zastosować do oszacowania ryzyka kondensacji na innych powierzchniach,
2) obliczania ryzyka kondensacji wewnętrznej wskutek dyfuzji pary wodnej. Zastosowana metoda zakłada, że wilgoć budowlana wysycha i nie jest brana pod uwagę w całym szeregu ważnych zjawisk fizycznych, obejmujących:

- zależność współczynnika przewodzenia ciepła od wilgotności;
- uwalnianie i absorpcję ciepła utajonego;
- zmienność właściwości materiałów w zależności od wilgotności;
- podciąganie kapilarne i transport wilgoci w fazie ciekłej wewnątrz materiałów;
- ruch powietrza przez pęknięcia lub wewnątrz przestrzeni powietrznych;
- zdolność materiałów do zawilgocenia sorpcyjnego.

Według normy PN-EN ISO 13788 [89] ryzyko wystąpienia i rozwoju pleśni występuje w przypadku utrzymywania się wilgotności względnej przez kilka dni powyżej 0,8 w pobliżu materiałów wrażliwych na wilgoć; nie dotyczy to np. okien i płytek łazienkowych. Kondensacja powierzchniowa i rozwój pleśni zależą od następujących czynników:

1) temperatury i wilgotności powietrza zewnętrznego,
2) temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, zależnie od metody wymiany powietrza wewnętrznego (grawitacyjne lub mechaniczne),
3) jakości cieplnej każdego elementu obudowy budynku, wyrażonej przez opór cieplny, mostki cieplne, geometrię i współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni;

Jakość cieplną elementu obudowy budynku można scharakteryzować bezwymiarową temperaturą wewnętrznej powierzchni f_{Rsi}. Czynnik temperaturowy na wewnętrznej powierzchni definiuje się jako różnica temperatury powierzchni wewnętrznej i temperatury powietrza zewnętrznego, podzielona przez różnicę temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, obliczona przy założeniu, że opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej wynosi R_{si} :

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \qquad (3.9).$$

Natomiast obliczeniowy czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej jako minimalny dopuszczalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej. Minimalna

dopuszczalna temperatura to najniższa temperatura powierzchni wewnętrznej, poniżej której rozpoczyna się rozwój pleśni.

Dane wyjściowe do obliczeń według PN-EN ISO 13788 [89]:

1) właściwości materiałów i wyrobów; do obliczeń należy stosować wartości obliczeniowe, wg specyfikacji materiałów i wyrobów lub tabelarycznych wartości obliczeniowych zamieszczonych w normach (PN-EN 12524 [78], PN-EN ISO 10456 [86], PN-EN ISO 12572 [87]),
2) warunki klimatyczne; przyjmowane warunki zewnętrzne powinny być reprezentowane dla lokalizacji budynku, jeśli nie zostały sprecyzowane inaczej. Przy obliczaniu ryzyka rozwoju pleśni na powierzchni lub szacowaniu ryzyka wystąpienia wewnętrznej kondensacji w konstrukcji, należy posługiwać się średnimi miesięcznymi wartościami, otrzymanymi metodami opisanymi w PN-EN ISO 15927-1 [93]. Przy obliczaniu ryzyka kondensacji powierzchniowej w elementach o niskiej bezwładności cieplnej, np. okna lub ramy okienne, należy posługiwać się średnią roczną minimalnej dziennej temperatury i odpowiadającej jej wilgotnością względną.

W obliczeniach należy stosować temperatury:

1) temperaturę powietrza zewnętrznego; posługiwać się średnimi miesięcznymi wartościami, otrzymanymi metodami opisanymi w PN EN ISO 15927-1 [93];
2) temperaturę gruntu przylegającego do komponentu budowlanego; należy stosować średnią roczną temperaturę powietrza zewnętrznego;
3) temperaturę powietrza wewnętrznego; należy przyjąć wartości zależne od przeznaczenia budynku – można stosować krajowe wartości temperatury powietrza wewnętrznego.

Warunki wilgotnościowe powietrza zewnętrznego ustala się za pomocą posługiwania się wilgotnością objętościową ν_e, lub ciśnieniem pary wodnej, p_e. Średnie miesięczne wartości ciśnienia pary wodnej lub wilgotności objętościowej można obliczyć z średniej temperatury i wilgotności względnej, stosując równania:

$$\bar{p} = \bar{\varphi}_e\, p_{sat}(\bar{\theta}_e) \text{ lub } \bar{\nu}_e = \bar{\varphi}_e\, \nu_{sat}(\bar{\theta}_e) \qquad (3.10).$$

Z powodu nieliniowej zależności między temperaturą a wilgotnością w stanie nasyconym, powyższe równania stają się niedokładne w klimatach gorących.

Przy obliczaniu ryzyka kondensacji powierzchniowej w elementach o niskiej bezwładności cieplnej, jak np. okna, ramy okienne należy posługiwać się zewnętrzną wilgotnością względną, odpowiadającą średniej rocznej minimalnej temperaturze dziennej. Przy ustaleniu warunków wilgotnościowych w gruncie, zakłada się stan nasycenia (φ= 1).

Warunki wilgotnościowe powietrza wewnętrznego można uzyskać z wyrażeń:

$$p_i = p_e + \Delta p, \quad \nu_i = \nu_e + \Delta\nu \qquad (3.11).$$

Wartości Δp, $\Delta\nu$ należy przyjąć zgodnie z oczekiwanym sposobem eksploatacji budynku i pomnożyć przez 1,10, aby zapewnić margines bezpieczeństwa. Do obliczeń zgodnych z niniejszą normą można stosować wartości krajowe albo przyjąć φ_i jako stałą, gdy wewnętrzna wilgotność względna jest znana i utrzymywana na stałym poziomie np. dzięki klimatyzacji. Zapewnić margines bezpieczeństwa dodając 0,05 do wilgotności względnej.

Główne kroki procedury projektowej to określenie wilgotności powietrza wewnętrznego, a następnie, na podstawie wymaganej wilgotności względnej na powierzchni, obliczenia akceptowanej wilgotności objętościowej w stanie nasycenia, ν_{sat}, lub ciśnienia pary nasyconej, p_{sat}, na powierzchni. Na podstawie tej wartości ustalana jest minimalna temperatura powierzchni i stąd wymagana „jakość cieplna" obudowy

budynku (określona dla danej temperatury powietrza wewnętrznego i wyrażona za pomocą f_{Rsi}).

Dla każdego miesiąca w roku, należy:

- zdefiniować temperaturę powietrza zewnętrznego,
- zdefiniować wilgotność zewnętrzną,
- zdefiniować temperaturę wewnętrzną zgodnie z praktyką krajową,
- obliczyć wewnętrzną wilgotność względną na podstawie Δp lub Δv lub przyjąć wilgotność względną w pomieszczeniu klimatyzowanym jako stałą uwzględniając poprawkę na margines bezpieczeństwa,
- przyjmując maksymalną dopuszczalną wilgotność względną na powierzchni, $\varphi_{si} = 0{,}8$, obliczyć minimalną dopuszczalną wilgotność objętościowa w stanie nasycenia, v_{sat}, lub ciśnienie pary nasyconej p_{sat}

$$v_{sat}(\theta_{si}) = \frac{v_i}{0{,}8},\ p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0{,}8} \qquad (3.12),$$

- na podstawie minimalnej dopuszczalnej wilgotności w stanie nasycenia określić minimalną dopuszczalną temperaturę powierzchni, $\theta_{si,min}$,
- na podstawie minimalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni $\theta_{si,min}$, przyjmując temperaturę powietrza wewnętrznego, θ_i i temperaturę zewnętrzną, θe, oblicza się z równania minimalny czynnik temperaturowy, $f_{Rsi,min}$,
- na podstawie otrzymanych wyników 12 miesięcy wybieramy wartość maksymalną, która jest wartością krytyczną.

Wartość czynnika temperaturowego dla analizowanego złącza budowlanego obliczamy na podstawie obliczonej temperatury minimalnej w danym węźle $\theta_{si,min}$ według zależności:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \qquad (3.13).$$

Natomiast wartość graniczą czynnika temperaturowego $f_{Rsi,min.}$ ustala się na podstawie kilku parametrów:

- temperatura powietrza zewnętrznego dla poszczególnych miesięcy roku i danego obszaru,
- wilgotność powietrza zewnętrznego,
- klasa wilgotności pomieszczeń wewnętrznych.

Dlatego wartość współczynnika $f_{Rsi,min.}$ jest zmienna, w zależności od przyjętych parametrów. Przykład jego wyznaczenia przedstawiono w tabeli 3.7. Wartości θ_e, φ_e przyjęto dla miasta: Warszawa na podstawie [21].

Tabela 3.7. Wyznaczenie czynnika temperaturowego $f_{Rsi,min.}$ - parametry przyjęto na podstawie [21]

Miesiąc	θ_e [°C]	φ_e [%]	$p_{ni}(\theta_e)$ [hPa]	p_e [hPa]	Δp [hPa]	p_i [hPa]	$p_{sat}(\theta_{si})$ [hPa]	$\theta_{si,min}$ [°C]	θ_i [°C]	f_{Rsi} [-]
I	-5,9	88	3,72	3,27	8,10	12,18	15,23	13,2	20	0,737
II	-1,8	91	5,27	4,80	8,10	13,71	17,14	15,1		0,775
III	-0,4	79	5,92	4,68	8,10	13,59	16,99	14,9		0,750
IV	6,6	77	9,75	7,51	5,43	13,48	16,85	14,8		0,612
V	9,9	67	12,18	8,16	4,09	12,66	15,82	13,9		0,386
VI	15,6	81	17,73	14,36	1,78	16,32	20,40	17,8		0,500
VII	16,6	84	18,89	15,87	1,38	17,39	21,74	18,8		0,647
VIII	16,5	80	18,78	15,02	1,42	16,58	20,73	18,1		0,457
IX	12,6	85	14,60	12,41	2,00	15,71	19,64	17,2		0,622
X	8,4	87	11,03	9,60	4,70	14,77	18,46	16,2		0,672
XI	1,5	84	6,82	5,73	7,49	13,97	17,46	15,4		0,751
XII	-0,4	90	5,92	5,33	8,10	14,24	17,80	15,7		**0,789**

Wartość maksymalna z 12 miesięcy wynosi $(f_{Rsi,min})_{max}$ 0,789 dla miesiąca grudnia. Oznacza to, że w każdym miesiącu roku i dla każdych innych wartości temperatur brzegowych, dla uniknięcia rozwoju pleśni f_{Rsi} powinien być większy od 0,789.

Przeprowadzenie analizy wg normy PN-EN ISO 13788 [89] wymaga opracowania danych obliczeniowych dla charakterystycznych miejsc w kraju. Dlatego obecne jej stosowanie staje się dyskusyjne.

Według normy PN-EN ISO 13788 [89] można przeprowadzić także obliczenia w zakresie kondensacji wewnętrznej (międzywarstwowej) przegród.

Zgodnie z załącznikiem do Rozporządzenia [66], w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej przywołano jako obowiązkowe do stosowania są następujące podstawowe normy przedmiotowe:

1. PN-EN ISO 6946:2004 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania [81].
2. PN-EN ISO 10211-1:2005/Ap.1:2006 Mostki cieplne w budynkach. Strumień cieplny i temperatura powierzchni. Ogólne metody obliczania [84].
3. PN-EN ISO 10211-2:2002 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplny i temperatury powierzchni. Liniowe mostki cieplne [85].
4. PN-EN ISO 14683:2001 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne [92].
5. PN-EN ISO 13789:2001 Cieplne właściwości użytkowe budynków. Współczynnik strat ciepła przez przenikanie. Metoda obliczania [89].
6. PN-EN ISO 13370:2001 Cieplne właściwości użytkowe budynków. Wymiana ciepła przez grunt. Metoda obliczania [88].
7. PN-B-02025:2001 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego [71].

W zakresie ustalania parametrów powietrza wewnętrznego, przywołano jako obowiązkowe do stosowania są normy:

1. PN-83/B-03430 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania [101].
2. PN-78/B-03421 Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi [98].

Takie pozostawienie problematyki wpływu mostków termicznych w obliczeniach cieplno-wilgotnościowych ścian zewnętrznych budzi wiele niejasności. Istniejące przepisy, wymagania oraz normy przedmiotowe w wielu przypadkach nie dają możliwości poprawnego wykonania analizy z zakresu fizyki budowli.

3.3. Wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujące w Polsce

Podstawowym punktem odniesienia w sprawie wymagań projektowych w zakresie cieplno-wilgotnościowym jest cytowana już Ustawa Prawo budowlane [70] zobowiązująca wszystkich uczestników procesu inwestycyjnego doprojektowania, wznoszenia i użytkowania obiektów budowlanych w sposób zapewniający spełnienie wymagań podstawowych. W zakresie cieplno-wilgotnościowych szczególne znaczenie mają wymagania dotyczące:

- oszczędności energii i odpowiedniej izolacyjności cieplnej przegród,
- odpowiednich warunków higienicznych i zdrowotnych.

Ponadto od stycznia 2009 roku Ustawa Prawo budowlane [70] wprowadza obowiązek sporządzania świadectw energetycznych budynków i lokali.

W Rozporządzeniu [66] powołano odrębny Dział X – Oszczędność energii i izolacyjność cieplna, w którym sprecyzowano ogólne i wynikające z nich szczegółowe wymagania w tym zakresie odrębnie dla czterech grup budynków , przedstawiono w tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Podstawowe wymagania cieplne dla podstawowych grup budynków – opracowanie własne

RODZAJ BUDYNKU	WYMAGANIA
budynki mieszkalne wielorodzinne i zamieszkania zbiorowego	$E < E_o$
budynki jednorodzinne	$E < E_o$ $U_k < U_{k,max.}$
budynki użyteczności publicznej	$U_k < U_{k,max.}$
budynki produkcyjne	$U_k < U_{k,max.}$

Załącznik 2 Rozporządzenia [66] podaje graniczne wartości współczynnika przenikania ciepła U, lub odpowiednich oporów cieplnych R przegród w poszczególnych rodzajach budownictwa kubaturowego Wartości maksymalne-graniczne dla ścian zewnętrznych budynku mieszkalnego jednorodzinnego podano w tabeli 3.9.

Tabela 3.9. Maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła U ścian zewnętrznych budynku – opracowanie własne na podstawie [66]

RODZAJ PRZEGRODY I TEMPERATURA W POMIESZCZENIU	$U_{k,max.}$ [W/(m^2·K)]
Budynki mieszkalne jednorodzinne	
Ściana zewnętrzna (stykająca się z powietrzem zewnętrznym) a) przy $t_i > 16°C$: - warstwowe, z izolacją o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda \leq 0,05$ W/(m·K), - pozostałe b) przy $t_i \leq 16°C$, niezależnie od rodzaju ściany	 0,30 0,50 0,80

W ostatnich latach zmniejszające się wartości maksymalnych wartości współczynnika przenikania ciepła od 1,45 W/(m^2·K) według PN-57/B-02405 [96] do 0,30 – 0,50 W/(m^2·K) według Rozporządzenia [66], prowadzą do stosowania materiałów izolacji cieplnej o niskiej przewodności cieplnej. Wiele jednak zależy też od rozwiązania detali projektowych [17], [18],[49],[52].

W tabeli 3.10. przedstawiono wartości maksymalne współczynnika przenikania ciepła.

Tabela 3.10. Przegląd wartości maksymalnych współczynników przenikania ciepła U_{max} stosowanych w Polsce – opracowanie własne na podstawie [17], [18], [49], [52]

l.p.	Dokument, w którym zostały sprecyzowane wartości maksymalne	U_{max} [W/(m^2·K)]]	
1	PN-57/B-02405	strefa klimatyczna I-II	1,45
		strefa klimatyczna III-V	1,16
2	PN-64/B-03404		1,16
3	PN-74/B-03404	bez podziału na strefy klimatyczne	1,16
4	PN-82/B-02020	dla pomieszczeń $t_i > 16$ °C	0,75
5	PN-91/B-02020	dla budynków mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej i $t_i > 16$ °C	0,55 – 0,70
6	Rozporządzenie [64], od 30.09. 1997	dla budynków jednorodzinnych, ścian warstwowych, $t_i > 16$ °C	0,30
		dla budynków jednorodzinnych, ścian jednowarstwowych, $t_i > 16$ °C	0,50

Wymagania w zakresie ochrony przeciwwilgociowej przegród budynków podaje Dział VII, Rozdziału 4 – Ochrona przed zawilgoceniem i korozją biologiczną Rozporządzenia [66]. W szczególności postanowiono, że:

1° *§ 317.1. Ściany piwnic budynku oraz stykające się z gruntem inne elementy budynku, wykonane z materiałów podciągających wodę kapilarnie, powinny być zabezpieczone odpowiednią izolacją przeciwwilgociową.*

2° *§ 317.2. Części ścian zewnętrznych, bezpośrednio nad otaczającym terenem, tarasami, balkonami i dachami, powinny być zabezpieczone przed przenikaniem wody opadowej i z topniejącego śniegu.*

3° *§ 321. W pomieszczeniu przeznaczonym na stały pobyt ludzi temperatura na wewnętrznej powierzchni przegród zewnętrznych powinna spełniać wymagania określone w pkt 2.2 załącznika do rozporządzenia.*

1) w budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego, budynku użyteczności publicznej, a także w budynku produkcyjnym opór cieplny nieprzezroczystych przegród zewnętrznych powinien umożliwiać utrzymanie na wewnętrznych jej powierzchniach temperatury wyższej co najmniej o 1 °C od punktu rosy powietrza w pomieszczeniu, przy obliczeniowych wartościach temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz przy obliczeniowej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu, obliczonej zgodnie z Polską Normą dotyczącą parametrów obliczeniowych powietrza wewnętrznego.

4° *§ 322. 1. Rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne zewnętrznych przegród budynku, warunki cieplno-wilgotnościowe, a także intensywność wymiany powietrza w pomieszczeniach, powinny uniemożliwić powstawanie zagrzybienia.*

2. Do budowy należy stosować materiały, wyroby i elementy budowlane odporne lub uodpornione na zagrzybienie i inne formy biodegradacji, odpowiednio do stopnia zagrożenia korozją biologiczną.

3. Przed podjęciem przebudowy, rozbudowy lub zmiany przeznaczenia budynku, w przypadku stwierdzenia występowania zawilgocenia i oznak korozji biologicznej, należy wykonać ekspertyzę mykologiczną i na podstawie jej wyników – odpowiednie roboty zabezpieczające.

Spełnienie czterech przedstawionych powyżej podstawowych wymagań wiąże się z wykonaniem szeregu zabiegów technicznych [6]:

- wykonanie pełnej i ciągłej izolacji przeciwwilgociowej lub przeciwwodnej, oddzielającej budynek od gruntu, na całej powierzchni piwnic lub podłóg na gruncie i pod ścianami budynku (warunek 1°),
- przecięciem ścian zewnętrznych budynku dodatkową izolacją poziomą (połączoną z innymi izolacjami pionowymi lub poziomymi budynku), ułożoną nad strefę cokołu budynku na wysokości 30 – 50 cm ponad poziomem terenu (warunek 2°),
- detale (szczegóły) rozwiązań konstrukcyjnych złączy budowlanych powinny być badane w celu wykluczenia niebezpieczeństwa kondensacji powierzchniowej (warunek 3°). Wadliwie zaprojektowane złącze generuje strefy krytycznych temperatur na powierzchniach wewnętrznych, powodując pleśń wykluczającą bezpieczną eksploatację budynku,
- konstrukcja przegród zewnętrznych powinna być obliczeniowo sprawdzona w celu wykluczenia możliwości nadmiernej kondensacji wewnętrznej (międzywarstwowej), powodującej ciągłe przyrosty wilgoci wewnętrznej w miarę upływu lat eksploatacji budynku. Rozporządzenie [66] nie wskazuje jednak obowiązującej metody obliczeniowej w tym zakresie (warunek 4°).

Załącznik 1 do Rozporządzenia [66] podaje wykaz norm przedmiotowych stosowanych do podstawowych obliczeń parametrów charakteryzujących zewnętrzne przegrody budowlane.

Wymagania dotyczące projektu budowlanego w sprawie ochrony cieplno-wilgotnościowej podaje Rozporządzenie [67].

3.4. Wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujące w krajach Europy

W krajach Europy wymagania w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej regulują przepisy prawne i normy przedmiotowe. Przegląd obecnie obowiązujących wartości maksymalnych współczynnika ciepła $U_{k,max.}$ dla poszczególnych elementów budynku w różnych krajach Europy podano tabeli 3.11.

Tabela 3.11. Wartości maksymalne współczynnika przenikania ciepła U_{max} – opracowanie własne na podstawie [27], [64]

Kraj	Ściana Zewnętrzna	Okno	Drzwi	Ściana przestrzeni nieogrzewanej	Strop, dach	Podłoga
			[W/(m^2·K)]			
Austria	0,35	1,70	1,70	0,50	0,20	0,40
Dania	0,30	1,80	1,80	0,40	0,15	0,20
Finlandia	0,28	1,80	0,70	0,28	0,22	0,22
Francja	0,28÷0,39	2,45	1,30	0,28÷0,39	0,20	0,37÷0,44
Niemcy	0,50	1,65	2,00	0,50	0,22	0,35
Grecja	0,60	3,50	3,50	0,70	0,60	0,60
Włochy	0,58	2,75	3,66	0,58	0,75	0,74
Irlandia	0,45	3,30	3,30	0,60	0,25	0,45
Zjednoczone Królestwo	0,45	3,30	3,30	0,60	0,25	0,45

Maksymalne wartości współczynnika U powinny być przestrzegane w odniesieniu do wszystkich ścian należących do obudowy budynku [27].

Według Woutersa P., Scietecata J., Standaerta P., Kasprekiewicza K. [27] zmniejszenie strat ciepła przez elementy budynku w związku z występowaniem mostków

cieplnych można określić przy sformułowaniu wymagania w postaci bezwzględnej i względnej.

Wymagania w postaci bezwzględnej w odniesieniu do ścian charakteryzujących się współczynnikiem U (wartość bez mostków cieplnych) oraz powierzchnią A, które zawierają liniowe i punktowe mostki cieplne, można zapisać według wzoru:

$$U \cdot A + \Sigma(\Psi \cdot l) + \Sigma\chi \leq U_{k,max.} \cdot A \quad (3.14),$$

$$\Sigma(\Psi \cdot l) + \Sigma\chi \leq (U_{k,max.} - U) \cdot A \quad (3.15).$$

Możliwe jest sformułowanie, w sposób arbitralny, dodatkowego wymagania, które ogranicza wpływ mostka cieplnego ściany do 5% całkowitej straty ciepła przez tę ścianę, czyli:

$$\Sigma(\Psi \cdot l) + \Sigma\chi \leq 0{,}05 \cdot U \cdot A \quad (3.16).$$

Wymaganie to, wyrażone w postaci względnej, nie zależy jedynie od wartości współczynnika Ψ, ale także od całkowitej długości możliwych liniowych mostków cieplnych i całkowitej liczby możliwych punktowych mostków cieplnych.

Wartości współczynników Ψ powinny być oceniane z dużą starannością. Znacząca wartość Ψ nie oznacza automatycznie istotnego mostka cieplnego. Zgodnie z definicją wartości Ψ traktowane są jako współczynniki korekcyjne do obliczeń jednowymiarowych strat ciepła, za pomocą których aspekt geometryczny (określony przez przyjęcie wymiarów), powinien być uwzględniony, tak samo jak zwiększenie strumienia cieplnego. Przykładową klasyfikację wpływu mostków cieplnych w zależności od wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ podaje tabela 3.12. poniżej.

Tabela 3.12. Klasyfikacja wpływu mostków cieplnych na starty ciepła – opracowanie własne na podstawie [27]

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

Wybrane zagadnienia i rozwiązania związane z uwzględnieniem mostków cieplnych w obliczeniach z zakresu fizyki budowli stosowane w krajach Europy przedstawiono w tabeli 3.13.

Tabela 3.13. Zestawienie podstawowych wymagań w zakresie cieplnym i wilgotnościowym w różnych krajach Europy – opracowanie własne na podstawie [64]

Kraj	Wymagania w zakresie cieplnym	Wymagania w zakresie wilgotnościowym
Francja	Odnośnie izolacyjności cieplnej budynków przepisy prawne podają maksymalne dopuszczalne wartości współczynnika przenikania ciepła U i wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ. Maksymalna dopuszczalna U [W/(m^2·K)]– wartość na częściach budynków: - nieprzezroczyste ściany w kontakcie z powietrzem zewnętrznym albo gruntem - 0.47; - podłoga pod przestrzenią dachu albo pochyłym końcem użytej przestrzeni dachu - 0.30; - niższa podłoga w kontakcie z pow. zewnętrznym albo parkingiem i płaskim dachem w betonie lub obmurowaniu – 0.36; - inny rodzaj wyższej podłogi – 0.47; - niższa podłoga w kontakcie z przestrzenią pełzania – 0.43; - okna albo szklane drzwi bez ochrony – 2.9; - ściana działowa – 2.9. Maksymalna dopuszczalna Ψ [W/(m·K)] – wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła w wyniku występowania mostka cieplnego zależy od typu budynku: - dom jednorodzinny – 0.99; - budynek wielorodzinny – 1.10; - inne budynki -1.35.	W zakresie wilgotnościowym podstawowym czynnikiem charakterystycznym jest *f* – czynnik temperaturowy. Dla warunków odniesienia i różnych klas mierzenia wilgoci pokoju, pobieżna kondensacja może nie wystąpić, jeśli następujące kryteria są spełnione dla f – wartości: - *f* > 0.25 dla W/ n ≤ 2.5 g /m^3, - *f* > 0.52 dla 2.5 < W / n ≤5 g /m^3, - *f* > 0.73 dla 5 < W / n ≤ 7.5 g /m^3, Dla większość celów, kryterium f > 0.7 jest raczej równoważne do poleceń innych krajów.
Hiszpania	Podstawowe wymaganie cieplne stanowi, że wszystkie elementy (ściany, dachy, otwory, podłogi) mają maksymalne dopuszczalne współczynniki przenikania ciepła. Wartości $U_{k,max.}$ są zależne od 12 stref klimatycznych.; np. Madryt jest w strefie klimatycznej D3, dla tego miejsca, wartości maksymalne współczynnika $U_{k,max.}$ wynoszą: - dla dachu 0.38 W/(m^2·K); - dla podłogi 0.49 W/(m^2·K). Wartości współczynnika $U_{k,max.}$ dla ścian i okien zależy od orientacji, np. okno na północ mogłoby mieć przewodnictwo cieplne między 1.9 i 3.5 W·/(m^2·K). Wpływ mostków cieplnych jest określany na podstawie wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ, określane za pomocą obliczeń przy użyciu programów komputerowych lub korzystając z normy ISO 14683.	W zakresie wilgotnościowym podstawowym czynnikiem charakterystycznym jest *f* – czynnik temperaturowy. Zaleca się stosowanie programów komputerowych do obliczeń czynnika *f*.

c.d. tabeli 3.13.

Finlandia	Podstawowym parametrem charakterystycznym jest współczynnik przenikania ciepła U. Określenie wpływu mostków cieplnych w obliczeniach cieplnych budzi wiele wątpliwości i problemów. Obliczenia wykonywane są tylko wtedy, jeśli jest obawa, że mogłyby by wystąpić niedopuszczalne zewnętrzne współczynniki. Końcowe regulacje pozwalają, że indywidualne cieplne mostki, które mogą być na przykład szczegółami ściana – strop albo ściana – podłoga nie muszą być wzięte do rachunku, kiedy obliczana jest wartość U. Reguły dla uzasadnienia, których szczegóły mogą zostać spisane jako „indywidualne cieplne mostki" nie są dobrze udokumentowane. Jeśli cieplne przewodnictwo przyległych materiałów różni się więcej niż 5 razy w cieplnych mostkach muszą zostać wzięte do rachunku i mogą zostać obliczone używając liniowego i punktowego współczynnika przenikania ciepła. Metody do obliczania liniowego i punktowego współczynnika przenikania ciepła nie są dane i mogą zostać określone doświadczalnie albo z odpowiednimi narzędziami obliczeniowymi. Maksymalne średnie wartości U dla zewnętrznych elementów budynku: - ściana zewnętrzna – 0,28 W/(m^2·K), - strop, dach – 0,22 W/(m^2·K), - okno – 1,80 W/(m^2·K).	Brak danych
Belgia	Obliczenie średniej wartości współczynnika przenikania ciepła U definiuje się, jako funkcje gęstości budynku, poziomu izolacji budynku (graficznie albo obliczony). Otrzymany poziom izolacji jest sprawdzony z wartościami maksymalnymi narzuconymi przez cieplne regulacje w trzech regionach Belgii.	Żadna z norm nie podaje wymagań w sprawie kondensacji. W jednym z dokumentów podaje się wytyczne odnoszące się tylko do normalnych wewnętrznych warunków w mieszkaniach, co następuje : - wewnętrzne temperatury powierzchni są obliczone dla R_{si} = 0.20 (m^2·K)/W lub h_i= 5 W/(m^2·K), - ocena ryzyka kondensacji jest oparta na czynniku temperatury ($f_{0,2}$); warunek dla uniknięcia ryzyka kondensacji wynosi około : $f_{0,2} \geq 0.7$. W zależności od wartości czynnika $f_{0,2}$ podaje się klasy występowania kondensacji.

c.d. tabeli 3.13.

Niemcy	W budynkach, w których panuje normalna temperatura, ogranicza się roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną odniesioną do: - powierzchni użytkowej (w przypadku budynków mieszkalnych); - kubatury (w przypadku innych budynków). Ponadto w przypadku budynków niemieszkalnych ogranicza się współczynnik strat ciepła przez przenikanie odniesiony do powierzchni przegród chłodzących. Stosuje się przy tym uproszczone umowne zależności do obliczania kubatury ogrzewanej: - $V = 0,76V_e$ w przypadku budynków do 3 kondygnacji; - $V = 0,80V_e$ w innych przypadkach, gdzie: V_e – kubatura obliczana w obrysie zewnętrznym, oraz powierzchni użytkowej $A_N=0,32V_e$. Roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną oblicza się według DIN EN 832 lub uproszczoną metodą podaną w rozporządzeniu, uwzględniając średnie zapotrzebowanie na przygotowanie ciepłej wody w budynkach mieszkalnych 12,5 kWh/(m^2·a). Uproszczona metoda sprawdzania spełnienia wymagań jest bardzo zbliżona do Załącznika G do PN-B-02025. Obliczenia wykonuje się tabelarycznie. Wpływ mostków cieplnych uwzględnia się alternatywnie przez: - podwyższenie współczynnika przenikania ciepła całej obudowy budynku o 0,1 W/(m^2·K); - zastosowanie przykładów detali wg określonego katalogu i podwyższenie współczynnika przenikania ciepła całej obudowy budynku o 0,05 W/(m^2·K); - dokładne obliczenia z wykorzystaniem uznanych reguł technicznych. Przepisy podają także maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła $U_{k,max.}$ dla poszczególnych przegród zewnętrznych.	Brak danych.

3.5. Ocena cieplno-wilgotnościowa ścian zewnętrznych analizowanego budynku według obowiązujących wymagań

Wymagania projektowe w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej zewnętrznych przegród budowlanych są nieprecyzyjne i trudne do spełnienia. Na przykład zapis Rozporządzenia [66]: *„...2) przegrody zewnętrzne odpowiadają wymaganiom izolacyjności cieplnej oraz innym wymaganiom związanym z oszczędnością energii, określonym w załączniku do rozporządzenia"... „ Wartości współczynnika przenikania ciepła U ścian, stropów i stropodachów, obliczone zgodnie z Polską Normą, nie mogą być większe niż wartości U_{max}, określone w tabelach..."*. Pojawiają się niejasności i wątpliwości: np. dla jakiej ściany (jak wybranej) należy przeprowadzić obliczenia współczynnika U_k dla danego budynku?, czy też: jak przyjmować wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła mostka cieplnego?. Natomiast sprawdzenie podstawowego kryterium wilgotnościowego według Rozporządzenia [66]: *„...w budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego, budynku użyteczności publicznej, a także w budynku produkcyjnym opór cieplny nieprzezroczystych przegród zewnętrznych powinien umożliwiać utrzymanie na wewnętrznych jej powierzchniach temperatury wyższej co najmniej o 1 °C od punktu rosy powietrza w pomieszczeniu, przy obliczeniowych wartościach temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego oraz przy obliczeniowej wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu, obliczonej zgodnie z Polską Normą dotyczącą parametrów obliczeniowych powietrza wewnętrznego"* jest w wielu przypadkach niemożliwe do realizacji, ponieważ brak katalogów mostków cieplnych wielu rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych przegród zewnętrznych budynku.

W celu wykazania błędów i niejasności w procedurach obliczeniowych powszechnie stosowanych w praktyce inżynierskiej przedstawiono poniżej przykład obliczeniowy składający się z dwóch części: obliczenia cieplne i wilgotnościowe.

Sprawdzenie kryterium cieplnego sprowadza się do obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k. Przenikanie ciepła w budynkach może być przeprowadzone przy podziale struktury na typowe przegrody: ściany, okna, drzwi, podłogi, dachy, w odniesieniu do których straty ciepła można obliczać oddzielnie na podstawie jednowymiarowego modelu przepływu ciepła, przy założeniu jednorodnej struktury przegrody, złożonej z równoległych warstw, do których strumień cieplny jest prostopadły. Starty ciepła przez pojedyncze elementy budynku, przy przyjęciu pewnych uproszczeń, można określić za pomocą współczynnika przenikania ciepła U, W/(m^2·K). Współczynnik określa stratę ciepła odniesioną do jednostkowej różnicy temperatury wewnętrznej i zewnętrznej oraz jednostkowej powierzchni elementu budowlanego:

$$U = \frac{1}{R_T} \tag{3.17}$$

gdzie:

R_T – całkowity opór cieplny przegrody złożonej z płaskich warstw jednorodnych, m^2·K/W, obliczony ze wzoru:

$$R_T = R_{si} + R_n + R_{se} \tag{3.18}$$

gdzie:

R_{si} – opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej, (m^2·K)/W,

R_n – obliczeniowe opory cieplne każdej warstwy, (m^2·K)/W, $R_n = \frac{d}{\lambda}$ (3.19)

d – grubość warstwy, m,

λ – obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła materiału, W/(m·K),

R_{se} – opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej, $(m^2 \cdot K)/W$.

Do obliczonego współczynnika przenikania ciepła U należy stosować poprawki korygujące wpływ:

- nieszczelności w warstwie izolacji,
- łączników mechanicznych przechodzących przez warstwę izolacyjną,
- opadów na dach o odwróconym układzie warstw.

Skorygowany współczynnik przenikania ciepła U_c uzyskuje się wprowadzając trzon korekcyjny ΔU:

$$U_c = U + \Delta U \tag{3.20}$$

Człon korekcyjny ΔU wyraża następującym wzorem :

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \tag{3.21}$$

gdzie:

ΔU_g – poprawka na nieszczelności,

ΔU_r– poprawka na wpływ opadów dla dachów odwróconym układzie warstw,

ΔU_f – poprawka na łączniki mechaniczne.

Procedurę uwzględniania w/w poprawek podaje norma PN-EN ISO 6946 [81].

Współczynnik przenikania ciepła z uwzględnieniem mostków cieplnych został obliczony dla czterech ścian zewnętrznych budynku według wzoru:

$$U_k = U_c + \frac{\sum_i \Psi_i \cdot l_i}{A} \tag{3.22}$$

gdzie:

U_c – skorygowany współczynnik przenikania ciepła (bez uwzględniania mostków cieplnych), $W/(m^2 \cdot K)$, obliczony wg normy [81],

Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka liniowego o indeksie „i", $W/(m \cdot K)$,

l_i – długość mostka liniowego o indeksie „i", m,

χ_j – punktowy współczynnik przenikania ciepła mostka punktowego o indeksie „j", W/K,

A – pole powierzchni przegrody w świetle przegród do niej przegród prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi, obliczone w świetle ościeży, m^2.

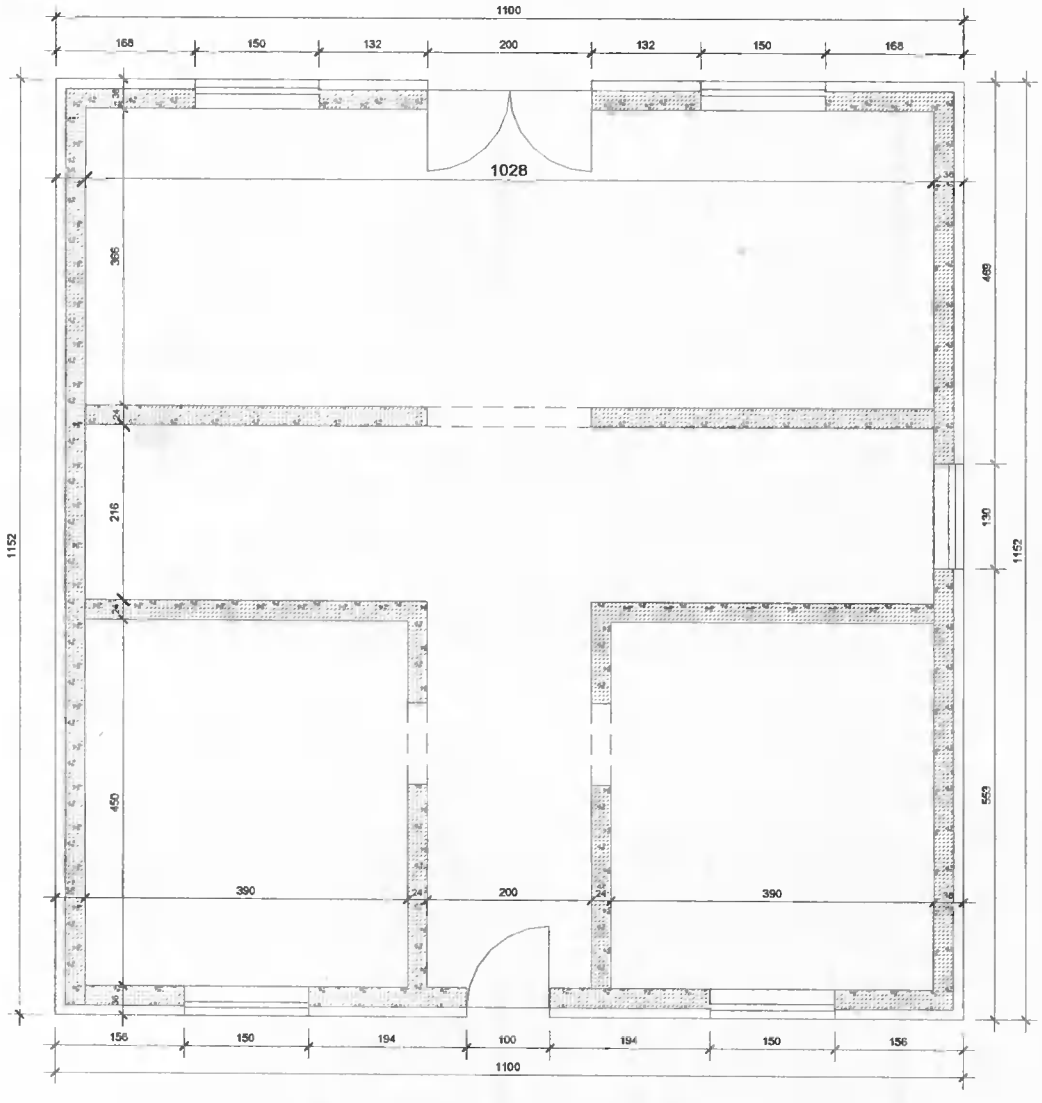
Procedurę obliczeń zaprezentowano w przykładzie obliczeniowym 1°.

1° Obliczenia współczynnika przenikania ciepła pojedynczych ścian zewnętrznych parteru analizowanego budynku według metod i schematów prezentowanych w: [13], [15], [18], [20], [51].

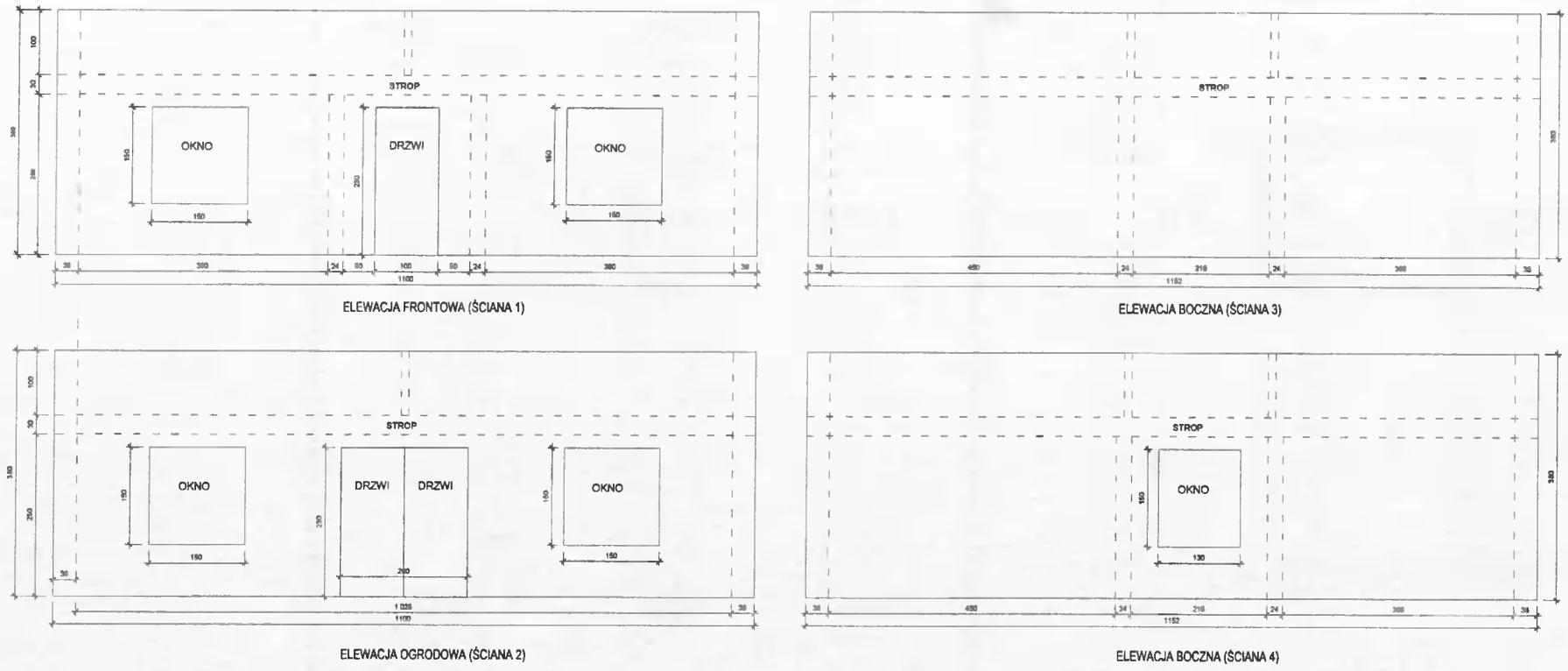
Do analizy cieplnej wybrano budynek jednorodzinny parterowy z poddaszem użytkowym. Podstawowe parametry wyjściowe:

- ściany zewnętrzne dwuwarstwowe z: betonu komórkowego gr. 24 cm o λ =0,22 $W/(m \cdot K)$, styropianu gr. 12 cm o λ=0,043 $W/(m \cdot K)$
- ściany wewnętrzne nośne z betonu komórkowego gr. 24 cm o λ=0,22 $W/(m \cdot K)$,
- ściany wewnętrzne działowe z betonu komórkowego gr. 12 cm o λ=0,22 $W/(m \cdot K)$,
- dach skośny czterospadkowy, pokrycie dachowe gontem bitumicznym o współczynniku U=0,29 $W/(m^2 K)$,
- rzut poziomy przyziemia budynku – rysunek 3.5.,

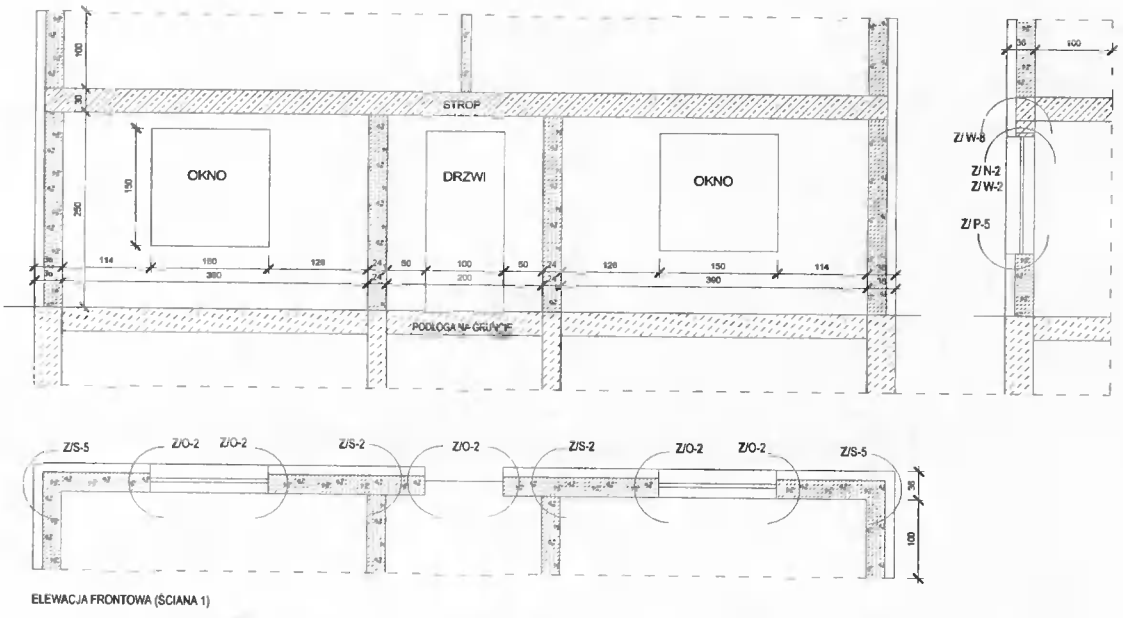
- elewacje budynku – rysunek 3.6.,
- identyfikacja liniowych mostków cieplnych – rysunki 3.7. – 3.10.,
- posadzka na gruncie, izolacja podłogi styka się bezpośrednio z izolacją ściany zewnętrznej, (przyjęto liniowy współczynnik przenikania ciepła w styku podłoga – ściana $\Psi_i = 0{,}0$ – tablica 3 normy PN-EN ISO 13370 [88]).



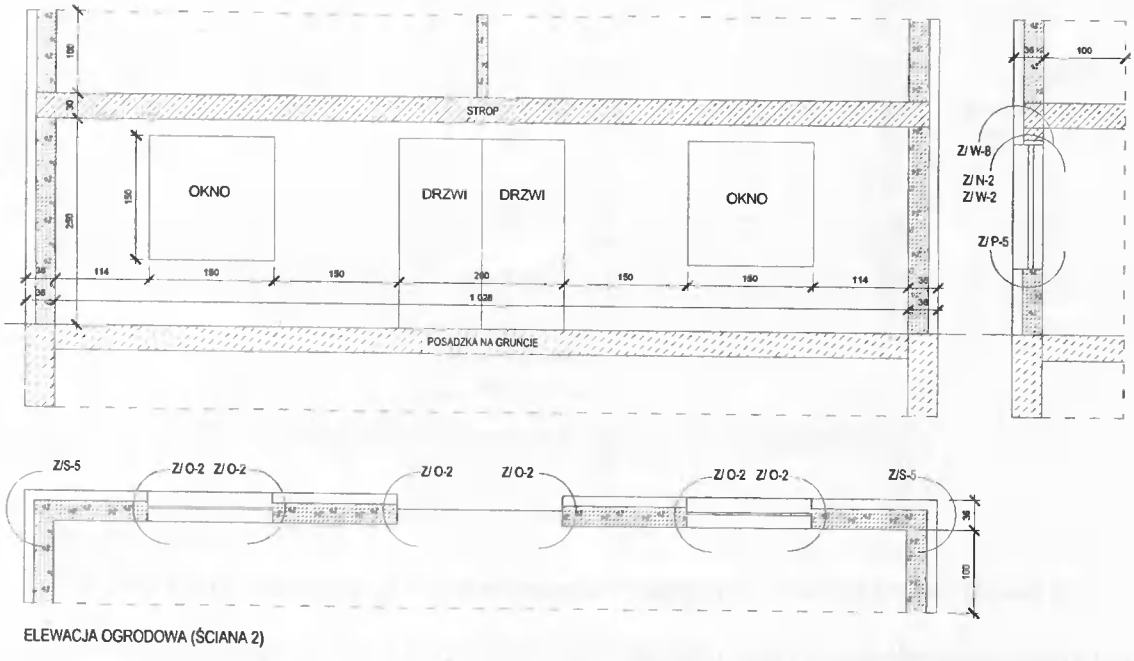
Rysunek 3.5. Rzut poziomy przyziemia



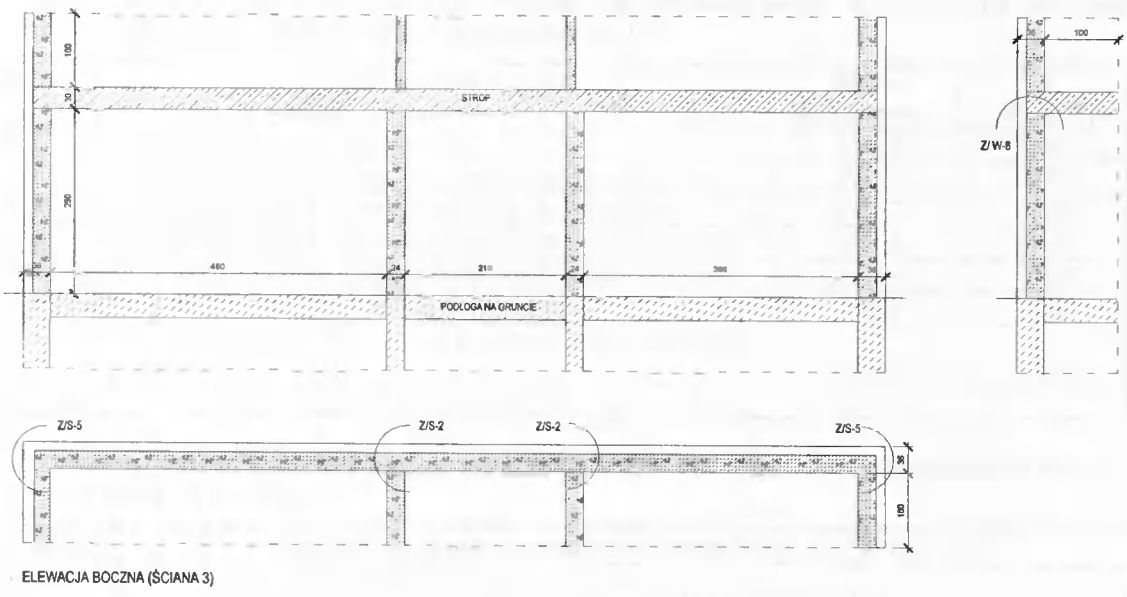
Rysunek 3.6. Elewacje analizowanego budynku



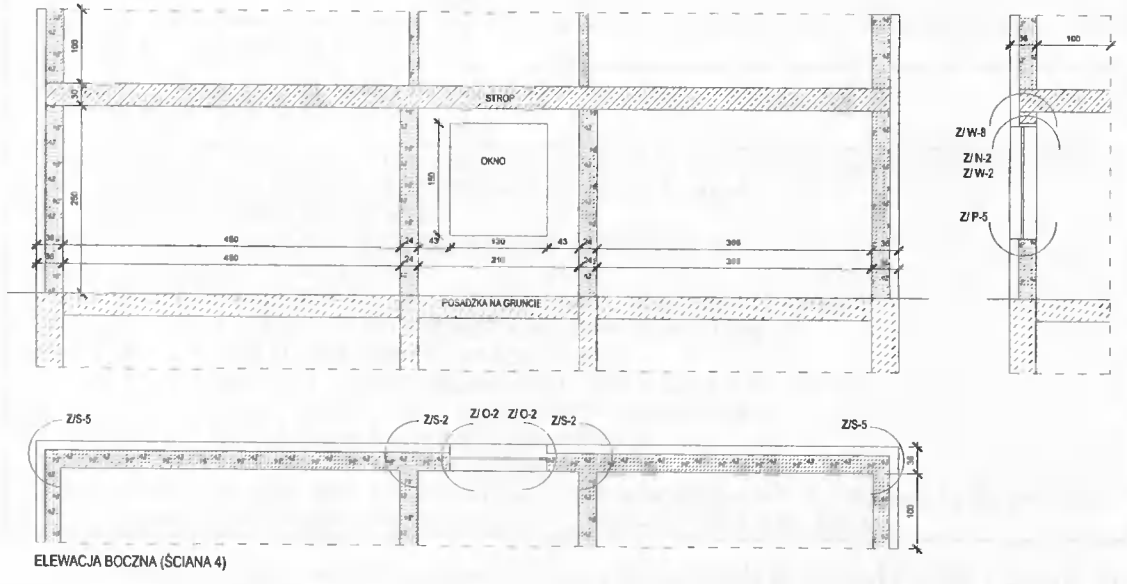
Rysunek 3.7. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja frontowa (ściana 1)



Rysunek 3.8. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja ogrodowa (ściana 2)



Rysunek 3.9. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja boczna (ściana 3)



Rysunek 3.10. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja boczna (ściana 4)

Na wstępie rozpatrzono 4 fragmenty ścian zewnętrznej (wyodrębnienie ściany parteru przez przegrody do niej prostopadłe: strop i ściany zewnętrzne) i wykonano obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k. W obliczeniach zgodnie z przykładami podanymi w [13], [15], [18], [20], [51] uwzględniono tylko wpływ liniowych mostków cieplnych wynikających z występowania okien i drzwi (Z/0-2, Z/N-2, Z/P-5). Wartości liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ_i przyjęto na podstawie katalogu [15] i przedstawiono w tabeli 3.14. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.15.

Tabela 3.14. Wartości liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ wybranych liniowych mostków cieplnych – przyjęto na podstawie katalogu [15]

l.p.	Liniowy mostek cieplny	Karta katalogowa [1)]	Ψ_i [W/(m·K)]
1	Węzeł naroża ściany zewnętrznej	Z/S-5	0,080
2	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	Z/O-2	0,070
3	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez nadproże	Z/N-2	0,060
4	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	Z/P-5	0,110
5	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez wieniec	Z/W-8	0,090
6	Połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną	Z/S-2	0,320
7	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	Z/W-2	0,280

[1)] karty katalogowe przyjęto na podstawie katalogu [15]

Tabela 3.15. Wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k, z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych

Ściana	Obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k, [W/(m²·K)]
1	$U_k = 0{,}244 + \frac{0{,}07 \cdot 10{,}6 + 0{,}06 \cdot 4{,}0 + 0{,}11 \cdot 3{,}0}{17{,}70} = 0{,}244 + 0{,}074 = 0{,}318$
2	$U_k = 0{,}244 + \frac{0{,}07 \cdot 10{,}6 + 0{,}06 \cdot 5{,}0 + 0{,}11 \cdot 3{,}0}{16{,}60} = 0{,}244 + 0{,}083 = 0{,}327$
3	$U_k = 0{,}244 + 0 = 0{,}244$
4	$U_k = 0{,}244 + \frac{0{,}07 \cdot 3{,}0 + 0{,}06 \cdot 1{,}3 + 0{,}121 \cdot 1{,}3}{23{,}85} = 0{,}244 + 0{,}018 = 0{,}262$

A_{1i} = [(3,90 + 2,00 + 3,90)·2,50] – [(1,50·1,50) + (1,00·2,30) +(1,50·1,50)] = 24,50 – 6,80 = 17,70 m²
A_{2i} = [10,28·2,50] – [(2·1,50·1,50) + (2,00·2,30)] = 25,70 – 9,10 = 16,60 m²
A_{3i} = [(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] = 25,80 m²
A_{4i} = [(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] – [(1,30·1,50)] = 25,80 – 1,95 = 23,85 m²
l_{1i} = 2,50 + 2,50 + 2,50 + 2,50 = 10,00 m
l_{2i} = (4·1,50 + 2·2,30) + (4·1,50 + 2·2,30) + (2·1,50) = 10,60 + 10,60 + 3,00 = 24,20 m
l_{3i} = (2·1,50 + 1,00) + (2·1,50 + 2·1,00) + (1,30) = 4,00 + 5,00 + 1,30 = 10,30 m
l_{4i} = (2·1,50) + (2·1,50) + (1,30) = 3,00 + 3,00 + 1,30 = 7,30 m
l_{5i} = (3,90 + 0,24 + 2,00 + 0,24 + 3,90) + (10,28) + (4,50 + 0,24 + 2,16 + 0,24 +3,66) + (4,50 + 0,24 + 2,16 + 0,24 +3,66) = 10,28 + 10,28 + 10,80 + 10,80 = 42,16 m
l_{6i} = (2·2,50) + (2·2,50) + (2·2,50) = 5,00 + 5,00 + 5,00 = 15,00 m
l_{7i} = (2·1,50 + 1,00) + (2·1,50 + 2·1,00) + (1,30) = 4,00 + 5,00 + 1,30 = 10,30 m
Do obliczeń zestawionych w tabeli 3.15 wykorzystano dane: odpowiednio pola A_{1i}, A_{2i}, A_{3i}, A_{4i} dla poszczególnych ścian (elewacji) oraz długości mostków cieplnych: 2 – Z/O-2, 3 – Z/N-2, 4 – Z/P-5.

Nie uwzględnienie wpływu mostków na krawędziach przegród (ścian i stropy dowiązujące) prowadzi do niedoszacowania wartości współczynnika U_k. Następnie przeprowadzono obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k z uwzględnieniem wszystkich liniowych mostków cieplnych występujących w ścianach parteru analizowanego budynku. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.16.

Tabela 3.16. Zestawienie wyników obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k ścian parteru z uwzględnieniem mostków cieplnych

l.p.	Rodzaj mostka cieplnego	Symbol złącza	Ψ_i [W/(m·K)]	Analizowane zewnętrzne przegrody budowlane							
				Elewacja frontowa		Elewacja ogrodowa		Elewacja boczna 1		Elewacja boczna 2	
				l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]
1	Węzeł naroża ścian zewnętrznych	Z/S-5	0,080	5,00	**0,400**	5,00	**0,400**	5,00	**0,400**	5,00	**0,400**
2	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	Z/O-2	0,070	10,60	**0,742**	10,60	**0,742**	-	-	3,00	**0,210**
3	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem przez wieniec	Z/W-8	0,090	6,28 [1)]	**0,565**	5,28 [2)]	**0,475**	10,80	**0,972**	9,50 [4)]	**0,855**
4	Połączenie ściany z oknem przez podokiennik	Z/P-5	0,110	3,00	**0,330**	3,00	**0,330**	-	-	1,30	**0,143**
5	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	Z/W-2	0,280	4,00	**1,120**	5,00	**1,400**	-	-	1,30	**0,364**
6	Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej	Z/S-2	0,320	5,00	**1,600**	-	-	5,00	**1,600**	5,00	**1,600**
$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]					**4,757**		**3,347**		**2,972**		**3,572**
Pole ściany, A [m^2],				[(3,90 + 2,00 + 3,90)·2,50] – [(2·1,50·1,50)+(1,00·2,30)]= **17,70**		[(10,28)·2,50] – [(2·1,50·1,50)+(2,00·2,30)]= **16,60**		(4,50 + 2,16 +3,66)·2,50 = **25,80**		[(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] – (1,30·1,50) = **23,85**	
$\frac{\Sigma \Psi_i \cdot l_i}{A}$ [W/(m^2·K)]				**0,269**		**0,202**		**0,115**		**0,150**	
$U_k = U_c + \frac{\Sigma \Psi_i \cdot l_i}{A}$ [W/(m^2·K)]				0,244 + 0,269 = **0,513**		0,244 + 0,202 = **0,446**		0,244 + 0,115 = **0,359**		0,244 + 0,150 = **0,394**	

[1)] 10,28 – 4,00 = 6,28 m, [2)] 10,28 – 5,00 =5,28 m, [4)] 10,80 – 1,30 = 9,50m – wpływ połączenia ściany zewnętrznej ze stropem przez wieniec uwzględnia już mostek Z/W-2: połączenie ściany ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem, dlatego dokonano redukcji długości mostka dla poszczególnych ścian

Dla jednego budynku uzyskano cztery współczynniki przenikania ciepła różne dla poszczególnych ścian. Do obliczeń współczynnika przenikania ciepła z uwzględnieniem liniowych mostków termicznych przyjęto całkowitą wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i dla całego złącza. Szczególne znaczenie ma to w przypadku mostka: 1 – narożnik ścian zewnętrznych, 3 – połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec, 5 – połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem oraz złączy w których występuje okno. Na podstawie katalogu [15] nie można określić jednoznacznie wpływu tych mostków na pojedynczą ścianę analizowanego budynku. Dlatego otrzymane wyniki (tablica 3.16.) są więc znacznie zawyżone.

2° Sprawdzenie kryterium wilgotnościowego

Do oceny wytypowano analizowane mostki termiczne. Wymagania wilgotnościowe sprecyzowano w Rozporządzeniu [66] Dział VII, Rozdział 4 – ochrona przed zwilgoceniem i korozją biologiczną.
W wielu przypadkach nie zawsze sprawdza się tylko nierówność:

$$t_{min.} \geq t_s + 1\,\mathrm{deg}. \tag{3.23}$$

gdzie:
$t_{min.}$ – krytyczna (najniższa) temperatura na powierzchni wewnętrznej przegrody, najczęściej na wewnętrznej powierzchni mostka, °C;
t_s – temperatura punktu rosy, °C;
Dla t_i = 20 °C, φ_i = 55% temperatura punktu rosy wynosi t_s = 10,7 °C. Sprawdzenie nierówności (3.23) wymaga ustalenia temperatury minimalnej na wewnętrznej powierzchni przegrody w miejscu mostka termicznego na podstawie katalogów mostków cieplnych lub przy zastosowaniu obliczeń numerycznych. Dla analizowanego przykładu przyjęto temperatury minimalne na podstawie katalogu [15] i przedstawiono w tabeli 3.17.

Tabela 3.17. Temperatury minimalne na wewnętrznej powierzchni wybranych liniowych mostków cieplnych [15]

l.p.	Liniowy mostek cieplny	karta katalogowa[1)]	$t_{min.}$ [°C]
1	Węzeł naroża ściany zewnętrznej	Z/S-5	16,60
2	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	Z/O-2	13,40
3	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez nadproże	Z/N-2	16,00
4	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	Z/P-5	14,40
5	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez wieniec	Z/W-8	18,20
6	Połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną	Z/S-2	17,70
7	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	Z/W-2	15,20
[1)] karty katalogowe przyjęto na podstawie katalogu [15]			

Podane wartości temperatur minimalne w katalogu [15] zostały wyznaczone przy zastosowaniu błędnych warunków brzegowych (nie rozróżniając obliczeń parametrów cieplnych i rozkładu temperatur). Kryterium wilgotnościowe powinno być określane przez określanie obszarów temperatur minimalnych na wewnętrznej powierzchni obudowy. Współczesne techniki obliczania pozwalają na identyfikację temperatur krytycznych w „słabych" miejscach; wymagają jednak badań mostków liniowych i przestrzennych oraz opracowania odpowiednich katalogów w odniesieniu do szeregu praktycznych rozwiązań, co proponował już autor pracy w [35].

Przykładowy katalog mostków cieplnych z podaniem m.in. wartości gałęziowych współczynników przenikania ciepła Ψ oraz rozkładu temperatur w analizowanym złączu stanowi załącznik do pracy. Procedurę jego opracowania podano w rozdziale 5.

Podsumowując można stwierdzić, że ocena cieplna i wilgotnościowa ścian zewnętrznych budynku z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych przeprowadzana według procedur podawanych w normach przedmiotowych, literaturze fachowej, przedstawione powyżej są niemożliwe do zastosowania i błędne. Podstawowe mankamenty w procedurach to:

- stosowanie do obliczeń wzoru 1.1., 3.22. obarczonego błędem związanym z przyjmowanym polem powierzchni A,
- uwzględnianie w obliczeniach tylko liniowych mostków cieplnych związanych z występowaniem okien i drzwi,
- przyjmowanie do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej ściany budynku całkowitych wartości liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ,
- brak kart katalogowych wielu często stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych.

Niezbędnym elementem poprawnego projektowania zewnętrznych przegród budowlanych jest opracowanie prostych metod inżynierskich w tym zakresie. Dlatego na podstawie prowadzonych badań własnych i obliczeń prezentowanych w [33], [34], [35], [37], [46] opracowano własne algorytmy efektywności zewnętrznych przegród budowlanych i ich złączy w aspekcie cieplno-wilgotnościowym, które zostały przedstawione rozdziale 5.5. rozprawy.

4. PODSTAWY PRZENOSZENIA CIEPŁA I WILGOCI

W materiałach budowlanych zachodzą przemiany fazowe takie jak:

- adsorpcja pary wodnej,
- kondensacja pary wodnej (kapilarna objętościowa),
- zamarzanie wody.

Złożone zjawiska przenoszenia ciepła i różnych form wilgoci oraz przemiany fazowe wymagają szerszego ujęcia pod kątem termodynamiki procesów nieodwracalnych. W ramach termodynamiki ujmuje się łącznie odległe z punktu widzenia fizyki procesy przenoszenia ciepła, wilgoci i naprężeń wewnętrznych. Ponadto procesy przenoszenia ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych wywołują zmiany temperatury, stężenia lub ciśnienia parcjalnego, czy też dominującego przy wyższych zawilgoceniach ciśnienia kapilarnego. Równolegle do ruchu wilgoci następuje przepływ ciepła [20].

4.1. PRZEPŁYW WILGOCI

Przedmiotem analizy przepływu wilgoci jest materiał budowlany porowaty składający się ze szkieletu i porów, które w stanie nienasyconym są wypełnione wodą i wilgotnym powietrzem (mieszaniną pary wodnej i suchego powietrza). Przy założeniu, że poszczególne części materiału porowatego tworzą makroskopowy ośrodek ciągły, do formułowania bilansów masy wody i pary wodnej można wykorzystać fenomenologiczną teorię wieloskładnikowego ośrodka ciągłego. Tak sformułowane bilanse będą zastosowane do wyprowadzenia równania różniczkowego przenoszenia wilgoci w porowatym materiale budowlanym:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_w \nabla W + D_T \nabla t) \tag{4.1}$$

w którym niewiadomymi są:
W – koncentracja objętościowa, m^3/m^3,
t – temperatura materiału, K
gdzie:
τ – czas, s,
D_w, D_T – współczynniki związane z dyfuzją pary wodnej w materiale porowatym, $kg/(m^2 \cdot s)$,

$$D_w = D_{lW} + D_{vW} \tag{4.2},$$

$$D_T = D_{lT} + D_{vT} \tag{4.3},$$

$$D_{lW} = \frac{k_l}{\rho_w} \frac{\partial p_c}{\partial W}\bigg|_t \tag{4.4},$$

$$D_{lt} = \frac{k_l}{\rho_w} \frac{\partial p_c}{\partial t}\bigg|_W \tag{4.5},$$

$$D_{vW} = \frac{\rho D}{\rho_w} \frac{\partial C}{\partial W}\bigg|_t \tag{4.6},$$

$$D_{vt} = \frac{\rho D}{\rho_w} \frac{\partial C}{\partial t}\bigg|_W \tag{4.7}$$

D – współczynnik dyfuzji pary wodnej w materiale porowatym, m^3/m^3,
k_l – współczynnik przepuszczalności wody, $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$,
p_c – ciśnienie kapilarne (różnica ciśnień nad i pod meniskiem wody kapilarnej), Pa,

C – koncentracja masowa, kg/kg.

4.2. Przepływ ciepła

Przenoszenia ciepła w wilgotnym materiale porowatym, w którym nie występują migracja wilgoci może odbywać się na skutek kilku nakładających się na siebie mechanizmów, takich jak:

- globalne przewodzenie ciepła przez szkielet materiału, wilgotne powietrze wypełniające jego pory oraz wodę kapilarną przylegającą do ścianek porów,
- lokalne promieniowanie wewnątrz pustych porów,
- lokalne unoszenie ciepła przez wilgotne powietrze wypełniające pory,
- lokalne wydzielenie bądź pochłanianie ciepła na skutek przemian fazowych wody wewnątrz porów.

Przy wyprowadzeniu równania różniczkowego przepływu ciepła przez wilgotny materiał porowaty są równania bilansów energii szkieletu oraz entalpii wody i pary wodnej.

$$c_\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla t) + Z\rho_w \nabla \cdot (D_{vW} \nabla W + D_{vt} \nabla t) \tag{4.8}$$

w którym niewiadomymi są:
W – koncentracja objętościowa, m^3/m^3,
t – temperatura materiału, K
gdzie:
τ – czas, s,
c_ρ – pojemność cieplna materiału , $J/(m^3 \cdot K)$,
λ – współczynnik przewodności cieplnej materiału, $W/(m \cdot K)$,
Z – ciepło kondensacji, J/kg,
ρ_W – gęstość właściwa wody, kg/m^3,
D_{vW}, D_{vt} – współczynniki określone wzorami (4.6), (4.7).

Z równań przepływu ciepła i wilgoci można określić stan cieplno-wilgotnościowy porowatego materiału budowlanego i mogą być one wykorzystane do analizy przenoszenia ciepła i wilgoci w przegrodach budowlanych. Równania te uwzględniają fakt, że warunki cieplne przegród bezpośrednio i w decydujący sposób wpływają na procesy przenoszenia wilgoci, a także to, że powoli przebiegające procesy przenoszenia wilgoci wpływają na rozkład temperatury w przegrodzie. Zmienność wilgotności i temperatury przegród budowlanych oraz złożone warunki utrudniają ocenę ich stanu wilgotnościowego. Z uwagi na złożoność procesów cieplno-wilgotnościowych zachodzą w przegrodach, nie doczekały się one dostatecznie prostych i jednocześnie dokładnych opisów teoretycznych, które mogłyby być wykorzystane w praktyce. W opracowaniach z zakresu fizyki często spotyka się uproszczone równania przepływu ciepła i wilgoci w materiale budowlanym [20].

4.2.1. Podstawy przenoszenia ciepła

Przepływ ciepła może odbywać się przez przewodzenie, konwekcję i promieniowanie.

Przewodzenie ciepła jest to przekazywanie energii wewnętrznej między bezpośrednio stykającymi się częściami jednego ciała lub różnych ciał. Ciepło płynie tylko wtedy, gdy występuje różnica temperatur od temperatury wyższej do niższej, a z drobnym przybliżeniem dla większości substancji ilość energii przekazanej przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu jest proporcjonalna do różnicy temperatur, co opisuje równanie różniczkowe Fouriera [24].

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}\Delta t = -\lambda \nabla t \tag{4.9}$$

gdzie:
q – wektor strumienia przewodzenia ciepła,
λ – współczynnik przewodzenia ciepła,
t – temperatura,
∇ - operator nabla.
Pole temperatur jest skalarem, jego gradient jest wektorem.

Konwekcja (unoszenie ciepła) występuje wówczas, gdy poszczególne cząstki ciepła, w którym przenosi się ciepło, zmieniają swoje położenie. Zjawisko to charakterystyczne dla płynów i gazów, przy czym przenoszenie energii odbywa się wskutek mieszania płynu, a także w niewielkim stopniu przez przewodzenie. Niezbędnym warunkiem występowania konwekcji jest więc ruch ośrodka, w którym przenosi się ciepło. Rozróżniamy:

- konwekcję wymuszoną – przepływ ciepła w płynie przy jego wymuszonym ruchu spowodowanym np. przez działanie pompy lub wentylatora,
- konwekcję swobodną, zwaną też naturalną – przepływ ciepła w płynie przy jego swobodnym (naturalnym) ruchu spowodowanym różnicą gęstości nagrzanych i zimnych cząstek.

Promieniowanie ciepła polega na wysłaniu przez ciała o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego fal elektromagnetycznych, takich samych jak fale promieniowania świetlnego, lecz obejmujących cały zakres długości fal od zera do nieskończoności lub selektywnie tylko niektóre długości fal. W wyniku promieniowania termicznego energia promieniowania przekształca się w energię radiacyjną (promieniowania elektromagnetycznego), która po napotkaniu innych ciała lub ich części tego samego ciała częściowo lub całkowicie jest pochłaniana i przekształca w energię wewnętrzną. Jeżeli ilość energii wypromieniowanej jest różna od ilości energii pochłoniętej przez powierzchnię, to powstaje radiacyjna wymiana ciepła (wymiana ciepła przez promieniowanie). Cechą charakterystyczną tego rodzaju wymiany ciepła jest to, że nie odbywa się ona między ciałami stykającymi się, lecz między ciałami rozdzielonymi ośrodkiem przenikliwym dla promieniowania termicznego lub nawet próżnią. Wymiana ciepła przez promieniowanie może odbywać się również między bezpośrednio stykającymi się częściami o różnych temperaturach ośrodka emitującego, pochłaniającego i rozpraszającego promieniowanie, tzw. ośrodka optycznie czynnego.

Często przewodzenie ciepła, konwekcja i promieniowanie występuje jednocześnie, lecz w praktyce inżynierskiej ma ogół jeden z tych rodzajów wymiany przeważa nad pozostałymi i może być rozpatrywany odrębnie [4].

Przepływ ciepła może być ustalony lub nieustalony. W pierwszym przypadku w poszczególnych punktach rozpatrywanego układu nie zmienia się w czasie.

4.2.2. Równania opisujące przewodnictwo cieplne

Zagadnienia przepływu ciepła mogą być rozwiązane, jeśli znany jest rozkład temperatury w rozpatrywanym ciele przewodzącym ciepło (znane są wartości temperatury we wszystkich punktach rozpatrywanego ciała). Aby wyznaczyć rozkład temperatury w danym modelu oznacza znajomość pola temperatury w tym modelu:

$$t = f(x, y, z, \tau) \tag{4.10}.$$

W przypadku zależności temperatury od czasu, to pole temperatury nosi nazwę nieustalonego oraz przewodzenie ciepła jest także nieustalone. W innych przypadkach mamy do czynienia z ustalonym przewodzeniem ciepła. Temperatura jest wielkością skalarną i do jej jednoznacznego określenia wystarczy podanie liczby będącej miarą jej

wielkości. Wielkości skalarnej można przypisać (przyporządkować) wektor będący gradientem tej wielkości. W przypadku temperatury będzie to wektor gradientu temperatury – grad T. Kierunek tego gradientu jest zgodny z kierunkiem normalnej do powierzchni izotermicznej. Miarą wielkości gradientu temperatury jest stosunek przyrostu temperatury wzdłuż normalnej do izotermy do odcinka tej normalnej

$$\text{grad} \cdot t = \frac{\partial t}{\partial n} \tag{4.11}$$

Pole temperatur definiuje się jako zbiór temperatur we wszystkich punktach rozpatrywanego ciała w tej samej chwili. Zbiór punktów o jednakowych temperaturach tworzy odpowiednio powierzchnię lub linię izotermiczną [4].

Ogólne równanie przewodzenia ciepła w ciele izotropowym z uwzględnieniem wewnętrznego wydzielania się ciepła można przedstawić w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right)+q_V = c_p \cdot \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{4.12}$$

Przy założeniu, że współczynnik przewodzenia ciepła λ jest stały (nie zależy od temperatury) oraz wprowadzając współczynnik wyrównania temperatury $a = \dfrac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ (4.13)

równanie (4.12) uproszcza się do postaci:

$$\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}\nabla^2 t + \frac{q_V}{c_p \cdot \rho} = \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{4.14}$$

W przypadku, gdy nie ma wewnętrznych źródeł ciepła, to $q_V = 0$ i otrzymujemy równanie Fouriera w postaci:

$$\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}\nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{4.15},$$

$$a\nabla^2 t = \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{4.16}$$

Przy ustalonym przewodzeniu ciepła $\left(\dfrac{\partial t}{\partial \tau} = 0\right)$ (4.17),

otrzymujemy równanie Laplace'a:

$$\nabla^2 t = 0 \tag{4.18}$$

Rozwiązanie równań przewodzenia ciepła (4.16), (4.18) wymaga określenia warunków jednoznaczności rozwiązania, do których zalicza się [4]:

- warunki geometryczne, charakteryzujące kształt i wymiary ciała,
- warunki fizyczne, określające właściwości fizyczne materiałów, z których zbudowane jest ciało,
- warunki początkowe, podające rozkład temperatury w chwili początkowej w rozpatrywanym obszarze $t(x,y,z) = t_0(x,y,z)$, dla $\tau = 0$ (4.19),
- warunki brzegowe, określające sposoby wymiany ciepła na powierzchniach granicznych ciała.

Warunki początkowe i brzegowe noszą nazwę warunków granicznych. W przypadku warunków brzegowych wyróżnia się ich cztery rodzaje.

Warunki brzegowe I rodzaju (warunki Dirichleta), określone są przez rozkład temperatury na powierzchniach granicznych ciała w dowolnej (każdej) chwili:

$$t_F(\tau) = t(\tau) \tag{4.20}$$

W technice warunek ten występuje tylko jako graniczny przypadek wymiany ciepła między powierzchnią ciała stałego i np. wrzącą wodą.

Warunki brzegowe II rodzaju (warunki Neumana), określone są przez podanie rozkładu gęstości strumienia ciepła na powierzchniach granicznych ciała w każdej chwili:

$$q_F(\tau) = f(\tau) \tag{4.21}$$

Warunki brzegowe III rodzaju (warunki Fouriera), określone są przez podanie temperatury płynu otaczającego ciało i współczynnika przejmowania ciepła w każdym miejscu powierzchni granicznych ciała i w każdej chwili. Warunek tego rodzaju jest najlepszym przybliżeniem rzeczywistych warunków wymiany ciepła na powierzchni ciała stałego przewodzącego ciepło, dla przypadku, gdy dominuje na tej powierzchni konwekcyjna wymiana ciepła z otaczającym płynem. Zgodnie z bilansem cieplnym elementarnego wycinak, strumień energii dopływającej do elementu równa się strumieniowi ciepła odpływającego od tego elementu drogą konwekcji do otaczającego płynu o temperaturze t_0:

$$d\dot{Q}_\lambda = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dS \tag{4.22},$$

$$d\dot{Q}_\alpha = h(t_F - t_0) dS \tag{4.23}.$$

Porównując strumienie ciepła $d\dot{Q}_\lambda$ i $d\dot{Q}_\alpha$ wynika warunek brzegowy III rodzaju:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS = h(t_F - t_0) \tag{4.24}.$$

Z matematycznego punktu widzenia wynika, że na powierzchni obszaru przewodzącego ciepło jest zadana kombinacja temperatury t i jej pochodnej:

$$\frac{\partial t}{\partial n} \tag{4.25}.$$

Warunki IV rodzaju dotyczą wymiany ciepła przez przewodzenie po obydwu stronach powierzchni idealnego styku dwóch ciał stałych. Obowiązuje wtedy prawo Fouriera, a temperatury i gęstość strumienia cieplnego po obu stronach powierzchni styku są jednakowe – warunek ciągłości temperatury i gęstości strumienia na wspólnym brzegu dla dwu obszarów, w których przewodzenie ciepła opisane jest różnymi równaniami:

$$\lambda_1 (\text{grad} \cdot t_1)_F = \lambda_2 (\text{grad} \cdot t_2)_F \tag{4.26},$$

$$t_{1F}(\tau) = t_{2F}(\tau) \tag{4.27}.$$

Indeks F oznacza temperaturę lub gęstość strumienia na brzegu obszaru. Gdy temperatury na powierzchniach styku obu ciał są równe występuje przypadek styku idealnego.
W fizyce cieplnej budowli najczęściej spotykamy się z przypadkami warunków brzegowych III i IV rodzaju.

Rozwiązanie równania różniczkowego Fouriera jest możliwe przy zastosowaniu dwóch grupy rozwiązań:

- rozwiązania analityczne (dokładne),
- rozwiązanie za pomocą metod numerycznych (dyskretnych).

Dla układów złożonych geometrycznie i materiałowo rozwiązanie analityczne równania różniczkowego byłoby trudne i pracochłonne. Obecnie obliczenia tego typu przykładów realizowane są przy pomocy metod numerycznych. Otrzymane w ten sposób rozwiązanie jest zbiorem szukanych wartości w określonych punktach układu.
Jedną z metod numerycznych jest metoda elementów skończonych (MES), która była rozwijana początkowo głownie przez Ziemkiewicza i jego współpracowników, pierwotnie do rozwiązywania zagadnień wytrzymałościowych. Nastąpił obecnie gwałtowny rozwój tej metody, znacznie wykraczający poza pierwotne jej zastosowania, dzięki czemu metoda ta stała się jednym z najczęściej stosowanych sposobów rozwiązywania

różnorodnych zagadnień teorii pola, w tym również zagadnień przepływu ciepła. Pojawiły też liczne komercyjne programy rozwiązujące za pomocą MES tego typu zadania. [25].

Podstawowe etapy w MES przy rozwiązywaniu danego zagadnienia [26]:

- Podział obszaru na elementy skończone (generacja siatki).
- Matematyczne sformułowanie metody Galerkina lub wariacyjnej (metody Ritza) dla analizowanego problemu brzegowego lub początkowo-brzegowego w obszarze jednego elementu.
- Wybór funkcji interpolujących rozkład temperatury wewnątrz elementu (funkcji kształtu).
- Wyznaczenie układu równań algebraicznych dla problemu ustalonego lub układu równań różniczkowych zwyczajnych dla zagadnienia nieustalonego dla jednego elementu za pomocą metody Galerkina lub innej metody wariacyjnej. Liczba równań dla danego elementu jest równa liczbie węzłów w danym elemencie, gdyż poszukiwanymi wielkościami są temperatury węzłach danego elementu.
- Dodawanie układów równań dla poszczególnych elementów w celu utworzenia jednego globalnego układu równań na temperatury w węzłach dla całego analizowanego obszaru.
- Uwzględnienie parametrów występujących w warunkach brzegowych w globalnym układzie równań.
- Rozwiązanie układu równań algebraicznych w przypadku zagadnienia ustalonego lub układu równań różniczkowych zwyczajnych w przypadku zagadnienia nieustalonego.
- Obliczenie gęstości strumienia ciepła, strumieni ciepła i innych wielkości wtórnych oraz graficzna prezentacja wyników obliczeń.

Przedstawiony sposób postępowania jest typowy dla dużych programów komercyjnych, przeznaczonych do rozwiązywania zagadnień z wielu dziedzin.

Przykład wyprowadzenia podstawowych równań w MES dla jednego elementu z wykorzystaniem metody Galerkina.

Przyjęto dwuwymiarowe pole temperatury, źródłowe, a na brzegu są zadane różne warunki brzegowe: I, II, III rodzaju, ośrodek jest anizotropowy (λ_x λ_y) [26].

Poszukuje się rozwiązania równania przewodzenia ciepła:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y}\right)+\dot{q}_v = 0 \tag{4.28}$$

przy warunkach brzegowych:

$$t|_{\Gamma t} = t_b \tag{4.29},$$

$$\left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} n_y\right)\Bigg|_{\Gamma q} = \dot{q}_B \tag{4.30},$$

$$\left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} n_y\right)\Bigg|_{\Gamma a} = h\left(t_{cz} - t|_{\Gamma a}\right) \tag{4.31}$$

gdzie:

λ_x – współczynnik przewodności cieplnej materiału w kierunku x,

λ_y – współczynnik przewodności cieplnej materiału w kierunku y,

t_b – temperatura zadana na brzegu Γ_t ciała,

$\dot{q}$ – gęstość strumienia ciała zadana na brzegu Γ_q ciała,

h – współczynnik wnikania ciepła na brzegu Γ_h ciała,
t_{cz} – temperatura czynnika.
W celu uogólnienia rozważań przyjęto trzy różne rodzaje warunków brzegowych:

- warunek brzegowy I rodzaju na odcinku Γ_t,
- warunek brzegowy II rodzaju na odcinku Γ_q,
- warunek brzegowy III rodzaju na odcinku Γ_h.

Przyjęto, że gęstość strumienia ciepła $\dot{q}$ we wzorze (4.30) jest dodatnia, tzn. ciało jest nagrzane. Normalna do brzegu n jest wektorem jednostkowym skierowanym na zewnątrz obszaru, a jej składowe są równe kosinusom kierunkowym:

$$n_x = \cos\varphi \tag{4.32},$$

$$n_y = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \sin\varphi \tag{4.33}$$

gdzie φ jest kątem nachylenia normalnej do poziomu.

Warunki brzegowe (4.30) i (4.31) można zapisać w innej postaci, jeżeli wprowadzi się macierz przewodności:

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

oraz wektor kolumnowy gradientu temperatury

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial t}{\partial x} \\ \frac{\partial t}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{4.35}.$$

Składowe gęstości strumienia ciepła $\dot{q}_x$ i $\dot{q}_y$ można zapisać w postaci:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_x \\ \dot{q}_y \end{Bmatrix} = -[\lambda]\{g\} \tag{4.36}.$$

Jeśli ponadto uwzględni się, że

$$\dot{q} = -\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} i - \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} j = \dot{q}_x i + \dot{q}_y j, \qquad n = n_x i + n_y j \tag{4.37}$$

oraz

$$-\left(-\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} n_x - \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} n_y\right) = -\dot{q} \cdot n = \dot{q}_n \tag{4.38}$$

warunki brzegowe (4.30) i (4.31) można zapisać odpowiednio postaci

$$\dot{q}_n\Big|_{\Gamma_q^e} = \dot{q}_B \tag{4.39},$$

$$\dot{q}_n\Big|_{\Gamma_h^e} = h\left(t_{cz} - t\big|_{\Gamma_h^e}\right) \tag{4.40}$$

$\dot{q}_n$ – wartość składowej normalnej gęstości strumienia ciepła.

Przyjęto także, że grubość ciała w kierunku prostopadłym do płaszczyzny rysunku wynosi jeden metr.

Zagadnienie brzegowe zostało sformułowane dla całego obszaru Ω. W MES metoda Galerkina jest formułowana najpierw dla jednego elementu Ω^e. Zakłada się przy tym, że na granicy elementu znane są trzy rodzaje warunków brzegowych, podobnie jak ma to miejsce dla całego obszaru. Takie sformułowanie jest potrzebne dla elementów przyległych do brzegu ciała. Do elementów leżących wewnątrz ciała uwzględnianie warunków brzegowych jest niepotrzebne. Rozkład temperatur wewnątrz elementu Ω^e jest przybliżony funkcją:

$$t^e(x,y) = \sum_{j=1}^{n} t_j^e \cdot N_j^e(x,y) = \left[N^e\right] \cdot \left\{T^e\right\} \tag{4.41}$$

n – liczba węzłów w elemencie,

t_j^e – temperatura w $j_{\text{-tym}}$ węźle,

$N_j^e(x,y)$ – funkcja kształtu (funkcja interpolacyjna).

Do przybliżonego wyznaczenia temperatur w węzłach t_j^e, j=1,...,n zastosowana zostanie metoda Galerkina.

$$\int_{\Omega^e}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial t^e}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial t^e}{\partial y}\right) + \dot{q}_v\right] \cdot N_i^e(x,y)\,dxdy = 0 \tag{4.42}.$$

Do przekształcenia równania (4.42) będzie wykorzystane równanie Grena

$$\int_{\Omega^e}\left(\frac{\partial G}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial y}\right)dxdy = \oint_{\Gamma^e}(Fdx + Gdx) \tag{4.43}.$$

Całkowanie po brzegu Γ^e odbywa się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Jeżeli przyjmie się, że:

$$F = -\lambda_y \frac{\partial t^e}{\partial y} N_i^e,\quad G = \lambda_x \frac{\partial t^e}{\partial x} N_i^e \tag{4.44}$$

to równanie (4.43) otrzymuje postać:

$$\int_{\Omega^e}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial t^e}{\partial x} N_i^e\right) + \frac{\partial t^e}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial t^e}{\partial y} N_i^e\right)\right]dxdy = \int_{\Gamma^e} N_i^e\left(-\lambda_y \frac{\partial t^e}{\partial y}dx + \lambda_x \frac{\partial t^e}{\partial x}dy\right) \tag{4.45}.$$

Po przekształceniu lewej strony równania (4.45) można zapisać je w postaci

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy BIBLIOTEKA GŁÓWNA Bydgoszcz

$$\int_{\Omega^e}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}\right)+\frac{\partial t^e}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}\right)\right]N_i^e dxdy =$$

$$-\int_{\Omega^e}\left(\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}\frac{\partial N_i^e}{\partial x}+\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\right)dxdy+\int_{\Gamma^e}N_i^e\left(-\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}dx+\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}dy\right) \tag{4.46.}$$

Po uwzględnieniu (4.46) w (4.42) otrzymuje się

$$\int_{\Omega^e}\left(\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}\frac{\partial N_i^e}{\partial x}+\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}\frac{\partial t^e}{\partial y}\right)dxdy =$$

$$\int_{\Omega^e}N_i^e\cdot q_v dxdy+\int_{\Omega^e}N_i^e\left(-\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}dx+\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}dy\right) \tag{4.47.}$$

Ponieważ: $-dx = ds\cdot\sin\varphi = n_y ds$ (4.48)

$$dy = ds\cdot\cos\varphi = n_x ds \tag{4.49}$$

na podstawie wzoru (4.38) wyrażenie w nawiasie w całce krzywoliniowej we wzorze (4.47) można przekształcić następująco

$$-\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}dx+\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}dy=\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}n_y ds+\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}n_x ds=-\dot{q}\cdot n=q_n ds \tag{4.50.}$$

Stąd i z warunków brzegowych (4.39) i(4.40) w (4.47) otrzymuje się

$$\int_{\Omega^e}\left(\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}\frac{\partial N_i^e}{\partial x}+\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\right)dxdy =$$

$$\int_{\Omega^e}N_i^e\cdot\dot{q}_v\,dxdy+\int_{\Gamma_q^e}N_i^e\cdot\dot{q}_B ds+\int_{\Gamma_h^e}N_i^e h(t_{cz}-t^e)ds \tag{4.51.}$$

Po podstawieniu (4.41) do (4.51) otrzymuje się

$$\int_{\Omega^e}\left(\lambda_x\frac{\partial t^e}{\partial x}\sum_{j=1}^{n}t_i^e\frac{N_i^e}{\partial x}+\lambda_y\frac{\partial t^e}{\partial y}\sum_{j=1}^{n}t_i^e\frac{\partial N_i^e}{\partial y}\right)dxdy =$$

$$\int_{\Omega^e}N_i^e\dot{q}_v\,dxdy+\int_{\Gamma_q^e}N_i^e\dot{q}_B ds-\int_{\Gamma_h^e}N_i^e h\sum_{j=1}^{n}t_i^e N_j^e ds+\int_{\Gamma_h^e}N_i^e h t_{cz}ds \tag{4.52.}$$

Równanie (4.52) dla i-tego węzła można zapisać postaci:

$$\sum_{j=1}^{n}\left(K_{c,ij}^e+K_{h,ij}^e\right)\cdot t_j^e=f_{Q,i}^e+f_{q,i}^e+f_{h,i}^e \tag{4.53}$$

gdzie:

$$K^e_{c,ij} = \int_{\Omega^e} \left(\lambda_x \frac{\partial N^e_i}{\partial x} \frac{\partial N^e_j}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N^e_i}{\partial y} \frac{\partial N^e_j}{\partial y} \right) dxdy \tag{4.54}$$

$$K^e_{h,ij} = \int_{\Gamma^e_h} h N^e_i N^e_j ds \tag{4.55}$$

$$f^e_{Q,i} = \int_{\Omega^e} \dot{q}_v N^e_i ds \tag{4.56}$$

$$f^e_{q,i} = \int_{\Gamma^e_q} \dot{q}_B N^e_i ds \tag{4.57}$$

$$f^e_{h,i} = \int_{\Gamma^e_h} h t_{cz} N^e_i ds \tag{4.58}$$

Jeżeli w równaniu (4.42), a tym samym i (4.53) za N^e_j przyjmie się funkcje kształtu dla kolejnych węzłów elementu skończonego, to dla danego elementu otrzyma się układ n równań, który można zapisać:

$$\left(\left[K^e_c \right] + \left[K^e_h \right] \right) \left\{ t^e \right\} = \left\{ f^e_Q \right\} + \left\{ f^e_q \right\} + \left\{ f^e_h \right\} \tag{4.59}$$

gdzie współczynniki macierzy i elementy wektorów kolumnowych są określone wzorami (4.54) – (4.58), a wektor $\left\{ t^e \right\}$ ma postać $\left\{ t^e \right\} = [t^e_1, ..., t^e_n]$, gdzie n jest liczbą węzłów w elemencie. Wprowadzono także oznaczenie macierzy lub wektora wierszowego [ ], wektora kolumnowego { }. Macierz $[K^e_c]$ jest nazywaną macierzą sztywności lub przewodności. Macierz $[K^e_c]$ jest symetryczna, gdyż $K^e_{c,ij} = K^e_{c,ji}$. Równanie (4.59) jest podstawą MES dla równania (4.28).

Układ równań (4.59) jest często zapisywany w nieco innej postaci. Po podstawieniu (4.41) do (4.35) wektor gradientu temperatury można zapisać:

$$\{g\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^e_1}{\partial x} \frac{\partial N^e_2}{\partial x} & \cdots \frac{\partial N^e_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N^e_1}{\partial y} \frac{\partial N^e_2}{\partial y} & \cdots \frac{\partial N^e_n}{\partial y} \end{bmatrix} \left\{ t^e \right\} \tag{4.60}$$

lub po wprowadzeniu macierzy

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^e_1}{\partial x} \frac{\partial N^e_2}{\partial x} & \cdots \frac{\partial N^e_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N^e_1}{\partial y} \frac{\partial N^e_2}{\partial y} & \cdots \frac{\partial N^e_n}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{4.61}$$

w skróconej formie

$$\{g\} = [B^e]\{t^e\} \tag{4.62}$$

Macierz przewodności $$[K_c^e] = \int_{\Omega^e} [B^e]^t [\lambda][B^e] dxdy \tag{4.63}$$

Pozostałe macierze i wektory kolumnowe występujące w ( ) można wyrazić następująco

$$[K_h^e] = h[N^e]^t[N^e] ds \tag{4.64}$$

$$\{f_Q^e\} = \int_{\Omega^e} \dot{q}\, v [N^e]^t dxdy \tag{4.65}$$

$$\{f_q^e\} = \int_{\Gamma_q^e} \dot{q}_B [N^e]^t d\Gamma \tag{4.66}$$

$$\{f_h^e\} = \int_{\Gamma_h^e} ht_{cz} [N^e]^t ds \tag{4.67}$$

gdzie $[N^e] = [N_1^e, N_2^e, ..., N_n^e]$

$[N^e]^t = \begin{Bmatrix} N_1^e \\ N_2^e \\ .... \\ N_n^e \end{Bmatrix}$, a n oznacza liczbę węzłów w elemencie.

5. BADANIA WŁASNE

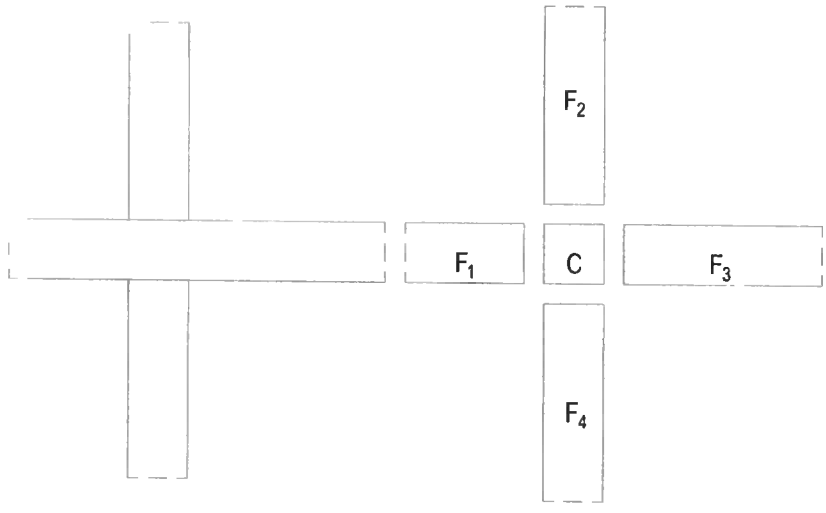
5.1. ZASADY MODELOWANIA

Podział budynku na części (elementy) powinien być przeprowadzony wg PN-EN ISO 10211-1 [84], PN-EN ISO 10211- 2 [85] w odpowiedni sposób, aby wyeliminować różnice w wynikach obliczeń między budynkiem podzielonym na części a budynkiem całym. Modelowanie, czyli podział na kilka modeli geometrycznych, trzeba wykonać drogą wyboru odpowiednich płaszczyzn podziału [27].

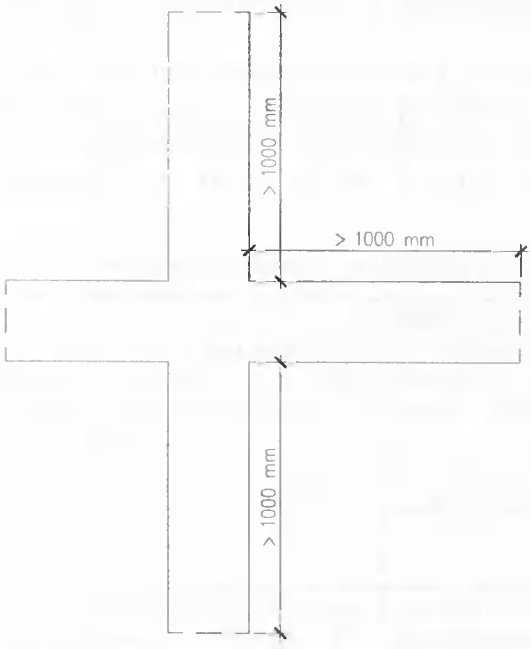
W badaniach własnych zastosowano zgodnie z PN-EN ISO 10211-1 [84] i PN-EN ISO 10211- 2 [85] następujące podstawowe zasady modelowania:

1) podział budynku na części – elementy, tak aby uniknąć różnic w wynikach obliczeń między budynkiem podzielonym na części i całym budynkiem; modelowanie (podział) na kilka modeli geometrycznych należy wykonać drogą wyboru odpowiednich płaszczyzn,
2) model geometryczny 2D jest uproszczeniem rzeczywistej konstrukcji, co za tym idzie otrzymane wyniki są w pewnym sensie przybliżone w stosunku wyników uzyskanych przy zastosowaniu modelu 3D (na wynik wpływa określenie długości mostka cieplnego),
3) model geometryczny zawiera element centralny, elementy boczne oraz jest ograniczony płaszczyznami przekrojów,
4) płaszczyzny przekroju; długość elementu jest określona jako odległość między elementem centralnym i płaszczyzną przekroju; elementy boczne o małych długościach wpływają na wyniki obliczeń; podział budynku na duże elementy skończone prowadzi do uzyskania wyników mało wiarygodnych,
5) płaszczyzny przekrojów (według PN-EN ISO 10211-2) powinny być usytuowane w następujący sposób (rysunek 5.1., 5.2.):

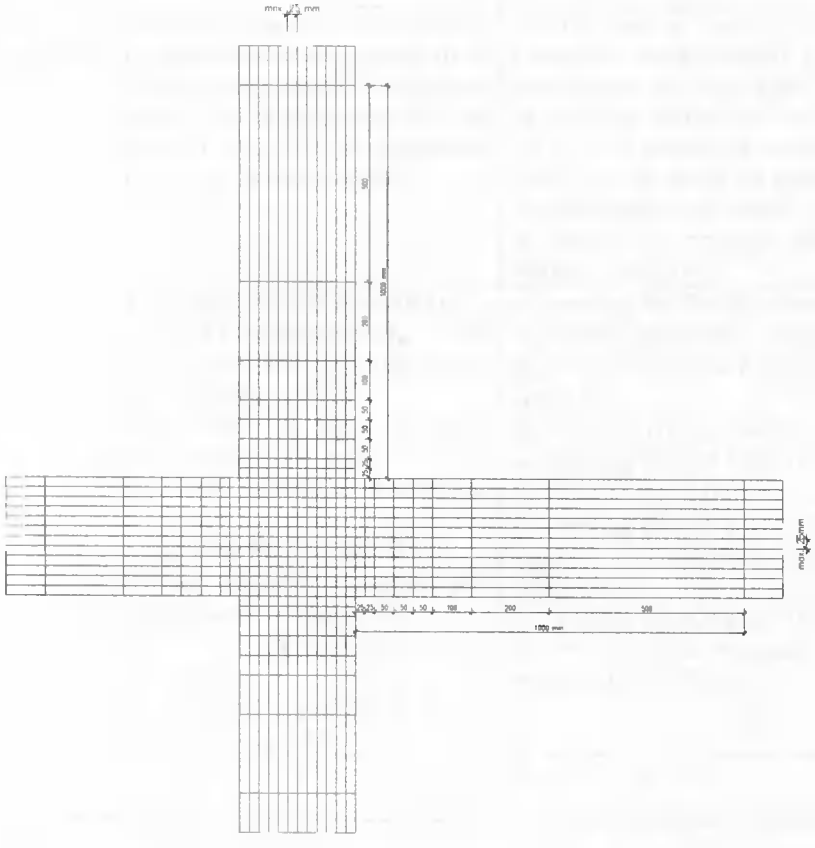
- generalnie w płaszczyznach symetrycznych w stosunku do detali, jeśli są one położone mniej niż 1m od elementu centralnego,
- przynajmniej 1 m od elementu centralnego jeśli w pobliżu nie występuje płaszczyzna symetrii,
- należy rozpatrywać dwa podstawowe zasady w zależności od wykonywanych obliczeń: strumień cieplny lub temperatura powierzchni,



Rysunek 5.1. Podział fragmentu budynku 2D: fragment budynku, podział na element centralny (C) i elementy boczne (F1, F2, F3, F4) [27]



Rysunek 5.2. Płaszczyzny przekrojów (modelowanie) [27]



Rysunek 5.3. Przykład płaszczyzn konstrukcyjnych uzupełnionych płaszczyznami pomocniczymi [85]

5.2. WARUNKI BRZEGOWE

Wybór warunków brzegowych ma zasadnicze znaczenie dla oceny mostków cieplnych, szczególnie jeśli warunki te mogą różnić się w zależności od rodzaju obliczeń – tabela 5.1.

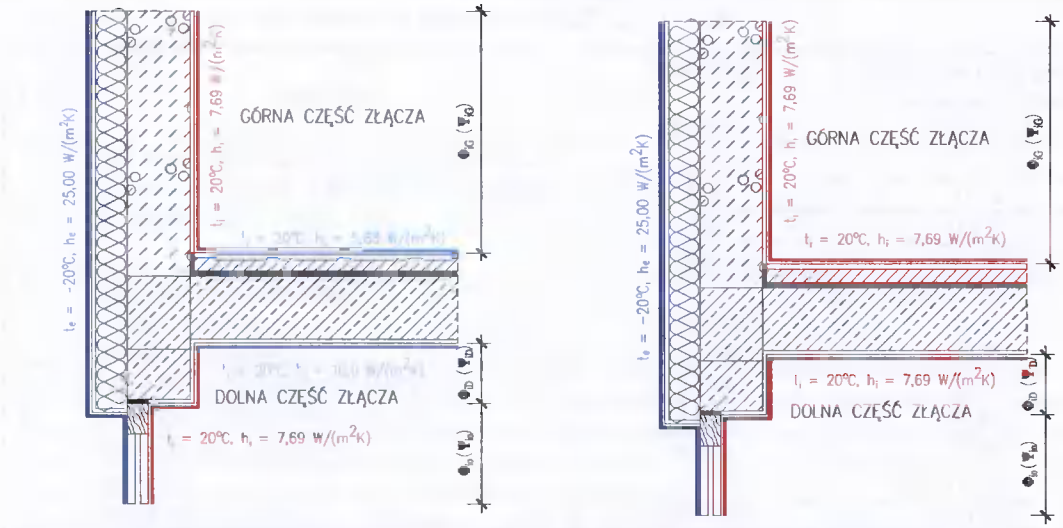
Płaszczyzny wydzielające powinny być adiabatyczne (z zerowym strumieniem ciepła przepływającym przez płaszczyznę), z wyjątkiem poziomych płaszczyzn odcinających w gruncie w przypadku obliczeń temperatury powierzchni; temperatura płaszczyzn odcinających jest przyjmowana jako równa rocznej średniej temperaturze powietrza zewnętrznego [27].

Tabela 5.1.Wybór warunków brzegowych w zależności typu obliczeń [27]

Parametr	Cel obliczeń	
	ocena ryzyka kondensacji	**obliczenia strumienia cieplnego**
Temperatura wewnętrzna (pomieszczenie ogrzewane) θ_i, t_i	średnia temperatura powietrza według oczekiwanego użytkowania budynku	średnia wynikowa temperatura termometru suchego
Temperatura wewnętrzna (pomieszczenie nieogrzewane) θ_i, t_i	według PN-EN ISO 13789	według PN-EN ISO 13789
Temperatura zewnętrzna θ_e, t_e	średnia roczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego – PN-EN ISO 13788	temperatura powietrza przy założeniu, że niebo jest całkowicie zachmurzone
Temperatura gruntu (w poziomej płaszczyźnie odcinajacej)	średnia roczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego	adiabatyczny warunek brzegowy (zerowy strumień cieplny)
Temperatura gruntu (w pionowej płaszczyźnie odcinajacej)	średnia roczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego (podziemna płaszczyzna oddzielająca model jest przyjmowana na głębokości 3m – na tej głębokości uznaje się za wartość stała)	średnia roczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego (podziemna płaszczyzna odcinająca jest usytuowana znacznie głębiej np. na głębokości 10 m, jeśli parter ma szerokość 4 m; przyjmuję się że na tej głębokości nie zachodzi przepływ ciepła, co oznacza, że mogą być przyjęte adiabatyczne warunki brzegowe)
R_{si} $(m^2 \cdot K)/W$ h_i $W/(m^2 \cdot K)$	• według PN-EN ISO 10211-1 R_{si} = 0,13 dla oszklenia, h_i = 7,69; R_{si} = 0,25 dla wyższych części pomieszczeń, h_i = 4,0; R_{si} = 0,35 dla niższych części pomieszczeń, h_i = 2,86; R_{si} = 0,50 dla miejsc za meblami, h_i = 2,0; • według PN-EN ISO 13788 (rozwój grzybów pleśniowych, kondensacja wewnętrzna) R_{si} = 0,13 dla oszklenia i ram, h_i = 7,69; R_{si} = 0,25 dla wszystkich innych elementów, h_i = 4,0;	• według PN-EN ISO 6946 R_{si} = 0,10 (przepływ w górę), h_i = 10; R_{si} = 0,13 (przepływ poziomy), h_i = 7,69; R_{si} = 0,17 (przepływ w dół), h_i = 5,88; • według PN-EN ISO 10211-1 R_{si} = 0,13 , h_i = 7,69; • według PN-EN ISO 1077-1 R_{si} = 0,13 (oszklenie, przepływ poziomy, h_i = 7,7); • według PN-EN ISO 1077-1 R_{si} = 0,20 (na brzegach, przepływ poziomy) , h_i = 7,69;
R_{se} $(m^2 \cdot K)/W$ h_e $W/(m^2 \cdot K)$	R_{se} = 0,04; h_e = 25	R_{se} = 0,04; h_e = 25

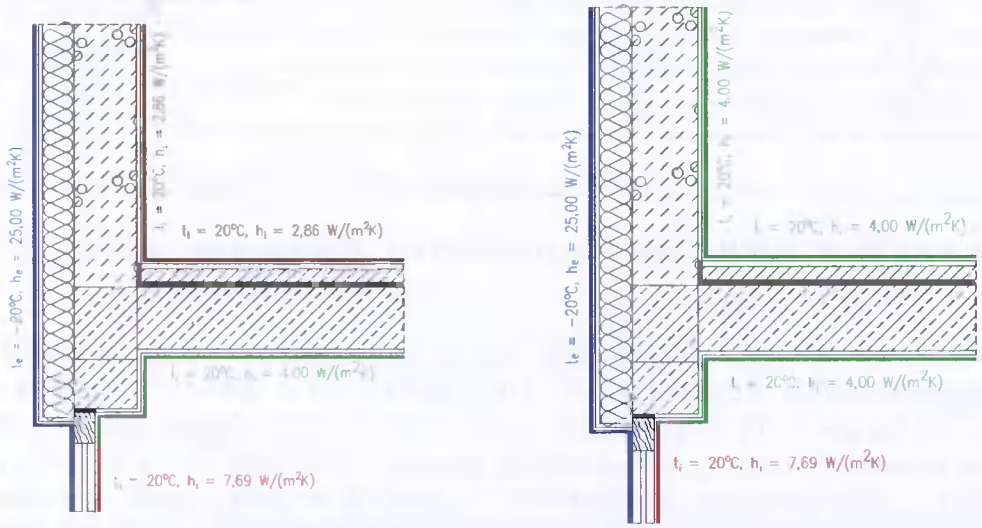
Do obliczeń własnych przyjęto, w zależności od celu obliczeń, następujące parametry – rysunek 5.4. – 5.5.

a) b)



Rysunek 5.4. Warunki brzegowe w celu wykonania obliczeń strumienia cieplnego
a) wg PN-EN ISO 6946 [81] b) wg PN-EN ISO 10211-1 [84]

a) b)



Rysunek 5.5. Warunki brzegowe w celu wykonania obliczeń temperatur minimalnych na wewnętrznej powierzchni przegrody
a) wg PN-EN ISO 10211-1 [84] b) wg PN-EN ISO 13788 [89]

Do obliczeń własnych przyjęto temperaturę powietrza zewnętrznego t_e= -20°C (wg PN-82/B-02403 [100], dla III strefy klimatycznej – miasto Toruń) oraz temperaturę powietrza wewnętrznego t_i = 20°C (wg Rozporządzenia [66], dla pomieszczeń przeznaczonych do przebywania bez okryć zewnętrznych np. pokój mieszkalny). W przypadku wyznaczania strumienia cieplnego przyjęto warunki brzegowe według rysunku 5.4.a) – według PN-EN ISO 6946 [81]. Natomiast do wyznaczenia parametrów wilgotnościowych zastosowano zasady przedstawione na rysunku 5.5.a) i 5.5.b).

5.3. Określenie charakterystyki materiałowej mostków cieplnych

W obliczeniach cieplno-wilgotnościowych przyjęto obliczeniowe wartości współczynnika przewodzenia ciepła zestawione w tabeli 5.2. na podstawie [6], [20], [51], [78] i danych podawanych przez producentów.

Tabela 5.2. Wartości współczynników przewodzenia ciepła wybranych materiałów budowlanych – opracowanie własne na podstawie [6],[20], [51], [78]

l.p.	Materiał	Gęstość ρ [kg/m^3]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]
1	Mur z betonu komórkowego na cienkowarstwowej zaprawie klejącej lub zaprawie ciepłochronnej	700	0,25
		600	0,22
		500	0,17[1)]
		400	0,15[1)]
2	Mur z cegły ceramicznej: - z cegły pełnej - z cegły kratówki	 1800 1300	 0,77 0,56
3	Mur z cegły silikatowej pełnej	1900	0,90
4	Mur z cegły silikatowej drążonej	1600	0,80
5	Mur z cegły klinkierowej	1900	1,05
6	Styropian	15	0,043
7	Pianka montażowa	30 – 60	0,035
8	Ościeżnica drewniana	600	0,16
9	Zestaw szybowy		0,075[2)]
10	Beton	2200	2,50
11	Gładź cementowa	1800	1,00
12	Tynk gipsowy	1000	0,40
13	Tynk cementowo-piaskowy	1800	1,00
14	Stal nierdzewna	7900	17

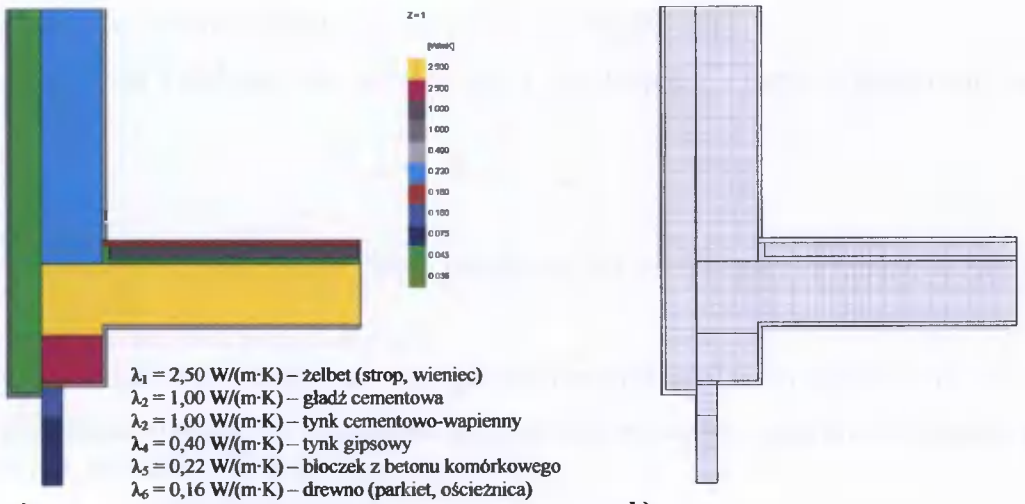
1) wg danych producenta
2) wg danych producenta, obliczono na podstawie podanego współczynnika U

5.4. Obliczenia parametrów cieplno-wilgotnościowych mostków cieplnych

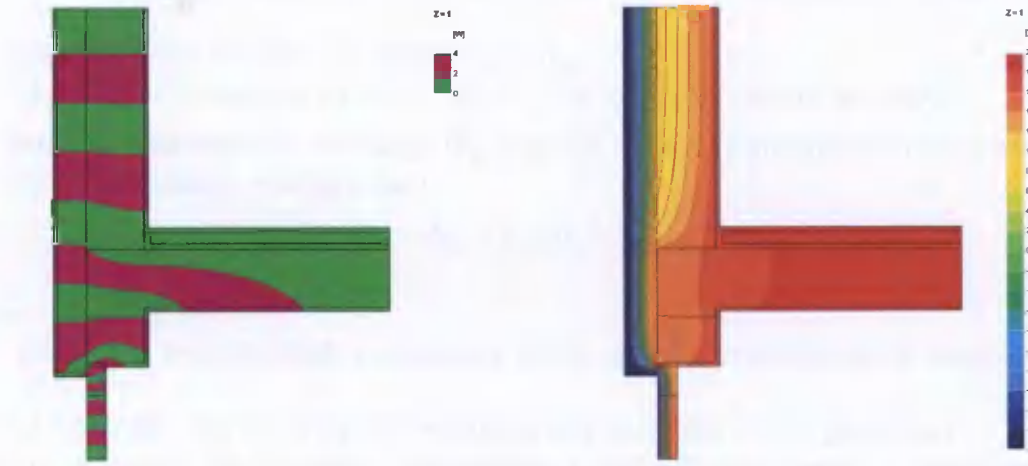
Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu komputerowego TRISCO – wersja 10.0 w. PHYSIBEL – Belgia 2002 [103]. Jest to narzędzie do analizy termicznej dla stacjonarnego przepływu ciepła (przepływ ciepła odbywa się w warunkach stałych temperatur otoczenia) i poddanych różnym warunkom brzegowym. Geometria jest opisana listą regularnych bloków złożonych z punktów na regularnej siatce. Materiały i warunki brzegowe o różnych właściwościach termicznych są oznaczone oddzielnymi kolorami (rysunek 5.6.a). Każdy blok składa się z określonego materiału i posiada określone warunki brzegowe. Przyjęto siatkę elementów skończonych o jednolitym boku równym 1 cm (w niektórych przypadkach nawet 0,5 cm), zgodnie z wytycznymi norm [84], [85] (rysunek 5.6.b). W tej wersji programu TRISCO v 10.0 może być określona stała temperatura między brzegami określonych bloków. Istnieje możliwość wykonania obliczeń dla złączy budowlanych w układzie 2D i 3D. Po stworzeniu geometrii i przyjęciu warunków brzegowych uruchamiany jest proces obliczeniowy, który przy pomocy macierzy równań liniowych dokonuje obliczeń pola temperatur. Po wykonaniu obliczeń zyskuje się graficzny i cyfrowy wynik zawierający temperatury i strumienie cieplne analizowanego złącza budowlanego (rysunek 5.7.). Zgodnie z instrukcją programu parametry obliczeniowe były następujące:

- maksymalna ilość iteracji – 10000,
- błąd bezwzględny w obliczeniu temperatur – 0,0001 °C,
- błąd bezwzględny w obliczeniu strumieni ciepła w złączu – 0,001 %.

Program TRISCO v 10.0 jest objęty licencją. Wyniki zestawiono w postaci kart katalogowych zawierających graficzne i analityczne zapisy programu.



Rysunek 5.6. Przykładowe złącze budowlane: a) układ i charakterystyka materiałów, b) siatka podziału



Rysunek 5.7. Przykładowe graficzne przedstawienie wyników obliczeń: a) linie strumieni cieplnych (adiabaty), b) rozkład temperatur (izotermy)

5.4.1. Określenie parametrów cieplnych złączy

W wielu przypadkach nie stosuje się tylko definicji współczynnika U, ze względu na konstrukcję elementów budowlanych, które odbiegają od jednowymiarowego, jednorodnego modelu. Niejednorodność modelu przegrody wynika z:

- występowania materiałów o kształcie i przewodności cieplnej różnej od warstw materiałów występujących w przegrodzie,
- różnicy kształtu wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni np. narożniki, czyli ogólnie ujmując z występowania mostków cieplnych.

W takich przypadkach strumień cieplny nie jest jednowymiarowy, ale dwuwymiarowy lub trójwymiarowy. W związku z tym powstają dodatkowe straty ciepła, określane na podstawie obliczeń modeli dwu – trójwymiarowych. Wielkość dodatkowych start ciepła w związku z występowaniem mostków termicznych oblicza się wprowadzając liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ lub punktowy współczynnik przenikania ciepła χ.

Całkowity strumień cieplny przez przegrodę Φ jest sumą:

1) **strumienia cieplnego Φ_0**, obliczanego z pominięciem mostków cieplnych, według wzoru:

$$\Phi_0 = U \cdot A \cdot (t_i - t_e) \tag{5.1}$$

gdzie:
U – współczynnik przenikania ciepła przegrody bez uwzględniania mostków cieplnych, $W/(m^2 \cdot K)$,
A – pole powierzchni przegrody, m^2,
$(t_i - t_e)$ – różnica temperatury po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody, °C.

2) **przyrostu strumienia cieplnego Φ_L**, z uwagi na wpływ mostków cieplnych liniowych, obliczany według wzoru:

$$\Phi_L = \sum_i \Psi_i \cdot l_i \cdot (t_i - t_e) \tag{5.2}$$

gdzie:
Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka liniowego o indeksie „i", W/(m·K),
l_i – długość mostka liniowego o indeksie „i", m,
$(t_i - t_e)$ – różnica temperatury po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody.

3) **przyrostu strumienia cieplnego Φ_p**, z uwagi na wpływ mostków cieplnych punktowych, obliczany według wzoru:

$$\Phi_p = \sum_j \chi_j (t_i - t_e) \tag{5.3}$$

gdzie:
χ_j – punktowy współczynnik przenikania ciepła mostka punktowego o indeksie „j", W/K,
$(t_i - t_e)$ – różnica temperatury po wewnętrznej i zewnętrznej stronie przegrody.
Analiza wartości punktowego współczynnika przenikania ciepła χ_j wskazuje, że otrzymywane wyniki są o rząd wielkości niższe od wartości współczynnika liniowego [8]. Dlatego wartości współczynnika χ_j w obliczeniach parametrów cieplnych pomija się w pracy.
Ilość przepływającego ciepła można zapisać za pomocą następującej zależności:

$$\Phi = H_T \cdot (t_i - t_e) \tag{5.4}$$

gdzie:
H_T – współczynnik strat ciepła, W/K, obliczany jest z zależności:

$$H_T = L_D + L_S + H_U \tag{5.5}$$

gdzie:
L_D – bezpośredni współczynnik sprzężenia między przestrzenią ogrzewaną i stroną zewnętrzną, W/K,
L_S – współczynnik strat ciepła w stanie ustalonym przez grunt, W/K,
H_U – współczynnik strat ciepła przez przenikanie przez przestrzenie nieogrzewane, W/K.

Wartości współczynników Ψ_k, χ_j zależą od konfiguracji i przewodności cieplnej warstw materiałowych oraz od tego w jaki sposób zostały wykonane obliczenia jedno-

wymiarowego przenikania ciepła, tzn. które wartości współczynników U zostały wybrane w odniesieniu do różnych elementów budynku i jakim płaszczyznom one odpowiadają. W większości przypadków obliczanie strat ciepła można wykonać przy użyciu modelu 2D, (np. przekrój poziomy przez narożnik ściany zewnętrznej). Straty ciepła można wyrazić przez liniowy strumień cieplny Q, W/m, - starty ciepła na 1 metr długości danego detalu budowlanego. Całkowity strumień ciepła 2D, przy uwzględnieniu występowania mostka cieplnego określa się z zależności:

$$q_l = \left(\sum_i U_i \cdot l_i + \Psi \right) \cdot \Delta t_{i,e} \tag{5.6}$$

lub:

$$q_l = L^{2D} \cdot \Delta t_{i,e} \tag{5.7}$$

gdzie:

L^{2D} – liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności:

$$L^{2D} = \frac{q_l}{\Delta t_{i,e}} \tag{5.8},$$

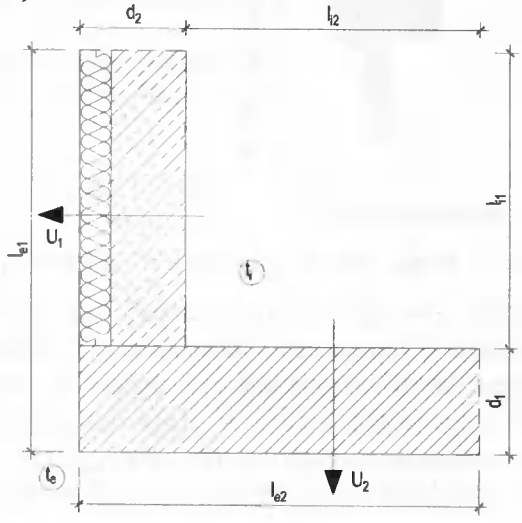
$$L^{2D} = \frac{\Phi}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}} \tag{5.9}$$

Ψ – liniowy współczynnik przenikania ciepła można obliczyć z zależności:

$$\Psi = L^{2D} - \sum U_i \cdot l_i \tag{5.10}.$$

Współczynnik Ψ jest równy stracie ciepła na 1 metr długości elementu budowlanego zawierającego mostek cieplny, zmniejszonej o stratę ciepła, która miałaby miejsce w przypadku braku mostka termicznego. Obliczenia powinno być zgodne ze wszystkimi innymi znormalizowanymi obliczeniami przenikania ciepła, przy przyjęciu takich samych warunków brzegowych.

Sposób wyznaczania liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ dla zewnętrznego i wewnętrznego systemu wymiarowania dla wybranego mostka cieplnego przedstawiono na rysunku 5.8.).



Rysunek 5.8. Przykładowy model obliczeniowy

Wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła dla wewnętrznego systemu wymiarowania wynosi: $\Psi_i = L^{2D} - (U_1 \cdot l_{il} + U_2 \cdot l_{i2})$. (5.11).

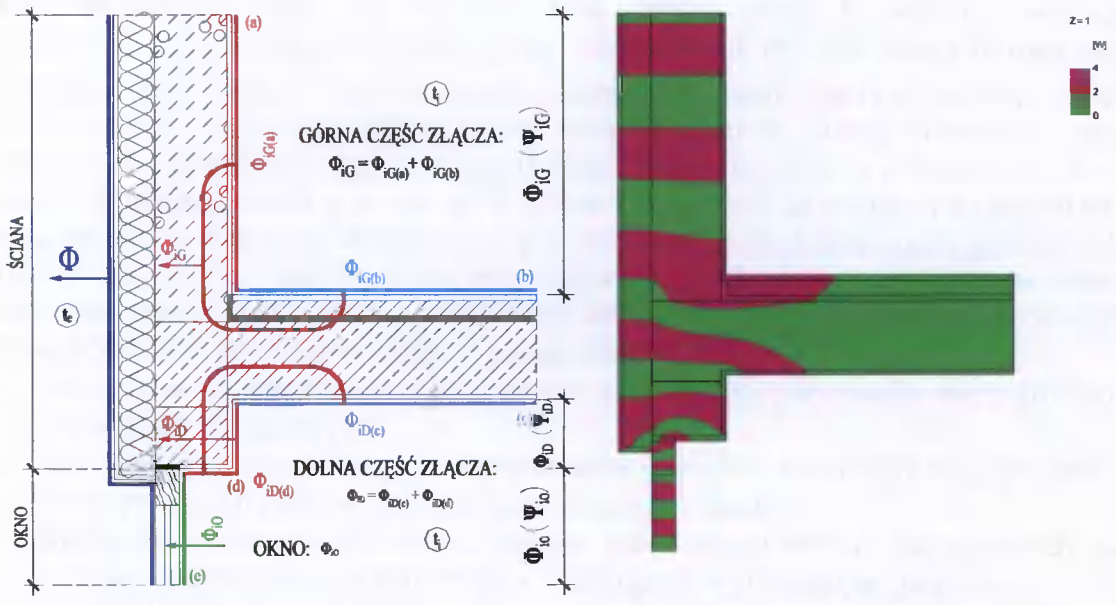
Wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła dla zewnętrznego systemu wymiarowania wynosi: $\Psi_e = L^{2D} - (U_1 \cdot l_{el} + U_2 \cdot l_{e2})$. (5.11),

$$\Psi_e = \Psi_i - (U_1 \cdot d_1 + U_2 \cdot d_2) \quad (5.12).$$

Wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła dla osiowego systemu wymiarowania wynosi: $\Psi_{oi} = \Psi_i - 0{,}5 \cdot (U_1 \cdot d_1 + U_2 \cdot d_2)$. (5.13).

5.4.2. Gałęziowy współczynnik przenikania ciepła

W celu uniknięcia błędów wynikających z przeszacowania wielkości strat ciepła zaproponowano stosowanie **wartości gałęziowych współczynników przenikania ciepła**. W Polsce katalogi, opracowania i normy podają wartości współczynników Ψ_i dotyczące całej dodatkowej straty ciepła przez mostek. Jedynie w PN-EN12831: 2006 [79] zauważa się potrzebę ich podziału przy obliczeniach strat ciepła *„metodą pomieszczenie po pomieszczeniu"* i proponuje się aby: *„... całkowite wartości Ψ_i obliczone według EN ISO 10211-1 zostały podzielone na dwa..."*. Takie postępowanie w wielu przypadkach jest podstawowym błędem. Poprawne wykonanie obliczeń cieplnych odniesionych do pewnych fragmentów budynku, np. poszczególnych ścian zewnętrznych, należy dokonać podziału wartości współczynnika Ψ na odpowiednie gałęzie złącza uczestniczące w stratach ciepła. Przykładowy podział wybranego złącza na części przedstawiono na rysunku 5.9.



a) model podziału złącza **b)linie strumieni cieplnych (adiabaty)**

Rysunek 5.9. Proponowany podział złącza na części

Wykonanie podziałów jest często bardzo uciążliwe, wymaga analizy składowych strumieni ciepła płynących przez mostek termiczny. Wydzielenie częściowych (gałęziowych) strumieni ciepła w złączu jest praktycznie możliwe w warunkach stosowania numerycznych metod obliczeniowych. W obliczeniach własnych zastosowano program komputerowy TRISCO [103], który umożliwia uzyskać wartości poszukiwanych częściowych strumieni bezpośrednio, po uprzednim dokładnym zdefiniowaniu gałęzi (po-

wierzchni złącza) przez które przepływają strumienie. Może to dotyczyć, opisywanych w rozprawie złączy dwuwymiarowych, jak również trójwymiarowych.

Przedstawione na rysunku 5.9. złącze tworzy gałęzie kształtujące trzy różne strumienie cieplne:

- pierwszy (górna część złącza) napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a) oraz górną warstwę stropu (b), oznaczono $\Phi_{iG} = \Phi_{iG(a)} + \Phi_{iG(b)}$;
- drugi (dolna część złącza) napływa na dolną część stropu (c) oraz na powierzchnię przegrody zewnętrznej (d), oznaczono $\Phi_{iD} = \Phi_{iD(c)} + \Phi_{iD(d)}$;
- trzeci (okno) napływa na powierzchnię ościeżnicy i zestawu szybowego (e), oznaczono Φ_{iO}.

Ważna jest zależność: $\Phi = \Phi_{iG} + \Phi_{iD} + \Phi_{iO}$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych. Jednak ze względu na różną geometrię złącza i układu konstrukcyjnego w wielu przypadkach: $\Phi_{iG} \neq \Phi_{iD} \neq \Phi_{iO}$. Dla określonych wielkości strumieni napływających: $\Phi_{iG}, \Phi_{iD}, \Phi_{iO}$ jest możliwe, według odpowiednich zależności, wyznaczenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła odpowiednich części złącza. Proponowane podziały innych złączy zaprezentowano w katalogu mostków cieplnych – załącznik do pracy.

Rozpatrując połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem (rysunek 5.9.) otrzymuje się złącze dwuwymiarowe, dla którego oblicza się gałęziowe (częściowe) współczynniki przenikania ciepła: Ψ_{iG} (dla górnej części złącza), Ψ_{iD} (dla dolnej części złącza), Ψ_{iO} (dla części złącza z oknem). Sumując $\Psi_{iG} + \Psi_{iD} + \Psi_{iO}$ otrzymujemy całościowy współczynnik Ψ_i dla całego mostka termicznego. Wydzielenie części związanej z oknem jest konieczne tym bardziej, że poziom wymagań cieplnych dla ścian i okna różni się znacznie. Dlatego wartości współczynnika Ψ_{iO} (dla części złącza z oknem) znajdują zastosowanie w obliczeniach związanych ze stratami ciepła przez okna. W Polsce przyjęto model realizacji wymagań termoizolacyjnych nakazuje obliczenie współczynników przenikania ciepła poszczególnych przegród w budynkach, co nie jest możliwe bez podziału liniowych współczynników przenikania ciepła występujących mostków. Procedura obliczania gałęziowych współczynników przenikania ciepła Ψ polega na:

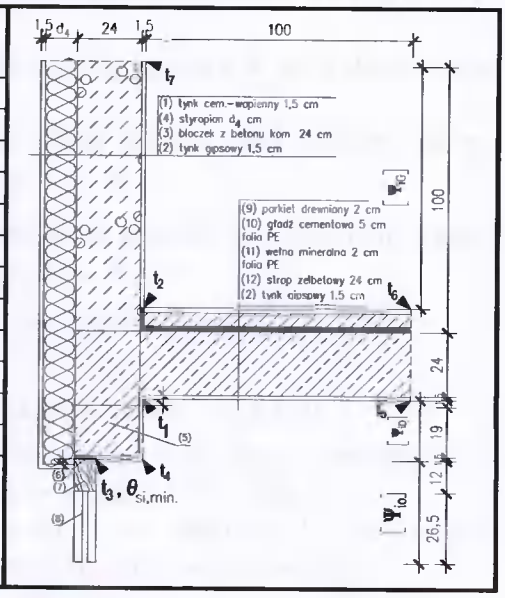
- wydzielenie wewnętrznych gałęzi mostka termicznego, przypisanie warunków początkowych i brzegowych,
- obliczenie (numerycznie) przy zastosowaniu programu komputerowego strumieni ciepła płynących przez wydzielone gałęzie (części) mostka,
- obliczenie odpowiednich współczynników gałęziowych według odpowiednich zależności z zastosowaniem danych odpowiadających wydzielonym gałęziom.

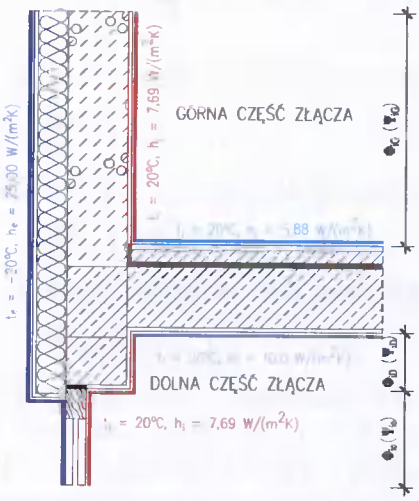
Poniżej podano przykład obliczania gałęziowych współczynników przenikania ciepła. Dane jest połączenie ściany zewnętrznej (dwuwarstwowej) ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem. Parametry geometryczne i fizyczne złącza przedstawiono w tabeli 5.3.

Na rysunku 5.10. podano: a) przyjęte warunki początkowe i brzegowe z podziałem złącza na części (gałęzie), b) wyniki symulacji numerycznej (linie strumieni cieplnych-adiabaty), c) wydzielone części strumieni napływających na poszczególne płaszczyzny mostka, d) gałęziowe współczynników przenikania ciepła Ψ.

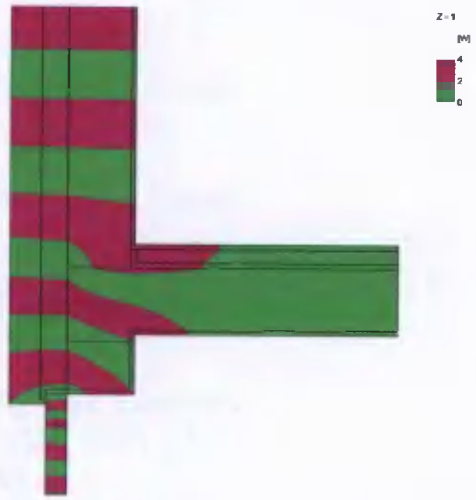
Tabela 5.3. Parametry geometryczne i fizyczne analizowanego złącza

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500

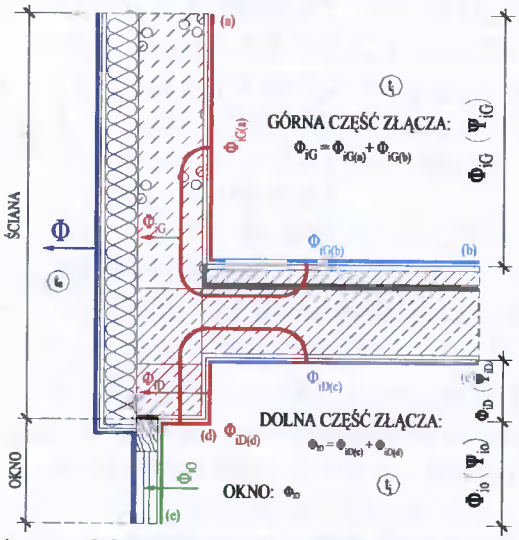




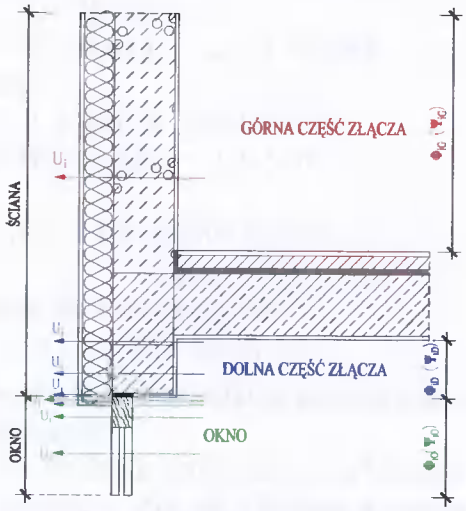
a) warunki początkowe i brzegowe z podziałem złącza na części (gałęzie)



b) linie strumieni cieplnych – adiabaty



c) wartości strumieni dla części złącza



d) gałęziowe współczynniki Ψ_i

Rysunek 5.10. Procedura określania gałęziowych współczynników przenikania ciepła

Obliczenia wykonano przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO [103] i uzyskano następujące wyniki:

- całkowity strumień ciepła płynący przez analizowany mostek w polu dwuwymiarowym: $\Phi = 33{,}83$ W,
- strumień ciepła napływający na górną powierzchnię mostka (nad stropem, na powierzchnie (a) i (b)): $\Phi_{iG} = \Phi_{iG(a)} + \Phi_{iG(b)} = 9{,}43$ W,
- strumień ciepła napływający na dolną powierzchnię mostka (pod stropem na powierzchnie (c) i (d)): $\Phi_{iD} = \Phi_{iD(c)} + \Phi_{iD(d)} = 9{,}40$ W,
- strumień ciepła napływający na powierzchnię ościeżnicy i okna (e): $\Phi_{iO} = 15{,}00$ W.

Sprawdzając: $\Phi = \Phi_{iG} + \Phi_{iD} + \Phi_{iO} = 9{,}43 + 9{,}40 + 15{,}00 = 33{,}83$ W.

Mając określone wartości strumieni dla odpowiednich gałęzi można przystąpić do wyznaczenia gałęziowych liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ_i.

W przypadku detalu przedstawionego na rysunku 5.10. całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła dla wewnętrznego systemu wymiarowania wynosi:

$$\Psi_i = \Psi_{iG} + \Psi_{iD} + \Psi_{iO} \tag{5.14}$$

gdzie:

Ψ_{iG} - liniowy współczynnik przenikania „górnej" gałęzi złącza,

$$\Psi_{iG} = L_G^{2D} - (\sum U_i \cdot l_i) \tag{5.15}$$

Ψ_{iD} - liniowy współczynnik przenikania „dolnej" gałęzi złącza,

$$\Psi_{iD} = L_D^{2D} - (\sum U_i \cdot l_i) \tag{5.16}$$

Ψ_{iO} - liniowy współczynnik przenikania części stolarki okiennej

$$\Psi_{iO} = L_O^{2D} - (\sum U_i \cdot l_i) \tag{5.17}$$

- Dla górnej części złącza uzyskujemy następujące parametry:
  $U_1 = 0{,}244$ W/(m^2·K), $l_1 = 0{,}91$ m, $L^{2D} = 0{,}236$ W/(m·K),
  $\Psi_{iG} = 0{,}236 - 0{,}244 \cdot 0{,}91 = 0{,}014$ W/(m·K)
- Dla dolnej części złącza uzyskujemy następujące parametry:
  $U_2 = 0{,}322$ W/(m^2·K), $l_2 = 0{,}025$ m, $U_3 = 0{,}322$ W/(m^2·K), $l_3 = 0{,}19$ m,
  $U_4 = 0{,}175$ W/(m^2·K), $l_4 = 0{,}015$ m, $L^{2D} = 0{,}235$ W/(m·K),
  $\Psi_{iD} = 0{,}235 - (0{,}322 \cdot 0{,}025 + 0{,}322 \cdot 0{,}19 + 0{,}175 \cdot 0{,}015) = 0{,}163$ W/(m·K)
- Dla okna uzyskujemy następujące parametry:
  $U_5 = 0{,}288$ W/(m^2·K), $l_5 = 0{,}02$ m, $U_6 = 1{,}242$ W/(m^2·K), $l_6 = 0{,}02$ m,
  $U_7 = 1{,}492$ W/(m^2·K), $l_7 = 0{,}08$, $U_8 = 0{,}809$ W/(m^2·K), $l_8 = 0{,}265$, m,
  $L^{2D} = 0{,}375$ W/(m·K),
  $\Psi_{iO} = 0{,}375 - (0{,}288 \cdot 0{,}02 + 1{,}242 \cdot 0{,}02 + 1{,}492 \cdot 0{,}08 + 0{,}809 \cdot 0{,}265) =$
  $0{,}014$ W/(m·K)
- Całkowity liniowy współczynnik przenikania dla całego złącza:
  $\Psi_i = \Psi_{iG} + \Psi_{iD} + \Psi_{iO} = 0{,}014 + 0{,}163 + 0{,}011 = 0{,}188$ W/(m·K).

Wyznaczone wartości gałęziowych i liniowych współczynników przenikania ciepła znajdują szerokie zastosowanie do obliczeń strat ciepła.

W Katedrze Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli prowadzone są badania i obliczenia dla charakterystycznych złączy budowlanych, których efektem są prace [7], [22] i przygotowywany do druku katalog [104].

5.4.3. CHARAKTERYSTYKA WILGOTNOŚCIOWA MOSTKÓW CIEPLNYCH

W tej części pracy przedstawiono procedurę wyznaczenia temperatur charakterystycznych w złączu oraz czynnika temperaturowego według PN-EN ISO 13788 [89]. Do obliczeń przyjęto:

- parametry geometryczne i fizyczne analizowanego złącza przedstawiono w tabeli 5.3.
- warunki początkowe i brzegowe zgodnie z PN-EN ISO 10211-1 [84] i PN-EN ISO 13788 [89] i przedstawiono na rysunku 5.5.

Wyznaczony rozkład temperatur w analizowanym złączu (szczególnie temperatur minimalnych) pozwala ocenić ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej. Stosując procedurę normy PN-EN ISO 13788 [89] wyznaczono czynnik temperaturowy na postawie zależności:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \qquad (5.18),$$

gdzie:

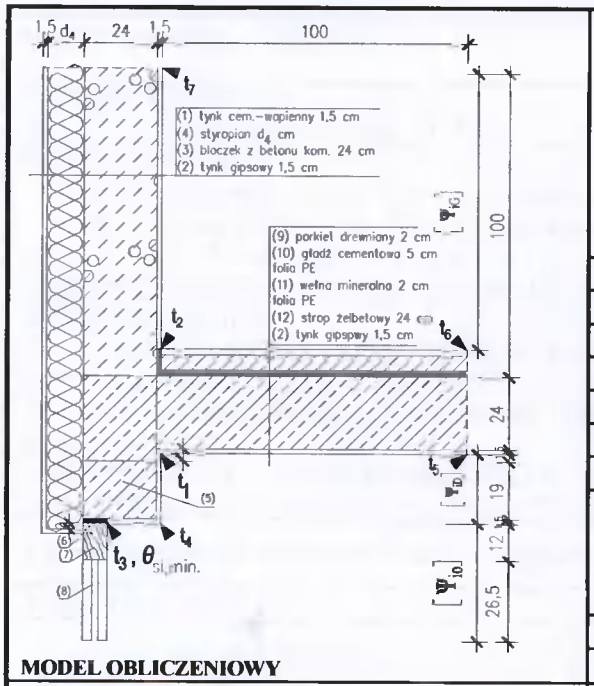
$\theta_{si,min.}$ – temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka termicznego, °C,

θ_e – temperatura powietrza zewnętrznego, °C,

θ_i – temperatura powietrza wewnętrznego, °C,

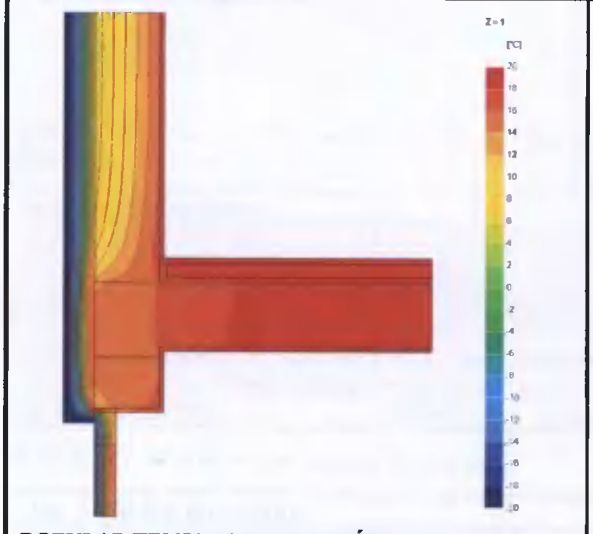
Wyniki obliczeń wykonanych przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO [103], zestawiono w tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Wyniki obliczeń wybranego mostka termicznego – opracowanie własne

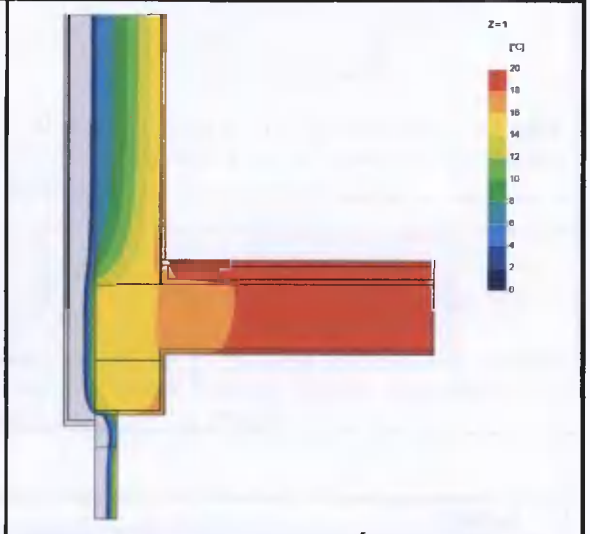


MODEL OBLICZENIOWY

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne, przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	16,89
t_2	[°C]	17,68
t_3	[°C]	14,47
t_4	[°C]	17,66
t_5	[°C]	19,60
t_6	[°C]	19,80
t_7	[°C]	16,78
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788		
$\theta_{si,min.}$	[°C]	15,70
f_{Rsi}	[-]	0,893



ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)



ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

5.4.4. Opracowanie katalogu mostków cieplnych

Do kompleksowych obliczeń parametrów cieplno-wilgotnościowych wytypowano następujące ściany zewnętrzne, przedstawione w tabeli 5.5.. Mostki termiczne związane z występowaniem stolarki okiennej w przegrodach warstwowych zewnętrznych rozpatrywano w różnym jej usytuowaniu (tabela 5.6.). Wytypowano mostki termiczne przedstawione w tabeli 5.7..

Tabela 5.5. Wytypowane ścian zewnętrzne

Analizowane ściany zewnętrzne	Symbol przegrody
JEDNOWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 36,5 cm,	JI,
DWUWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, - bloczek wapienno-piaskowy gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, - cegła pełna gr. 25 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, - cegła kratówka gr. 25 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm,	D I D II D III D IV
TRÓJWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm, - bloczek wapienno-piaskowy gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, blok wapienno-piaskowy gr. 12cm - cegła pełna gr. 25 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm, - cegła kratówka gr. 25 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm,	T I T II T III T IV

Tabela 5.6. Sposoby usytuowania okna w ścianach zewnętrznych

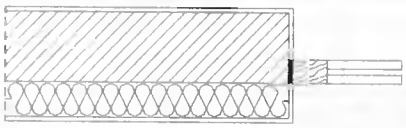
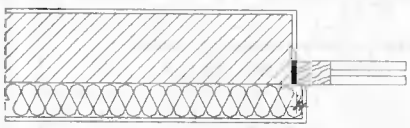
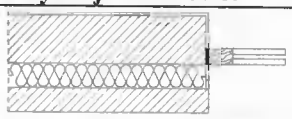
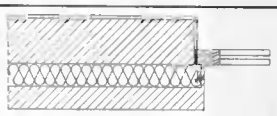
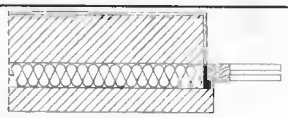
Ściany dwuwarstwowe:	
 - okno usytuowane w licu zewnętrznym muru, izolacja kończy się na krawędzi muru,	 - (a) okno usytuowane w licu zewnętrznym muru, izolacja cieplna zachodzi 2 cm na ościeżnicę, (rozwiązanie poprawne)
Ściany trójwarstwowe:	
 - okno usytuowane w licu zewnętrznym muru, izolacja kończy się na krawędzi muru,	 - (a) okno usytuowane w licu zewnętrznym muru, izolacja cieplna zachodzi 2 cm na ościeżnicę,
 - (b) okno usytuowane w warstwie izolacji cieplnej, (rozwiązanie poprawne)	

Tabela 5.7. Wytypowane mostki termiczne

l.p.	Mostek termiczny	symbol
1	Narożnik ścian zewnętrznych	NR
2	Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej	SC
3	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec	ST
4	Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże	ND
5	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	SN
6	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	OS
7	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	PO

Przykładową kartę katalogową przedstawiono w tabeli 5.8.. Wyniki przeprowadzonych obliczeń opracowano w formie katalogu mostków cieplnych [104]. W załączniku do pracy zestawiono tylko karty katalogowe dla następujących ścian zewnętrznych:

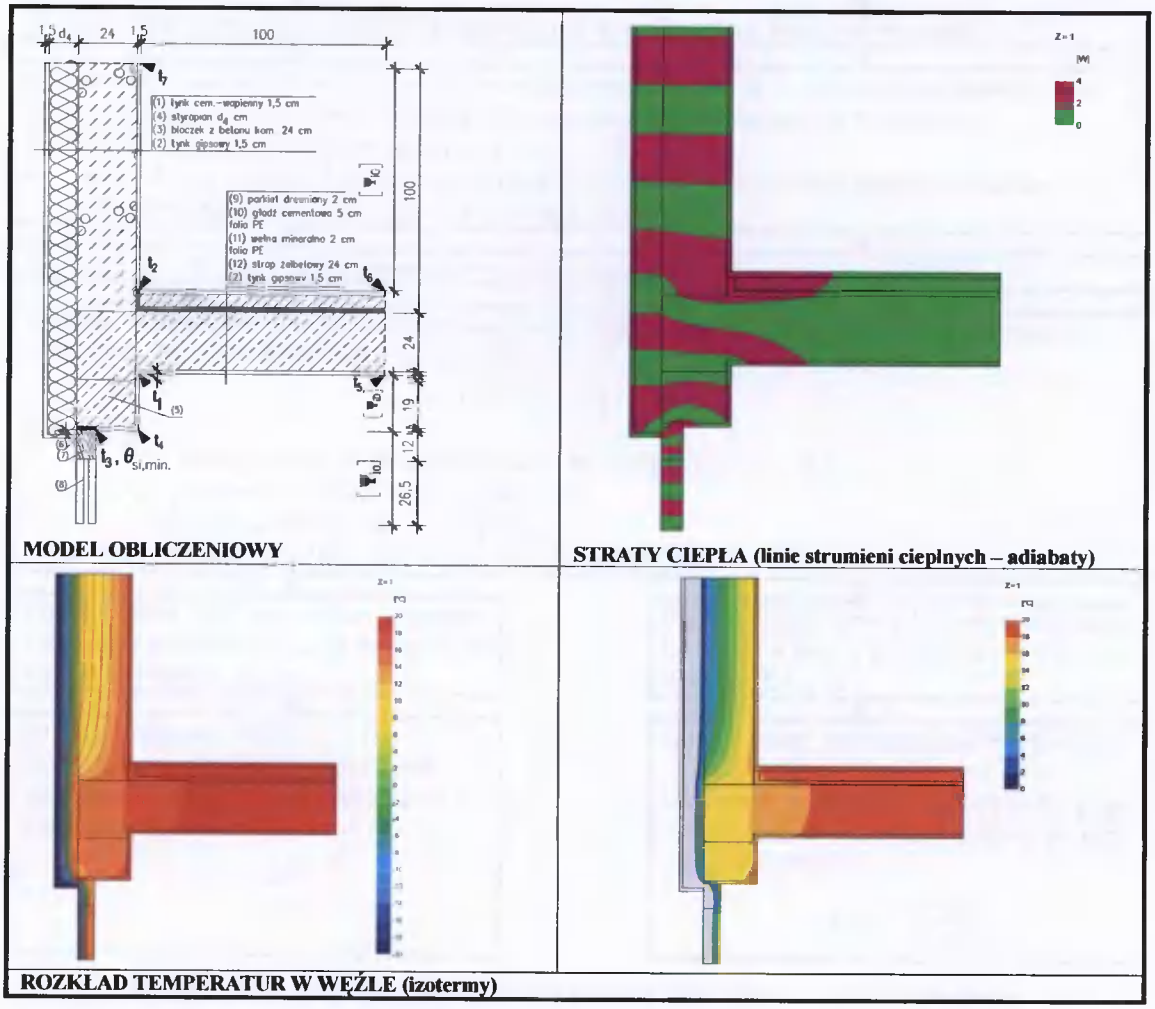
- jednowarstwowe z betonu komórkowego gr. 36,5 cm, (JI);
- dwuwarstwowe:
  bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, (DI);
- trójwarstwowe:
  bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa 12 cm, (TI),

które zostały wykorzystane do obliczeń i analiz prezentowanych w rozprawie.

Tabela 5.8. Przykładowa karta katalogowa, mostek cieplny: połączenie ściany zewnętrznej ze stropem z nadprożem: SN/DI-12(a) – opracowanie własne

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	36,110	33,826	31,377
L^{2D}[W/(m·K)]	0,903	0,847	0,784
Ψ_i [W/(m·K]	0,203	0,188	0,173
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,016	0,014	0,012
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,176	0,163	0,151
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,011	0,011	0,010
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	16,56	16,89	17,23
t_2 [°C]	17,40	17,68	17,99
t_3 [°C]	14,19	14,47	14,75
t_4 [°C]	17,44	17,66	17,88
t_5 [°C]	19,55	19,60	19,65
t_6 [°C]	19,78	19,80	19,82
t_7 [°C]	16,39	16,78	17,23
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,46	15,70	15,95
f_{Rsi} [-]	0,887	0,893	0,899



5.5. OCENA CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWA ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH I ICH ZŁĄCZY WEDŁUG WŁASNYCH ALGORYTMÓW

Poprawne wykonanie kompleksowych obliczeń i analiz cieplno-wilgotnościowych ścian zewnętrznych budynku i ich złączy wymaga opracowania jasnych procedur w formie prostych metod inżynierskich. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano własne algorytmy obliczeniowe.

Pierwszy z nich (rysunek 5.11.), przedstawia kolejność postępowania obliczania współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej ściany zewnętrznej oraz obliczania średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$ dla ścian zewnętrznych traktowanych jako jedna obudowa.

Drugi algorytm (rysunek 5.12.), służy do analizy i oceny ścian zewnętrznych pod względem wilgotnościowym.

(1) Obliczenie współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej bez uwzględnienie mostków cieplnych U_{ci} według procedury podanej w PN-EN ISO 6946 [81]:
- określenie wartości oporów przejmowania ciepła R_{si}, R_{se} według tablicy normy PN-EN ISO 6946 [81],
- określenie współczynników przewodności cieplnej materiałów według normy PN-EN 12524 [78],
- uwzględnienie poprawek do współczynnika przenikania ciepła według załącznika D normy PN-EN ISO 6946 [81],

↓

(2) Określenie pola powierzchni ściany uczestniczącej w przenikaniu w świetle przegród do niej prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych okien i drzwi, obliczone w świetle ościeży A_i, m^2

↓

(3) Identyfikacja mostków cieplnych występujących w analizowanej ścianie zewnętrznej

↓

(4) Określenie wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ_i, wartości gałęziowego, liniowego współczynnika przenikania ciepła analizowanego mostka cieplnego na podstawie:
- kart katalogowych mostków cieplnych [104],
- obliczeń przy użyciu odpowiedniego programu komputerowego według zasad prezentowanych w PN-EN ISO 10211-1 [84] , PN-EN ISO 10211-2 [85]

↓

(5) Określenie długości liniowych mostków cieplnych, l_i , m,

↓

(6) Obliczenie współczynnika sprzężenia cieplnego między przestrzenią ogrzewaną i otoczeniem zewnętrznym przez obudowę budynku, L_D, W/K,

$$L_D = \sum U_{ci} \cdot A_i + \sum \Psi_i \cdot l_i ,$$

gdzie:
- U_{ci} – współczynnik przenikania ciepła i – tej przegrody, $W/(m^2 \cdot K)$,
- A_i – pole powierzchni i –tej przegrody,, m^2,
- l_i – długość liniowego mostka cieplnego, m,
- Ψ_i – liniowy współczynnik przenikania ciepła, $W/(m \cdot K)$

↓

(7) Określenie pola powierzchni pojedynczej ściany budynku w osiach przegród do niej prostopadłych, A_O, m^2,

↓

(8) dla pojedynczej ściany:
Obliczenie współczynnika przenikania ciepła analizowanej ściany zewnętrznej na podstawie zależności:

$$U_k = \frac{L_D}{A_O}$$

(7) Określenie sumy pól powierzchni ścian budynku w osiach przegród do niej prostopadłych, ΣA_O, m^2,

↓

(8) dla ścian zewnętrznych traktowanych jako jedna obudowa:
Obliczenie średniego współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej na podstawie zależności:

$$U_{k,śr.} = \frac{L_D}{\sum A_O}$$

Rysunek 5.11. Algorytm efektywności cieplnej ścian zewnętrznych i ich złączy

(1) Identyfikacja mostków cieplnych występujących w ścianie zewnętrznej

(2) Określenie parametrów:
- powietrza zewnętrznego: t_e według PN-82/B-02403 [100],
- powietrza wewnętrznego: t_i według Rozporządzenia [66], φ_i według Rozporządzenia [64]

(3) Określenie pól temperatur charakterystycznych i minimalnych w analizowanych miejscach związanych
z występowaniem mostków cieplnych na podstawie:
- kart katalogowych mostków cieplnych [104],
- obliczeń przy użyciu programu komputerowego według zasad prezentowanych w PN-EN ISO 10211-1 [84] , PN-EN ISO 10211-2 [85]

(4) Identyfikacja miejsc (obszaru), w których istnieje ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej:
- kryterium podstawowe: $t_{min.} \geq t_s + 1deg$, (obszary ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej)

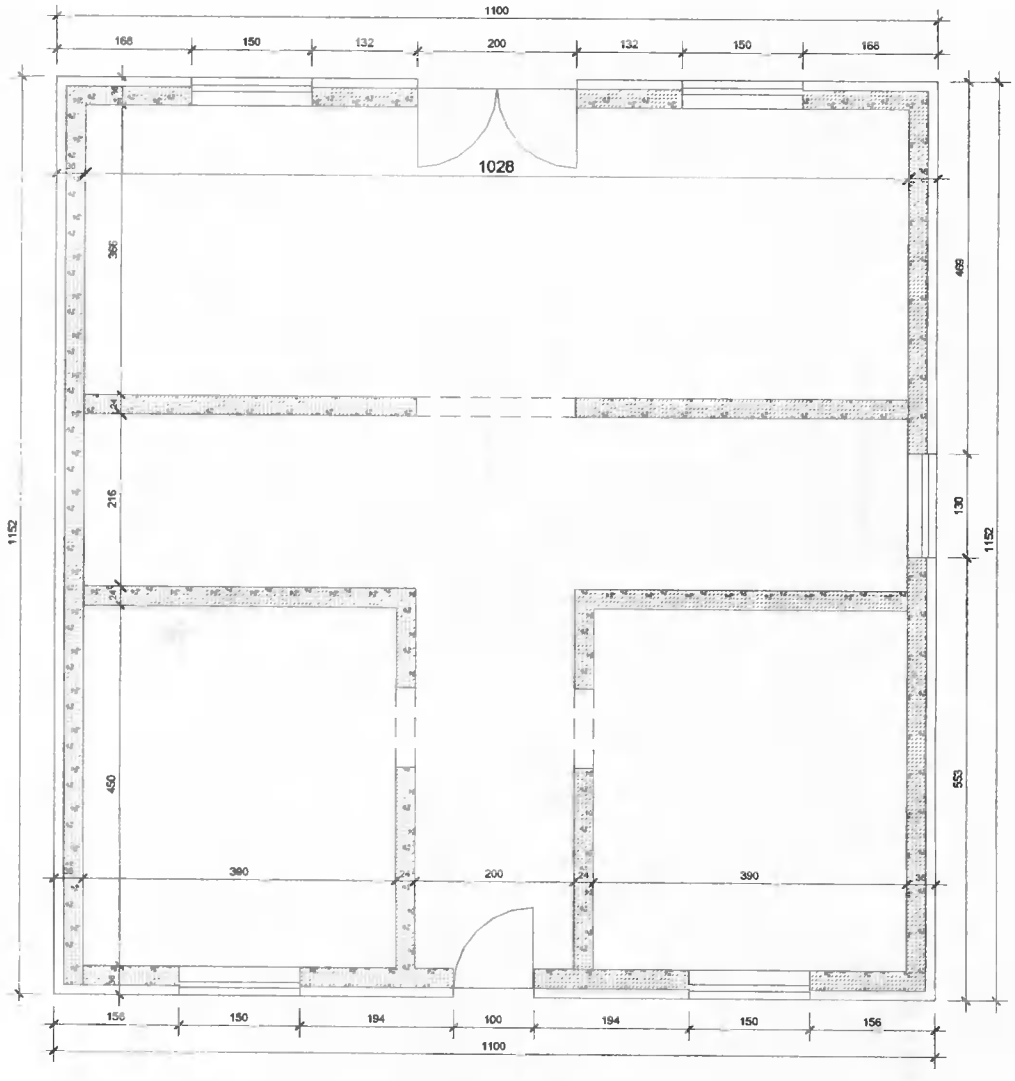
Rysunek 5.12. Algorytm efektywności wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy

Przedstawione powyżej algorytmy usuwają wszelkie niejasności i błędy opisane w rozdziale 3 rozprawy i stanowią elementy kompleksowej oceny ściany zewnętrznej, jako samej przegrody ale także i jej złączy.

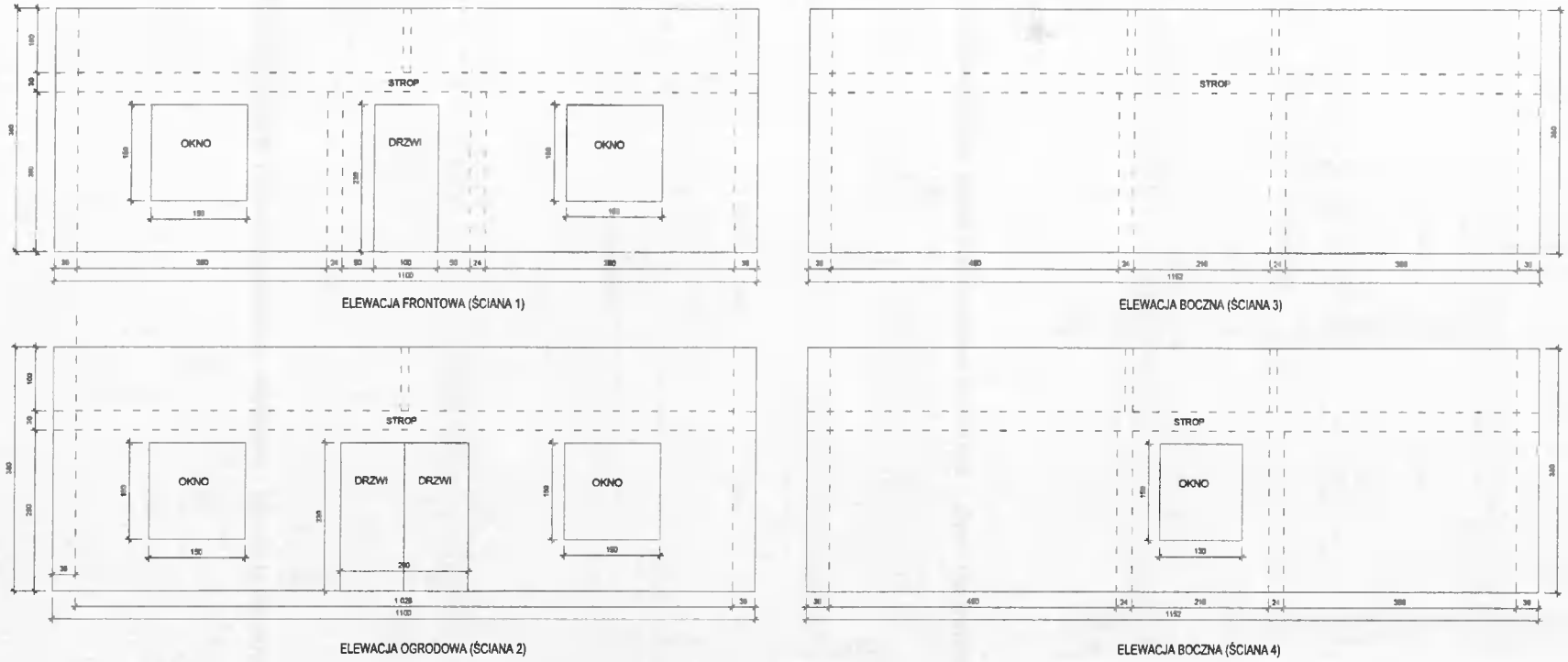
5.5.1. Obliczenie współczynnika przenikania ciepła U_K ścian zewnętrznych analizowanego budynku według własnego algorytmu

Do analizy cieplnej wybrano budynek jednorodzinny parterowy z poddaszem użytkowym (przykład obliczeniowy prezentowany w punkcie 3.5. pracy). Podstawowe parametry wyjściowe:

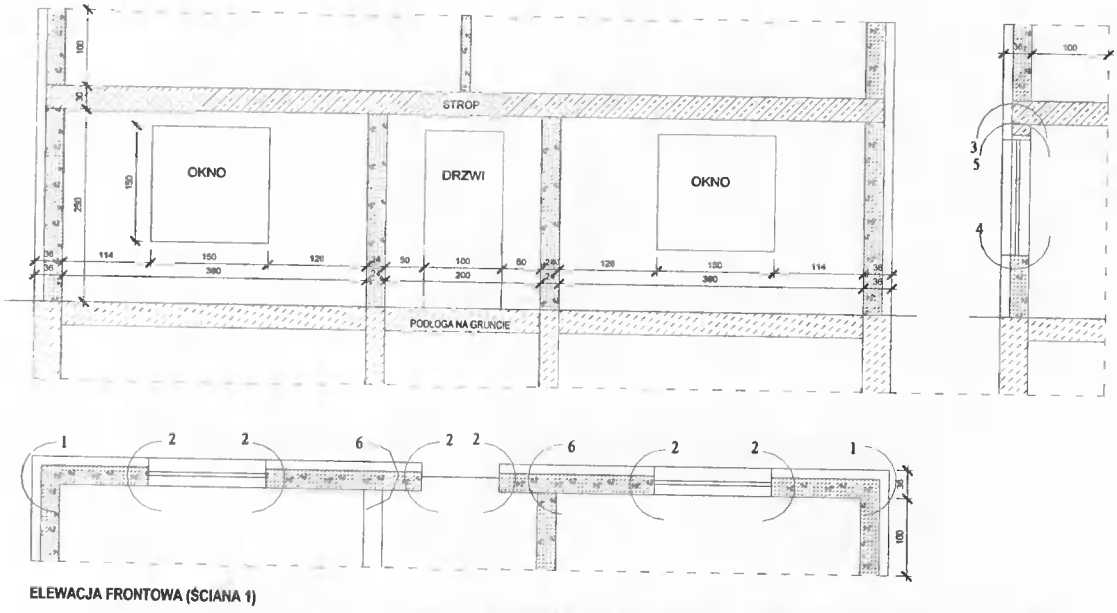
- ściany zewnętrzne dwuwarstwowe z: betonu komórkowego gr. 24 cm o λ=0,22 W/(m·K), styropianu gr.12 cm o λ =0,043 W/(m·K);
- ściany wewnętrzne nośne z betonu komórkowego gr. 24 cm o λ=0,22 W/(m·K);
- ściany wewnętrzne działowe z betonu komórkowego gr. 12 cm o λ=0,22 W/(m·K);
- dach skośny czterospadkowy, pokrycie dachowe gontem bitumicznym, U=0,29 W/(m^2·K);
- rzut poziomy przyziemia budynku – rysunek 5.13.;
- elewacje budynku pokazano – rysunek 5.14.;
- identyfikacja liniowych mostków cieplnych – rysunki 5.15. – 5.18.;
- posadzka na gruncie, izolacja podłogi styka się bezpośrednio z izolacją ściany zewnętrznej, (przyjęto liniowy współczynnik przenikania ciepła w styku podłoga – ściana Ψ_i = 0,0 – tablica 3 normy PN-EN ISO 13370 [88]),
- wszystkie złącza zostały zaprojektowane prawidłowo (szczególnie zwrócono uwagę na przedłużenie izolacji cieplnej na ościeżnice, przegroda i jej złącza oznaczone indeksem (a)),
- ściany zewnętrzne parteru budynku wyodrębniono przez przegrody do nich prostopadłe: strop dowiązujący i ściany zewnętrzne.



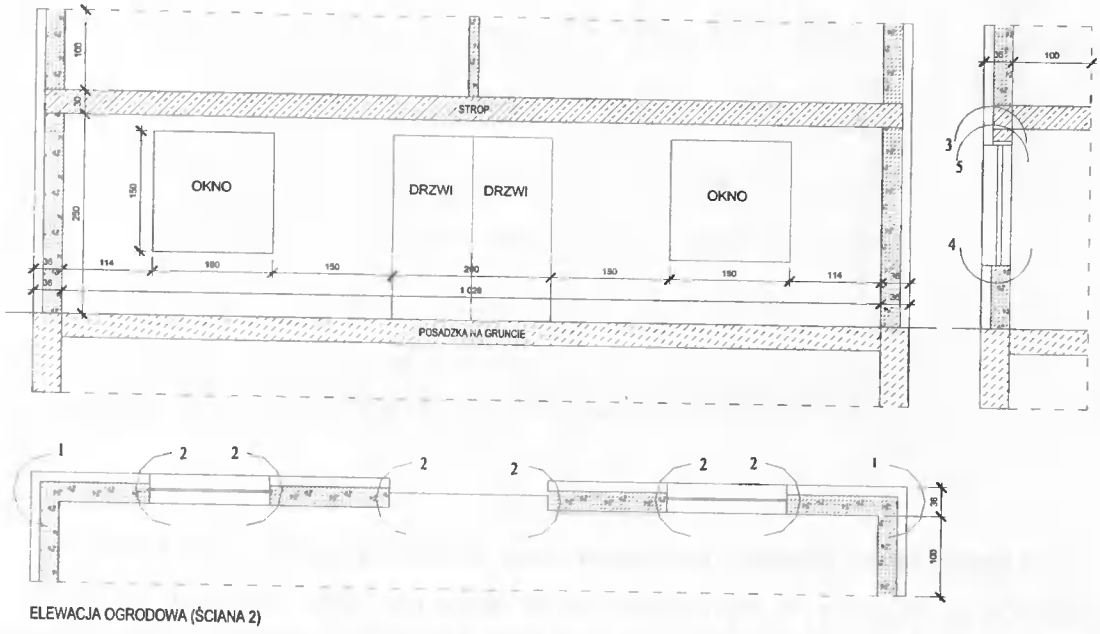
Rysunek 5.13. Rzut poziomy przyziemia budynku



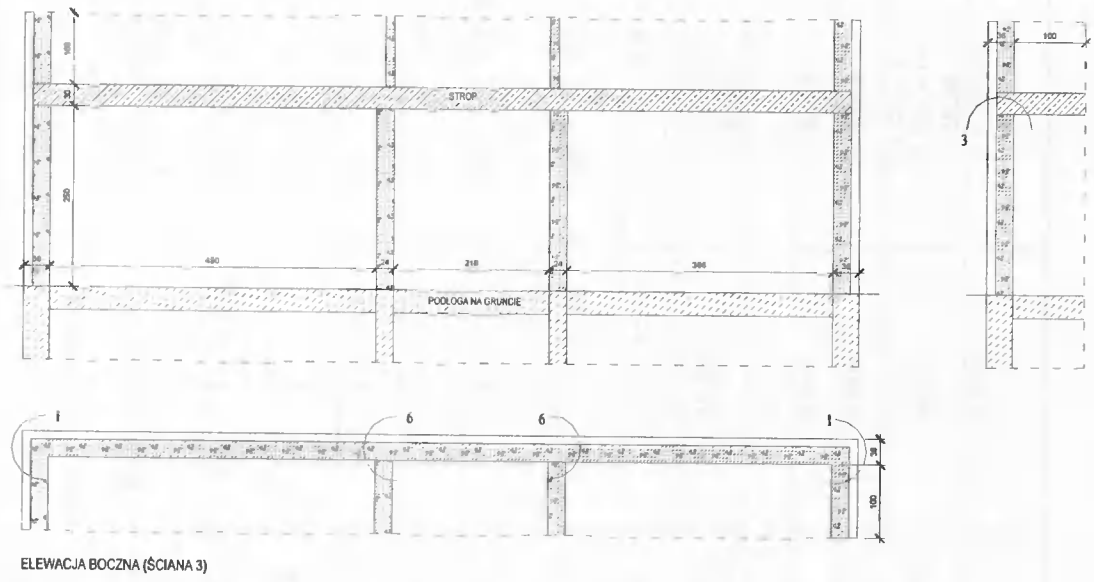
Rysunek 5.14. Elewacje analizowanego budynku



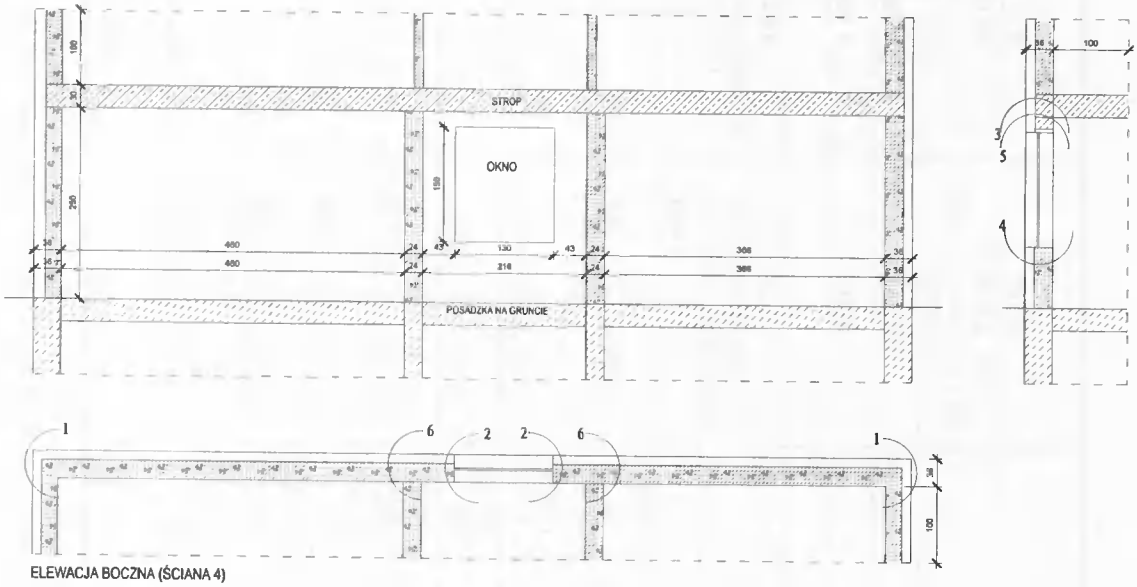
Rysunek 5.15. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja frontowa (ściana 1)



Rysunek 5.16. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja ogrodowa (ściana 2)



Rysunek 5.17. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja boczna (ściana 3)



Rysunek 5.18. Identyfikacja liniowych mostków cieplnych – elewacja boczna (ściana 4)

Wartości linowych współczynników przenikania ciepła Ψ_i przyjęto na podstawie obliczeń własnych opracowanych w formie katalogu mostków cieplnych (załącznik do pracy). Współczynniki Ψ_i, długości liniowych mostków termicznych l_i oraz pole powierzchni ścian zewnętrznych uczestniczących w przenikaniu A_i przyjęto przy zastosowaniu wymiarów wewnętrznych. Natomiast pole powierzchni A_O określono po obrysie ścian zewnętrznych a na wysokość – do osi stropu dowiązującego.

Istnieje potrzeba wykorzystania wartości liniowego współczynnika przenikania dla poszczególnych gałęzi węzła konstrukcyjnego (dokonując jego podziału). Obliczenia współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej ściany budynku wykonano z zastosowaniem gałęziowych współczynników Ψ_i. Dla mostka 3 i 5 (wyznaczone dla części złącza pod stropem) oraz dla mostka 1 (wyznaczone dla części narożnika Ψ_{i1}). W przypadku złączy z oknem uwzględniono straty ciepła odniesione do ściany zewnętrznej (Ψ_{i1}). Wyniki obliczeń zestawiono tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k dla poszczególnych (pojedynczych) ścian analizowanego budynku z zastosowaniem gałęziowych współczynników przenikania ciepła przyjętych na podstawie własnych obliczeń

l.p.	Rodzaj mostka cieplnego, karta katalogowa	Ψ_i [W/(m·K)]	Analizowane ściany zewnętrzne budynku							
			Elewacja frontowa		Elewacja ogrodowa		Elewacja boczna 1		Elewacja boczna 2	
			l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	l_i [m]	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]
1	Naroże ścian zewnętrznych: NR/DI-12	Ψ_{il}= 0,042	5,00	**0,210**	5,00	**0,210**	5,00	**0,210**	5,00	**0,210**
2	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI-12a	Ψ_{il}= 0,056	10,60	**0,598**	10,60	**0,594**	-	-	3,00	**0,168**
3	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI-12	Ψ_{iD}= 0,098	6,28	**0,615**	5,28	**0,517**	10,80	**1,058**	9,50	**0,931**
4	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/DI-12	Ψ_{il}= 0,033	3,00	**0,099**	3,00	**0,099**	-	-	1,30	**0,043**
5	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/DI-12a	Ψ_{iD}= 0,163	4,00	**0,652**	5,00	**0,815**	-	-	1,30	**0,212**
6	Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/DI-12	Ψ_i= 0,062	5,00	**0,310**	-	-	5,00	**0,310**	5,00	**0,310**
$\sum \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]				**2,480**		**2,235**		**1,578**		**1,874**
A_i [m^2]			[(3,90 + 2,00 + 3,90)·2,50] – [(2·1,50·1,50)+(1,00·2,30)]= **17,70**		[10,28·2,50] – [(2·1,50·1,50)+(2,00·2,30)]= **16,60**		(4,50 + 2,16 +3,66)·2,50 = **25,80**		[(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] – (1,30·1,50) = **23,85**	
U_{ci} [W/(m^2·K)]			**0,244**							
$A_i \cdot U_{ci}$ [W/K]			**4,319**		**4,050**		**6,295**		**5,819**	
$L_D = \sum A_i \cdot U_{ci} + \sum l_i \cdot \Psi_i$ [W/K]			**6,799**		**6,285**		**7,873**		**7,693**	
A_o [m^2]			[11,00·2,65] – [(2·1,50·1,50)+(1,00·2,30)]= **22,35**		[11,00·2,65] – [(2·1,50·1,50)+(2,00·2,30)]= **20,05**		11,52·2,65 = **30,53**		[11,52·2,65] – (1,30·1,50) = **28,58**	
$U_k = \frac{L_D}{A_O}$ [W/(m^2·K)]			**0,304**		**0,313**		**0,258**		**0,269**	

Tabela 5.10. Porównanie wyników obliczeń współczynnika U_k dla poszczególnych ścian budynku

Metoda obliczeń	Wyniki obliczeń współczynnika U_k [W/(m^2·K)] dla poszczególnych ścian budynku			
	Elewacja frontowa (ściana 1)	**Elewacja ogrodowa (ściana 2)**	**Elewacja boczna 1 (ściana 3)**	**Elewacja boczna 2 (ściana 4)**
Wg [13], [15], [18], [20], [51] [1)]	0,318	0,327	0,244	0,262
Wg [13], [15], [18], [20], [51] [2)]	0,513	0,446	0,359	0,394
Obliczenia własne	0,304	0,313	0,258	0,269
	Procentowy udział mostków cieplnych w stratach ciepła przez ściany zewnętrzne[%]			
Wg [13], [15], [18], [20], [51] [1)]	23,30	25,30	0,00	6,90
Wg [13], [15], [18], [20], [51] [2)]	52,41	45,25	32,07	38,04
Obliczenia własne	36,48	35,56	20,04	24,36

[1)] bez uwzględniania wpływu mostków na krawędziach przegród (ściany i stropy dowiązujące) – tabela 3.15.;
[2)] bez wyodrębnienia gałęziowych wartości współczynnika Ψ_j – tabela 3.16.

Otrzymane wyniki współczynnika przenikania ciepła pojedynczych ścian U_k różnią się znacząco. Wartości otrzymane wg [13], [15], [18], [20], [51] są niedoszacowane lub zawyżone. Wynika to z błędów opisanych w rozdziale 3 rozprawy.

Jednym z nich jest uwzględnianie w obliczeniach tylko wpływu mostków cieplnych wynikających z występowania okien i drzwi, co prowadzi do niedoszacowania wartości współczynnika przenikania ciepła U_k, uzyskując odpowiednio: 0,318 W/(m^2·K) dla elewacji frontowej, 0,327 W/(m^2·K) dla elewacji ogrodowej, 0,244 W/(m^2·K) dla elewacji bocznej 1, 0,262 W/(m^2·K) dla elewacji bocznej 2. Przy takim ujęciu procentowy udział mostków cieplnych w całkowitych stratach ciepła przez pojedynczą ścianę zewnętrzną kształtują się od 0 % dla elewacji bocznej 1 (bez okien i drzwi) do 25,30 % dla elewacji ogrodowej.

Następnym mankamentem jest przyjmowanie do obliczeń dla pojedynczej (wyodrębnionej) ściany całkowitych wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ, ponieważ na podstawie katalogu [15] nie można określić jednoznacznie wielkości wpływu mostka na jego odpowiednią część (gałąź). W taki sposób otrzymano zawyżone wartości współczynnika U_k od 0,359 W/(m^2·K) dla elewacji bocznej 1 do 0,513 W/(m^2·K) dla elewacji frontowej. Natomiast procentowy wpływ liniowych mostków cieplnych w stratach ciepła prze pojedynczą ścianę zewnętrzną znacznie wzrosły w stosunku do wyżej opisanych obliczeń i wynosi od 32,07 % dla elewacji bocznej 1 do 52,41 % dla elewacji frontowej.

Opisane wyniki obliczeń uzyskano na podstawie wzoru 1.1., 3.22. zawierającego błąd związany z interpretacją pola powierzchni A.

W wielu przypadkach wykonanie obliczeń współczynnika U_k jest niemożliwe, ponieważ w dostępnym katalogu [15] brak wielu kart katalogowych często stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych ścian zewnętrznych budynku.

Obliczenia według własnego algorytmu z wyodrębnieniem wartości gałęziowych współczynników przenikania ciepła dają bardziej miarodajne wartości współczynnika U_k dla pojedynczej ściany zewnętrznej od 0,258 W/(m^2·K) dla elewacji bocznej 1 do 0,313 W/(m^2·K) dla elewacji ogrodowej. Natomiast procentowy udział mostków cieplnych w stratach ciepła przez ścianę zewnętrzną kształtuje się od 20,04 % dla elewacji bocznej 1 do 36,48% dla elewacji frontowej. W ten sposób dowiedziono trzecią tezę pracy.

Biorąc pod uwagę kryterium sformułowane w Rozporządzeniu [66] ściany elewacji frontowej i ogrodowej nie spełniają podstawowego wymagania $U_k \geq U_{k,max}$. Dla ścian warstwowych $U_{k,max}$ wg [66] wynosi 0,30 W/(m^2·K). Zasadne jest zwrócenie uwagi na

stosowany do niedawna „zryczałtowany" dodatek do współczynnika przenikania ciepła U, określony w normach powszechnie stosowanych. Jego wartość wg załącznika PN-EN ISO 6946 [81] dla ścian zewnętrznych z otworami okiennymi i drzwiowymi wynosi 0,05 W/(m^2·K). Określona wielkość dodatku (ΔU) odnosi się do poprawnie rozwiązanych detali konstrukcyjnych przegród zewnętrznych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń własnych dla poprawnie skonstruowanych złączy uzyskano wartość (ΔU) od 0,025 do 0,069 W/(m^2·K) w zależności od rozpatrywanej ściany. Wartości zdefiniowanego dodatku w załączniku normy [81] są często niedoszacowane, a jego stosowanie w procedurze obliczeniowej staje się podstawowym błędem.

Przegrody budowlane jednego budynku charakteryzują się niejednorodnością cieplną wynikającą z ich budowy oraz systemu złączy z innymi przegrodami. Układy geometryczne przegrody i jej złączy determinuje wielkość jej podstawowego parametru U, który może się okazać bardzo zróżnicowany w odniesieniu do różnych przegród tego samego budynku. Dla analizowanego budynku w pracy (rozdział 3 i 5) uzyskano 4 różne współczynniki przenikania ciepła U ścian zewnętrznych (dla każdej ściany – elewacji). Dlatego zasadne jest obliczanie średniego współczynnika $U_{k,śr.}$, który odnosi się do ścian jako jednej obudowy. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 5.11..

Tabela 5.11. Obliczenie średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$ ścian parteru budynku z uwzględnieniem gałęziowych współczynników przenikania ciepła

l.p.	Mostek cieplny	Ψ_i [W/(m·K)]	l_i [m]	$\Psi_i \cdot l_i$ [W/K]
1	Naroże ścian zewnętrznych: NR/DI-12	0,084	10,00	**0,840**
2	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI-12a	Ψ_{il} = 0,056	24,20	**1,355**
3	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI-12	Ψ_{iD} = 0,098	31,86	**3,122**
4	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/DI-12a	Ψ_{il} = 0,033	7,30	**0,241**
5	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/DI-12a	Ψ_{iD} = 0,163	10,30	**1,679**
6	Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/DI-12	0,062	15,00	**0,930**
			$\sum \Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	**8,167**
A_{1i} = [(3,90 + 2,00 + 3,90)·2,50] – [(2·1,50·1,50) + (1,00·2,30)] = 17,70 A_{2i} = [10,28·2,50] – [(2·1,50·1,50) + (2,00·2,30)] = 16,60 A_{3i} = [(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] = 25,80 A_{4i} = [(4,50 + 2,16 + 3,66)·2,50] – [(1,30·1,50)] = 23,85 $\sum A_i = A_{1i} + A_{2i} + A_{3i} + A_{4i}$ [m^2]				**83,95**
			U_{ci} [W/(m·K)]	**0,244**
			$A_i \cdot U_{ci}$ [W/K]	**20,484**
			$L_D = A_i \cdot U_{ci} + \sum l_i \cdot \Psi_i$ [W/K]	**28,651**
A_{1O} = [11,00·2,65] – [(2·1,50·1,50)+(1,00·2,30)] = 22,35 A_{2O} = [11,00·2,65] – [(2·1,50·1,50)+(2,00·2,30)] = 20,05 A_{3O} = (11,52)·2,65 = 30,53 A_{4O} = [11,52·2,65] – (1,30·1,50) = 28,58 $\Sigma A_O = A_{1O} + A_{2O} + A_{3O} + A_{4O}$ [m^2]				**101,51**
			$U_{k,śr.} = \frac{L_D}{\sum A_o}$ [W/(m^2·K)]	**0,282**

l_{1i} = 2,50 +2,50 + 2,50 + 2,50 = 10,00 m, l_{2i} = 4·1,50 + 2·2,30 + 4·1,50 + 2·2,30 + 2·1,50 = 24,20 m
l_{3i} = [10,28 – (2·1,50 + 1,00)] + [10,28 – (2·1,50 + 2,00)] + 10,80 + [10,80 – 1,30] = 31,86 m
l_{4i} = 2·1,50 + 2·1,50 + 1,30 = 7,30 m, l_{5i} = 2·1,50 + 1,00 + 2·1,50 + 2,00 + 1,30 = 10,30 m, l_{6i} = (2·2,50) + (2·2,50) + (2·2,50) = 15,00 m

Racjonalnym parametrem strat ciepła przez ściany zewnętrzne traktowane jako jedna obudowa jest średni współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych $U_{k,śr.}$ Pozwala to na ujednolicenie kryterium doboru termoizolacyjności przegrody dla budynku, co dowodzi słuszność drugiej tezy pracy. Istnieje jednak potrzeba określenia w Rozporządzeniu [66] wartości granicznej (maksymalnej) współczynnika $U_{k,śr.}$

5.5.2. Analiza wilgotnościowa ścian zewnętrznych analizowanego budynku według własnego algorytmu

Ocena wilgotnościowa ścian zewnętrznych analizowanego budynku według własnego algorytmu (rysunek 5.12.) polega na identyfikacji mostków termicznych i wykonaniu obliczeń rozkładu temperatur a szczególnie określenie temperatur minimalnych na wewnętrznej powierzchni przegrody. Należy także wyznaczyć strefę (obszar) na występowanie ryzyka kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody.

Spełnienie warunku $t_{min.} \geq t_s + 1$ deg., wymaga wyznaczenia:

- $t_{min.}$ na podstawie obliczeń przy zastosowaniu programów numerycznych lub przy wykorzystaniu kart katalogowych,
- t_s (temperatura punktu rosy.

W ramach badań własnych wykonano obliczenia temperatur minimalnych złączy ścian zewnętrznych. Wyniki zestawiono w opracowanych katalogach mostków cieplnych stanowiących załącznik do pracy. Należy podkreślić, że wyznaczone wartości $t_{min.}$ zależą szczególnie temperatury powietrza zewnętrznego (t_e) i wewnętrznego (t_i) oraz wartości współczynnika przejmowania ciepła h_e i h_i. Przy sprawdzeniu kryterium $t_{min.} \geq t_s + 1$ deg., korzystając z katalogów mostków cieplnych, często przyjmuje się $t_{min.}$ nie zwracając uwagi na przyjmowane w obliczeniach numerycznych parametry: t_e, t_i, h_e, h_i. Takie działanie prowadzi do błędnej analizy i oceny. Wykonanie oceny powinno się przeprowadzać przez każdorazowe wykonanie obliczeń. Dlatego zasadne jest opracowanie katalogów mostków cieplnych dla wszystkich stref klimatycznych Polski (wg PN-82/B-02403 [100]) oraz różnych pomieszczeń budynków opisanych w Rozporządzeniu [64] w zależności od temperatury powietrza wewnętrznego t_i.

Temperatura punktu rosy zależy od kilku parametrów: temperatura wewnętrzna pomieszczenia t_i, wilgotności powietrza wewnętrznego φ_i. W tabeli 5.12. przedstawiono wartości temperatury punktu rosy. Wymagane parametry przyjęto na podstawie: [20], [81].

Tabela 5.12. Temperatury krytyczne przed występowaniem ryzyka kondensacji powierzchniowej analizowanych złączy budowlanych (mostków termicznych)

t_i [°C]	p_s [hPa]	φ_i [%]	p_s [hPa]	t_s [°C]	$t_{krytyczna}=t_s+1°C$ [°C]
20	23,40	45	10,53	7,7	8,7
		55	12,87	10,7	11,7
		60	14,04	12,0	13,0
24	29,85	45	13,43	11,3	12,3
		55	16,42	14,4	15,4
		60	17,91	15,7	16,7

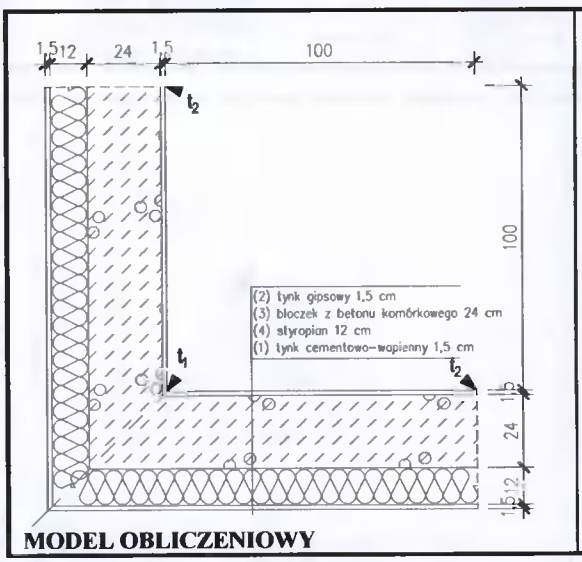
Analizę i ocena wilgotnościowa analizowanych mostków termicznych (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C) przedstawiono w tabeli 5.13.. Dla t_i = 20 °C i φ_i = 55%, zgodnie z prezentowanym w tabeli 5.12. obliczeniami, temperatura krytyczna wynosi 11,7°C. Oznacza to, że miejsca w których wyznaczone temperatury są niże od temperatury krytycznej występuje ryzyko kondensacji powierzchniowej.

Tabela 5.13. Zestawienie wyników temperatur charakterystycznych i minimalnych w analizowanych mostkach cieplnych

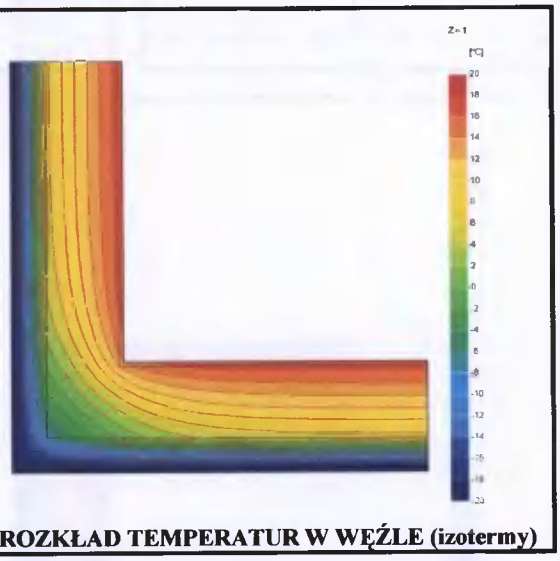
a) narożnik ścian zewnętrznych: NR/DI-12

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	14,35
t_2	[°C]	17,62



MODEL OBLICZENIOWY

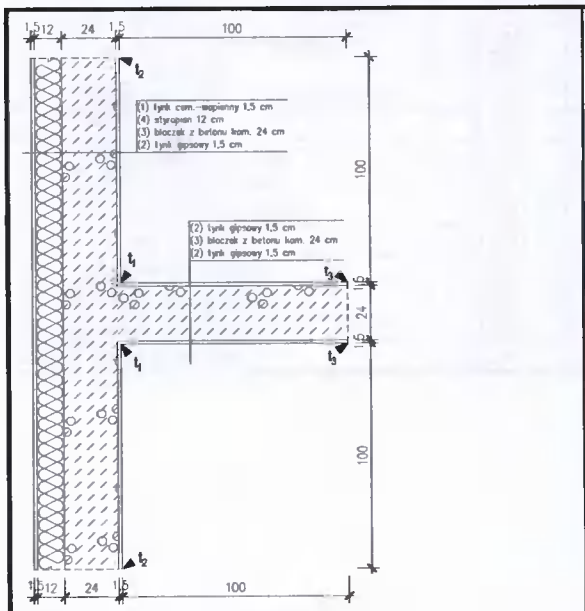


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

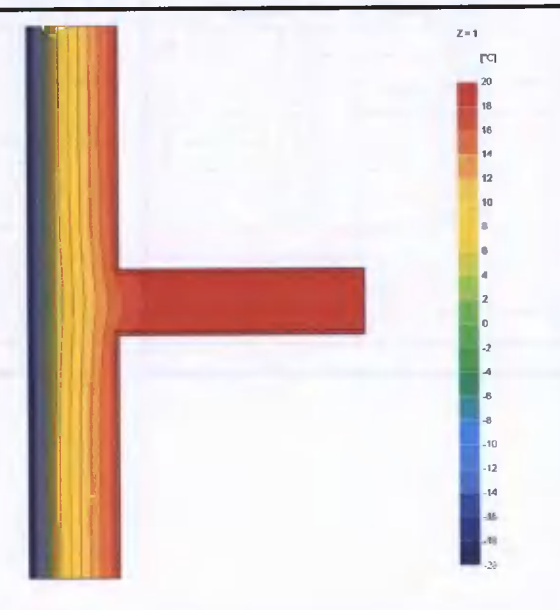
b) połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/DI-12

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	17,29
t_2	[°C]	17,63
t_3	[°C]	20,00



MODEL OBLICZENIOWY

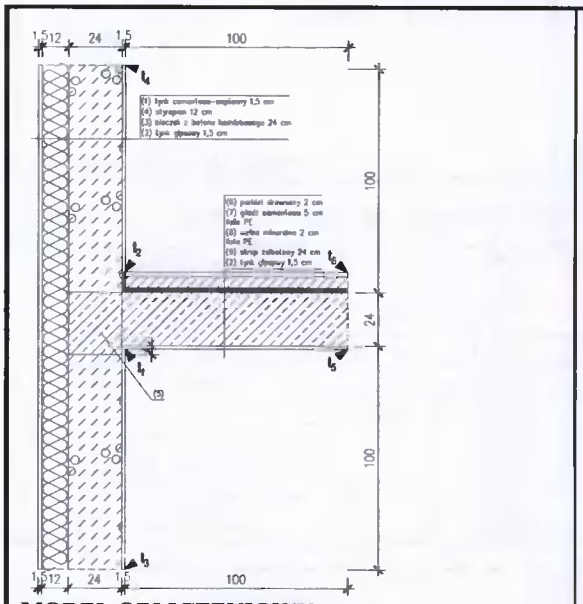


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

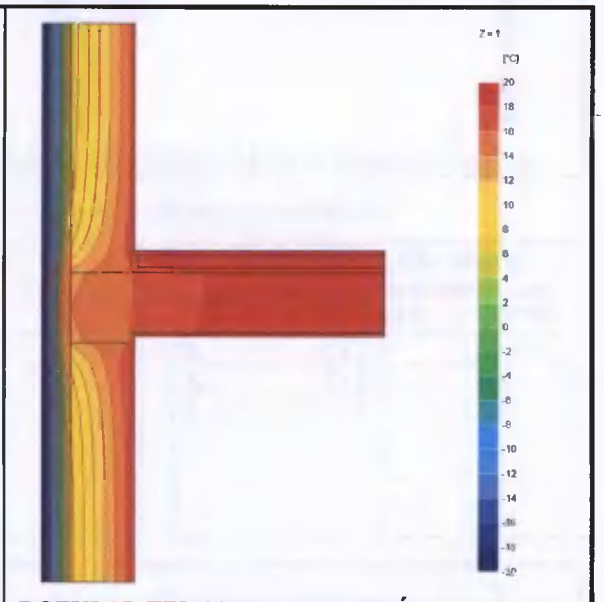
c) połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI-12

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Parkiet drewniany	0,020	0,160
7	Gładź cementowa	0,050	1,000
8	Wełna mineralna	0,020	0,043
9	Strop żelbetowy	0,240	2,500

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	16,93
t_2	[°C]	17,65
t_3	[°C]	17,64
t_4	[°C]	16,78
t_5	[°C]	19,59
t_6	[°C]	19,80



MODEL OBLICZENIOWY

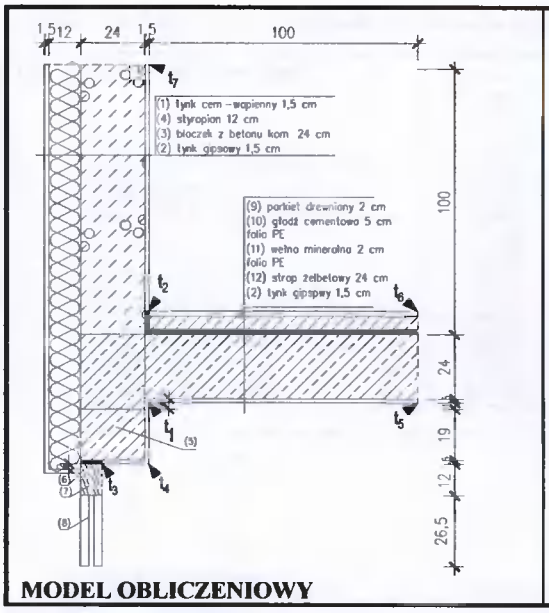


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

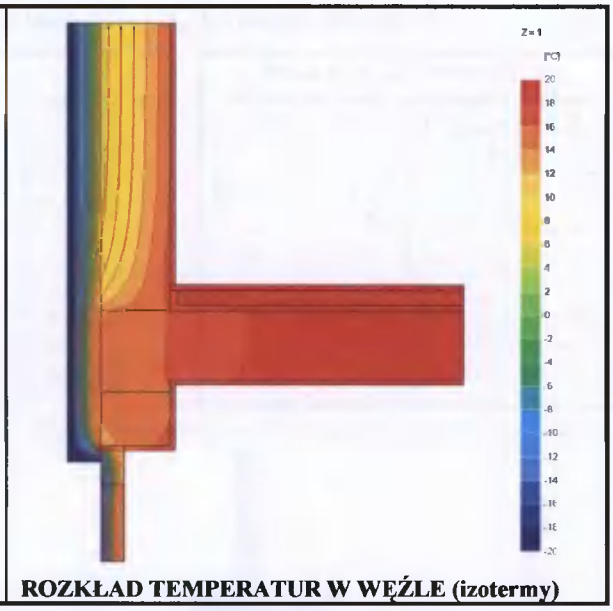
d) połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproża z oknem: SN/DI-12a

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	16,89
t_2	[°C]	17,68
t_3	[°C]	14,47
t_4	[°C]	17,66
t_5	[°C]	19,60
t_6	[°C]	19,80
t_7	[°C]	16,78



MODEL OBLICZENIOWY

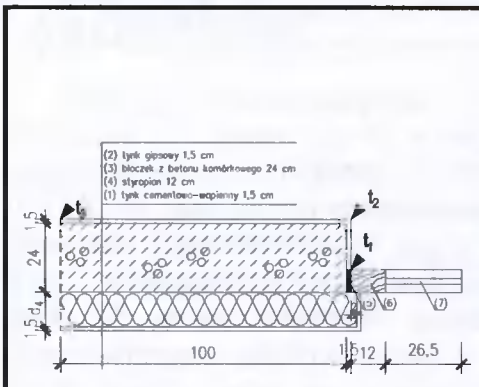


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

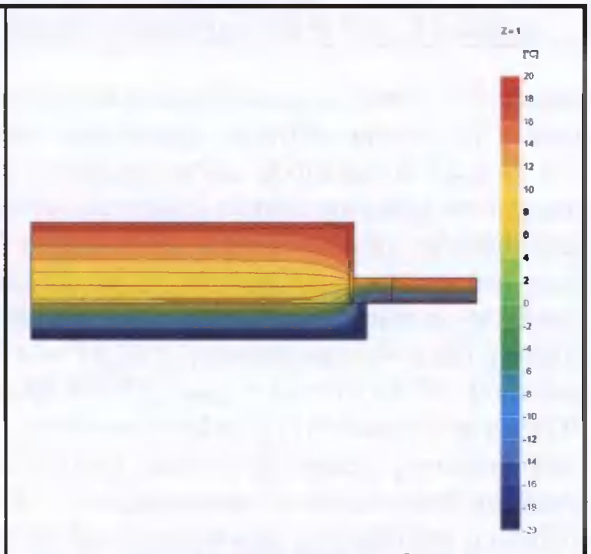
e) połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI-12a

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,08	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	12,39
t_2	[°C]	19,01
t_3	[°C]	17,63



MODEL OBLICZENIOWY

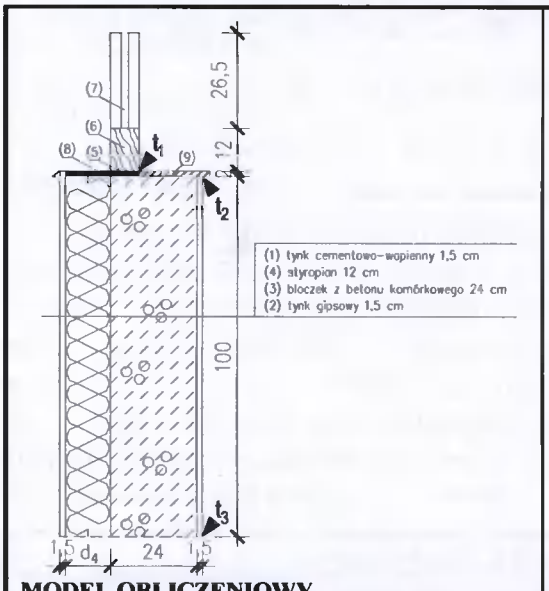


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

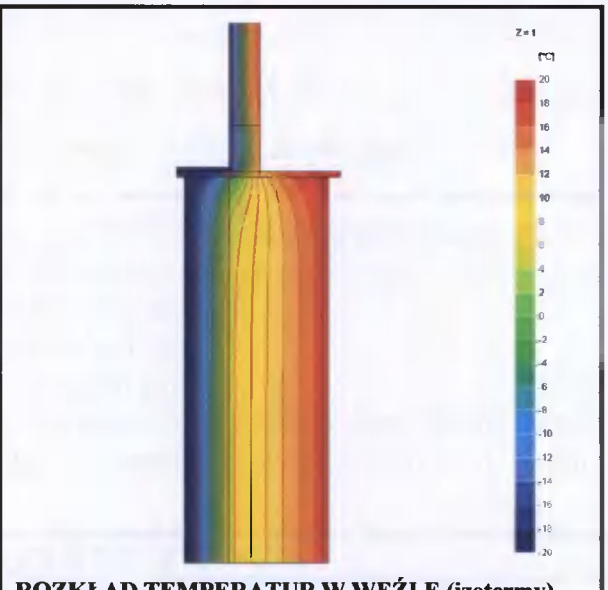
f) połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/DI-12

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	0,120	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
8	Parapet zewnętrzny	0,005	17,00
9	Parapet wewnętrzny	0,020	0,160

Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)		
t_1	[°C]	10,91
t_2	[°C]	19,81
t_3	[°C]	17,63



MODEL OBLICZENIOWY



ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

Analizując charakterystyczne mostki termiczne przedstawione w tabeli 5.13. można stwierdzić, że istnieje ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej w złączu: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik ($t_{min.} = t_1 =$ 10,91°C).W pozostałych przypadkach analizowane mostki cieplne spełniają wymaganie kryterium wilgotnościowego: $t_{min.} \geq t_s + 1$ deg. Istnieją jednak sposoby minimalizacji ryzyka występowania kondensacji powierzchniowej na wewnętrznej powierzchni przegrody. Dla mostka cieplnego: połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem (SN/DI-12) $t_{min.} = t_3 = 11{,}33$ °C, natomiast przy 2 cm przedłużeniu izolacji cieplnej na ościeże okienne (SN/DI-12_a) $t_{min.} = t_3 = 14{,}47$ °C. Podobnie dla złącza: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju prze ościeżnicę (OS/DI-12) $t_{min.} = t_1 = 10{,}90$ °C, 2 cm przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże powoduje podwyższenie temperatury $t_{min.} = t_1 = 12{,}39$ °C. Uwzględnienie w obliczeniach rozkładu temperatur w złączu stolarki okiennej pozwala na identyfikacje powierzchni o obniżonej temperaturze na styku połączenia. W wielu opracowaniach nie jest to uwzględniane co powoduje uzyskanie błędnych wyników obliczeń.

Opracowany własny katalog mostków cieplnych [104] i załącznik do pracy pozwalają na przeprowadzenie dokładnej i poprawnej oceny mostków cieplnych pod względem wilgotnościowym (kryterium występowania kondensacji powierzchniowej).

6. KRYTERIA OCENY ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

Kolejnym etapem rozprawy jest kompleksowa ocena różnych rozwiązań ścian zewnętrznych (jednowarstwowe, warstwowe) w aspekcie cieplno-wilgotnościowym. Dla analizowanego budynku w pracy wykonano obliczenia zgodnie z własnymi algorytmami (rysunek 5.11. i 5.12.). Wybrano następujące rodzaje ścian zewnętrznych i przedstawiono w tablicy 6.1.

Tabela 6.1. Wytypowane ściany zewnętrzne

Analizowane ściany zewnętrzne	Symbol przegrody
JEDNOWARSTWOWA: - bloczek z betonu komórkowego gr. 36,5 cm,	JI,
DWUWARSTWOWA: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm,	D I
TRÓJWARSTWOWA: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm,	T I

Dla ścian dwuwarstwowych i trójwarstwowych obliczenia przeprowadzono dla wariantów prezentowanych w tabeli 5.7. w zależności od sposobu usytuowania okna w ścianie zewnętrznej. Rozwiązaniami poprawnymi są:

- dla ścian dwuwarstwowych oznaczone indeksem (a),
- dla ścian trójwarstwowych oznaczone indeksem (b).

Ocena rozwiązań ścian zewnętrznych budynku jest możliwa przy jednoczesnym uwzględnieniu dwóch podstawowych kryteriów: cieplnego i wilgotnościowego, według schematu przedstawionego na rysunku 6.1.

OCENA ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

I. Kryterium cieplne (straty ciepła):

1. Wartość współczynnika przenikania ciepła U_c,
2. Wybór rozwiązań z poprawnie zaprojektowanymi węzłami konstrukcyjnymi (mostków termicznych),
3. Minimalne straty ciepła wynikające z występowania mostków cieplnych,
4. Wartość średniego współczynnika przenikania ciepła ściany zewnętrznej $U_{k,śr.}$,

II. Kryterium wilgotnościowe (kondensacja powierzchniowa – minimalne temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody):

1. Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (analiza rozkładu temperatur w rozpatrywanych mostkach cieplnych ścian zewnętrznych),
2. Sprawdzenie podstawowego kryterium $t_{min.} \geq t_s + 1$ deg.,
3. Identyfikacja obszarów zagrożonych występowaniem kondensacji powierzchniowej.

Rysunek 6.1. Ocena ścian zewnętrznych według kryterium cieplnego i wilgotnościowego

Wyniki obliczeń dla wszystkich analizowanych rozwiązań przedstawiono w tabeli 6.2.. Takie zestawienie umożliwia przeprowadzenie analizy strat ciepła przy poprawnych i niepoprawnych rozwiązaniach złączy budowlanych.

W ramach kryterium wilgotnościowego zestawiono w tabeli 6.3. temperatury minimalne w analizowanych złączach ścian zewnętrznych.

Tabela 6.2. Wyniki obliczeń średniego współczynnika przenikania ciepła ścian zewnętrznych analizowanego budynku

Symbol ściany zewnętrznej	Warstwy ściany zewnętrznej	λ_i W/(m·K)	d_i [m]	U_{ci} W/(m²·K)	$\Sigma U_{ci} \cdot A_i$ W/K	$\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ W/K	L_D W/K	$U_{k,śr.}$ W/(m²·K)	% udział $\Sigma \Psi_i \cdot l_i$ w stratach ciepła	ΔU W/(m²·K)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
J I-15	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego tynk cementowo-wapienny	0,40 0,15 1,00	0,015 0,365 0,015	0,377	31,649	13,577	45,226	0,445	30,02	0,068
J I-17	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego tynk cementowo-wapienny	0,40 0,17 1,00	0,015 0,365 0,015	0,422	35,427	14,559	49,986	0,492	29,13	0,070
D I-10	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,275	23,086	11,210	34,296	0,339	32,87	0,064
D I-10$_{(a)}$	styropian tynk cementowo-wapienny	0,043 1,00	0,10 0,015			8,926	32,012	0,317	27,88	0,042
D I-12	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,244	20,484	10,561	31,035	0,306	34,00	0,062
D I-12$_{(a)}$	styropian tynk cementowo-wapienny	0,043 1,00	0,12 0,015			8,167	28,651	0,282	28,51	0,038
D I-15	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,208	17,462	9,884	27,346	0,268	36,14	0,060
D I-15$_{(a)}$	styropian tynk cementowo-wapienny	0,043 1,00	0,15 0,015			7,431	24,893	0,244	29,85	0,036
T I-10	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,268	22,499	12,249	34,748	0,337	35,25	0,069
T I-10$_{(a)}$	styropian	0,043	0,10			10,045	32,544	0,316	30,87	0,048
T I-10$_{(b)}$	cegła klinkierowa	1,05	0,12			7,091	29,590	0,287	23,96	0,019
T I-12	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,238	19,980	9,699	29,679	0,287	32,68	0,049
T I-12$_{(a)}$	styropian	0,043	0,12			7,419	27,399	0,265	27,08	0,027
T I-12$_{(b)}$	cegła klinkierowa	1,05	0,12			6,324	26,304	0,254	24,04	0,016
T I-15	tynk gipsowy bloczek z betonu komórkowego	0,40 0,22	0,015 0,24	0,204	17,126	9,091	26,217	0,251	34,68	0,047
T I-15$_{(a)}$	styropian	0,043	0,15			6,678	23,804	0,229	28,05	0,025
T I-15$_{(b)}$	cegła klinkierowa	1,05	0,12			5,510	22,636	0,217	24,34	0,013

Tabela 6.3. Zestawienie wartości temperatur minimalnych w analizowanych złączach budowlanych

L.p.	Mostek termiczny	Temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni analizowanego mostka cieplnego, $t_{min.}$ [°C] przy t_e = -20 °C, t_i = 20 °C																
		J I-15	J I-17	D I-10	D I-$10_{(a)}$	D I-12	D I-$12_{(a)}$	D I-15	D I-$15_{(a)}$	T I-10	T I-$10_{(a)}$	T I-$10_{(b)}$	T I-12	T I-$12_{(a)}$	T I-$12_{(b)}$	T I-15	T I-$15_{(a)}$	T I-$15_{(b)}$
1	Naroże ściany zewnętrznej	12,35	11,67	13,83		14,35		14,98		13,95			14,45			15,05		
2	Połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną	15,87	15,42	16,96		17,29		17,67		17,04			17,35			17,71		
3	Połączenie ściany ze stropem w przekroju przez wieniec	14,38	14,03	16,48		16,93		17,43		16,59			17,01			17,48		
4	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez nadproże	10,10	9,83	9,84	13,59	10,01	13,86	10,19	14,13	9,71	13,60	14,11	9,87	13,86	14,32	10,04	14,11	14,62
5	Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	11,64	11,39	11,12	14,19	11,33	14,47	11,53	14,75	11,10	14,25	14,26	11,29	14,51	14,58	11,49	14,78	14,88
6	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	10,10	9,79	10,76	12,19	10,90	12,39	11,04	12,61	10,83	12,27	12,46	10,96	12,46	12,76	11,10	12,66	13,07
7	Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	10,00	9,84	10,76	-	10,91	-	11,07	-	10,79	-	11,06	10,94	-	11,29	11,09	-	11,51

W kilku analizowanych złączach występuje ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej i rozwoju pleśni, szczególnie na styku połączenia ściany zewnętrznej z oknem. Są to miejsca w których temperatura minimalna ($t_{min.}$) jest niższa od temperatury punktu rosy + 1°C, czyli $t_{krytyczna}$ = 11,7 °C..

Stosowanie ścian o konstrukcji jednowarstwowej nawet z materiału o stosunkowo niskim współczynniku przewodności cieplnej λ (dla betonu komórkowego λ = 0,15 W/(m·K), λ = 0,17 W/(m·K)) jest ryzykowne, ponieważ charakteryzują się wysokim udziałem liniowych mostków cieplnych w starach ciepła (ok. 29%, a ΔU wynosi 0,068 – 0,070 W/(m^2·K)). Można także zaobserwować znaczne obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody w złączu, co prowadzi do występowania kondensacji powierzchniowej.

Uzyskane wyniki obliczeń wskazują, że pod względem strat ciepła (L_D, $U_{k,śr.}$, ΔU), bardziej korzystne jest stosowanie ścian warstwowych, z ciągłą warstwą izolacji termicznej. Znaczące jest także zwrócenie uwagi na poprawne osadzenie stolarki okiennej w ścianie zewnętrznej. W przypadku ścian dwuwarstwowych okna i drzwi należy montować najlepiej tak, aby ocieplenie zachodzące na ościeżnicę minimum 2 cm tworzyło węgarek wokół otworu. Natomiast w przegrodach trójwarstwowych zaleca sytuowanie w warstwie izolacji cieplnej. W ten sposób straty ciepła wynikające z występowania mostków cieplnych (w ujęciu ich % udziału) maleją o 5 – 7 % dla ścian dwuwarstwowych i o 7 – 12 %.

Ocena złączy pod względem wilgotnościowym pozwala zidentyfikować miejsca (obszary) obniżonej temperatury. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń, można stwierdzić, że styk połączenia ściany zewnętrznej z oknem jest najbardziej podatny na występowanie kondensacji powierzchniowej i rozwój pleśni. Dlatego bardzo ważne jest, podobnie jak przy ocenie strat ciepła, zwrócenie szczególnej uwagi na kształtowanie i zabezpieczenie tego rodzaju połączeń poprzez poprawne osadzenie stolarki okiennej. Zastosowanie od zewnątrz ciągłej izolacji cieplnej skutkuje wyższymi temperaturami na wewnętrznej powierzchni przegrody niż w przypadku jednowarstwowych.

Kompleksowa ocena ścian zewnętrznych powinna dotyczyć jednocześnie przegrody jak i jej złączy według kryterium cieplnego i wilgotnościowego. Ich stosowanie jednocześnie daje możliwość wyboru poprawnych rozwiązań ścian zewnętrznych. W ten sposób udowodniono pierwszą tezę pracy.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W rozprawie rozpatrywano ściany zewnętrzne i ich złącza w aspekcie cieplno-wilgotnościowym.

Charakterystyka zewnętrznych przegród budowlanych i mostków termicznych oraz analiza wymagań projektowych i procedur obliczeniowych w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej obowiązujących w Polsce i krajach Europy pozwoliła na zweryfikowanie i poszerzenie dotychczasowego stanu wiedzy. Na tej podstawie zidentyfikowano następujące mankamenty i błędy:

- wymagania sformułowane w Rozporządzeniu [66] są nieprecyzyjne i trudne do spełnienia;
- stosowanie do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k błędnych wzorów i zależności;
- uwzględnianie w obliczeniach tylko liniowych mostków cieplnych związanych z występowaniem okien i drzwi;
- przyjmowanie do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej ściany budynku całkowitych wartości liniowych współczynników przenikania ciepła Ψ;
- brak katalogów mostków cieplnych wielu często stosowanych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych uniemożliwia przeprowadzenie obliczeń w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej.

Rozwiązanie przedstawionych powyżej problemów wymagało przeprowadzenia badań własnych. W pierwszym etapie określono zasady modelowania, przyjmowania warunków brzegowych i określania charakterystyki materiałowej mostków cieplnych. Następnie przeprowadzono obliczenia parametrów cieplnych złączy budowlanych. Przedstawiono także procedurę wyznaczania wartości gałęziowego współczynnika przenikania ciepła. Jego określenie wymaga dokonania podziału złącza na części. Wydzielenie częściowych (gałęziowych) strumieni ciepła w złączu jest praktycznie możliwe w warunkach stosowania numerycznych metod obliczeniowych, które umożliwiają uzyskanie poszukiwanych wartości bezpośrednio, po uprzednim dokładnym zdefiniowaniu powierzchni złącza (gałęzi). Na podstawie otrzymanych wartości napływających strumieni jest możliwe, według odpowiednich zależności, wyznaczenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła. Następnym etapem badań własnych było określenie charakterystyki wilgotnościowej mostków cieplnych przez podanie ich rozkładu temperatur. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO [103] zestawiono w katalogu mostków cieplnych [104] i załączniku do pracy. W ten sposób uzupełniono lukę w bazie danych obliczeniowych dla ścian jednowarstwowych, dwuwarstwowych i trójwarstwowych. Jedyne dostępne opracowanie tego typu [15] jest niekompletne – brak wielu złączy i danych obliczeniowych oraz jest obarczone błędami z zakresu warunków granicznych.

W ramach badań opracowano własne algorytmy efektywności cieplno-wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy w formie prostych metod inżynierskich osiągając w ten sposób podstawowy cel rozprawy. Jeden z nich podaje kolejność postępowania obliczania współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej ściany zewnętrznej oraz średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr}$ dla ścian zewnętrznych traktowanych jako jedna obudowa. Drugi zaś służy do analizy i oceny ścian zewnętrznych pod względem wilgotnościowym (kondensacja na powierzchni wewnętrznej przegrody).

Opracowanie własnych algorytmów, katalogu mostków cieplnych oraz określenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła złączy budowlanych pozwala na usu-

nięcie mankamentów i błędów w procedurach obliczeniowych. Na tej podstawie przeprowadzono obliczenia dla ścian zewnętrznych analizowanego budynku.

Określenie współczynnika przenikania ciepła dla pojedynczej ściany budynku wymaga znajomości lub obliczania gałęziowych współczynnika przenikania ciepła Ψ. Zastosowanie takich wartości daje możliwość otrzymania bardziej miarodajnych wyników. Odzwierciedla rzeczywiste straty ciepła przez pojedynczą przegrodę. Na podstawie przykładu obliczeniowego przedstawionego w rozdziale 5.5.1. udowodniono trzecią tezę pracy.

W przypadku ścian zewnętrznych traktowanych jako jedna obudowa uzasadnione jest wyznaczenie średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$, który jest racjonalnym parametrem strat ciepła przez przegrodę. Pozwala to także na ujednolicenie kryterium doboru termoizolacyjności przegrody dla budynku, co dowodzi słuszność drugiej tezy pracy. Uzasadniony jest więc postulat uzupełnienia Rozporządzenia [66], określeniem wartości maksymalnych w odniesieniu do wartości uśrednionej.

Kolejnym etapem pracy było przeprowadzenie oceny ścian zewnętrznych: jednowarstwowych, dwuwarstwowych, trójwarstwowych według kryterium cieplnego i wilgotnościowego. Dla analizowanego budynku w pracy wykonano obliczenia średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$ oraz zestawiono temperatury minimalne w analizowanych złączach ścian zewnętrznych. Kompleksowa ocena ścian zewnętrznych powinna dotyczyć jednocześnie przegrody jak i jej złączy według kryterium cieplnego i wilgotnościowego. Jednoczesne stosowanie tych wymagań pozwala wytypować poprawne rozwiązania przegród i złączy. W ten sposób dowiedziono słuszność pierwszej tezy rozprawy.

Podstawowy cel pracy został osiągnięty a tezy udowodnione.

W konkluzji sformułowano następujące wnioski i propozycje końcowe:

- Zastosowanie własnych algorytmów efektywności cieplno-wilgotnościowej ścian zewnętrznych i ich złączy daje możliwość poprawnego przeprowadzenia obliczeń i uzyskanie bardziej miarodajnych wyników. Jednocześnie istnieje potrzeba poprawy i uzupełnienia zapisów Rozporządzenia [66] szczególnie dotyczących wymagań w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej.

- Określenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła jest niezbędne do obliczeń współczynnika przenikania ciepła U_k dla pojedynczej przegrody, ale także w przypadku sporządzania od stycznia 2009 r. świadectw energetycznych pojedynczych lokali. Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych obliczeń w zakresie określania gałęziowych współczynników przenikania ciepła dla wielu często spotykanych w praktyce złączy np. połączenie ściany z dachem, połączenie ściany z fundamentem.

- Indywidualna symulacja komputerowa złączy jest bardzo pracochłonna i wymaga znajomości specyficznych szczegółów programowania warunków geometryczno-fizycznych złączy i jako taka może być podejmowana przez osoby odpowiednio przeszkolone w tym zakresie. Opracowany przez autora pracy katalog mostków cieplnych [104] oraz załącznik do pracy może być początkiem zbioru kart uwzględniających różne parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego niezbędnych dla biur projektów i celów dydaktyczno-szkoleniowych. Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań i obliczeń zarówno dla złączy dwuwymiarowych jak trójwymiarowych (przestrzennych).

- Wprowadzenie przez Ustawę [70] obowiązku sporządzania świadectw energetycznych budynków i lokali wymagać będzie przeprowadzenia wielu precyzyjnych ob-

liczeń w zakresie ochrony cieplno-wilgotnościowej przegród zewnętrznych i ich złączy. Dlatego istnieje potrzeba opracowania prostych procedur obliczeniowych i uzupełnienia przepisów prawnych.

- Ocenę ścian zewnętrznych i ich złączy należy przeprowadzać według kryterium cieplnego przez wyznaczenie średniego współczynnika przenikania ciepła $U_{k,śr.}$ i kryterium wilgotnościowego związanego z możliwością występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody.
- Rodzaj, grubość i usytuowanie izolacji termicznej ma istotny wpływ na parametry cieplne oraz rozkład temperatur analizowanego złącza budowlanego.
- Odpowiednie ukształtowanie złącza przegrody zewnętrznej pozwala osiągnąć kilkakrotnie niższe wartości parametrów cieplnych (np. współczynnik Ψ) oraz obniżyć ryzyko występowania kondensacji powierzchniowej. Istotne znaczenie ma poprawne osadzenie stolarki okiennej.
- Kryterium dopuszczalności mostka cieplnego w przegrodzie należy sformułować podając wartość $\Psi_{i,\ max.}$ uwzględniając minimalizację strat ciepła w złączu oraz jednocześnie warunek niedopuszczenia na powierzchni wewnętrznej kondensacji pary wodnej, co autor zaproponował już w [33]. Stosowanie takiego kryterium wymaga opracowania szczegółowych katalogów mostków cieplnych.
- Przeprowadzone obliczenia wskazują, że pod względem strat ciepła (L_D, $U_{k,śr.}$, ΔU), bardziej korzystne jest stosowanie ścian warstwowych, z ciągłą warstwą izolacji termicznej niż stosowanie rozwiązań jednomateriałowych. Zastosowanie rozwiązań dwu i trójwarstwowych z izolacją cieplną od zewnątrz skutkuje także wyższymi temperaturami na wewnętrznej powierzchni przegrody niż w układach jednowarstwowych z betonu komórkowego.

Przedstawione w pracy ściany zewnętrzne i ich złącza nie wyczerpują wszystkich istniejących rozwiązań, jednak podane przykłady pozwalają sformułować ogólne wnioski dotyczące szeroko rozumianej efektywności cieplno-wilgotnościowej.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy Bydgoszcz (2) BIBLIOTEKA GŁÓWNA

BIBLIOGRAFIA

LITERATURA PRZEDMIOTOWA

1. Byrdy Cz.: Cepłochronne ściany budynków osłonowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999
2. Bogosłowski W. N.: Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1985
3. Domański R., Jaworski M., Redow M.: Wymiana ciepła. Warszawa 1992
4. Dylla A.: Fizyka budowli. Wydawnictwa Uczelniane ATR Bydgoszcz 1985
5. Dylla A.: Ochrona cieplna słabych miejsc w przegrodach budowlanych. Wydawnictwo ART Olsztyn 1988
6. Dylla A., Dylla A.: Jakość cieplna przegród budowlanych w świetle obowiązujących norm, materiały szkoleniowe. Toruń 2005
7. Dylla D.: Nowoczesne metody numeryczne w budowaniu katalogu mostków cieplnych w ścianach trójwarstwowych. Praca dyplomowa nr 6853, UTP, Bydgoszcz 2007
8. Hołownia P.: Wpływ termicznych mostków przestrzennych na kształtowanie parametrów cieplno-wilgotnościowych przegrody. Rozprawa doktorska. ATR Bydgoszcz 2006
9. Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J.: Fizyki budowli – wybrane zagadnienia. Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej 2000
10. Kisilewicz T., Królak E., Pieniążek Z.: Fizyka cieplna budowli. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999
11. Kołodziejczyk S.: Fizyka konstrukcji budowlanych. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Łódź 1962
12. Lugez J.: Budownictwo mieszkaniowe z elementów wielkopłytowych. Arkady Warszawa 1978
13. Laskowski L.: Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynku. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005
14. Płoński W., Pogorzelski J.A.: Fizyka budowli. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1976
15. Pogorzelski J.A., Awsksientjuk J.: Katalog mostków cieplnych. Wydawnictwo ITB Warszawa 2003
16. Pogorzelski J.A.: Fizyka cieplna budowli. Państwowe Wydawnictwa Naukowe Warszawa 1976
17. Pogorzelski J.A.: Nowe wymagania dotyczące ochrony cieplnej budynków. Prace ITB, nr 4(104), Warszawa 1997
18. Pogorzelski J.A.: Przewodnik po PN-EN ochrony cieplnej. Wydawnictwo ITB Warszawa 2003
19. Praca zbiorowa. Materiały pomocnicze do PN/91/B-02020 Ochrona cieplna budynków. Wydawnictwa ITB, Warszawa 1991
20. Praca zbiorowa pod kierunkiem prof. P. Klemma: Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli. Wydawnictwo Arkady Warszawa 2005
21. Praca zbiorowa pod redakcją D. Gawina i E. Koseckiej: Komputerowa fizyka budowli. Typowy rok meteorologiczny od symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach, Politechnika Łódzka, Łódź 2002
22. Rożek P.: Nowoczesne metody numeryczne w budowaniu katalogu mostków cieplnych w ścianach dwuwarstwowych. Praca dyplomowa nr 6855, UTP, Bydgoszcz 2007

23. Sadowski Z., Technologiczność prefabrykowanych konstrukcji żelbetowych. Warszawa, Arkady 1983
24. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979
25. Szurgot J.: Modelowanie numeryczne pól temperatur. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1992
26. Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2003
27. Wouters P., Schietecata J., Standaert P., Kasperkiewicz K. : Cieplno-wilgotnościowa ocena mostków cieplnych. Wydawnictwo ITB Warszawa 2004
28. Żenczykowski W.: Budownictwo ogólne. Tom III Ochrona cieplna budynków. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1997
29. Żenczykowski W.: Budownictwo ogólne, tom IV, Izolacje i roboty wykończeniowe, Arkady, 1962

ARTYKUŁY

30. Bobociński A., Pogorzelski J.A.: Ściany nie oddychają. Materiały budowlane 3/2001
31. Durica P., Łakoci D.: External walls of the low energy Hauses. Czasopismo Techniczne z. 5-B/2006. Politechnika Krakowska 2006
32. Dylla A., Pawłowski K.: Wpływ ocieplenia narożników w ścianach zewnętrznych na imperfekcje w rozkładzie temperatur. Zeszyty Naukowe nr 235, Budownictwo i Inżynieria Środowiska 32, Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2001
33. Dylla A., Pawłowski K.: Uwagi na temat sposobu uwzględniania mostków cieplnych w obliczeniach współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych – artykuł dyskusyjny. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGODOM 2002. Politechnika Krakowska
34. Dylla A., Pawłowski K.: Ocena cieplno-wilgotnościowa jednomateriałowych narożników ścian zewnętrznych. Budownictwo ogólne. Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2003
35. Dylla A., Pawłowski K.: Kryteria analizy cieplno-wilgotnościowej i efektywności zewnętrznych przegród budowlanych. Inżynieria i Budownictwo 7/2005
36. Dylla A., Pawłowski K.: Współczynnik kształtu mostka cieplnego. Budownictwo ogólne. Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2005
37. Dylla A., Pawłowski K.: Wady w procedurze obliczania współczynnika przenikania ciepła. Czasopismo Techniczne – Budownictwo z. 1 – B/2007, zeszyt 4.Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2007
38. Geryło R.: Polska wersja komputerowego katalogu mostków cieplnych EUROKOBRA. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGODOM 2002. Politechnika Krakowska
39. Geryło R.: Jakość cieplna wybranych węzłów konstrukcyjnych w świetle wyników analiz numerycznych pola temperatury. Czasopismo Techniczne z. 5-B/2006. Politechnika Krakowska 2006
40. Ickiewicz I.: Certyfikacja energetyczna budynków na podstawie norm unijnych. Czasopismo Techniczne z. 5-B/2006. Politechnika Krakowska 2006

41. Kasperkiewicz K.: Wymagania dotyczące zapobiegania kondensacji pary wodnej i propozycje ich zmian. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGODOM 2002. Politechnika Krakowska
42. Kasperkiewicz K.: Ocena proponowanego w Polsce sposobu określania zintegrowanej charakterystyki energetycznej budynku. Materiały budowlane 4/2007
43. Kisielewicz T.: Mostki cieplne w budynkach. Materiały budowlane 1/2004
44. Ligęza w., Kisielewicz T.: Cieplno-wilgotnościowe skutki modyfikacji systemowych węzłów konstrukcyjnych. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGODOM 2002. Politechnika Krakowska
45. Panek A., Robakiewicz M., Jędrzejuk J.: Metody określania charakterystyki energetycznej budynków. Materiały budowlane 1/2006
46. Pawłowski K., Wesołowska M.: Potrzeba tworzenia kart katalogowych mostków cieplnych nowoczesnych systemów budowlanych. Czasopismo Techniczne z. 5-B/2006. Politechnika Krakowska 2006
47. Pogorzelski J.A., Awksientjuk J.: Przydatność katalogów mostków cieplnych w wersji „drukowanej. Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2003
48. Pogorzelski J.A., Awksientjuk J.: Wady cieplne budynków mieszkalnych na przykładzie jednej z ekspertyz. II Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Ogólne. ATR Bydgoszcz 2001
49. Pogorzelski J.A.: Aktualne potrzeby kodyfikacji ochrony cieplnej budynków. Budownictwo ogólne. Zagadnienia konstrukcyjne, materiałowe i cieplno-wilgotnościowe w budownictwie. Wydawnictwa Uczelniane ATR, Bydgoszcz 2003
50. Pogorzelski J.A.: Dyrektywa Europejska 2002/91/EC. Materiały budowlane 1/2004
51. Pogorzelski J.A.: Fizyka budowli. Cykl artykułów prezentowanych w Materiałach Budowlanych 6/2004 – 9/2005
52. Pogorzelski J.A.: Geneza nowych wymagań ochrony cieplnej budynków. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGO-DO.M 98 Politechnika Krakowska 1998
53. Pogorzelski J.A.: Komentarz do Dyrektywy 2002/91/EC. Materiały budowlane 1/2004
54. Pogorzelski J.A.: Kryterium kondesacji pary wodnej na powierzchni przegród wg PN-EN ISO 13788. II Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Ogólne. ATR Bydgoszcz
55. Pogorzelski J.A.: O mostkach cieplnych w przegrodach. Materiały budowlane 1/2007
56. Pogorzelski J.A., Sarosiek W.: Kto się boi wdrożenia w Polsce Dyrektywy 2002/91/WE?. Materiały budowlane 1/2007
57. Rogalski P.: Certyfikacja energetyczna budynków – obowiązkowa od stycznia 2009 r. Czasopismo Izolacje 11,12/2007
58. Rudczyk-Malijewska E., Święcicki A.: Wpływ mostków cieplnych na termoizolacyjność przegród budowlanych. Materiały budowlane 1/2007

59. Sarosiek W., Rudczyk-Malijewska E.: Mostki termiczne – „projektowanie i wykonawstwo". IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Problemy projektowania, realizacji i eksploatacji budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię ENERGODOM 98.Politechnika Krakowska 1998
60. Sas-Micuń A.: System oceny energetycznej budynków w Polsce. Materiały budowlane 2/2005
61. Sas-Micuń A.: System oceny energetycznej budynków – proponowane rozwiązania prawne. Materiały budowlane 1/2006
62. Szczechowiak E.: Efektywność energetyczna budynków. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2006
63. Wesołowska M., Hołownia P., Pawłowski K.: Zagrożenia rozwojem grzybów pleśniowych na jednowarstwowych ścianach ścianach z betonu komórkowego. Ochrona przed korozją 10s/a/2003, Wydawnictwo Sigma
64. Wouters P., Schietecat J., Standaert P.: Practical guide for the hygrothermal evolution of thermal bridges, a SAVE-KOPRACTICE-project document, 2003
65. Żurawski J.: Czy jest nam potrzebne wdrożenie dyrektywy 2002/91/WE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD)?. Czasopismo Izolacje 11,12/2007

AKTY PRAWNE

66. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r., nr 75, poz. 690, Dz. U. z 2003 r., nr 33, poz. 270, Dz. U. z 2004 r. nr 109, poz. 1156)
67. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego (Dz. U. z 2003r. nr 120, poz. 1133)
68. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie przeprowadzenia szkolenia oraz egzaminu dla osób ubiegających się o uprawnienie do sporządzania świadectwa charakterystyki energetycznej budynku, lokalu mieszkalnego oraz części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową (Dz. U. z 2008 r., nr 17, poz. 104)
69. Rozporządzenie Ministra Transportu i Budownictwa w sprawie zakresu i formy świadectwa energetycznego budynku oraz lokalu mieszkalnego – projekt
70. Ustawa Prawo budowlane (Dz. U. z 2006 r., nr 156,poz. 1118, Dz. U. z 2007 r., nr 88, poz. 587, Dz. U. z 2007 r., nr 99, poz. 665, Dz. U. z 2007 r., nr 127, poz. 880, Dz. U. z 2007 r., nr 191, poz. 1373)

POLSKIE NORMY

71. PN-B-02025:2001 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego
72. PN-B-03406:1994 Ogrzewnictwo. Obliczenie zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń o kubaturze do 600 m^3
73. PN-EN 1946 – 1:2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Kryteria wspólne
74. PN-EN 1946 – 2: 2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Pomiary metodą osłoniętej płyty grzejnej

75. PN-EN 1946 – 3:2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Pomiary metodą czujnika strumienia cieplnego
76. PN-EN 1946 – 4:2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Pomiary metodami skrzynki grzejnej
77. PN-EN 1946 – 5:2000 Właściwości cieplne wyrobów i komponentów budowlanych. Szczegółowe kryteria oceny laboratoriów wykonujących pomiary właściwości związanych z transportem ciepła. Pomiary metodami aparatu rurowego
78. PN-EN 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe
79. PN-EN 12831:2006 Instalacje grzewcze w budynkach – Metoda obliczania obciążenia cieplnego
80. PN-EN 15217:2007 Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Metody przedstawienia energetycznych właściwości użytkowych i certyfikacji energetycznej budynków
81. PN-EN ISO 6946:2004 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania
82. PN-EN ISO 7345:1998 Izolacja cieplna. Wielkości fizyczne i definicje
83. PN-EN ISO 9346:1998 Izolacja cieplna. Wymiana masy; wielkości fizyczne definicje
84. PN-EN ISO 10211-1:2005/Ap1:2006 Mostki cieplne w budynkach. Strumień cieplny i temperatura powierzchni. Ogólne metody obliczania
85. PN-EN ISO 10211-2:2002 Mostki cieplne w budynkach. Obliczanie strumieni cieplny i temperatury powierzchni. Liniowe mostki cieplne
86. PN-EN ISO 10456:2004 Izolacja cieplna. Materiały i wyroby budowlane. Określenie deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych
87. PN-EN ISO 12572:2004 Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe materiałów i wyrobów budowlanych. Określenie właściwości związanych z transportem wilgoci
88. PN-EN ISO 13370:2001Cieplne właściwości użytkowe budynków. Wymiana ciepła przez grunt. Metoda obliczania
89. PN-EN ISO 13788: 2003 Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania
90. PN-EN ISO 13789:2001 Cieplne właściwości użytkowe budynków. Współczynnik strat ciepła przez przenikanie. Metoda obliczania
91. PN-EN ISO 13790:2006 Cieplne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii do ogrzewania
92. PN-EN ISO 14683:2001 Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne
93. PN-EN ISO 15927-1:2003 Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków. Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych. Część 1: Średnie miesięczne niezależnych parametrów meteorologicznych
94. PN-EN ISO 15927-4:2005 Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków. Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych. Część 4: Dane godzinowe do oceny rocznego zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia

95. PN-EN ISO 15927-5: 2004 Cieplno-wilgotnościowe właściwości użytkowe budynków. Obliczanie i prezentacja danych klimatycznych. Część 5: Dane do wyznaczania obliczeniowej mocy cieplnej systemu ogrzewania
96. PN-57/B-02405 Współczynnik przenikania ciepła k dla przegród budowlanych. Wartości liczbowe
97. PN-74/B-03404 Współczynnik przenikania ciepła K dla przegród budowlanych
98. PN-78/B-03421 Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych na stały pobyt ludzi
99. PN-82/B-02020 Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia
100. PN-82/B-02403 Ogrzewnictwo. Temperatury obliczeniowe zewnętrzne
101. PN-83/B-03430 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania
102. PN-91/B-02020 Ochrona cieplna budynków. Wymagania i obliczenia

INSTRUKCJE, KATALOGI

103. Instrukcja programu komputerowego TRISCO
104. Praca zbiorowa – Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli. Katalog mostków cieplnych. (w przygotowaniu do druku)

ZAŁĄCZNIK

KATALOG MOSTKÓW CIEPLNYCH

CHARAKTERYSTYKA KART KATALOGOWYCH

Opracowanie „Katalog mostków cieplnych" zawiera karty katalogowe dla ścian zewnętrznych przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Wytypowane ścian zewnętrzne

Analizowane ściany zewnętrzne	Symbol przegrody
JEDNOWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 36,5 cm,	JI
DWUWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm,	D I
TRÓJWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm,	T I

Wytypowano mostki termiczne przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Wytypowane mostki termiczne

Mostek termiczny	symbol
Narożnik ścian zewnętrznych	**NR**
Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej	**SC**
Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec	**ST**
Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże	**ND**
Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem	**SN**
Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę	**OS**
Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik	**PO**

Każda karta katalogowa zawiera:

- nazwę i symbol mostka termicznego,
- układ warstw materiałowych węzła,
- parametry cieplne węzła: U_c, Φ, L^{2D}, Ψ_i, Ψ_{i1}. Ψ_{iO}, Ψ_{iG}, Ψ_{iD},
- temperatury minimalne w węźle,
- temperatura minimalna $\theta_{si,min.}$, oraz czynnik temperaturowy $f_{R,si.}$ określone według normy PN-EN ISO 13788,
- rysunki: układ materiałów w węźle, straty ciepła (linie strumieni cieplnych – adiabaty), rozkład temperatur w węźle (izotermy).

W katalogu mostków cieplnych stosowane są następujące skróty i symbole:

$\mathbf{d_i}$	grubość warstwy przegrody	[m]
$\mathbf{U_c}$	współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej bez uwzględniania liniowych mostków cieplnych	[W/(m²·K)]
$\boldsymbol{\lambda_i}$	współczynnik przewodności cieplnej materiału	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Phi}$	strumień cieplny	[W]
$\mathbf{L^{2D}}$	liniowy współczynnik sprężenia cieplnego	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Psi_i}$	liniowy współczynnik przenikania ciepła według wymiarów wewnętrznych	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Psi_{i1}}$	liniowy współczynnik przenikania ciepła według wymiarów wewnętrznych pojedynczej gałęzi mostka termicznego	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Psi_{iO}}$	liniowy współczynnik przenikania ciepła według wymiarów wewnętrznych związany z występowaniem stolarki okiennej	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Psi_{iD}}$	liniowy współczynnik przenikania ciepła według wymiarów wewnętrznych dolnej części mostka termicznego	[W/(m·K)]
$\boldsymbol{\Psi_{iG}}$	liniowy współczynnik przenikania ciepła według wymiarów wewnętrznych górnej części mostka termicznego	[W/(m·K)]
$\mathbf{t}$	temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody	[°C]

$\theta_{si,min.}$ temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody obliczona według PN-EN ISO 13788 [°C]

f_{Rsi} czynnik temperaturowy obliczony według PN-EN ISO 13788 [-]

Wyniki obliczeń przedstawione na kartach katalogowych otrzymano w wyniku obliczeń przy zastosowaniu programu komputerowego TRISCO przy następujących założeniach:

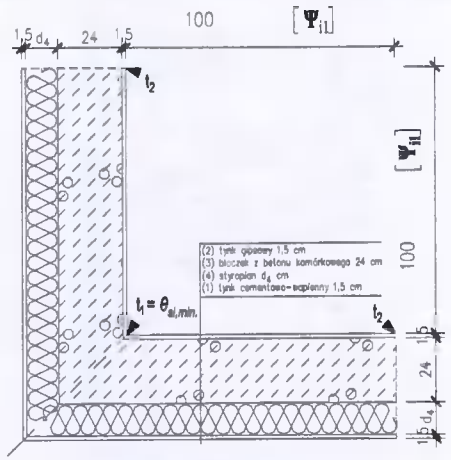
- temperatura powietrza zewnętrznego t_e = -20 °C (wg PN-82/B-02403 Ogrzewnictwo. Temperatury obliczeniowe zewnętrzne. , dla III strefy klimatycznej – miasto Toruń),
- temperatura powietrza wewnętrznego t_i = 20 °C (wg Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. nr 75, poz. 690, z późniejszymi zmianami, - dla pomieszczeń przeznaczonych do przebywania bez okryć zewnętrznych np. pokój mieszkalny),
- wartości współczynnika przejmowania ciepła w zależności od celu obliczeń i zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wybór warunków brzegowych w zależności od typu obliczeń

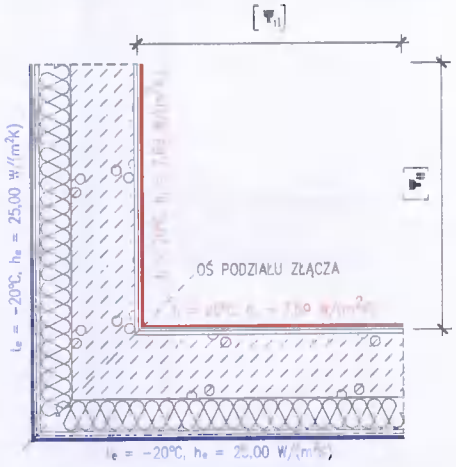
Cel obliczeń	
ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej	**obliczenia strumienia cieplnego**
• według PN-EN ISO 10211-1 na powierzchni wewnętrznej: - dla oszklenia: h_i = 7,69 W/(m^2·K), - dla wyższych części pomieszczeń: h_i = 4,00 W/(m^2·K), - dla niższych części pomieszczeń: h_i = 2,86 W/(m^2·K), - dla miejsc za meblami: h_i = 2,00 W/(m^2·K), na powierzchni zewnętrznej: h_e = 25 W/(m^2·K) • według PN-EN ISO 13788 na powierzchni wewnętrznej: - dla oszklenia i ram: h_i = 7,69 W/(m^2·K), - dla wszystkich innych elementów: h_i = 4,00 W/(m^2·K), na powierzchni zewnętrznej: h_e = 25 W/(m^2·K)	• według PN-EN ISO 6946 na powierzchni wewnętrznej: - przepływ w górę: h_i = 10,00 W/(m^2·K), - przepływ poziomy: h_i = 7,69 W/(m^2·K), - przepływ w dół: h_i = 5,88 W/(m^2·K), na powierzchni zewnętrznej: - h_e = 25 W/(m^2·K)

Poniżej przedstawiono praktyczne zastosowanie warunków brzegowych dla wybranych mostków cieplnych w zależności od typu obliczeń. Poza tym zaprezentowano proponowane podziały złączy i procedurę wyznaczania gałęziowych liniowych współczynników przenikania ciepła. Wszystkie wybrane mostki cieplne dotyczą ściany zewnętrznej dwuwarstwowej z betonu komórkowego (symbol przegrody: DI). Analogicznie postępuje się dla innych rozwiązań ścian zewnętrznych.

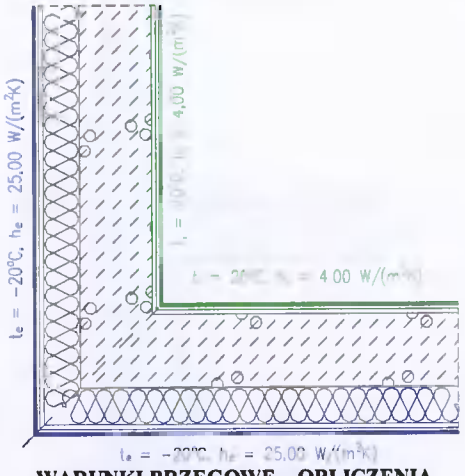
Tabela 4. Warunki brzegowe i proponowany podział złącza – narożnik ścian zewnętrznych: NR/DI



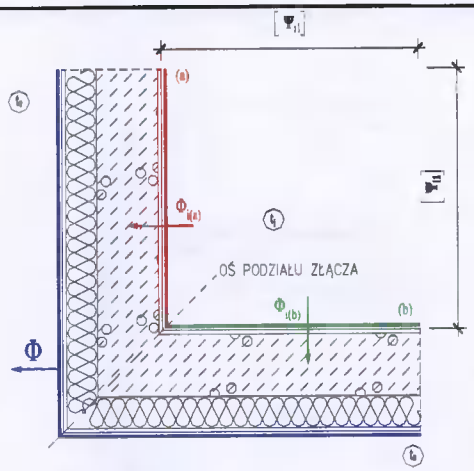
MODEL OBLICZENIOWY



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA STRUMIENIA CIEPLNEGO



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR



PROPONOWANY PODZIAŁ ZŁĄCZA

Przedstawione złącze tworzy gałęzie kształtujące dwa strumienie cieplne:

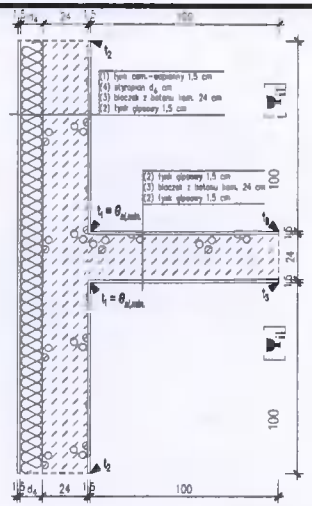
- pierwszy napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a): $\Phi_{i(a)}$,
- drugi napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (b): $\Phi_{i(b)}$,

$\Phi_{i(a)} + \Phi_{i(b)} = \Phi$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych

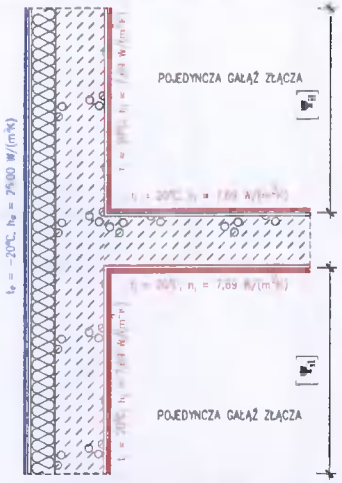
Wyznaczenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła części złącza: Ψ_{i1}.

W tym przypadku symetryczny podział złącza powoduje, że $\Phi_{i(a)}=\Phi_{i(b)}$. Wartość Ψ_{i1}, określono według zależności: $\Psi_{i1} = L^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, gdzie: L^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności: $L^{2D} = \dfrac{\Phi_{i(a,b)}}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}}$.

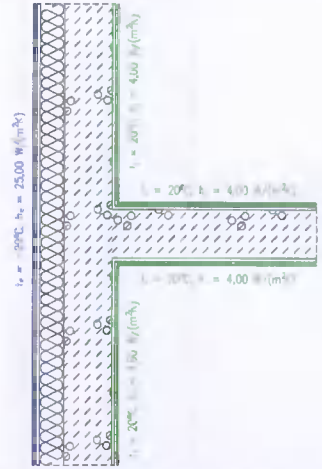
Tabela 5. Warunki brzegowe i proponowany podział złącza – połączenie ściany zewnętrznej z wewnętrzną: SC/DI



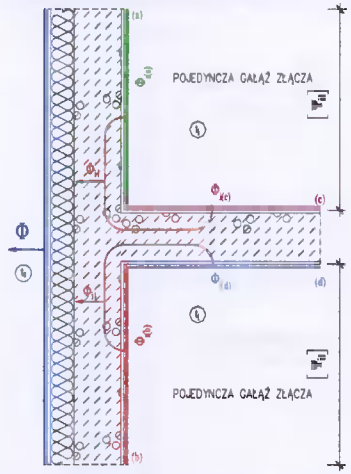
MODEL OBLICZENIOWY



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA STRUMIENIA CIEPLNEGO



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR



PROPONOWANY PODZIAŁ ZŁĄCZA

Przedstawione złącze tworzy gałęzie kształtujące dwa strumienie cieplne:

- pierwszy napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a)i (c): $\Phi_{i1} = \Phi_{i(a)} + \Phi_{i(c)}$
- drugi napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (b) i (d): $\Phi_{i1} = \Phi_{i(b)} + \Phi_{i(d)}$

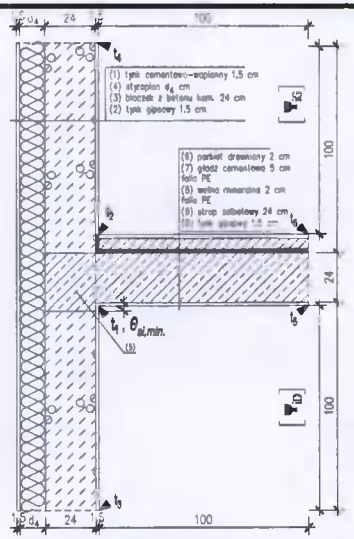
$\Phi_{i(a)} + \Phi_{i(c)} + \Phi_{i(b)} + \Phi_{i(d)} = \Phi$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych.

Wyznaczenie gałęziowych współczynników przenikania ciepła części złącza: Ψ_{i1}.

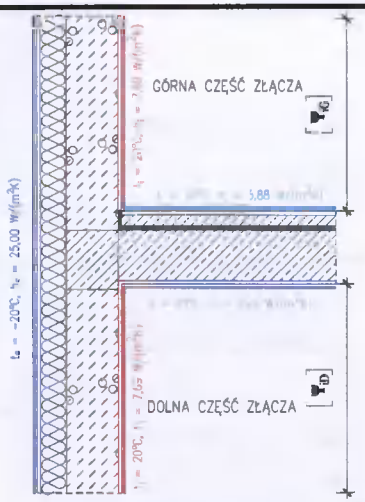
W tym przypadku symetryczny podział złącza powoduje, że $[\Phi_{i(a)} + \Phi_{i(c)}] = [\Phi_{i(b)} + \Phi_{i(d)}]$

Wartość Ψ_{i1}, określono według zależności: $\Psi_{i1} = L^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, gdzie: L^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności: $L^{2D} = \frac{\Phi_{i(a,b)}}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}}$.

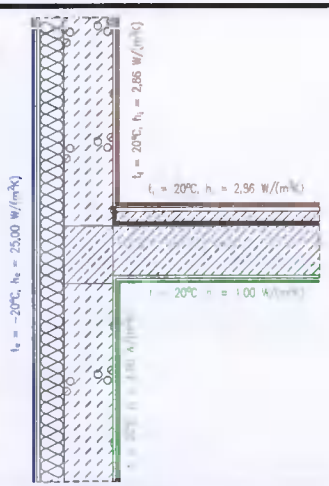
Tabela 6. Warunki brzegowe i proponowany podział złącza – połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI



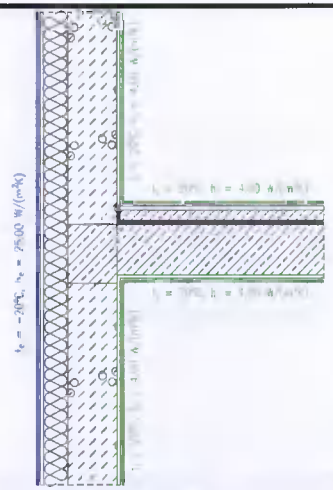
MODEL OBLICZENIOWY



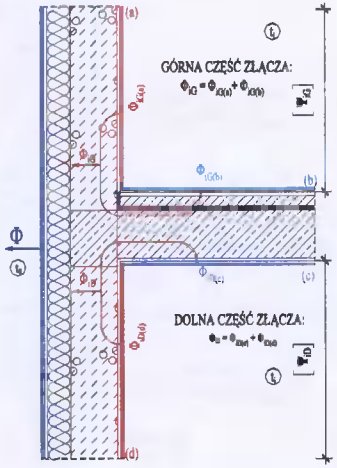
WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA STRUMIENIA CIEPLNEGO



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 10211-1



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 13788



PROPONOWANY PODZIAŁ ZŁĄCZA

Przedstawione złącze tworzy gałęzie kształtujące dwa różne strumienie cieplne:

- pierwszy (górna część złącza) napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a) oraz górną warstwę stropu (b), oznaczono $\Phi_{iG} = \Phi_{iG(a)} + \Phi_{iG(b)}$;
- drugi (dolna część złącza) napływa na dolną część stropu (c) oraz na powierzchnię przegrody zewnętrznej (d), oznaczono $\Phi_{iD} = \Phi_{iD(c)} + \Phi_{iD(d)}$.

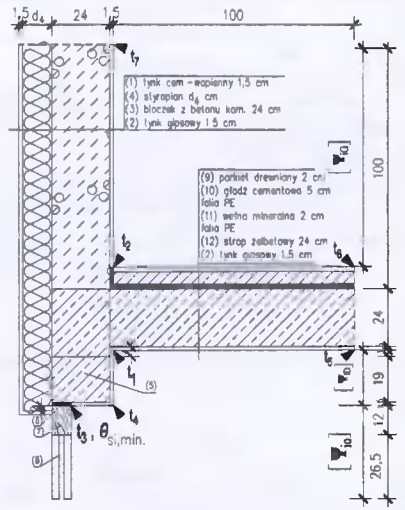
$\Phi_{iG} + \Phi_{iD} = \Phi$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych.

Wartości gałęziowych współczynników przenikania ciepła określono odpowiednio dla górnej części złącza (Ψ_{iG}) na podstawie Φ_{iG}, dla dolnej części złącza (Ψ_{iD}) na podstawie Φ_{iD}.

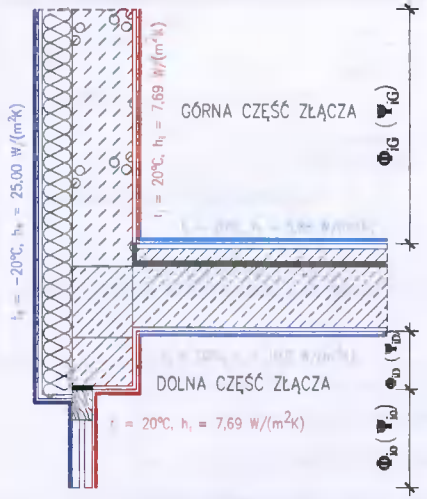
Wartość Ψ_{iG}, Ψ_{iD} określono według zależności: $\Psi_{iG} = L_G^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, $\Psi_{iD} = L_D^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$

gdzie: L^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności: $L^{2D} = \frac{\Phi_{i(G,D)}}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}}$.

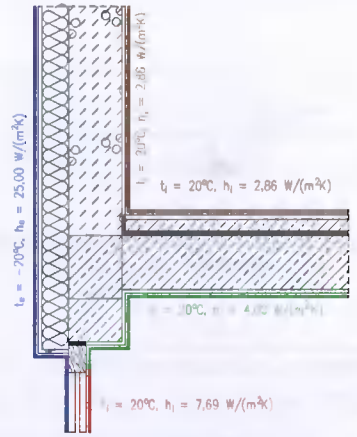
Tabela 7. Warunki brzegowe i proponowany podział złącza – połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/DI



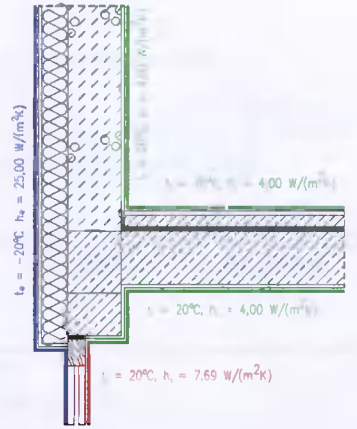
MODEL OBLICZENIOWY



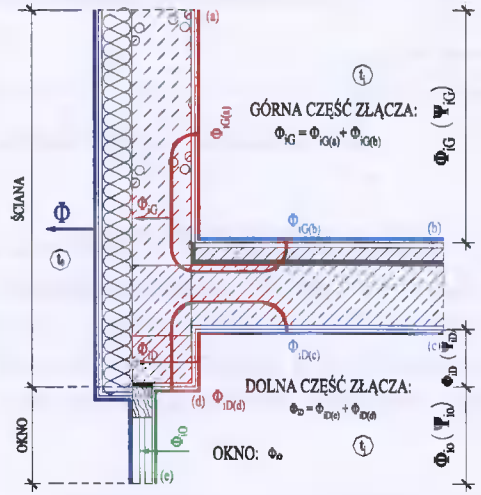
WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA STRUMIENIA CIEPLNEGO



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 10211-1



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 13788



PROPONOWANY PODZIAŁ ZŁĄCZA

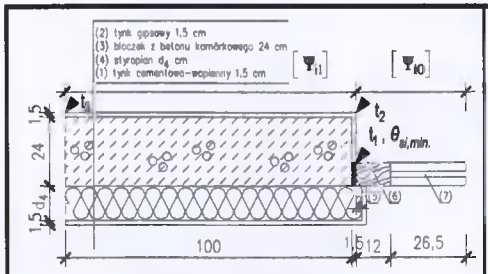
Przedstawione złącze tworzy gałęzie kształtujące trzy różne strumienie cieplne:

- pierwszy (górna część złącza) napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a) oraz górną warstwę stropu (b), oznaczono $\Phi_{iG} = \Phi_{iG(a)} + \Phi_{iG(b)}$;
- drugi (dolna część złącza) napływa na dolną część stropu (c) oraz na powierzchnię przegrody zewnętrznej (d), oznaczono $\Phi_{iD} = \Phi_{iD(c)} + \Phi_{iD(d)}$,
- trzeci (okno) napływa na powierzchnię okna (e), oznaczono Φ_{iO}.

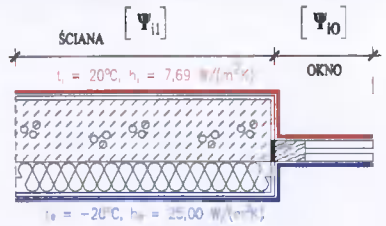
$\Phi_{iG} + \Phi_{iD} + \Phi_{iO} = \Phi$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych. Wartości gałęziowych liniowych współczynników przenikania ciepła określono odpowiednio dla górnej części złącza (Ψ_{iG}) na podstawie Φ_{iG}, dla dolnej części złącza (Ψ_{iD}) na podstawie Φ_{iD}, dla okna (Ψ_{iO}) Wartość Ψ_{iG}, Ψ_{iD}, Ψ_{iO} określono według zależności: $\Psi_{iG} = L_G^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, $\Psi_{iD} = L_D^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$,

$\Psi_{iO} = L_O^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$ gdzie: L^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności: $L^{2D} = \dfrac{\Phi_{i(G,D,O)}}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}}$.

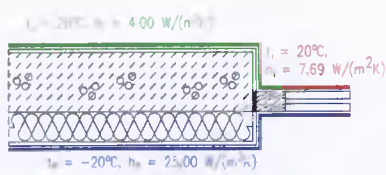
Tabela 8. Warunki brzegowe i proponowany podział złącza – połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI



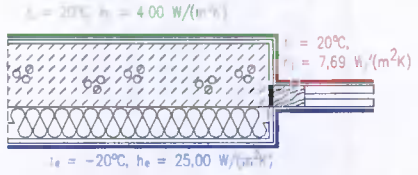
MODEL OBLICZENIOWY



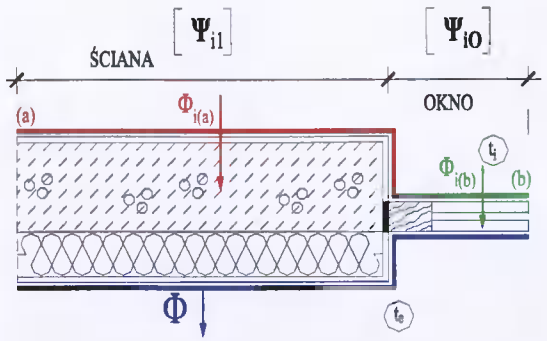
WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA STRUMIENIA CIEPLNEGO



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 10211-1



WARUNKI BRZEGOWE – OBLICZENIA ROZKŁADU TEMPERATUR wg PN-EN ISO 13788



PROPONOWANY PODZIAŁ ZŁĄCZA

Przedstawione złącze tworzy gałęzie kształtujące dwa różne strumienie cieplne:

- pierwszy (ścian) napływa na powierzchnię przegrody zewnętrznej (a), oznaczono $\Phi_{i(a)}$;
- drugi (okno) napływa na dolną okno (b), oznaczono $\Phi_{i(b)}$.

$\Phi_{i(a)} + \Phi_{i(b)} = \Phi$, gdzie Φ oznacza całkowity strumień ciepła płynący przez złącze w przyjętych granicach geometrycznych. Wartości liniowych współczynników przenikania ciepła określono dla ściany (Ψ_{i1}) na podstawie $\Phi_{i(a)}$, dla okna (Ψ_{iO}) na podstawie Φ_{iO}.

Wartość Ψ_{i1}, Ψ_{iO}, określono według zależności: $\Psi_{i1} = L_1^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, $\Psi_{iO} = L_O^{2D} - \sum U_i \cdot l_i$, gdzie: L^{2D} - liniowy współczynnik sprzężenia między dwoma środowiskami, obliczany z zależności: $L^{2D} = \dfrac{\Phi_{i(1,O)}}{l_i \cdot \Delta t_{i,e}}$.

Identyczne warunki brzegowe (tabela 8) przyjmowane są dla następujących mostków cieplnych: połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże (ND/DI), połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik (PO/DI). Dla tych mostków podobnie wyznacza się liniowe współczynniki przenikania ciepła dla ściany i okna.

Prezentowane warunki brzegowe i podziały złączy (tabela 4 – tabela 8) mają zastosowanie dla ścian jednowarstwowych i trójwarstwowych.

SPIS TREŚCI KART KATALOGOWYCH

RODZAJ ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ	SYMBOL	STR.
JEDNOWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 36,5 cm,	**JI**	10
DWUWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm,	**DI**	18
TRÓJWARSTWOWE: - bloczek z betonu komórkowego gr. 24 cm, izolacja cieplna gr. 10, 12, 15 cm, cegła klinkierowa gr. 12 cm,	**TI**	30

UKŁAD KART KATALOGOWYCH: ŚCIANA JEDNOWARSTWOWA – JI

Lista kart katalogowych:

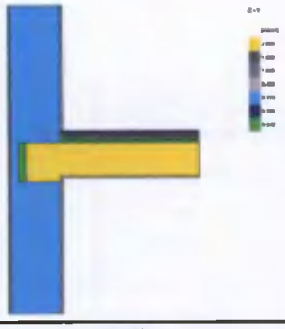
- Narożnik ścian zewnętrznych: NR/J, str. 11;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej: SC/J, str. 12;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/J, str. 13;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/J, str. 14;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: ND/J, str. 15;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/J, str. 16;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/J, str. 17;

WYTYPOWANE MOSTKI TERMICZNE – ŚCIANA JEDNOWARSTWOWA – JI

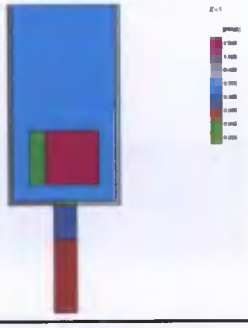
NR/J

SC/J

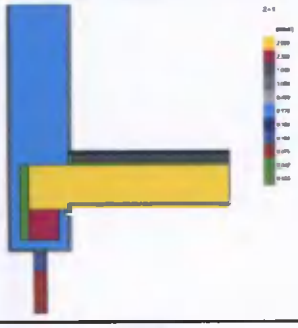
ST/J



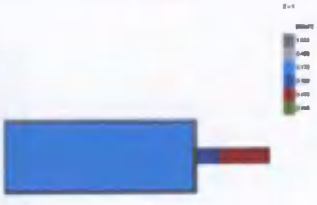
ND/J



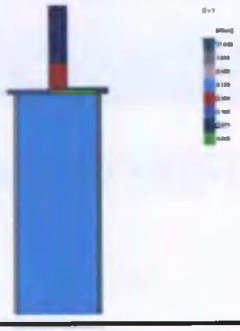
SN/J



OS/J



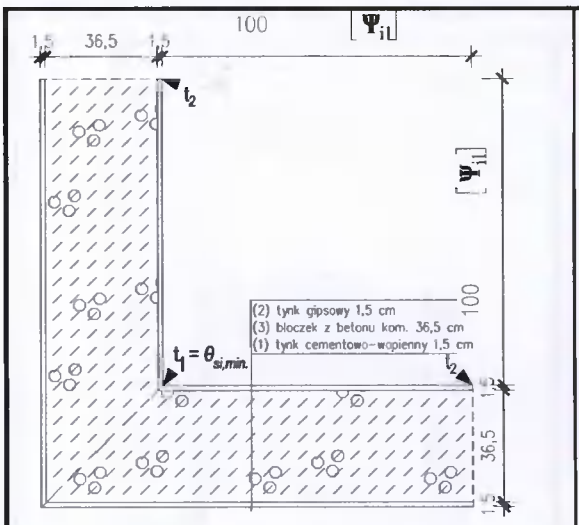
PO/J



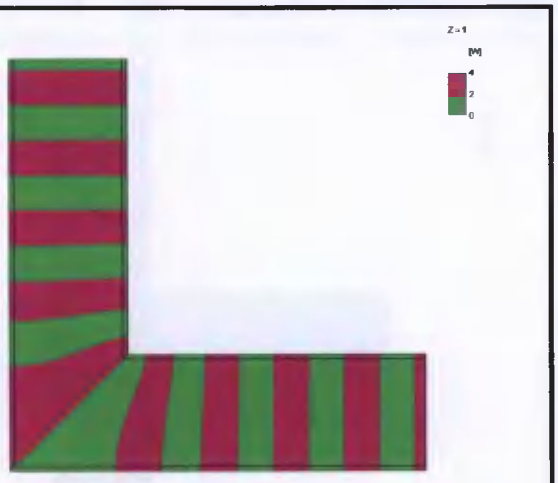
1. Narożnik ściany zewnętrznej: NR/J

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
x) wyniki parametrów dla $\lambda_3 = 0{,}15$ W/(m·K), $\lambda_3 = 0{,}17$ W/(m·K),			

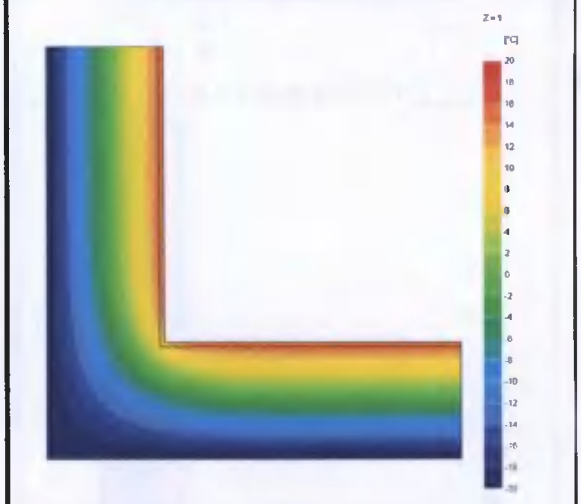
Parametry cieplne węzła			
λ_3	[W/(m·K)]	**0,15**	**0,17**
U_c	[W/(m²·K)]	0,377	0,422
Φ	[W]	33,253	37,228
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,831	0,931
Ψ_i	[W/(m·K]	0,078	0,087
Ψ_{i1}	[W/(m·K]	0,039	0,0435
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	12,35	11,67
t_2	[°C]	16,40	15,98
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	12,35	11,67
f_{Rsi}	[-]	0,809	0,792

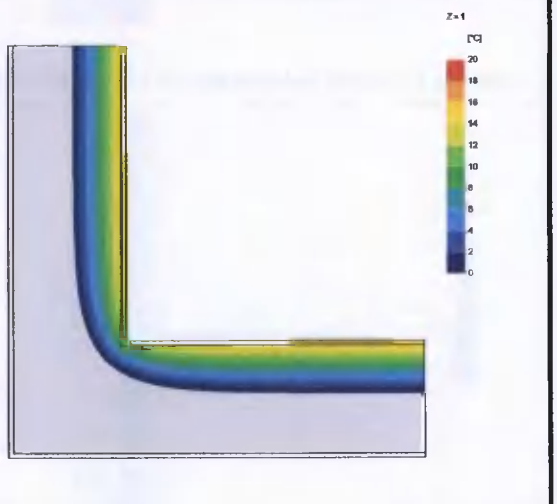


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)





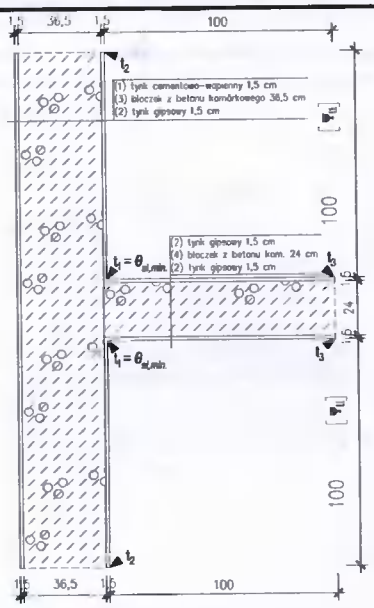
ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

2. Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/J

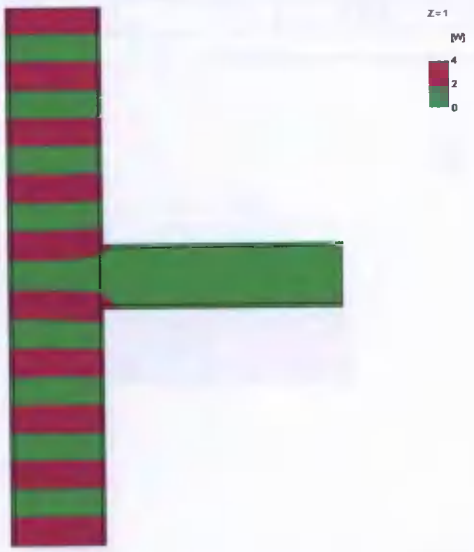
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Bloczek z betonu komórkowego	0,24	0,220

x) wyniki parametrów dla $\lambda_3 = 0{,}15$ W/(m·K), $\lambda_3 = 0{,}17$ W/(m·K),

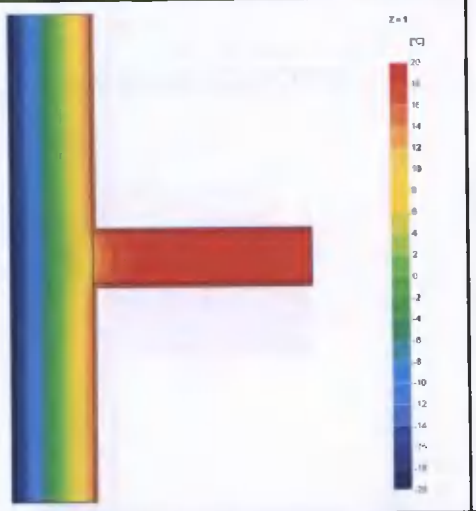
Parametry cieplne węzła			
λ_3	[W/(m·K)]	**0,15**	**0,17**
U_c	[W/(m²·K)]	0,377	0,422
Φ	[W]	33,854	37,909
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,846	0,948
Ψ_i	[W/(m·K)]	0,093	0,104
Ψ_{i1}	[W/(m·K]	0,0465	0,052
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)			
t_1	[°C]	15,87	15,42
t_2	[°C]	16,38	15,98
t_3	[°C]	20,00	20,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	15,87	15,42
f_{Rsi}	[-]	0,897	0,886

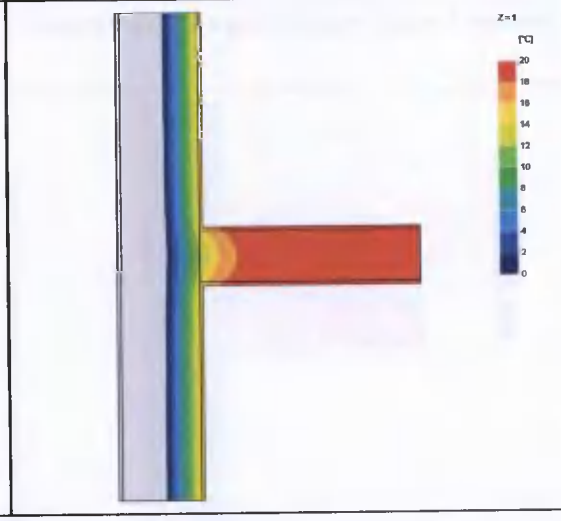


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



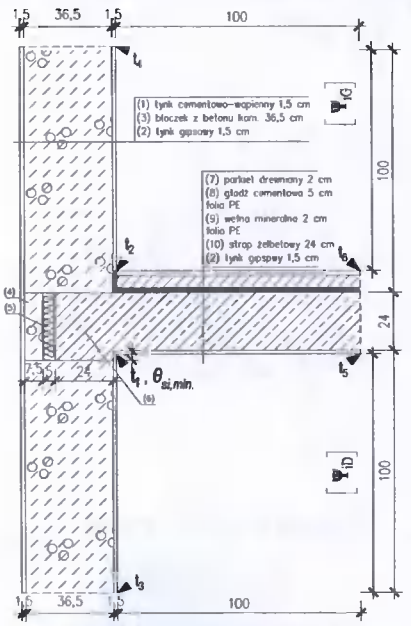


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

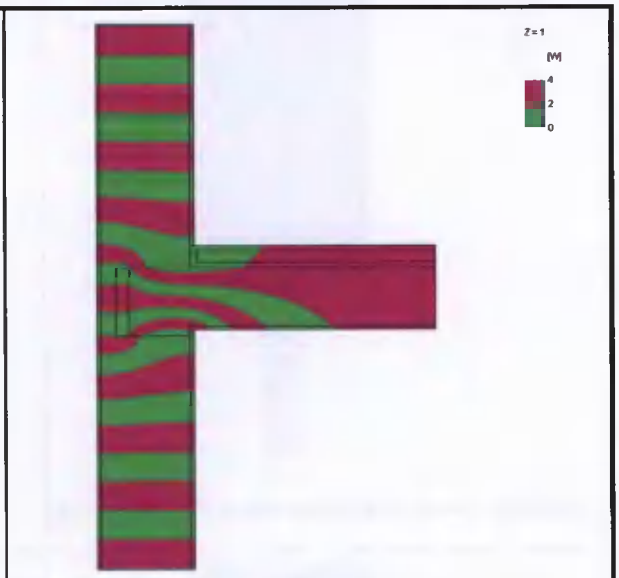
3. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/J

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Kształtka z bet. komórkowego	0,075	x)
5	Ocieplenie	0,040	0,042
6	Wieniec żelbetowy	0,250	2,500
7	Parkiet drewniany	0,020	0,016
8	Gładź cementowa	0,050	1,000
9	Wełna mineralna	0,020	0,042
10	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla $\lambda_{3,4}$ = 0,15 W/(m·K), $\lambda_{3,4}$ = 0,17 W/(m·K),			

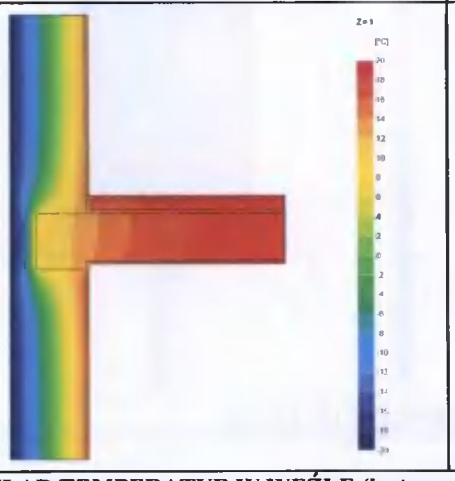
Parametry cieplne węzła			
$\lambda_{3,4}$	[W/(m·K)]	0,15	0,17
U_c	[W/(m^2·K]	0,377	0,422
Φ	[W]	38,257	42,252
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,956	1,056
Ψ_i	[W/(m·K]	0,240	0,255
Ψ_{iG}	[W/(m·K]	0,037	0,040
Ψ_{iD}	[W/(m·K)]	0,203	0,215
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	14,38	14,03
t_2	[°C]	16,20	15,80
t_3	[°C]	16,40	15,99
t_4	[°C]	15,14	14,61
t_5	[°C]	19,24	19,19
t_6	[°C]	19,62	19,60
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	14,47	14,13
f_{Rsi}	[-]	0,862	0,853

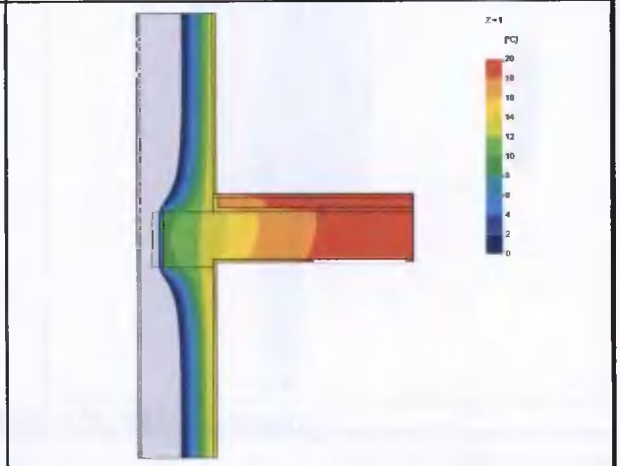


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



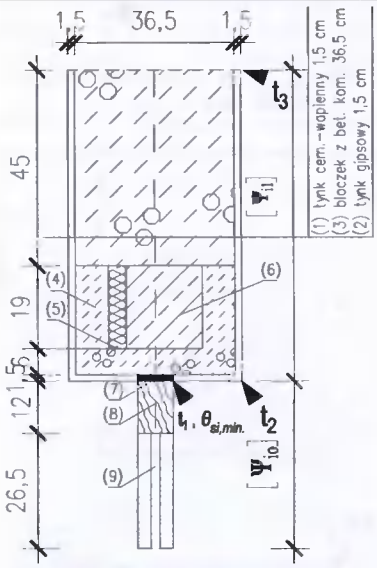


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

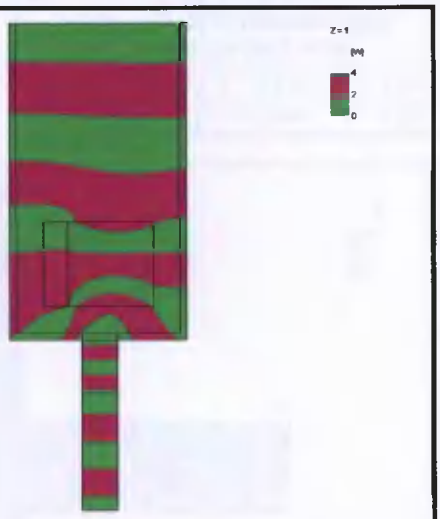
4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/J

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Kształtka z bet. komórkowego	0,075	x)
5	Ocieplenie	0,040	0,042
6	Nadproże żelbetowe	0,190	2,500
7	Pianka montażowa	0,015	0,035
8	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
9	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla $\lambda_{3,4}$ = 0,15 W/(m·K), $\lambda_{3,4}$ = 0,17 W/(m·K),			

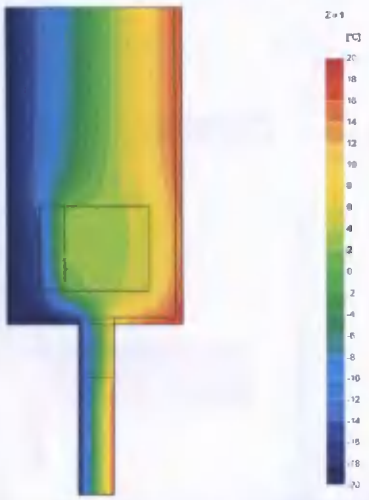
Parametry cieplne węzła			
$\lambda_{3,4}$	[W/(m·K)]	0,15	0,17
U_c	[W/(m²·K)]	0,377	0,422
Φ	[W]	31,103	32,599
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,778	0,815
Ψ_i	[W/(m·K]	0,108	0,119
Ψ_{i1}	[W/(m·K]	0,118	0,129
Ψ_{iO}	[W/(m·K]	-0,010	-0,010
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e = -20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	10,10	9,83
t_2	[°C]	17,81	17,59
t_3	[°C]	16,44	16,03
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	12,46	12,20
f_{Rsi}	[-]	0,812	0,805

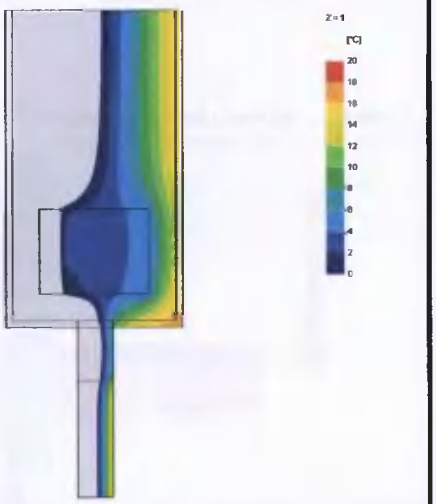


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)





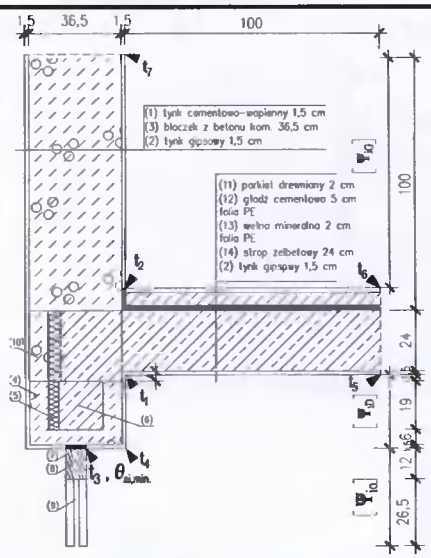
ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/J

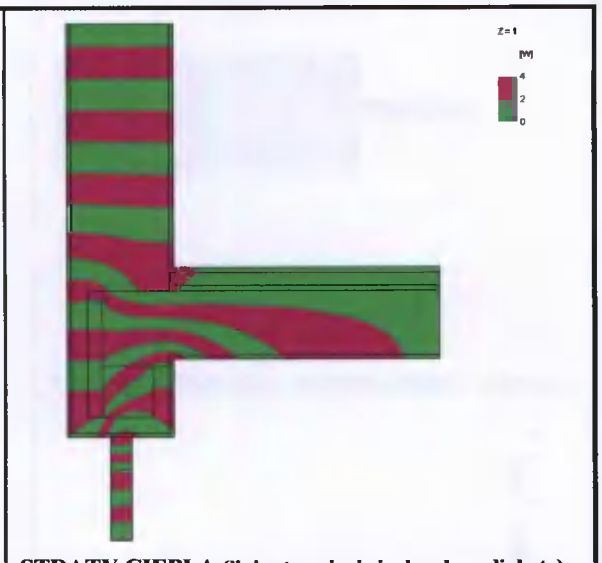
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Kształtka z bet. komórkowego	0,075	x)
5	Ocieplenie	0,040	0,042
6	Nadproże żelbetowe	0,250	2,500
7	Pianka montażowa	0,015	0,035
8	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
9	Zestaw szybowy	0,080	0,075
10	Kształtka z bet. komórkowego	0,075	x)
11	Parkiet drewniany	0,020	0,160
12	Gładź cementowa	0,050	1,000
13	Wełna mineralna	0,020	0,042
14	Strop żelbetowy	0,240	2,500

x) wyniki parametrów dla $\lambda_{3,4,10} = 0{,}15$ W/(m·K), $\lambda_{3,4,10} = 0{,}17$ W/(m·K),

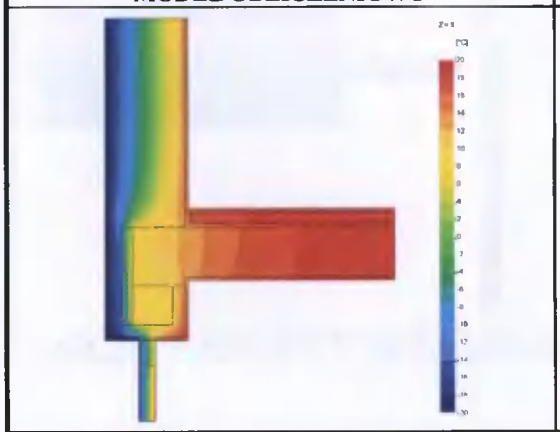
Parametry cieplne węzła			
$\lambda_{3,4,10}$	[W/(m·K)]	**0,15**	**0,17**
U_c	[W/(m²·K]	0,377	0,422
Φ	[W]	46,997	49,688
L^{2D}	[W/(m·K)]	1,175	1,242
Ψ_i	[W/(m·K]	0,320	0,340
Ψ_{iG}	[W/(m·K]	0,043	0,045
Ψ_{iD}	[W/(m·K]	0,289	0,309
Ψ_{iO}	[W/(m·K]	-0,014	-0,014
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	13,68	13,44
t_2	[°C]	16,02	15,65
t_3	[°C]	11,64	11,39
t_4	[°C]	18,52	18,34
t_5	[°C]	19,17	19,13
t_6	[°C]	19,59	19,57
t_7	[°C]	15,14	14,60
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	13,73	13,49
f_{Rsi}	[-]	0,843	0,837

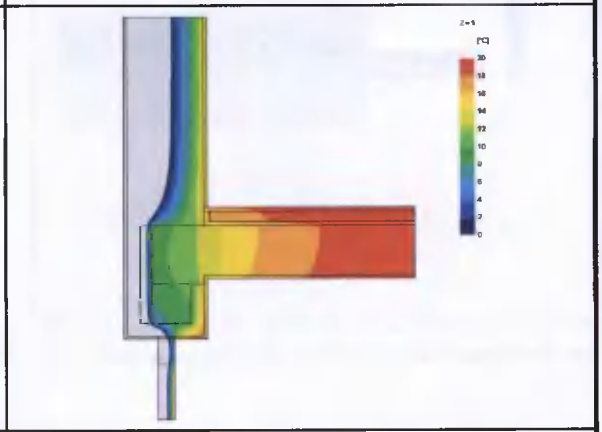


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



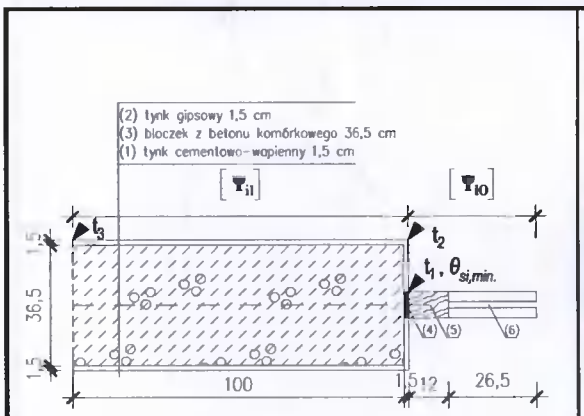


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

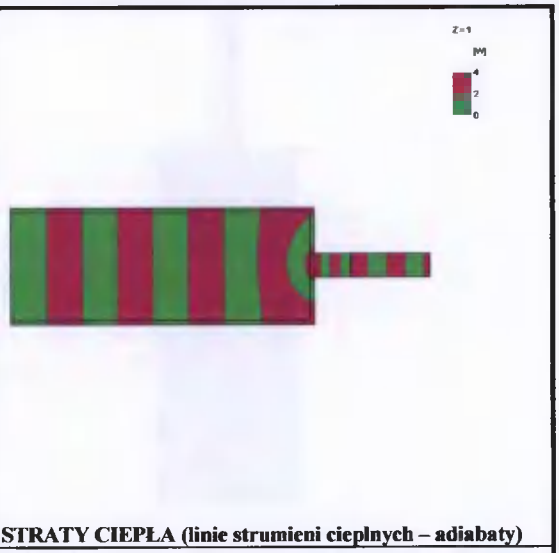
6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/J

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Pianka montażowa	0,015	0,035
5	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
6	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla λ_3 = **0,15** W/(m·K), λ_3 = **0,17** W/(m·K),			

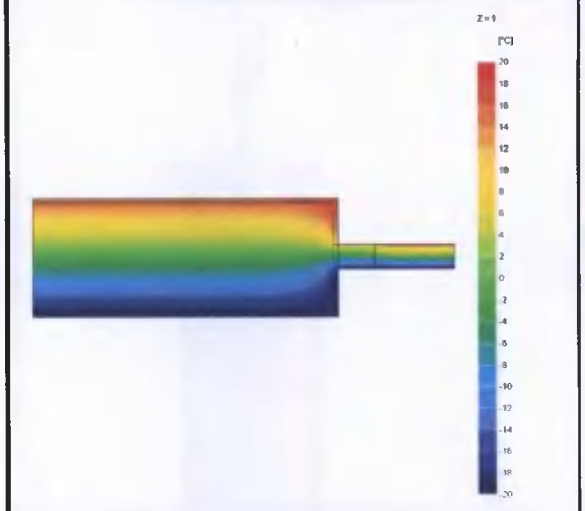
Parametry cieplne węzła			
λ_3	[W/(m·K)]	**0,15**	**0,17**
U_c	[W/(m²·K)]	0,377	0,422
Φ	[W]	32,705	34,695
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,818	0,867
Ψ_i	[W/(m·K]	0,042	0,047
Ψ_{il}	[W/(m·K]	0,065	0,070
Ψ_{iO}	[W/(m·K]	-0,023	-0,023
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e = -20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	10,10	9,79
t_2	[°C]	18,60	18,42
t_3	[°C]	16,39	15,98
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	12,55	12,25
f_{Rsi}	[-]	0,814	0,806

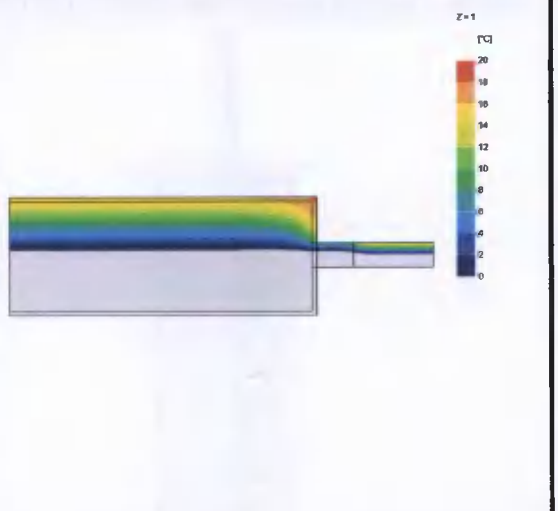


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



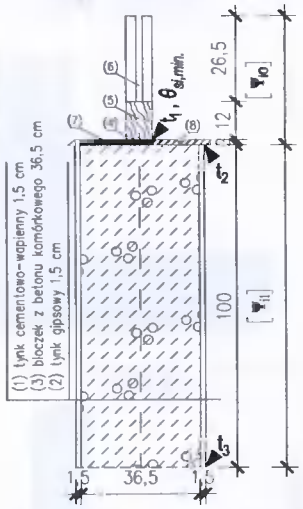


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

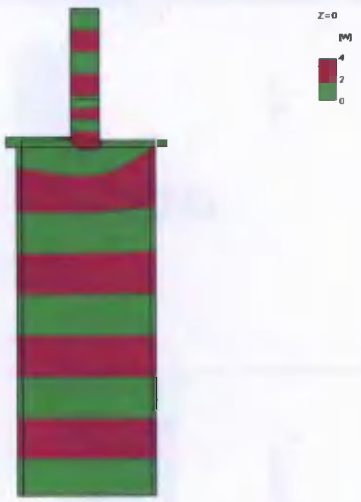
7. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/J

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,365	x)
4	Pianka montażowa	0,015	0,035
5	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
6	Zestaw szybowy	0,080	0,075
7	Parapet zewnętrzny	0,005	17,00
8	Parapet wewnętrzny	0,020	0,160
x) wyniki parametrów dla λ_3 = 0,15 W/(m·K), λ_3 = 0,17 W/(m·K),			

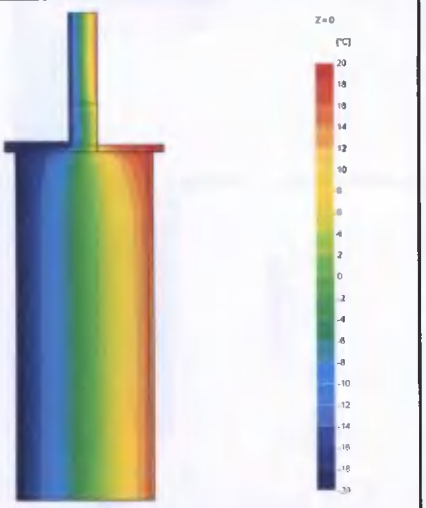
Parametry cieplne węzła			
λ_3	[W/(m·K)]	0,15	0,17
U_c	[W/(m²·K)]	0,377	0,422
Φ	[W]	31,956	33,851
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,799	0,846
Ψ_i	[W/(m·K]	0,026	0,028
Ψ_{i1}	[W/(m·K]	0,054	0,055
Ψ_{iO}	[W/(m·K]	-0,023	-0,023
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy t_e = –20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1	[°C]	10,00	9,84
t_2	[°C]	18,81	19,14
t_3	[°C]	16,39	15,98
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$	[°C]	12,96	12,81
f_{Rsi}	[-]	0,824	0,820

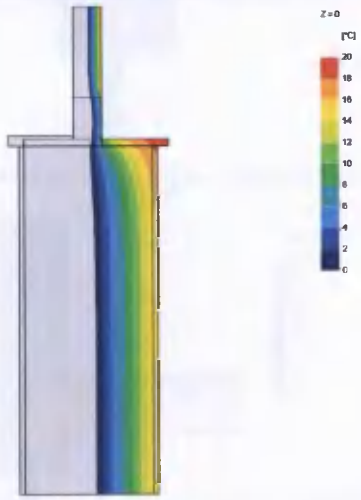


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)





ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

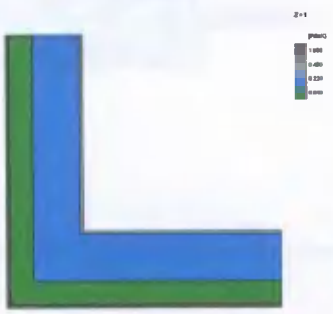
UKŁAD KART KATALOGOWYCH: ŚCIANA DWUWARSTWOWA – DI

Lista kart katalogowych:

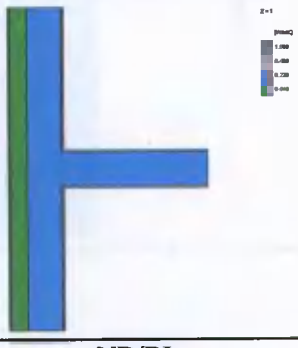
- Narożnik ścian zewnętrznych: NR/DI, str. 20;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej: SC/DI, str. 21;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI, str. 22;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/DI, str. 23;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): ND/DI_a, str. 24;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: ND/DI, str. 25;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): ND/DI_a, str. 26;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę : OS/DI, str. 27;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): OS/DI_a, str. 28;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/DI, str. 29;

WYTYPOWANE MOSTKI TERMICZNE – ŚCIANA DWUWARSTWOWA – DI

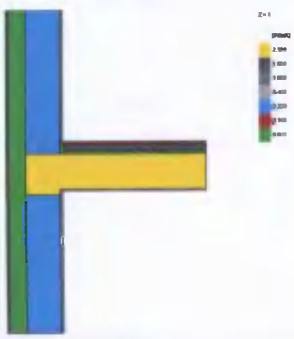
NR/DI



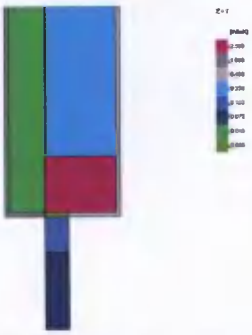
SC/DI



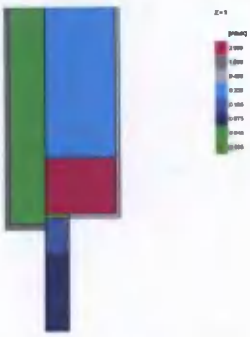
ST/DI



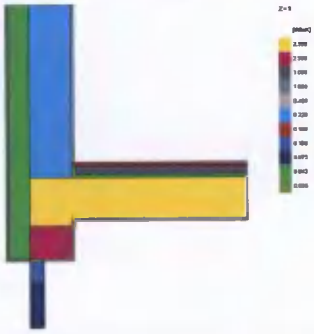
ND/DI



ND/DI_a

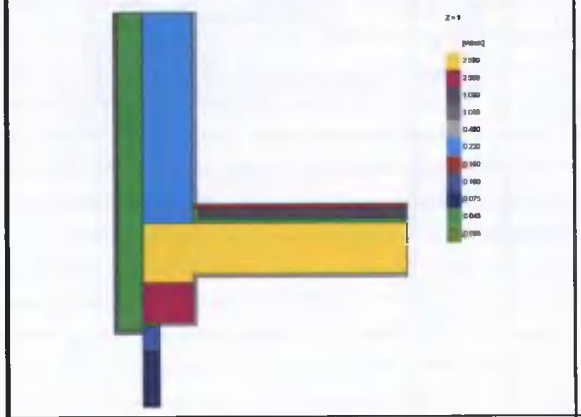


SN/DI

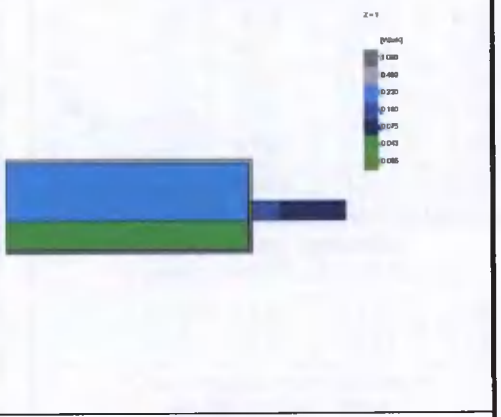


WYTYPOWANE MOSTKI TERMICZNE – ŚCIANA DWUWARSTWOWA – DI

SN/DI$_a$

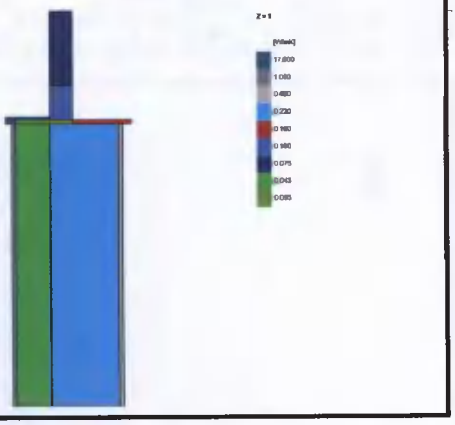


OS/DI



OS/DI$_a$

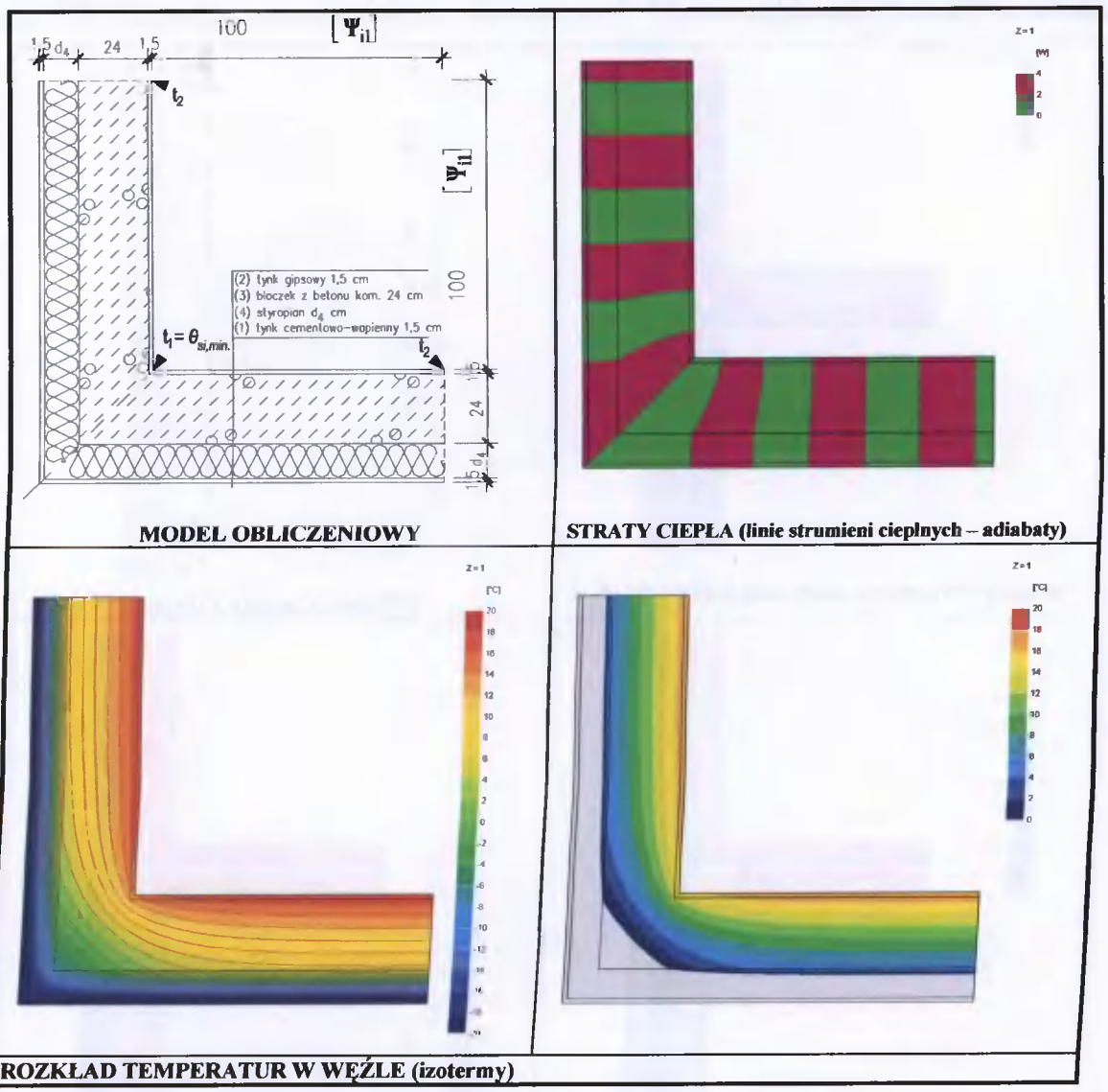
PO/DI



1. Narożnik ściany zewnętrznej: **NR/DI**

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

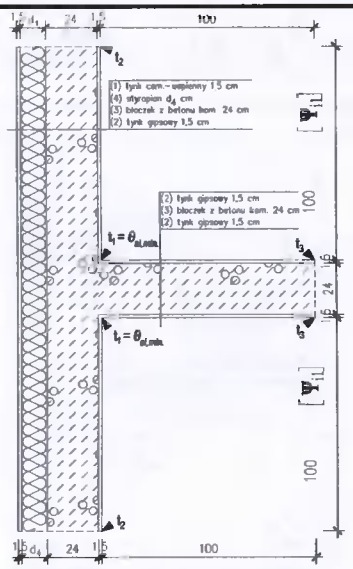
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	25,495	22,838	19,785
L^{2D} [W/(m·K)]	0,643	0,571	0,495
Ψ_i [W/(m·K]	0,088	0,084	0,078
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,044	0,042	0,039
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = –20 °C, t_i = 20 °C)			
$t_1 = t_{NR}$ [°C]	13,83	14,35	14,98
t_2 [°C]	17,33	17,62	17,96
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,83	14,35	14,98
f_{Rsi} [-]	0,846	0,859	0,875



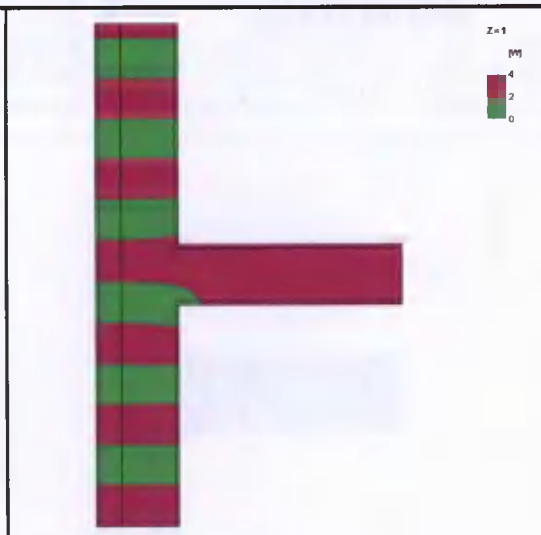
2. Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/DI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

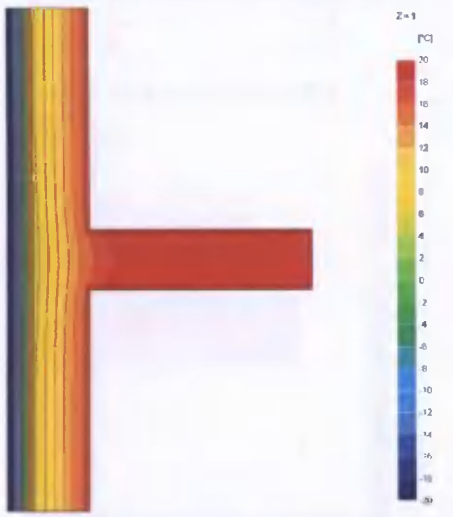
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	24,783	21,991	18,812
L^{2D} [W/(m·K)]	0,620	0,550	0,470
Ψ_i [W/(m·K)]	0,070	0,062	0,054
Ψ_{i1} [W/(m·K)]	0,035	0,031	0,027
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = -20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	16,96	17,29	17,67
t_2 [°C]	17,34	17,63	17,97
t_3 [°C]	20,00	20,00	20,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	16,96	17,63	17,97
f_{Rsi} [-]	0,924	0,941	0,949

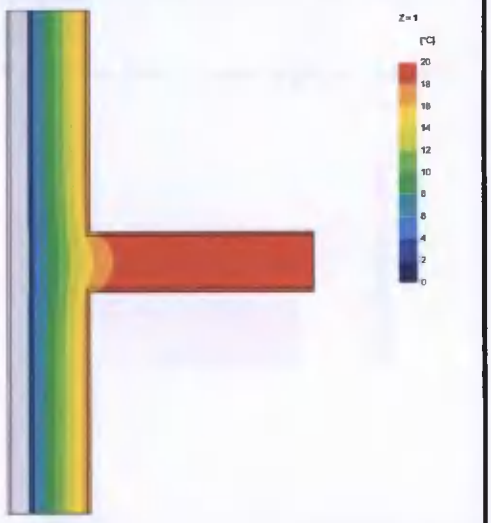


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



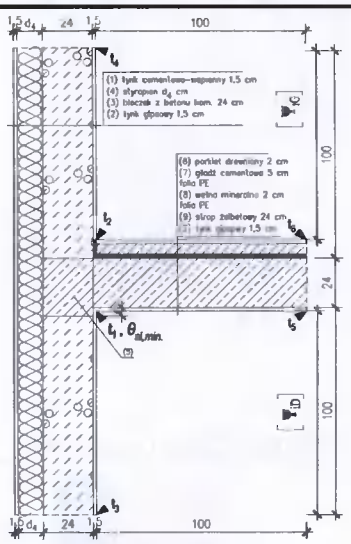


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

3. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/DI

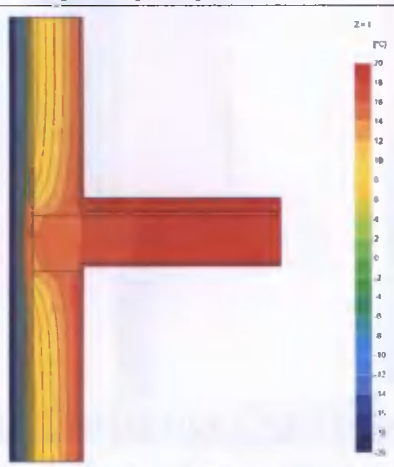
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Parkiet drewniany	0,020	0,160
7	Gładź cementowa	0,050	1,000
8	Wełna mineralna	0,020	0,043
9	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

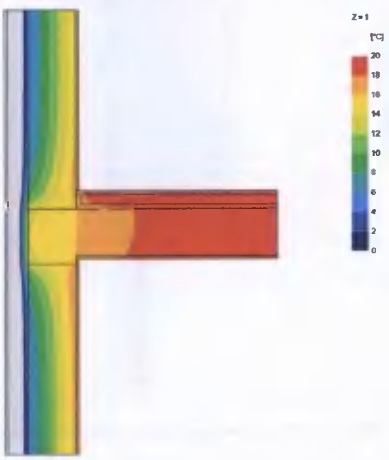
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	26,400	23,200	19,630
L^{2D}[W/(m·K)]	0,660	0,580	0,491
Ψ_i [W/(m·K]	0,136	0,116	0,095
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,021	0,018	0,014
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,115	0,098	0,081
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	16,48	16,93	17,43
t_2 [°C]	17,32	17,65	18,02
t_3 [°C]	17,35	17,64	17,98
t_4 [°C]	16,39	16,78	17,23
t_5 [°C]	19,53	19,59	19,66
t_6 [°C]	19,77	19,80	19,83
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	16,56	17,01	17,49
f_{Rsi} [-]	0,914	0,925	0,937



MODEL OBLICZENIOWY

STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



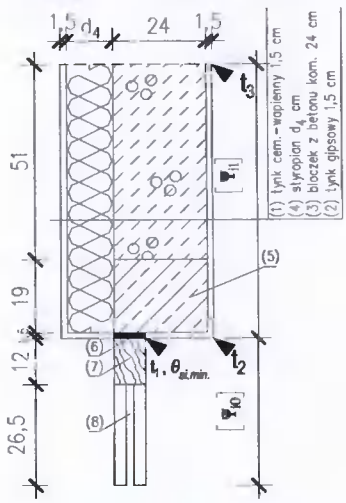


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

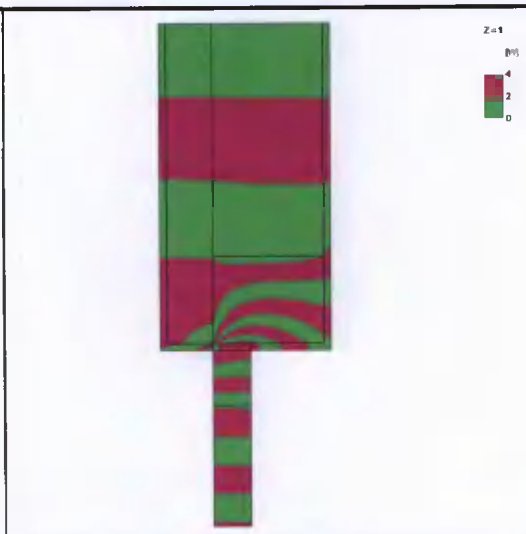
4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/DI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,24	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,08	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

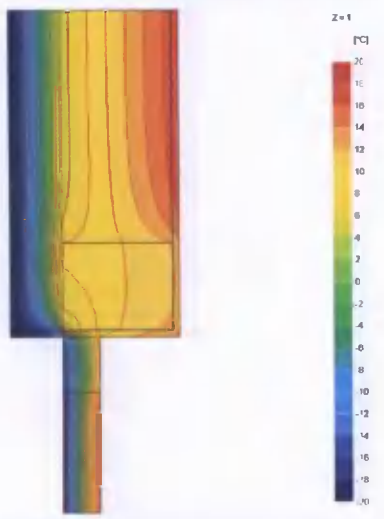
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	34,111	33,252	32,341
L^{2D} [W/(m·K)]	0,853	0,831	0,809
Ψ_i [W/(m·K)]	0,243	0,248	0,255
Ψ_{il} [W/(m·K)]	0,233	0,239	0,247
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,010	0,009	0,008
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	9,84	10,01	10,19
t_2 [°C]	14,63	14,77	14,91
t_3 [°C]	17,31	17,57	17,87
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	11,69	11,85	12,00
f_{Rsi} [-]	0,792	0,796	0,800

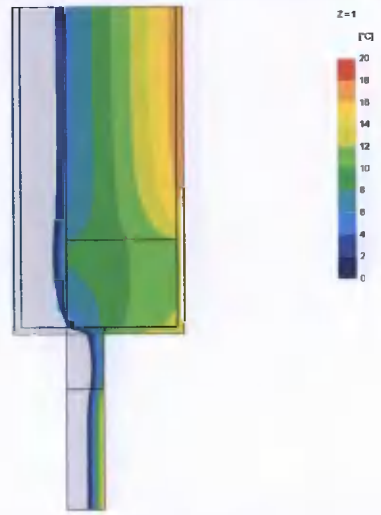


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



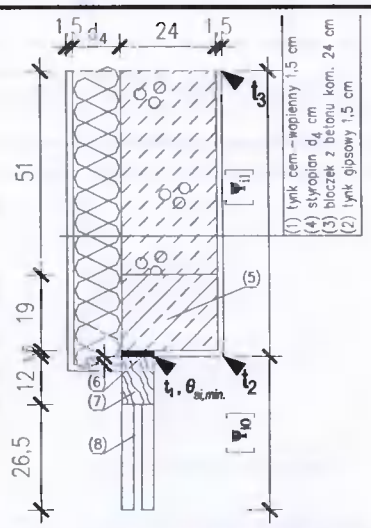


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

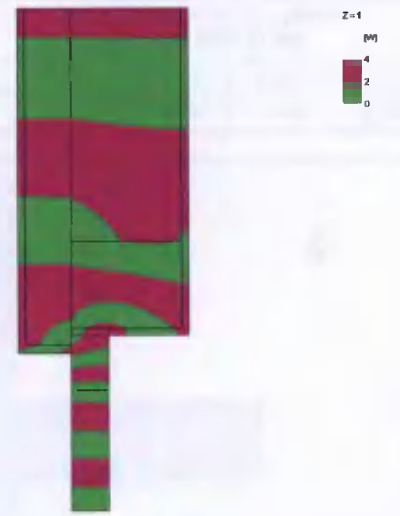
4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: **ND/DI$_a$**

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,24	2,500
6	Ościeżnica drewniana	0,08	0,16
7	Pianka montażowa	0,015	0,035
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

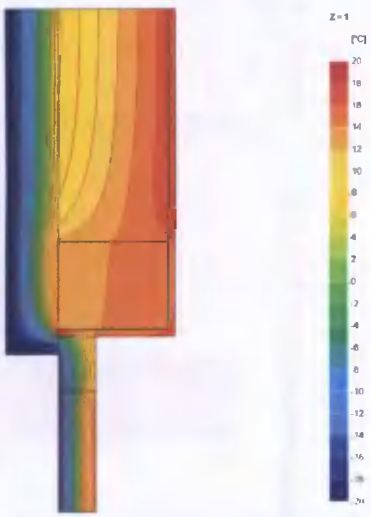
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m^2·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	26,415	25,377	24,279
L^{2D} [W/(m·K)]	0,660	0,634	0,607
Ψ_i [W/(m·K]	0,080	0,082	0,086
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,067	0,069	0,073
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,013	0,013	0,013
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = –20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	13,59	13,86	14,13
t_2 [°C]	16,98	17,19	17,40
t_3 [°C]	17,46	17,74	18,05
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	14,96	15,20	15,43
f_{Rsi} [-]	0,874	0,880	0,886

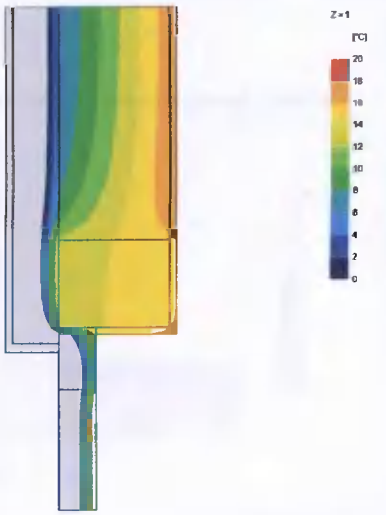


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



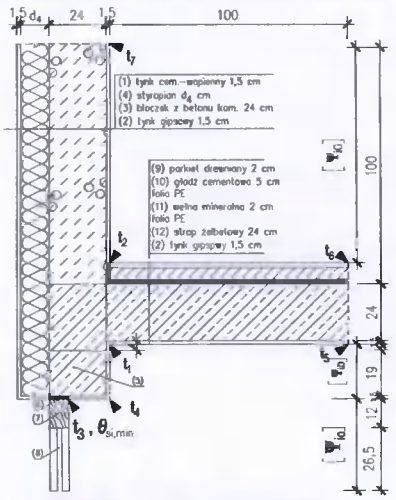


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

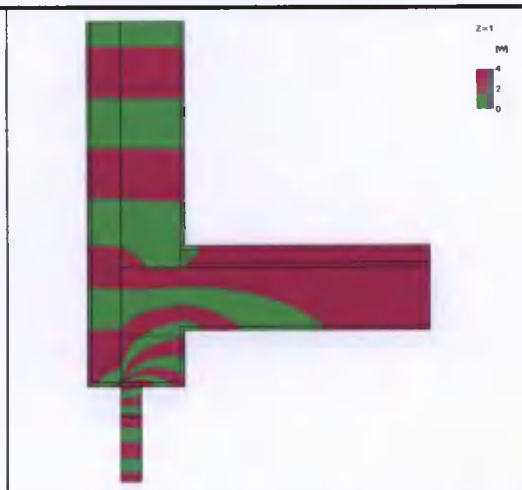
5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/DI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

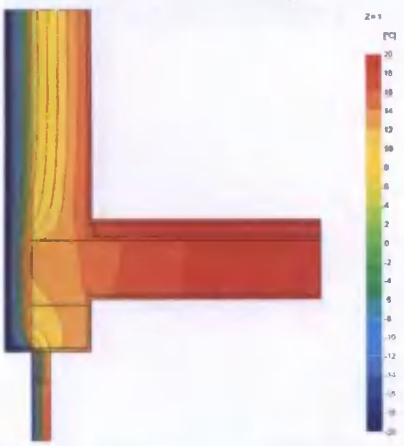
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	44,286	42,198	39,953
L^{2D}[W/(m·K)]	1,107	1,055	0,999
Ψ_i [W/(m·K]	0,377	0,365	0,355
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,034	0,032	0,032
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,339	0,331	0,321
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,004	0,002	0,002
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = −20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	14,67	15,03	15,32
t_2 [°C]	16,77	17,02	17,30
t_3 [°C]	11,12	11,33	11,53
t_4 [°C]	15,70	15,86	16,04
t_5 [°C]	19,35	19,39	19,47
t_6 [°C]	19,68	19,69	19,71
t_7 [°C]	16,38	16,77	17,22
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	12,79	12,97	13,15
f_{Rsi} [-]	0,820	0,824	0,829

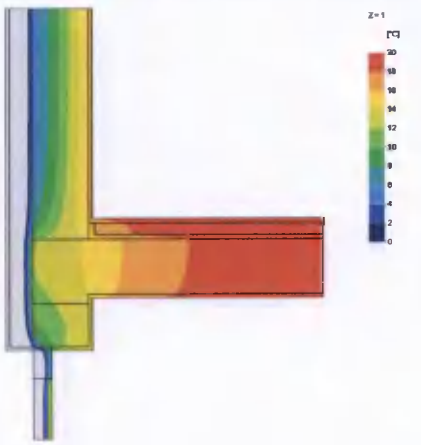


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



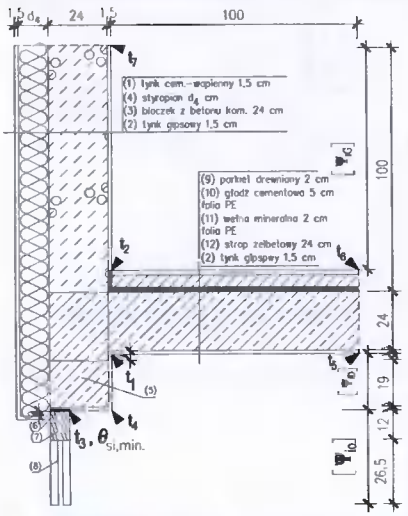


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

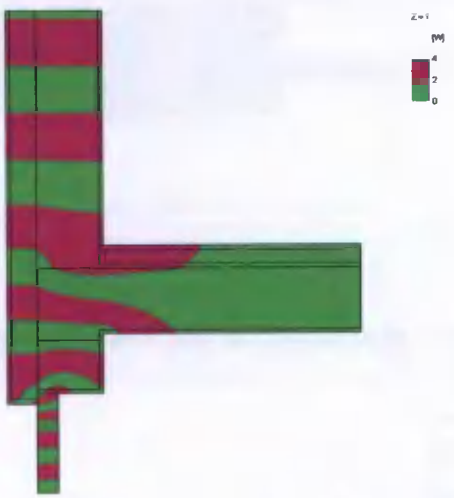
5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/DI$_a$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

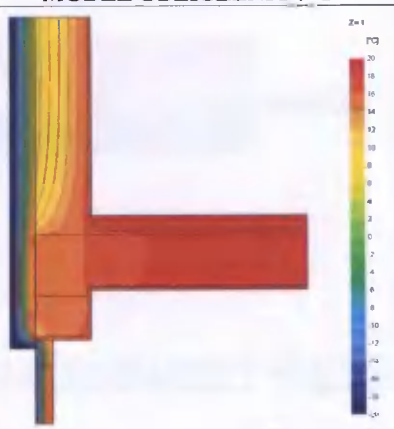
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m^2·K]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	36,110	33,826	31,377
L^{2D}[W/(m·K)]	0,903	0,847	0,784
Ψ_i [W/(m·K]	0,203	0,188	0,173
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,016	0,014	0,012
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,176	0,163	0,151
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,011	0,011	0,010
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	16,56	16,89	17,23
t_2 [°C]	17,40	17,68	17,99
t_3 [°C]	14,19	14,47	14,75
t_4 [°C]	17,44	17,66	17,88
t_5 [°C]	19,55	19,60	19,65
t_6 [°C]	19,78	19,80	19,82
t_7 [°C]	16,39	16,78	17,23
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,46	15,70	15,95
f_{Rsi} [-]	0,887	0,893	0,899

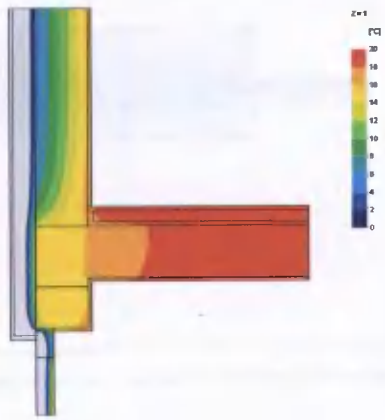


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



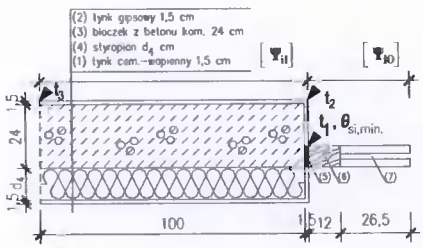


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI

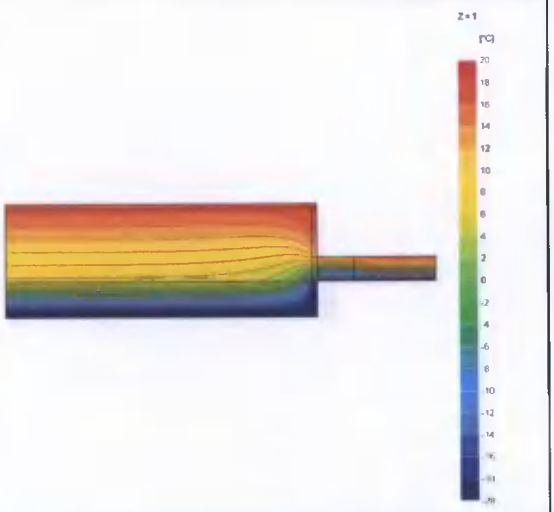
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,08	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

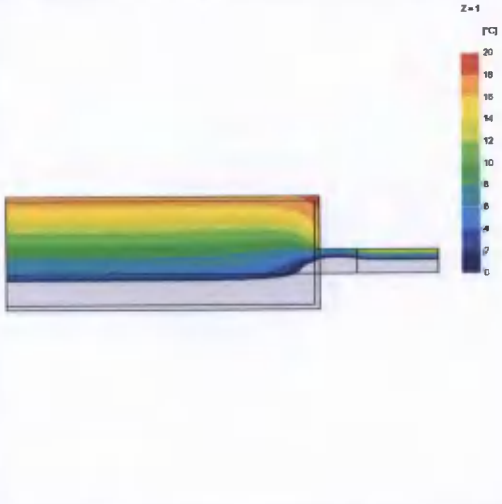
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	29,102	27,989	26,755
L^{2D} [W/(m·K)]	0,728	0,700	0,669
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,079	0,083	0,088
Ψ_{iO} [W/(m·K]	-0,024	-0,025	-0,025
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	10,76	10,90	11,04
t_2 [°C]	18,76	18,81	18,86
t_3 [°C]	17,34	17,63	17,96
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,01	13,12	13,24
f_{Rsi} [-]	0,825	0,828	0,831



MODEL OBLICZENIOWY

STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



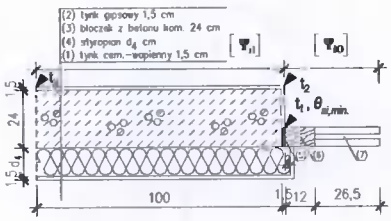


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

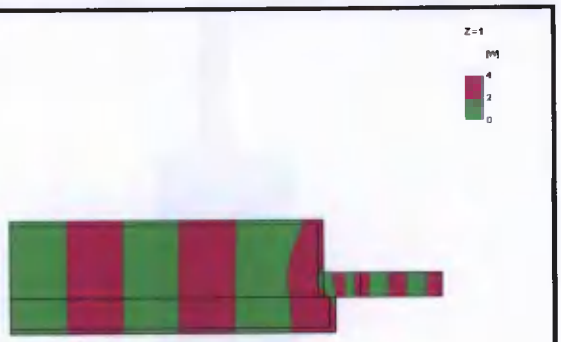
6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/DI$_a$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,08	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0,10$ m, $d_4 = 0,12$ m, $d_4 = 0,15$ m,			

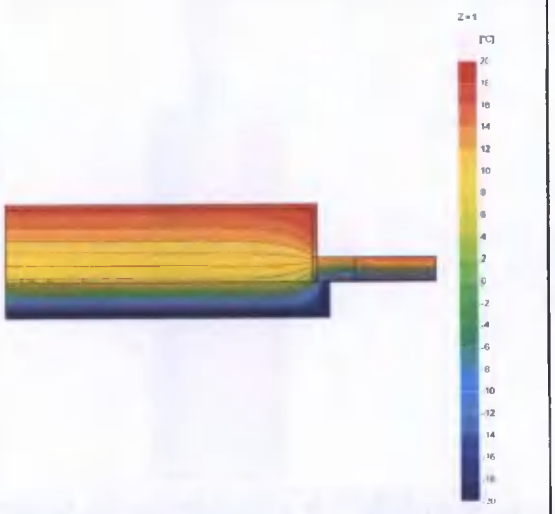
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	27,694	26,504	25,185
L^{2D} [W/(m·K)]	0,692	0,663	0,630
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,054	0,056	0,059
Ψ_{iO} [W/(m·K]	-0,006	-0,004	-0,003
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	12,19	12,39	12,61
t_2 [°C]	18,95	19,01	19,08
t_3 [°C]	17,34	17,63	17,96
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	14,21	14,37	14,55
f_{Rsi} [-]	0,855	0,859	0,864

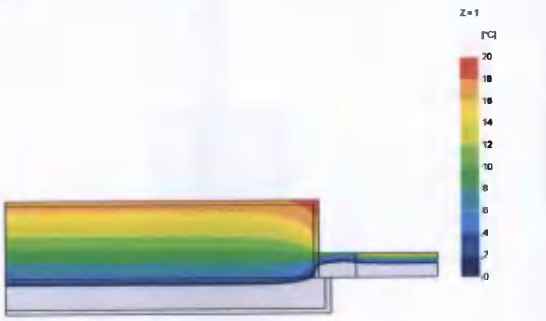


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



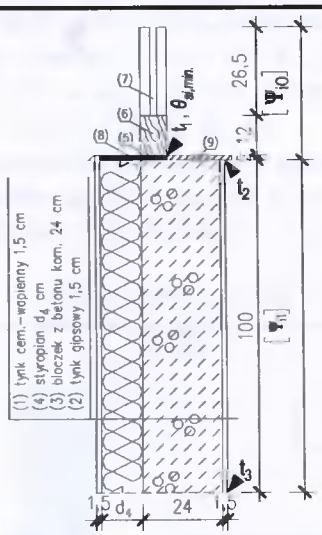


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

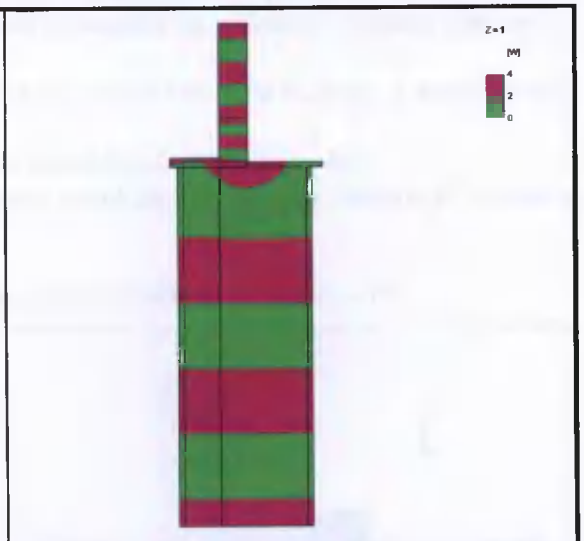
7. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/DI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Tynk cementowo-wapienny	0,015	1,000
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,24	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
8	Parapet zewnętrzny	0,005	17,00
9	Parapet wewnętrzny	0,020	0,160
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

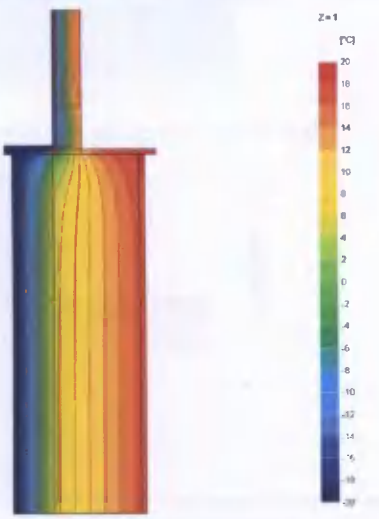
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,275	0,244	0,208
Φ [W]	28,284	27,135	25,859
L^{2D} [W/(m·K)]	0,707	0,678	0,646
Ψ_{i1} [W/(m·K)]	0,029	0,033	0,038
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,007	0,006	0,005
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = -20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	10,76	10,91	11,07
t_2 [°C]	19,80	19,81	19,82
t_3 [°C]	17,34	17,63	17,96
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,50	13,62	13,74
f_{Rsi} [-]	0,838	0,841	0,844

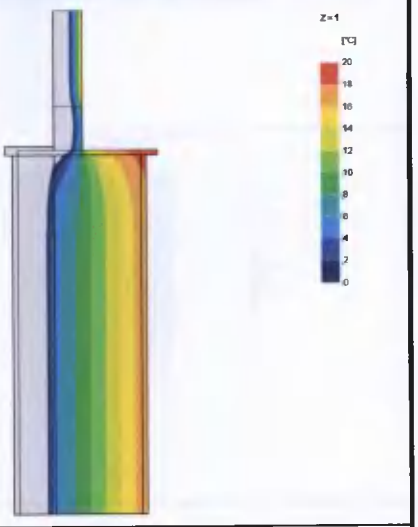


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)





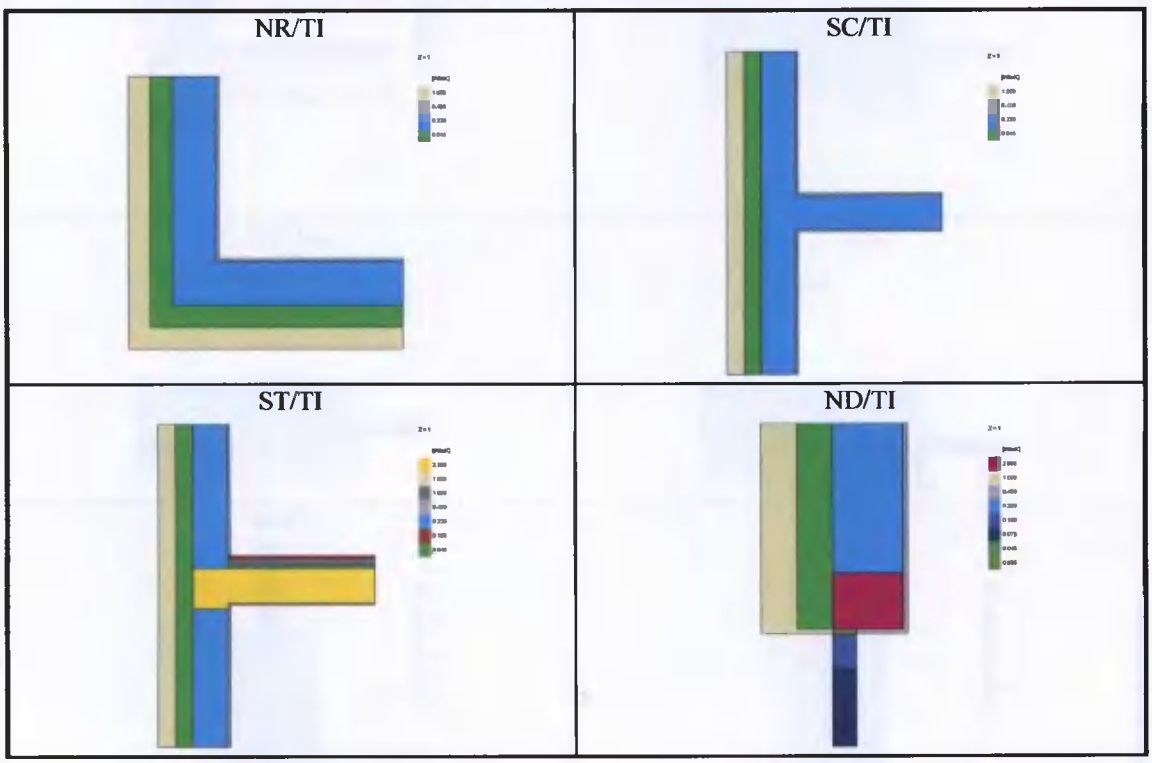
ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

UKŁAD KART KATALOGOWYCH: ŚCIANA TRÓJWARSTWOWA – TI

Lista kart katalogowych:

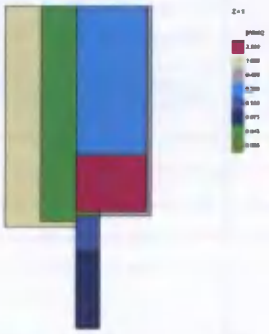
- Narożnik ścian zewnętrznych: NR/TI, str. 32;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrznej: SC/TI, str. 33;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/TI, str. 34;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/TI, str. 35;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): ND/TI_a, str. 36;
- Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże (stolarka okienna w warstwie izolacji cieplnej): ND/TI_b, str. 37;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: ND/TI, str. 38;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): ND/TI_a, str. 39;
- Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem (stolarka okienna w warstwie izolacji cieplnej): ND/TI_b, str. 40;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę : OS/TI, str. 41;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę (przedłużenie izolacji cieplnej na ościeże okienne – 2 cm): OS/TI_a, str. 42;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez ościeżnicę (stolarka okienna w warstwie izolacji cieplnej): OS/TI_b, str. 43;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/TI, str. 44;
- Połączenie ściany z oknem w przekroju przez podokiennik (stolarka okienna w warstwie izolacji cieplnej): PO/TI_b, str. 45.

WYTYPOWANE MOSTKI TERMICZNE – ŚCIANA TRÓJWARSTWOWA – TI

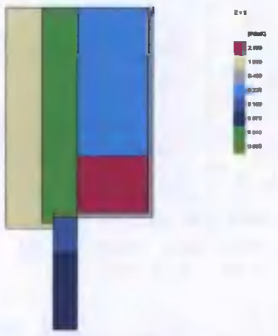


WYTYPOWANE MOSTKI TERMICZNE – ŚCIANA TRÓJWARSTWOWA – TI

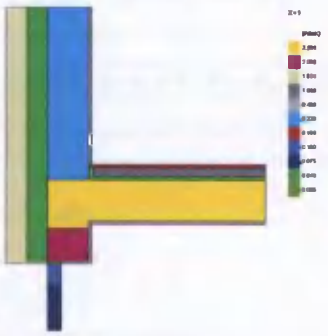
ND/TI$_a$



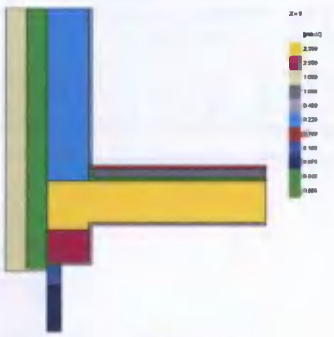
ND/DI$_b$



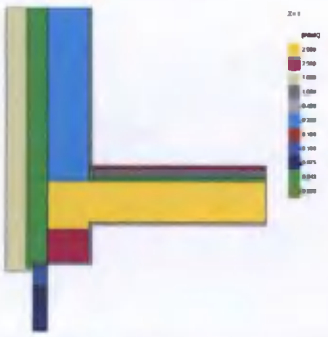
SN/TI



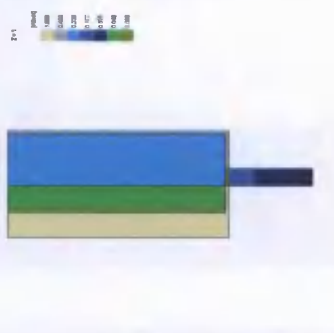
SN/TI$_a$



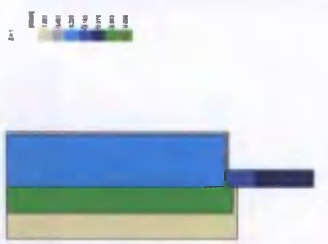
SN/TI$_b$



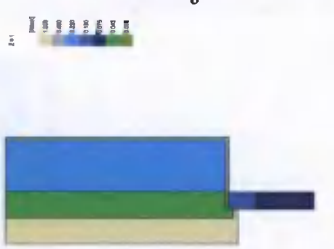
OS/TI



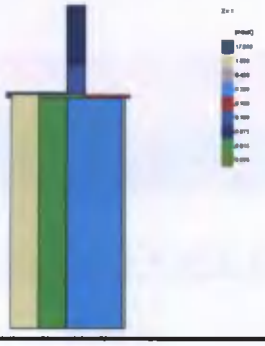
OS/TI$_a$



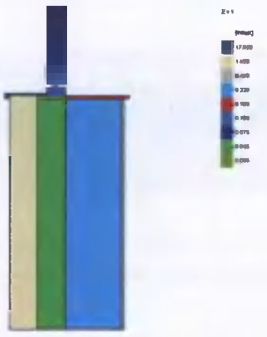
OS/TI$_b$



PO/TI



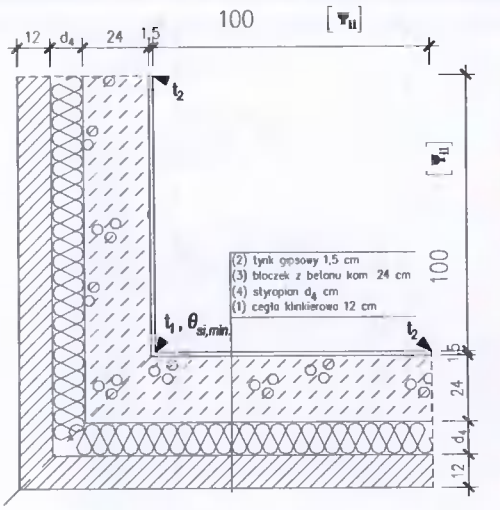
PO/TI$_b$



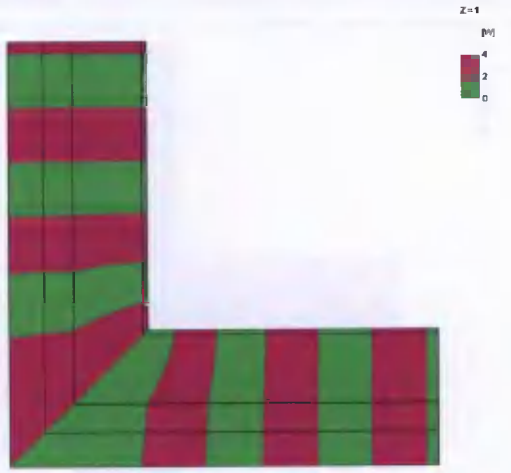
1. Narożnik ściany zewnętrznej: NR/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

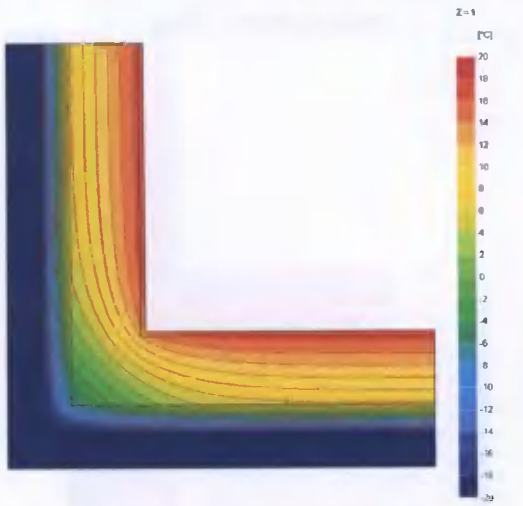
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	24,886	22,353	19,425
L^{2D} [W/(m·K)]	0,622	0,559	0,486
Ψ_i [W/(m·K]	0,087	0,083	0,078
Ψ_{il} [W/(m·K]	0,043	0,041	0,039
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
$t_1 = t_{NR}$ [°C]	13,95	14,45	15,05
t_2 [°C]	17,40	17,68	18,04
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,95	14,45	15,05
f_{Rsi} [-]	0,849	0,861	0,876

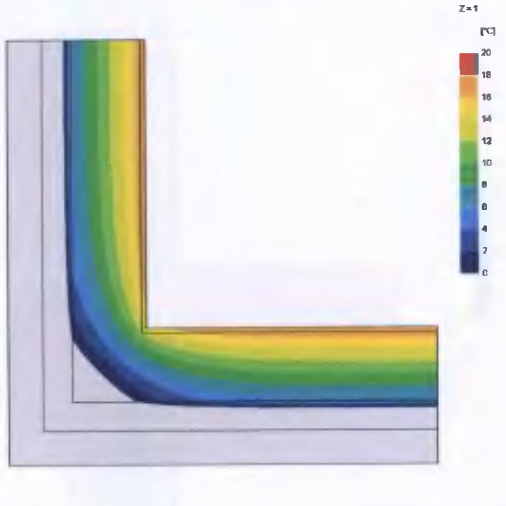


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



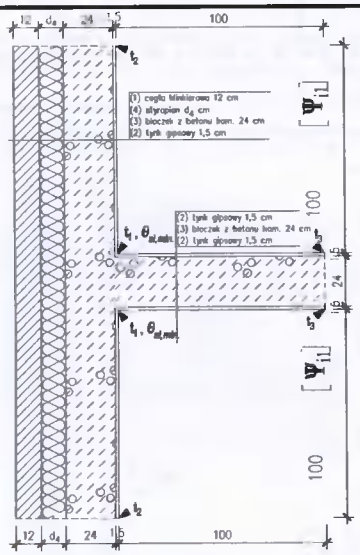


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

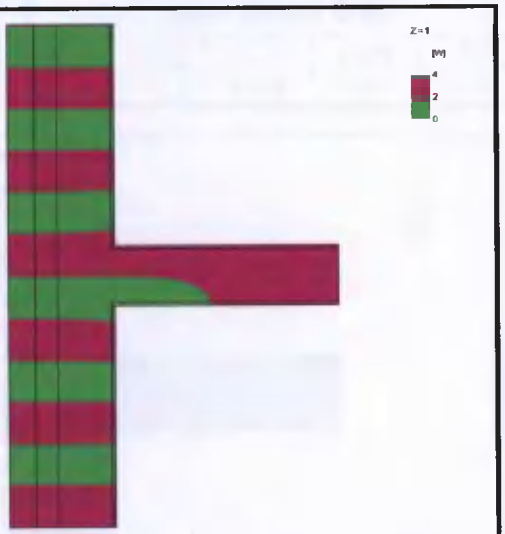
2. Połączenie ściany zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną: SC/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

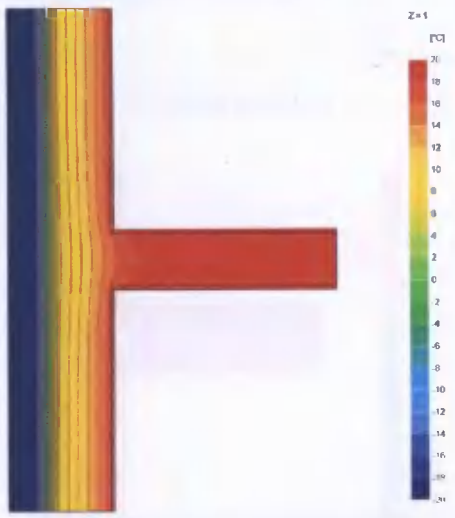
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	24,129	21,475	18,433
L^{2D} [W/(m·K)]	0,603	0,537	0,461
Ψ_i [W/(m·K]	0,068	0,061	0,053
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,034	0,0305	0,0265
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	17,04	17,35	17,71
t_2 [°C]	17,41	17,69	18,01
t_3 [°C]	20,00	20,00	20,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	17,04	17,35	17,71
f_{Rsi} [-]	0,926	0,934	0,943

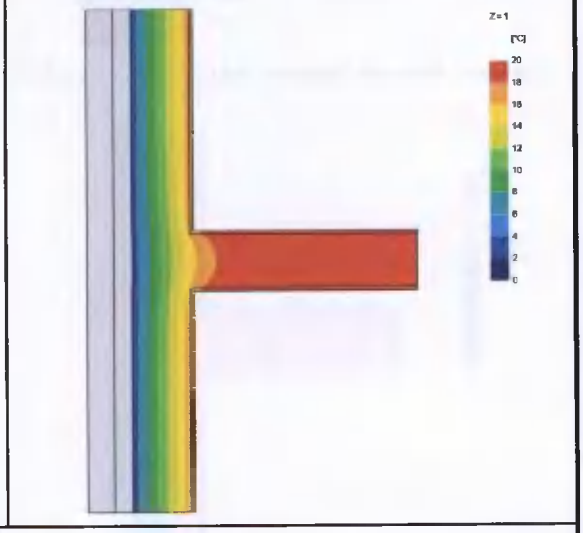


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



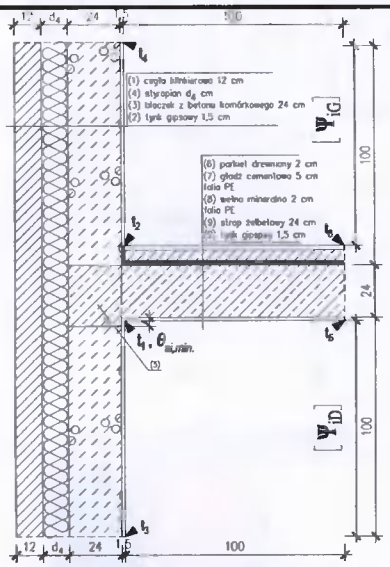


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

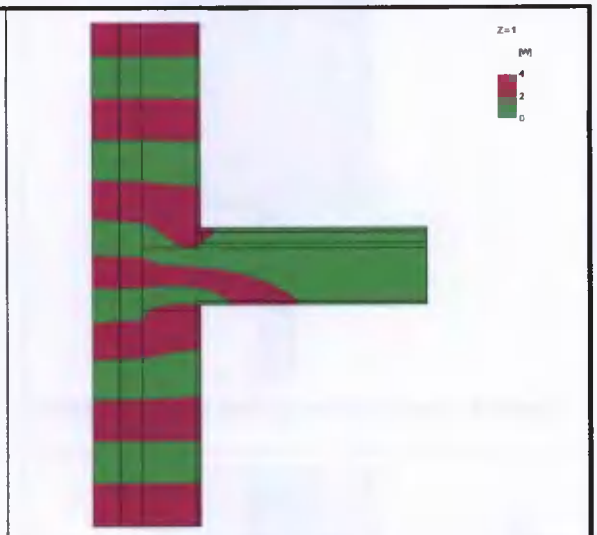
3. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez wieniec: ST/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Parkiet drewniany	0,020	0,160
7	Gładź cementowa	0,050	1,000
8	Wełna mineralna	0,020	0,043
9	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

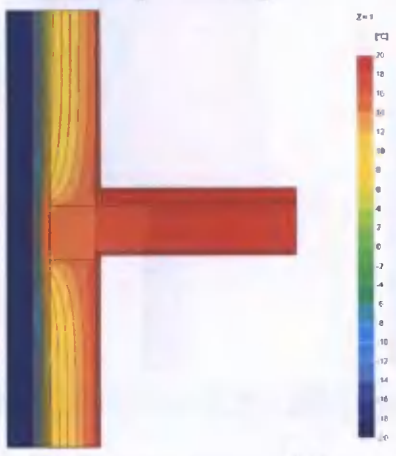
Parametry cieplne węzła				
d_4	[m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c	[W/(m²·K]	0,268	0,238	0,204
Φ	[W]	25,648	22,613	19,212
L^{2D}	[W/(m·K)]	0,641	0,565	0,480
Ψ_i	[W/(m·K]	0,132	0,113	0,092
Ψ_{iG}	[W/(m·K]	0,020	0,016	0,013
Ψ_{iD}	[W/(m·K)]	0,112	0,097	0,079
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)				
t_1	[°C]	16,59	17,01	17,48
t_2	[°C]	17,40	17,71	18,06
t_3	[°C]	17,42	17,70	18,02
t_4	[°C]	16,48	16,85	17,28
t_5	[°C]	19,56	19,61	19,67
t_6	[°C]	19,78	19,81	19,84
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788				
$\theta_{si,min.}$	[°C]	16,67	17,09	17,55
f_{Rsi}	[-]	0,917	0,927	0,939

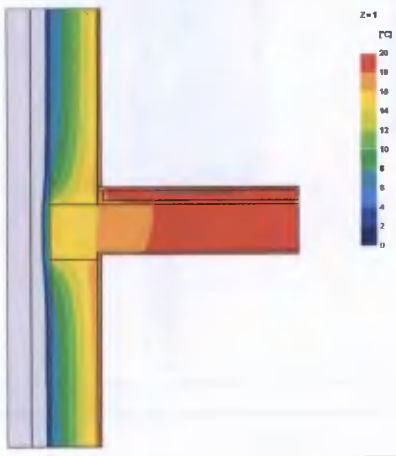


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



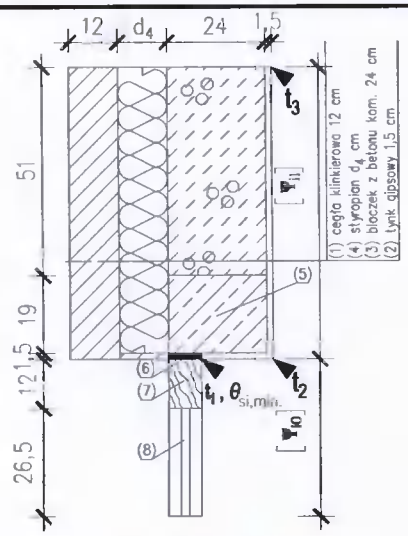


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

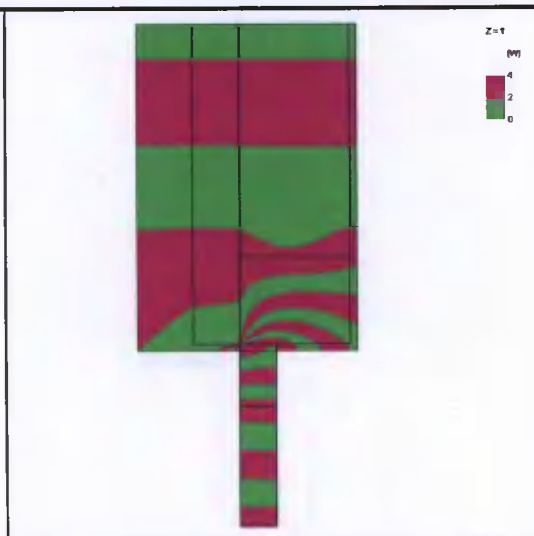
4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,24	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,08	0,160
8	Zestaw szybowy	0,08	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

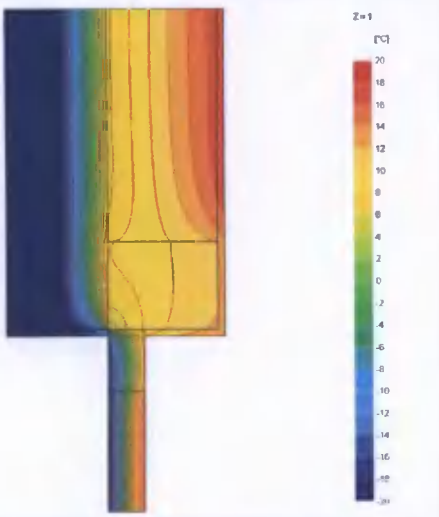
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	34,251	33,445	32,583
L^{2D} [W/(m·K)]	0,856	0,836	0,815
Ψ_{i1} [W/(m·K)]	0,243	0,243	0,256
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,010	0,009	0,008
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = -20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	9,71	9,87	10,04
t_2 [°C]	14,56	14,69	14,82
t_3 [°C]	17,36	17,61	17,90
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	11,62	11,76	11,91
f_{Rsi} [-]	0,791	0,794	0,798

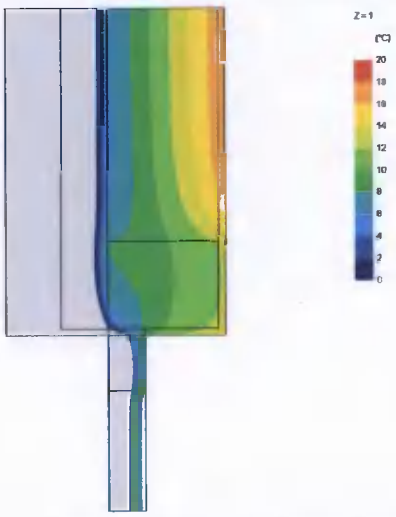


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



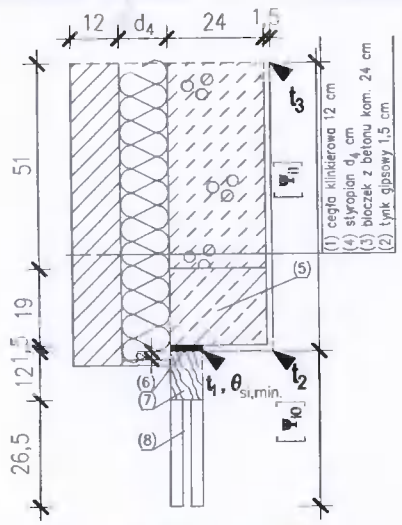


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/TI$_a$

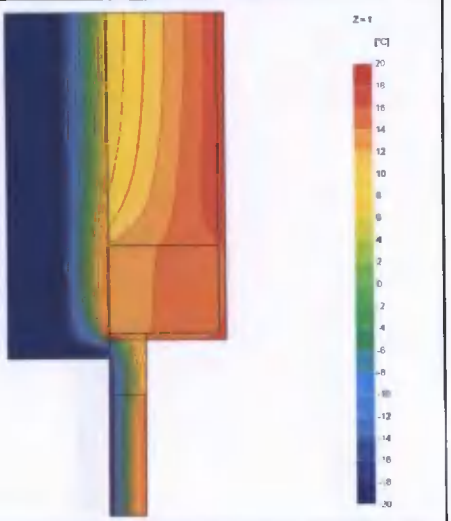
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,24	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,08	0,160
8	Zestaw szybowy	0,08	0,075
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

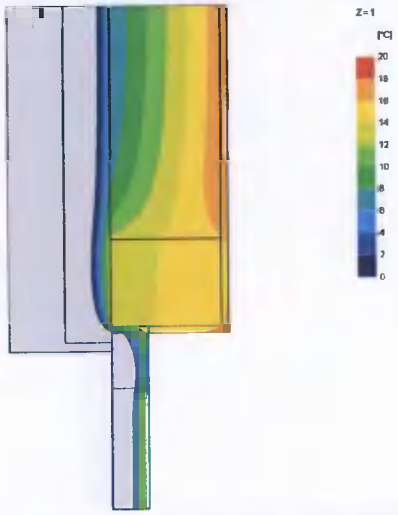
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	26,203	25,223	24,179
L^{2D} [W/(m·K)]	0,655	0,631	0,604
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,068	0,070	0,071
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,015	0,016	0,016
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)			
t_1 [°C]	13,60	13,86	14,11
t_2 [°C]	17,02	17,21	17,41
t_3 [°C]	17,52	17,79	18,09
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,00	15,22	15,44
f_{Rsi} [-]	0,875	0,881	0,886



MODEL OBLICZENIOWY

STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



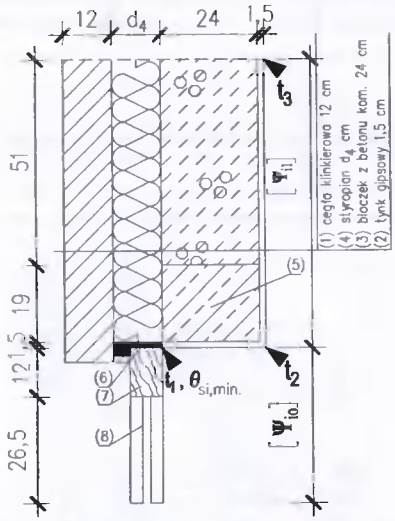


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

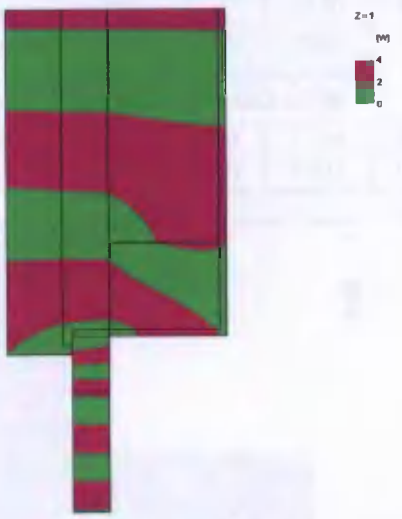
4. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez nadproże: ND/TI$_b$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Nadproże żelbetowe	0,24	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,08	0,160
8	Zestaw szybowy	0,08	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

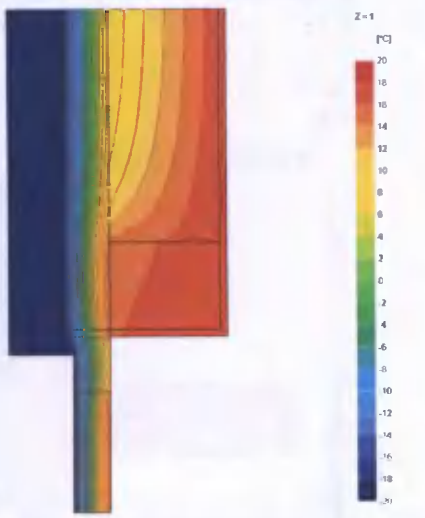
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	24,687	23,569	22,407
L^{2D} [W/(m·K)]	0,617	0,589	0,560
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,019	0,019	0,020
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,014	0,016	0,018
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = –20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	14,01	14,32	14,62
t_2 [°C]	18,41	18,33	18,52
t_3 [°C]	17,59	17,86	18,17
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,46	15,73	15,98
f_{Rsi} [-]	0,887	0,893	0,900

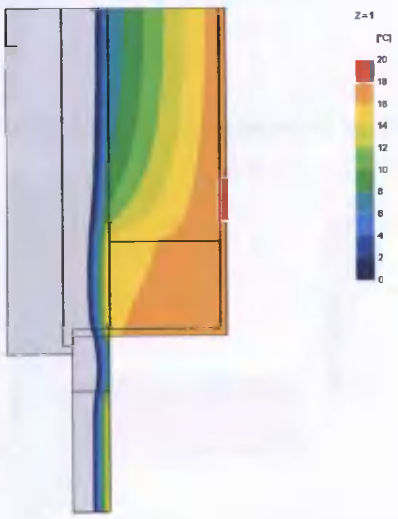


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



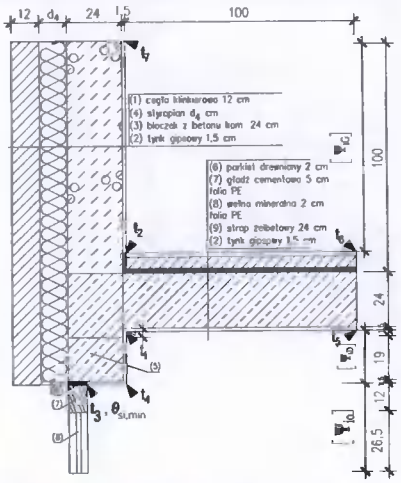


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

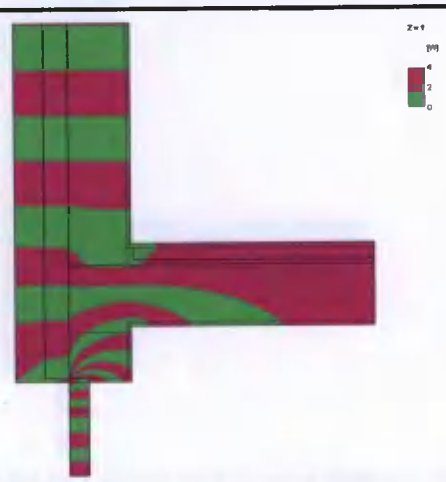
5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

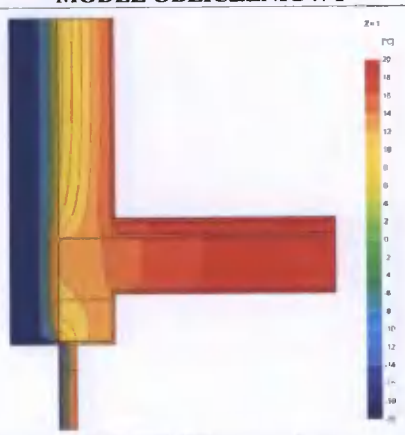
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	43,983	42,018	39,884
L^{2D}[W/(m·K)]	1,100	1,050	0,997
Ψ_i [W/(m·K]	0,379	0,369	0,358
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,034	0,033	0,032
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,341	0,333	0,324
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,004	0,003	0,002
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)			
t_1 [°C]	14,78	15,04	15,31
t_2 [°C]	16,81	17,05	17,32
t_3 [°C]	11,10	11,29	11,49
t_4 [°C]	15,69	15,85	16,01
t_5 [°C]	19,37	19,41	19,44
t_6 [°C]	19,69	19,70	19,72
t_7 [°C]	16,48	16,85	17,28
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	12,78	12,94	13,11
f_{Rsi} [-]	0,820	0,824	0,828

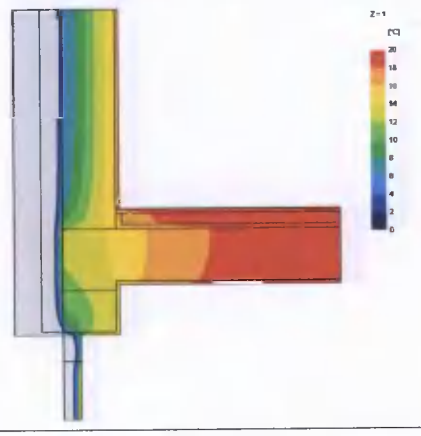


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



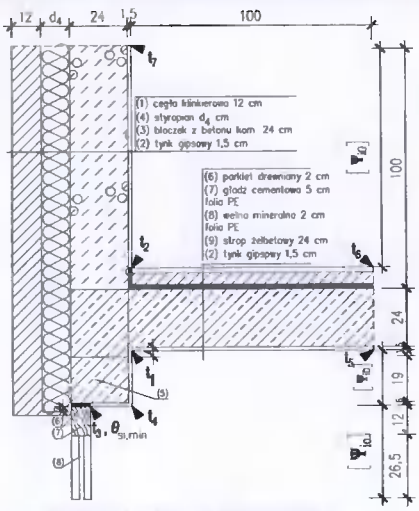


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

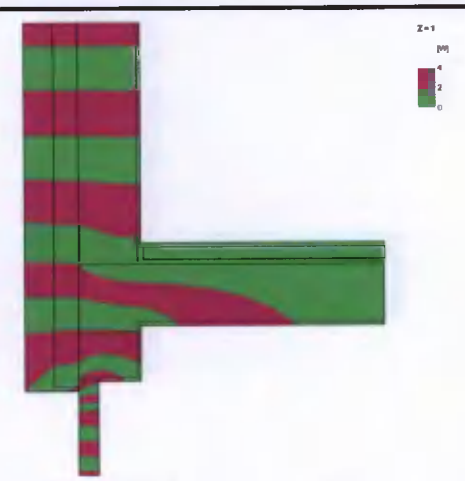
5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/TI$_a$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

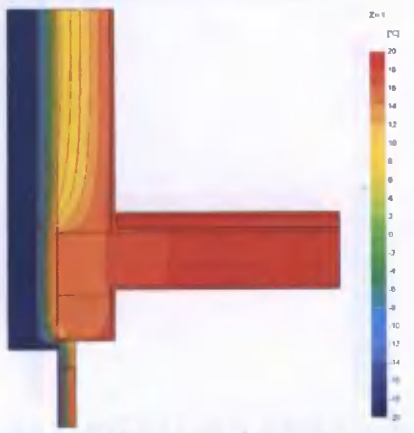
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	35,600	33,447	31,118
L^{2D}[W/(m·K)]	0,890	0,836	0,778
Ψ_i [W/(m·K]	0,202	0,188	0,175
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,015	0,014	0,012
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,174	0,161	0,149
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,013	0,013	0,014
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	16,63	16,94	17,26
t_2 [°C]	17,47	17,33	18,02
t_3 [°C]	14,25	14,51	14,78
t_4 [°C]	17,49	17,69	17,90
t_5 [°C]	19,58	19,62	19,66
t_6 [°C]	19,79	19,81	9,83
t_7 [°C]	16,48	16,85	17,28
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,51	15,74	15,97
f_{Rsi} [-]	0,888	0,894	0,899

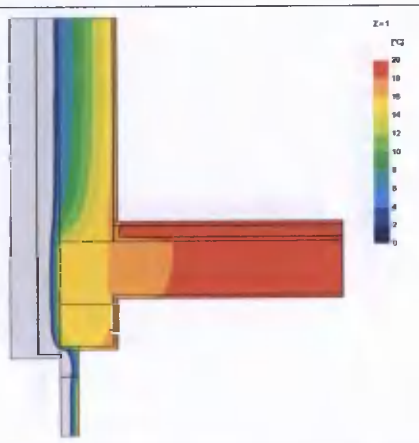


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



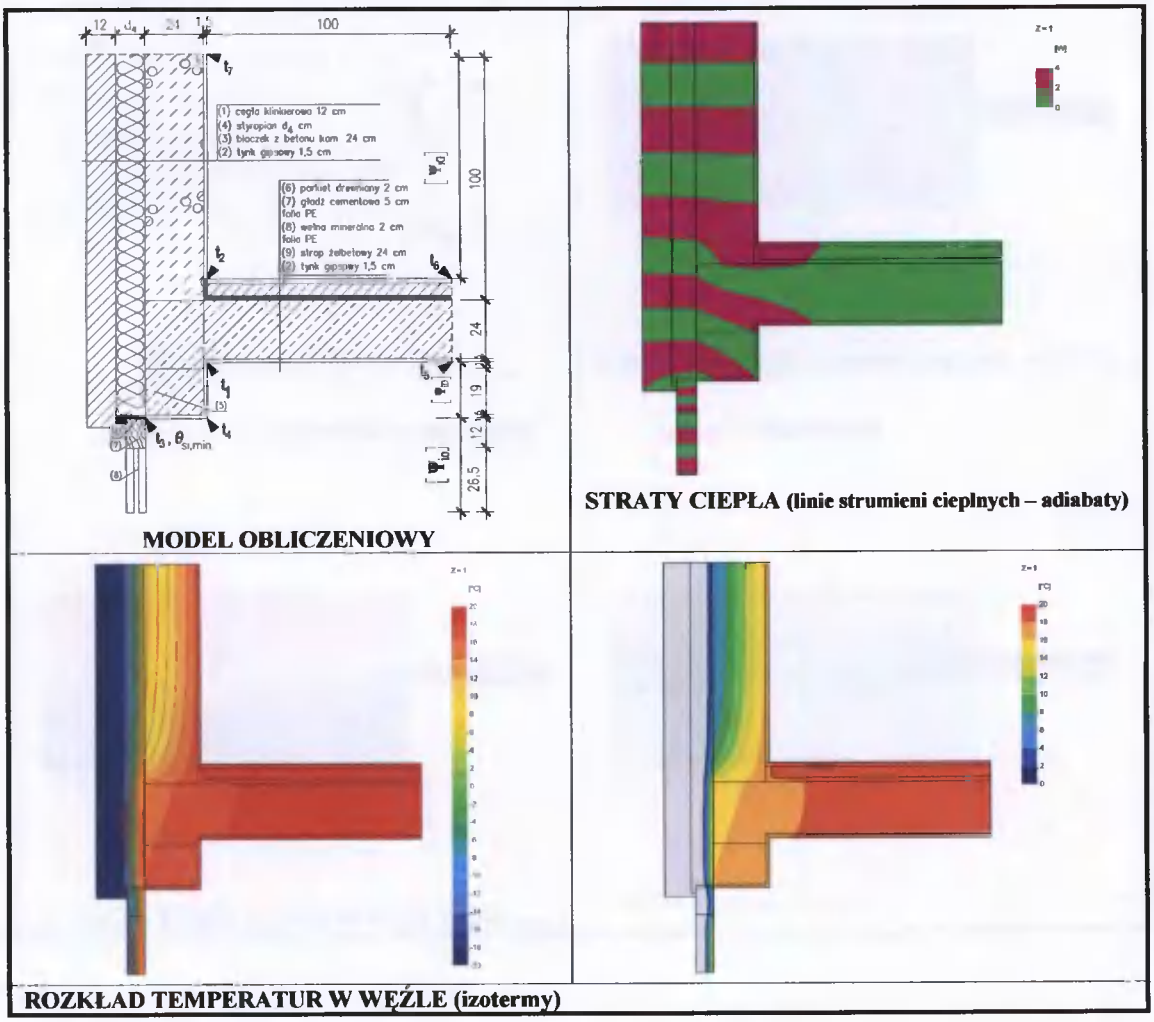


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

5. Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem w przekroju przez nadproże z oknem: SN/TI$_b$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Wieniec żelbetowy	0,240	2,500
6	Pianka montażowa	0,015	0,035
7	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
8	Zestaw szybowy	0,080	0,075
9	Parkiet drewniany	0,020	0,160
10	Gładź cementowa	0,050	1,000
11	Wełna mineralna	0,020	0,043
12	Strop żelbetowy	0,240	2,500
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

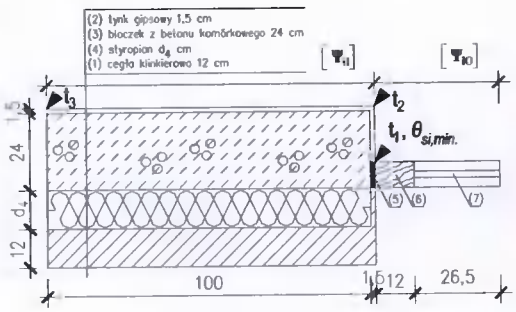
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	34,016	31,726	29,277
L^{2D}[W/(m·K)]	0,850	0,793	0,732
Ψ_i [W/(m·K]	0,149	0,136	0,123
Ψ_{iG} [W/(m·K]	0,008	0,006	0,004
Ψ_{iD} [W/(m·K)]	0,128	0,114	0,101
Ψ_{iO} [W/(m·K)]	0,013	0,016	0,018
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)			
t_1 [°C]	17,40	17,71	18,04
t_2 [°C]	17,74	18,01	18,30
t_3 [°C]	14,26	14,58	14,88
t_4 [°C]	18,25	18,45	18,66
t_5 [°C]	19,66	19,70	19,74
t_6 [°C]	19,83	19,85	19,87
t_7 [°C]	16,48	16,86	17,29
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	15,64	15,91	16,17
f_{Rsi} [-]	0,891	0,898	0,904



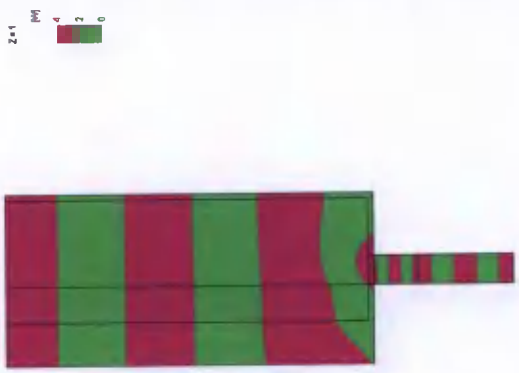
6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0{,}10$ m, $d_4 = 0{,}12$ m, $d_4 = 0{,}15$ m,			

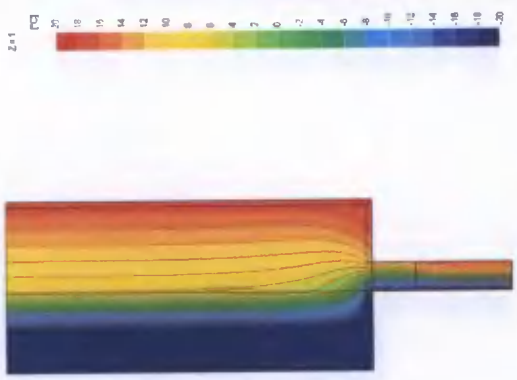
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	28,853	27,798	26,619
L^{2D} [W/(m·K)]	0,721	0,695	0,665
Ψ_{il} [W/(m·K]	0,045	0,049	0,055
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,010	0,010	0,009
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: $t_e = -20$ °C, $t_i = 20$ °C)			
t_1 [°C]	10,83	10,96	11,10
t_2 [°C]	18,77	18,82	18,86
t_3 [°C]	17,40	17,68	18,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,03	13,15	13,26
f_{Rsi} [-]	0,826	0,829	0,832

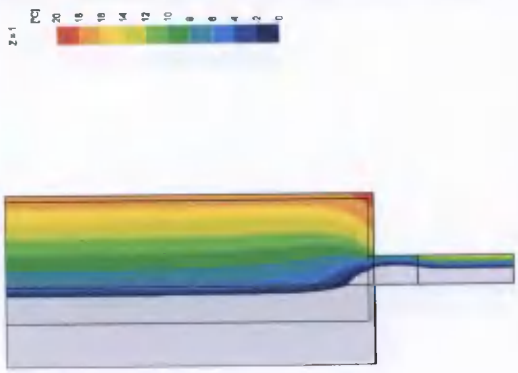


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



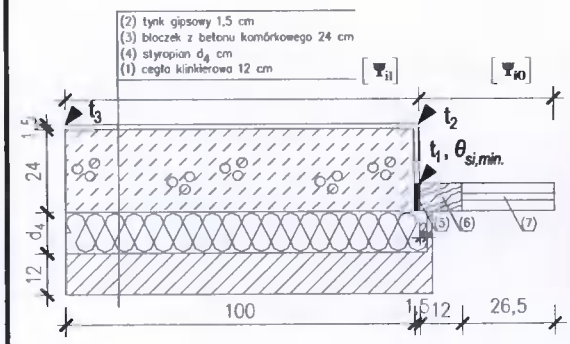


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

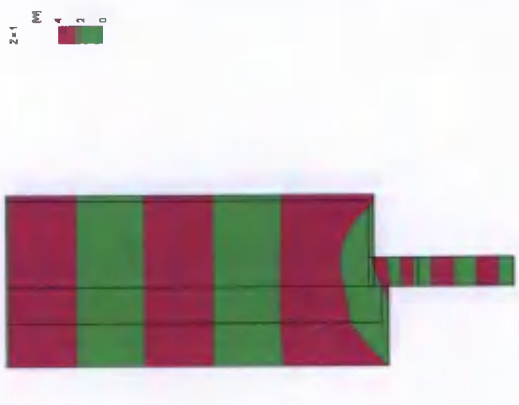
6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/TI$_a$

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla $d_4 = 0,10$ m, $d_4 = 0,12$ m, $d_4 = 0,15$ m,			

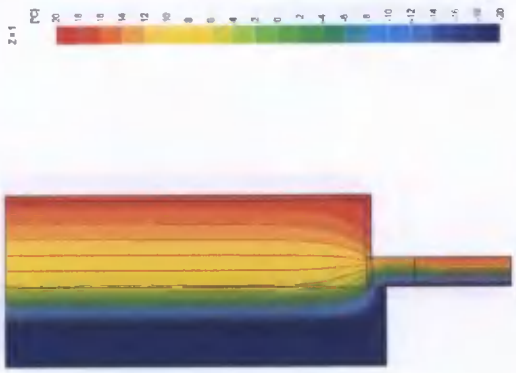
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	27,432	26,303	25,044
L^{2D} [W/(m·K)]	0,686	0,658	0,626
Ψ_{ij} [W/(m·K]	0,025	0,028	0,032
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,027	0,028	0,028
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	12,27	12,46	12,66
t_2 [°C]	18,96	19,02	19,08
t_3 [°C]	17,41	17,69	18,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	14,25	14,41	14,57
f_{Rsi} [-]	0,856	0,860	0,864

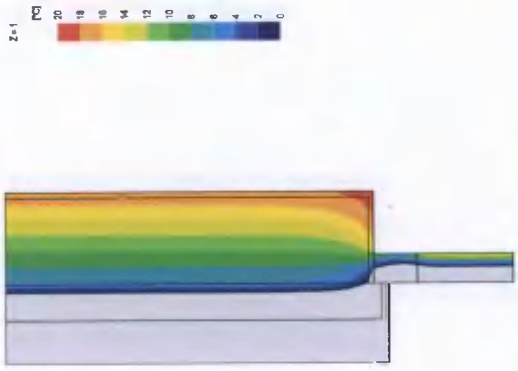


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



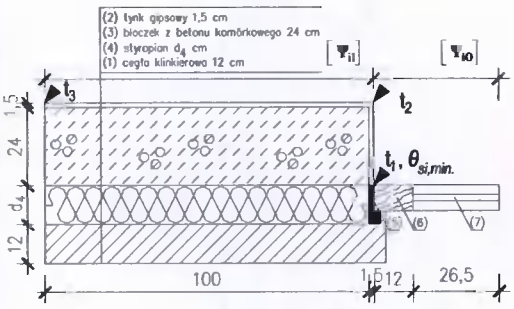


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

6. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez ościeżnicę: OS/TI$_b$

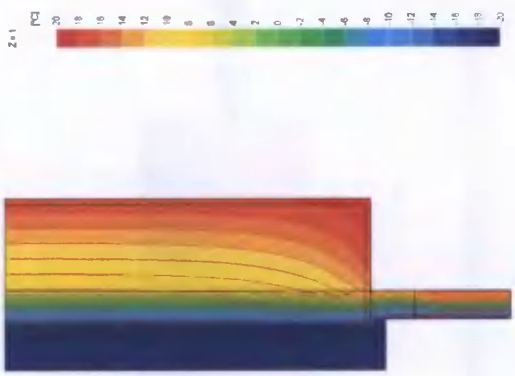
l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,16
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

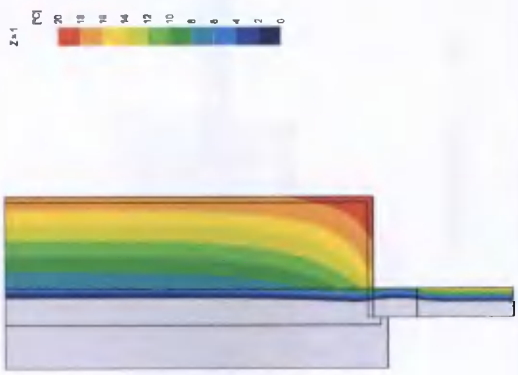
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	27,081	25,782	24,370
L^{2D} [W/(m·K)]	0,677	0,645	0,609
Ψ_{il} [W/(m·K]	0,010	0,010	0,012
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,020	0,023	0,025
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	12,46	12,78	13,07
t_2 [°C]	19,37	19,43	19,50
t_3 [°C]	17,42	17,70	18,02
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	14,52	14,78	15,03
f_{Rsi} [-]	0,863	0,870	0,876



MODEL OBLICZENIOWY

STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



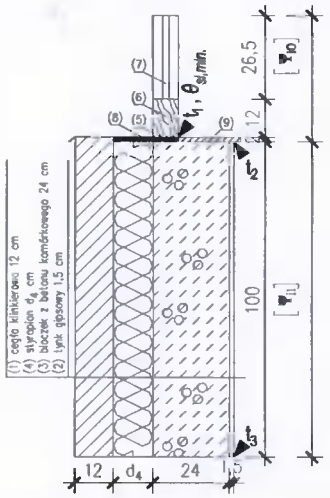


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

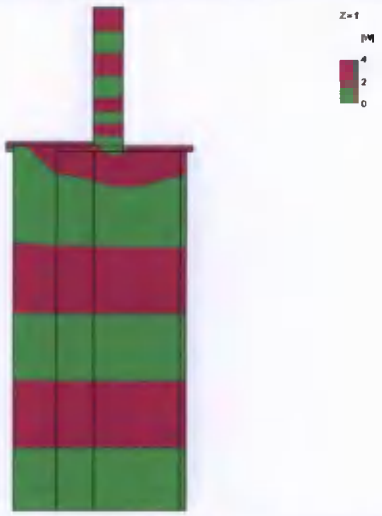
7. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik: PO/TI

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
8	Parapet zewnętrzny	0,005	17,00
9	Parapet wewnętrzny	0,020	0,160
x) wyniki parametrów dla d_4 = 0,10 m, d_4 = 0,12 m, d_4 = 0,15 m,			

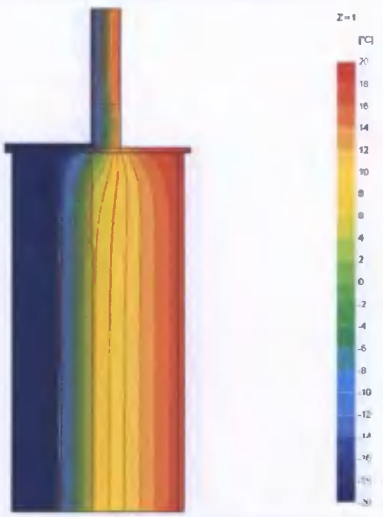
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	0,10	0,12	0,15
U_c [W/(m²·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	28,023	26,933	25,715
L^{2D} [W/(m·K)]	0,701	0,673	0,643
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,030	0,034	0,038
Ψ_{i0} [W/(m·K]	0,008	0,006	0,006
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e =-20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	10,79	10,94	11,09
t_2 [°C]	18,99	19,04	19,09
t_3 [°C]	17,41	17,68	18,00
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,52	13,64	13,76
f_{Rsi} [-]	0,838	0,841	0,844

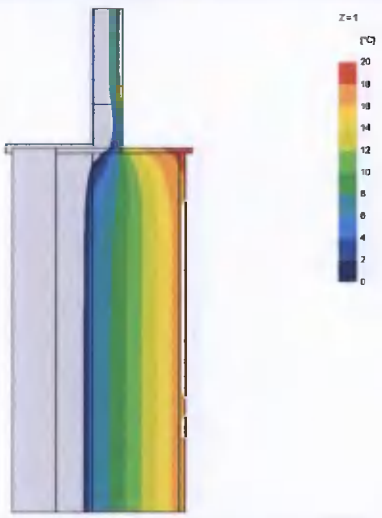


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)



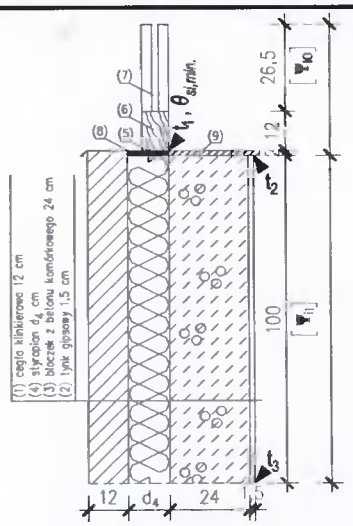


ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

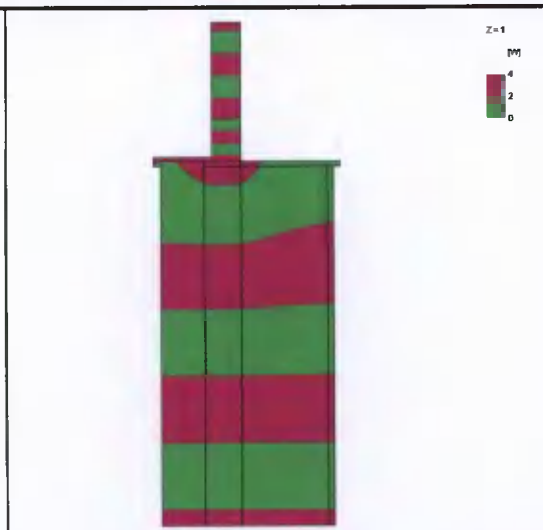
7. Połączenie ściany zewnętrznej z oknem w przekroju przez podokiennik: **PO/TI$_b$**

l.p.	Układ warstw węzła	d_i [m]	λ_i [W/(m·K)]
1	Cegła klinkierowa	0,120	1,050
2	Tynk gipsowy	0,015	0,400
3	Bloczek z betonu komórkowego	0,240	0,220
4	Styropian	x)	0,043
5	Pianka montażowa	0,015	0,035
6	Ościeżnica drewniana	0,080	0,160
7	Zestaw szybowy	0,080	0,075
8	Parapet zewnętrzny	0,005	17,00
9	Parapet wewnętrzny	0,020	0,160
x) wyniki parametrów dla d_4 = **0,10** m, d_4 = **0,12** m, d_4 = **0,15** m,			

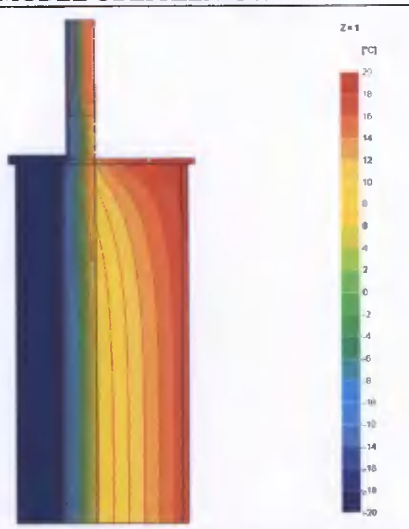
Parametry cieplne węzła			
d_4 [m]	**0,10**	**0,12**	**0,15**
U_c [W/(m^2·K)]	0,268	0,238	0,204
Φ [W]	27,273	26,038	24,681
L^{2D} [W/(m·K)]	0,682	0,651	0,617
Ψ_{i1} [W/(m·K]	0,010	0,010	0,012
Ψ_{iO} [W/(m·K]	0,008	0,007	0,006
Ocena ryzyka kondensacji powierzchniowej (temperatury minimalne przy: t_e = –20 °C, t_i = 20 °C)			
t_1 [°C]	11,06	11,29	11,51
t_2 [°C]	19,40	19,46	19,52
t_3 [°C]	17,42	17,70	18,02
Ocena ryzyka rozwoju pleśni wg PN-EN ISO 13788			
$\theta_{si,min.}$ [°C]	13,85	14,03	14,19
f_{Rsi} [-]	0,846	0,851	0,855

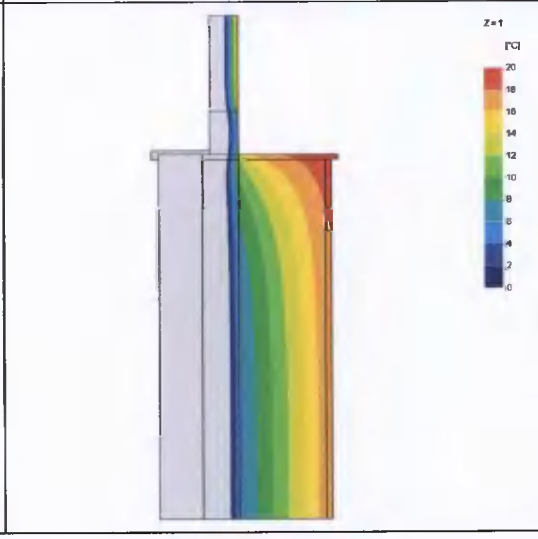


MODEL OBLICZENIOWY



STRATY CIEPŁA (linie strumieni cieplnych – adiabaty)





ROZKŁAD TEMPERATUR W WĘŹLE (izotermy)

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy Bydgoszcz (2) BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
D 327