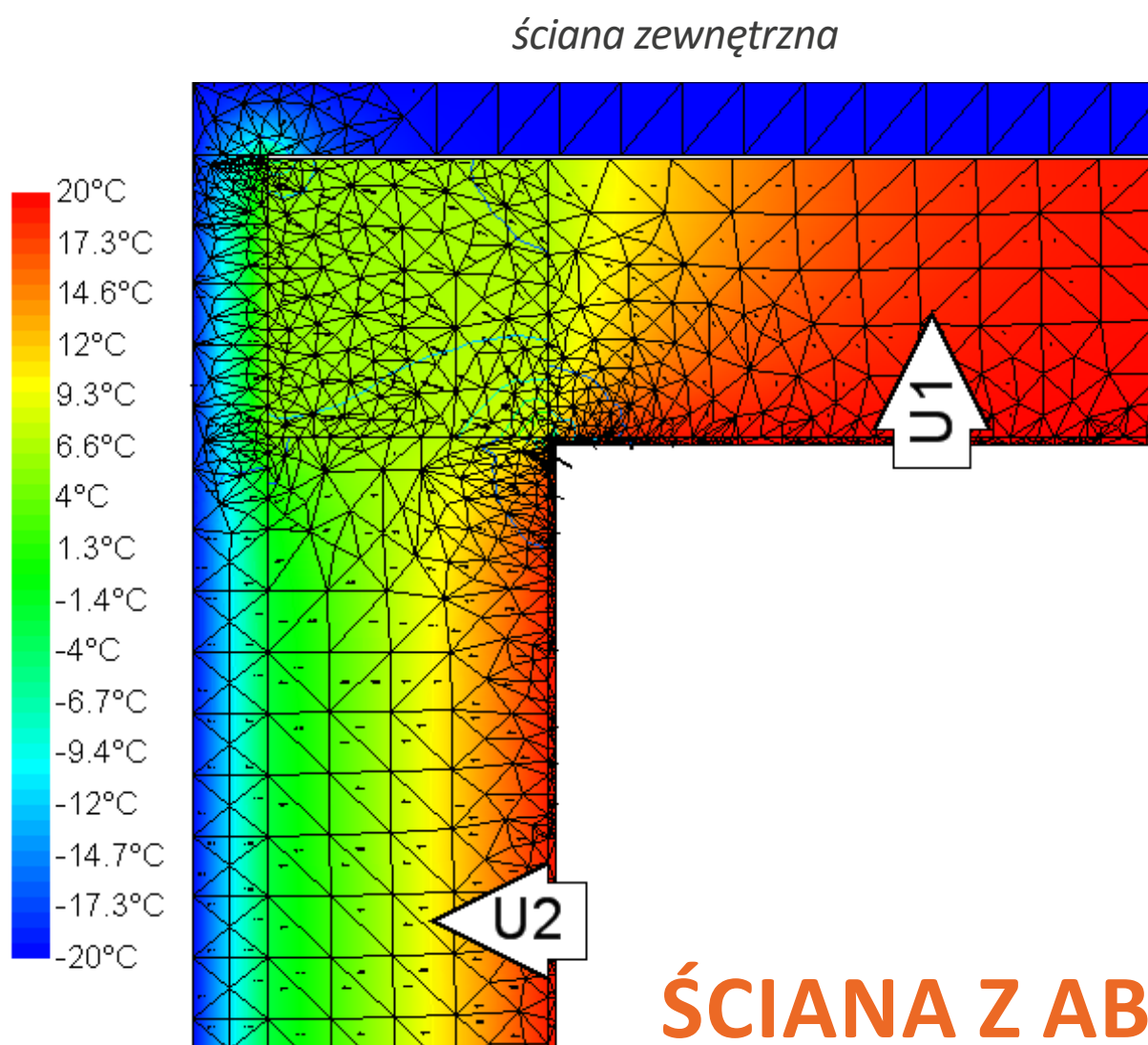




ISBN 978-83-941005-9-9

CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE PROJEKTOWANIE ŚCIAN Z BETONU KOMÓRKOWEGO

Zeszyt 3 Część 2 Mostki termiczne



1. Wprowadzenie

Projektowanie budynków energooszczędnych stało się koniecznością ze względu na rosnące koszty eksploatacji i użytkowania obiektów. Poprawa izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych istotnie zmniejszyła zapotrzebowanie na energię do ogrzewania. Wraz ze wzrostem oporu cieplnego poszczególnych elementów obudowy budynku coraz ważniejsze jest poprawne projektowanie i wykonawstwo miejsc określanych jako mostki termiczne (mostki cieplne). Rozpoznanie takich miejsc na etapie projektowania stanowi podstawę do dalszych działań w zakresie prawidłowego obliczania mostków termicznych, a następnie zaprojektowania w taki sposób aby zminimalizować ich wpływ na przyszły stan eksploatacyjny przegród zewnętrznych. Mostki cieplne to miejsca, w których występują większe straty ciepła niż w miejscach przegród pełnych. Są to też miejsca, które charakteryzują się niższą temperaturą powierzchni wewnętrznej w odniesieniu do innych miejsc, poza mostkami termicznymi. Stan taki sprawia, iż w okresie jesienno-zimowo-wiosennym w miejscach mostków mogą wystąpić niekorzystne zjawiska takie jak np. zawilgocenia powierzchni wewnętrznej, a w konsekwencji pojawianie się pleśni lub zagrzybienia. Prawidłowe zaprojektowanie przegrody zewnętrznej pod względem izolacyjności cieplnej, jako elementu składającego się z kilku warstw i uzyskanie współczynnika przenikania ciepła zgodnego z obligatoryjnymi przepisami, nie gwarantuje całkowitego wyeliminowania liniowych i punktowych mostków cieplnych. Mostki liniowe najczęściej możemy identyfikować jako wzajemne połączenia poszczególnych elementów budynku. W zakresie obliczania i projektowania przegród zewnętrznych z uwzględnieniem liniowych mostków cieplnych nie ma prostej metody obliczeń, zapewniającej szybkie i prawidłowe rozwiązania materiałowo-architektoniczne. Projektant ma do dyspozycji kilka narzędzi, którymi może posługiwać się aby rozwiązać problem prawidłowego projektowania takich miejsc szczególnych. Najprostsze z nich to normatywne katalogi mostków termicznych. Problem w tym, iż najczęściej trudno jest dopasować rozwiązanie materiałowo-

konstrukcyjne, które dokładnie pasuje do danego projektu. Lepszym rozwiązaniem są katalogi elektroniczne. Posługiwanie się nimi wymaga od projektanta pewnej wiedzy z zakresu fizyki budowli. Najlepszym rozwiązaniem jest samodzielne wykonanie stosownego modelu odzwierciedlającego projektowany detal, a następnie wykonanie obliczeń. Obliczenia te wykonuje się przy użyciu programu numerycznego (dwa lub trójwymiarowy przepływ ciepła). W taki przypadku oprócz znajomości zagadnień projektowania architektonicznego i fizyki budowli, potrzebna jest wiedza z zakresu metod obliczeniowych MEB i/lub MES. W niniejszej publikacji autorzy starali się przybliżyć projektantowi wszystkie możliwe problemy, które mogą wyniknąć przy analizie i/lub obliczaniu liniowych oraz punktowych mostków cieplnych, wraz z ich uwzględnianiem w obliczeniach zapotrzebowania na energię dla budynku. W kolejnych rozdziałach przedstawiono zarówno zagadnienia praktycznej diagnostyki liniowych i punktowych mostków cieplnych występujących na przegrodach budowlanych oraz zagadnień teoretycznych, a także praktyczne przykłady obliczeń dwuwymiarowych mostków cieplnych przy pomocy programu komputerowego. Ostatnią częścią jest katalog liniowych mostków cieplnych, który pomoże w samodzielnym rozwiązywaniu zagadnień projektowania połączeń elementów przegród wykorzystujących beton komórkowy, jako podstawowy materiał do budowy ścian zewnętrznych.

Autorzy monografii:

Dr inż. Paweł Krause

Dr inż. Tomasz Steidl

Dr inż. Bożena Orlik-Koźdoń

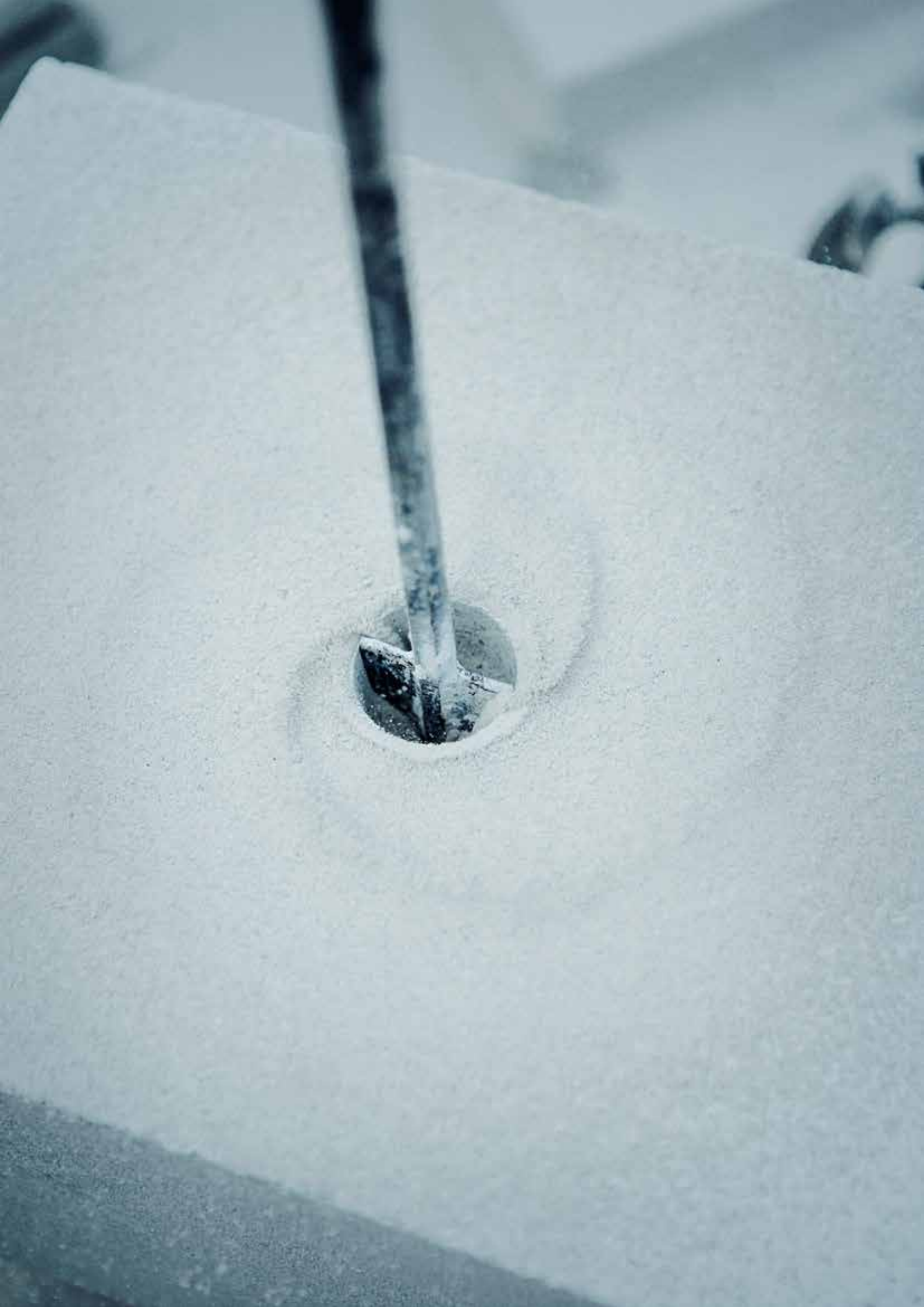
Recenzenci:

Dr hab. inż. Łukasz Drobiec

Dr inż. Małgorzata Fedorczyk-Cisak



1.	WPROWADZENIE	2
2.	MOSTKI TERMICZNE	6
2.1.	Terminy i definicje	6
2.2.	Rodzaje mostków termicznych	6
2.3.	Literatura	10
3.	UWZGLĘDNIANIE MOSTKÓW TERMICZNYCH W OBLICZENIACH	11
3.1.	Symbole i jednostki	11
3.2.	Terminy i definicje	13
3.3.	Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie	14
3.4.	Obliczanie liniowych współczynników przenikania ciepła	15
3.4.1.	Metody wyznaczania liniowego współczynnika przenikania ciepła	16
3.4.2.	Systemy wymiarowania liniowych mostków termicznych	16
3.5.	Obliczanie punktowych współczynników przenikania ciepła	17
3.5.1.	Mostki punktowe w systemach ETICS	19
3.6.	Określanie temperatury powierzchni wewnętrznej – czynnik temperaturowy f_{Rsi}	20
3.7.	Uwzględnianie mostków termicznych w certyfikacji energetycznej budynków	21
3.8.	Literatura	22
4.	TYPOWE MOSTKI TERMICZNE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH	22
4.1.	Diagnostyka mostków termicznych	22
4.2.	Literatura	25
5.	MOSTKI TERMICZNE W UJĘCIU NUMERYCZNYM	25
5.1.	Symbole i jednostki	25
5.2.	Terminy i definicje	26
5.3.	Konstruowanie modeli dwuwymiarowych mostków termicznych w obrębie gruntu	29
5.4.	Uproszczenia modelu geometrycznego	30
5.5.	Metodyka obliczeń dla modelu geometrycznego	31
5.6.	Obliczanie strumienia ciepła i liniowego współczynnika przenikania ciepła	31
5.7.	Programy obliczeniowe	32
5.7.1.	Wprowadzenie	32
5.7.2.	Weryfikacja przyjętego narzędzia analitycznego	33
5.7.3.	Przykład obliczeniowy	34
5.8.	Literatura	36
6.	KATALOG MOSTKÓW CIEPLNYCH	37
6.1.	Symbole i jednostki	37
6.2.	Materiały przyjęte do obliczeń liniowych mostków cieplnych	37
6.3.	Katalog liniowych mostków cieplnych	38



2. MOSTKI TERMICZNE

2.1.

Terminy i definicje

Mostek termiczny/Mostek cieplny - miejsce w obudowie zewnętrznej lub w obrębie przegród wewnętrznych budynku, oddzielających strefy o zróżnicowanych temperaturach (np. ogrzewane od nieogrzewanych), w którym występuje zwiększony przepływ strumienia ciepła w stosunku do pozostałego fragmentu przegrody.

Liniowy mostek cieplny - mostek cieplny o jednakowym przekroju poprzecznym w jednym kierunku. [8], [9].

Punktowy mostek cieplny - mostek cieplny bez jednakowego przekroju poprzecznego w żadnym kierunku. [8], [9].

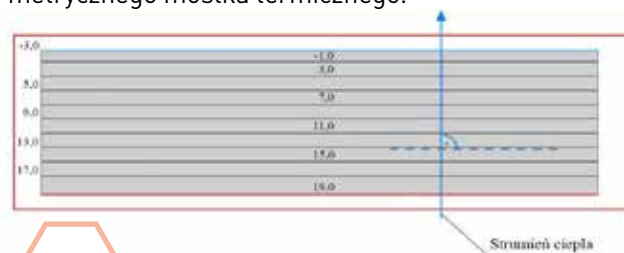
2.2.

Rodzaje mostków termicznych

Definicje są na ogół pojęciami, które to inżynierowie starają się omijać. W dobie korzystania z programów komputerowych lub w czasie wykonywania uproszczonych obliczeń ręcznych, uznają oni, iż intuicyjne podejście do tematu obliczeń jest zupełnie wystarczające, a definicje to kwestia czysto akademicka. Rozważając zaawansowane zagadnienia obliczeń cieplnych należy jednoznacznie stwierdzić, iż znajomość definicji jest niezbędna. Bez dobrej znajomości i należytego zrozumienia jednoznacznie zdefiniowanych pojęć, takich jak np. warunki brzegowe, warunki początkowe, liniowy i punktowy mostek cieplny, sprzężenie cieplne czy emisyjność powierzchni, praktycznie nie powinno się przystępować do wykonywania obliczeń mostków termicznych, w tym z użyciem programów numerycznych.

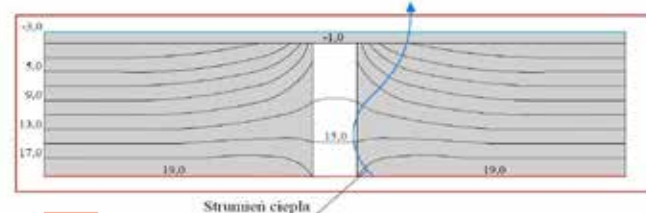
W literaturze można znaleźć kilka różnych definicji mostka cieplnego [2], [3], [7]. Pojęcia te nie zawsze w sposób wystarczający i jednoznaczny odzwierciedlają definicję zawartą w normie [8]. Według normy PN-EN-ISO 10211 [8], jako mostek cieplny określa się część obudowy budynku, w której skądinąd jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony w wyniku całkowitej lub częściowej penetracji obudowy budynku przez materiały o różnym współczynniku przewodzenia ciepła i/lub zmiany grubości struktury i/lub różnicy między wewnętrznymi i zewnętrznymi powierzchniami, jakie występują przy połączeniu ściana - podłoga - sufit [8]. Definicja ta nie ujmuje wszystkich przypadków występowania mostków cieplnych w budownictwie ograniczając

się do tych, które możemy obliczyć i uwzględnić przy projektowaniu przegród budowlanych, pomijając ważną grupę mostków geometrycznych, które nie zawsze pasują do podanej powyżej definicji. Terminem **mostek termiczny/cieplny**, określa się takie miejsce w obudowie zewnętrznej lub w obrębie przegród wewnętrznych budynku, oddzielających strefy o zróżnicowanych temperaturach (np. ogrzewane od nieogrzewanych), w którym ma miejsce zwiększony przepływ strumienia ciepła w odniesieniu do pozostałego fragmentu przegrody. Opór cieplny w tych miejscach jest niższy w odniesieniu do pozostałej sąsiadującej części budynku. Konsekwencją tego, w przypadku mostków cieplnych w obudowie zewnętrznej budynku, jest obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody, w miejscu występowania mostka termicznego oraz wzrost temperatury na zewnętrznej jej powierzchni. Zwiększony przepływ strumienia ciepłego może być spowodowany zmianami materiałowymi przegrody. Następuje wtedy zaburzenie strumienia ciepła na styku zróżnicowanych materiałów budowlanych. Większy przepływ ma związek ze zmianą geometrii przegrody. Jest to związane ze zmianą strumienia ciepła na styku połączeń geometrycznych przegród. Z tego względu pojawiają się także określenia mostka termicznego materiałowego lub geometrycznego mostka termicznego.



Rys. 2.1.

Izotermy i strumień ciepła dla przegrody pełnej.

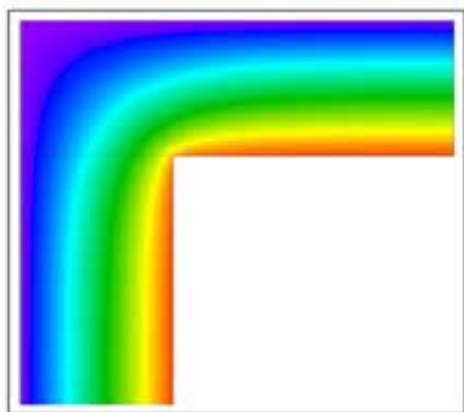
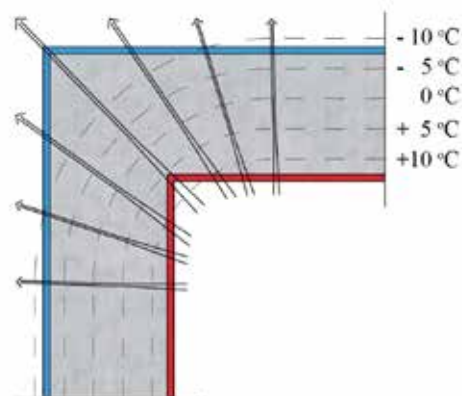


Rys. 2.2.

Izotermy i strumień ciepła dla przegrody w miejscu mostka termicznego.

W przypadku mostków geometrycznych na wewnętrznej powierzchni przegrody następuje obniżenie temperatury w narożu. Przykładowe połączenie narożnych ścian zewnętrznych zobrazowano na rysunku 2.3. Kolorem niebieskim zaznaczono powierzchnię zewnętrzną ścian, kolorem czerwonym powierzchnię wewnętrzną od strony ogrzewanych pomieszczeń.

Ze względu na zwiększoną powierzchnię przegrod od strony środowiska zewnętrznego (kolor niebieski), w stosunku do powierzchni wewnętrznej ścian (kolor czerwony) następuje zintensyfikowane wychładzanie naroża ściennego, a w konsekwencji, spadek temperatury na wewnętrznej jego powierzchni. Zakłada się, że w odległości 1 metra od naroża (w każdą stronę) ustępuje zaburzenie przepływu ciepła, związane z wpływem geometrii przegrody. Izolinie stają się równoległe w przekroju przegrody, jeśli nie ma innych czynników mogących zaburzyć ich przebieg. W przypadku ścian o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła konstrukcji, zasięg zaburzeń może przekraczać 1 metr.

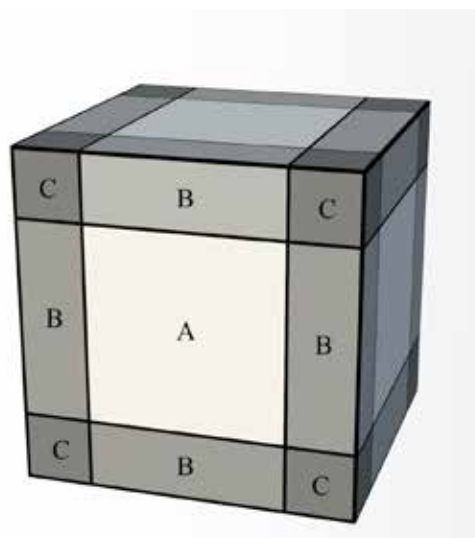


Rys. 2.3.

Izotermi i pole temperatury w skali barw dla naroża ściennego.

Oszacowanie strumienia ciepła w miejscach mostków termicznych jest istotne zarówno z punktu widzenia bilansu cieplnego budynku (mostki termiczne powodują zwiększenie zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania), jak i ze względu na kondensację pary wodnej na wewnętrznej powierzchni przegrody. W normie PN-EN ISO 10211:2008. Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe można wyróżnić trzy główne modele geometryczne związane z:

- jednowymiarowym strumieniem ciepła 1D (A),
- dwuwymiarowym strumieniem ciepła 2D (B),
- trójwymiarowym strumieniem ciepła 3D (C).



Rys. 2.4.

Wydzielenie obszarów strumienia ciepła dla przykładowej bryły.

Jednowymiarowe mostki termiczne, oznaczane często jako 1D, są m.in. konsekwencją zróżnicowania materiałowego fragmentu przegrody budowlanej (różne współczynniki przewodzenia ciepła). Przykładem takiego mostka termicznego może być rdzeń żelbetowy w ścianie zewnętrznej jednowarstwowej. Dwuwymiarowy mostek termiczny 2D powstaje np. w miejscach, w których wewnętrzna i zewnętrzna powierzchnia przegród budowlanych jest zróżnicowana. Przykładem takiego mostka są naroża wklęsłe i wypukłe ścian zewnętrznych, płyty balkonów wspornikowych czy np. nadproża okienne. W wielu przypadkach tego typu mostki termiczne nie są możliwe do wyeliminowania. Można jedynie minimalizować negatywne skutki ich występowania. Mostki termiczne 3D powstają w miejscach przecięcia się, co najmniej trzech elementów budowlanych. Do

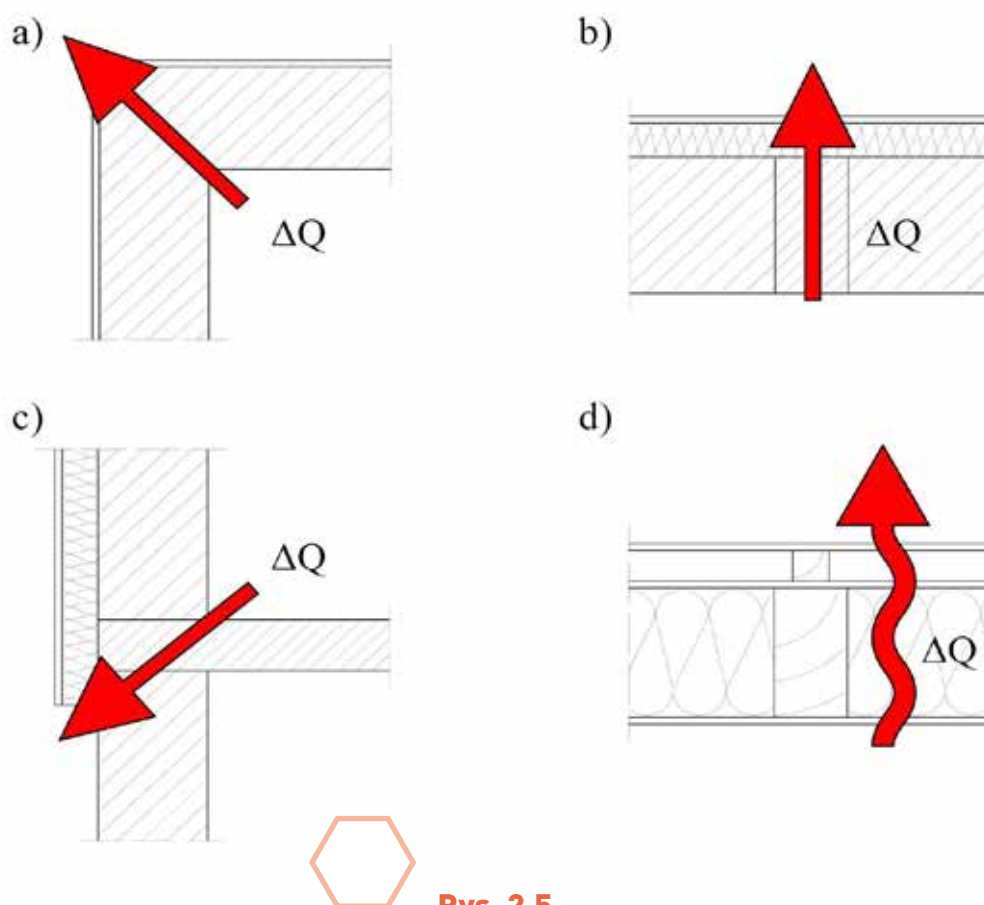
mostków termicznych 3D zaliczamy także punktowe mostki termiczne - miejsca zaburzeń przepływu ciepła spowodowane punktowym przebiegiem przegrody budowlanej np. łącznik metalowy przebijający warstwę izolacji termicznej w ścianie trójwarstwowej. Innymi przykładami mostka cieplnego 3D mogą być połączenia dwóch ścian zewnętrznych i dachu, a także np. dwóch ścian zewnętrznych i podłogi. Mostki termiczne mogą się wzajemnie na siebie nakładać. Jednym z przykładów takiej sytuacji jest naroże budynku wraz z płytą stropową i stolarką okienną. Tego typu rozwiązania są szczególnie narażone na obniżenie temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody, prowadząc w niektórych przypadkach do kondensacji pary wodnej.

W literaturze [1,2,3,4,7,8] możemy znaleźć umowny ogólny podział mostków termicznych, wyróżniając m.in. mostki:

- geometryczne,
- materiałowe,
- konstrukcyjne,
- konwekcyjne.

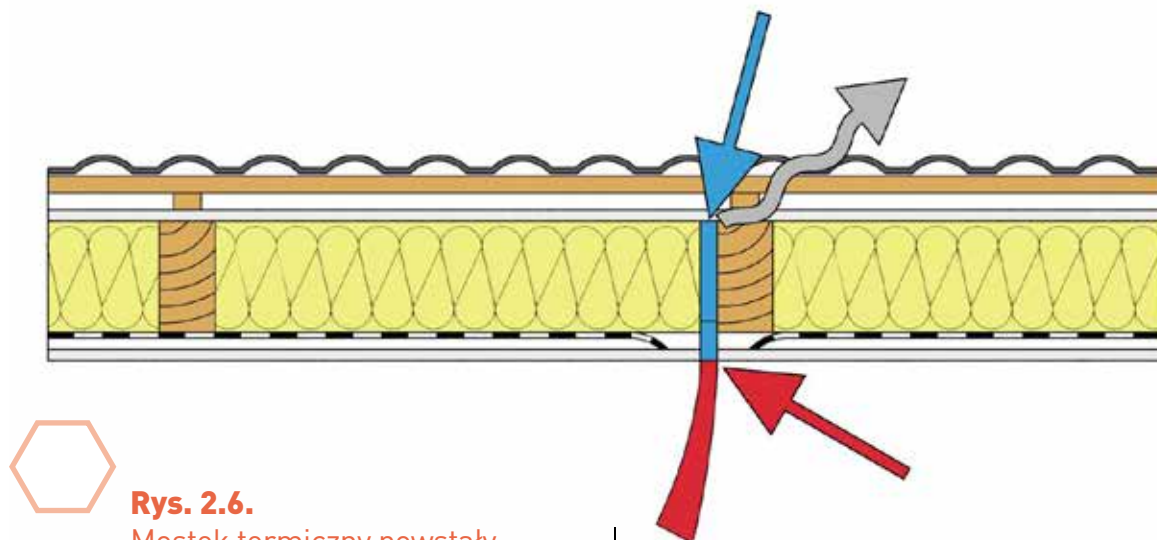
Schematyczne przedstawienie powyższych mostków cieplnych pokazano na rysunku 2.5.

Pojęcie mostka termicznego konwekcyjnego występuje w krajowej literaturze sporadycznie. Konwekcyjnym mostkiem termicznym nazywa się miejsca nieszczelności połączeń przegród budowlanych w obudowie budynku, skutkujące zwiększonymi stratami energii i lokalnym obniżeniem temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody pomimo, iż w myśl np. definicji mostka zawartego w normie PN-EN-ISO 10211 [8], miejsca takie nie są jednoznacznie kwalifikowane jako mostek termiczny. Przykładem konwekcyjnego mostka termicznego może być miejsce nieszczelności, przedstawione na rysunku 2.6. Ze względu na brak zapewnienia ciągłości paroizolacji ma miejsce konwekcyjna wymiana ciepła pomiędzy środowiskiem wewnętrznym a zewnętrznym. Jest to związane z niekontrolowaną infiltracją powietrza.



Rys. 2.5.

Geometryczny mostek termiczny w narożu ścian (a), mostek termiczny materiałowy (b), liniowy konstrukcyjny mostek termiczny (c), mostek termiczny konwekcyjny (d).



Rys. 2.6.

Mostek termiczny powstały w wyniku nieszczelności na styku elementów konstrukcji i izolacji termicznej dachu.

Ze względu na geometrię, mostki termiczne można również podzielić na mostki:

- liniowe – mostki termiczne o jednolitym przekroju poprzecznym wzdłuż jednego kierunku (np. nadproże, wieniec w ścianie zewnętrznej, połączenie ościeżnicy ze ścianą zewnętrzną, naroże budynku),
- punktowe (przestrzenne) – umiejscowiony mostek cieplny, którego wypływ może być wyrażony przez punktowy współczynnik przenikania ciepła χ_p [W/K] (np. metalowy łącznik przebijający warstwę materiału termoizolacyjnego).

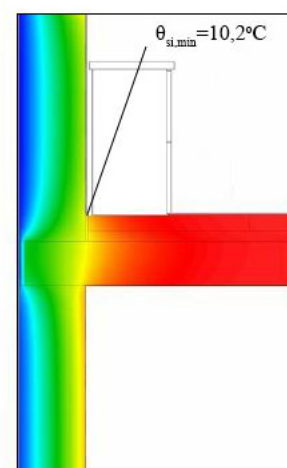
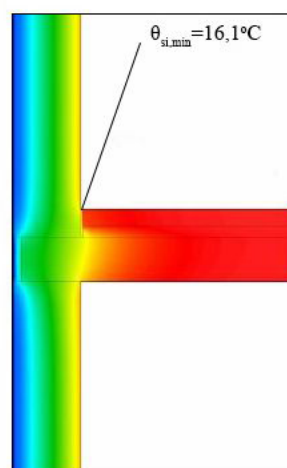
Występowanie mostka termicznego w komponencie budowlanym może być wynikiem:

- całkowitego lub częściowego przebicia warstw przegrody zewnętrznej budynku, przez element z materiału charakteryzującego się dużo większym współczynnikiem przewodzenia ciepła, w stosunku do pozostałej części przegrody (mostek punktowy),
- zmian grubości warstw materiałowych przegrody, w tym zasadniczo warstw, które nazywamy warstwami izolującymi termicznie,
- różnicy pól powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej w danej części obudowy zewnętrznej przegrody (np. naroże budynku).

Konsekwencją wystąpienia mostka termicznego może być:

- zwiększenie strat ciepła z budynku (przekładające się na zwiększenie opłat za ogrzewanie oraz wzrost emisji gazów cieplarnianych),
- wystąpienie kondensacji na powierzchni przegród budowlanych lub w ich wnętrzu, po osiągnięciu temperatury punktu rosy,
- wystąpienie porażenia mykologicznego (zagrzybienia).

Kondensacja pary wodnej lub porażenie mykologiczne mogą być w miejscach mostków termicznych dodatkowo potęgowane przez niewłaściwą eksploatację pomieszczeń oraz sposób aranżacji wnętrz. Na poniższym rysunku przedstawiono obliczoną temperaturę na wewnętrznej powierzchni naroża (ściana zewnętrzna-strop) w miejscu niezabudowanym oraz w miejscu zabudowanym meblami. W przypadku lokalizacji mebli bezpośrednio przy ścianach zewnętrznych następuje utrudniona cyrkulacja powietrza co skutkuje zmianą współczynnika przejmowania ciepła.



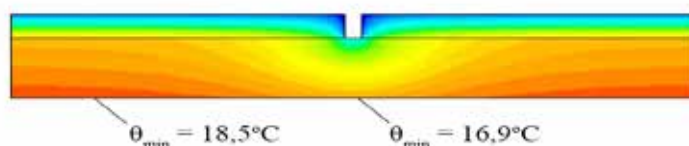
Rys. 2.7.

Mostek termiczny 2D w programie Psi-Them - temperatura w narożu niezabudowanym i zabudowanym.

Z punktu widzenia prowadzenia procesu budowlanego mostki termiczne dzieli się na:

- mostki projektowe,
- mostki wykonawcze.

Mostek cieplny wynikający z rozwiązań projektowych może być defektem termicznym lub anomalią cieplną. Mostki będące defektami termicznymi wynikają z błędnego (nieprawidłowego) rozwiązania projektowego. Mostki projektowe typu anomalie cieplne, nie stanowią błędów projektowych i wynikają np. z geometrii przegród budowlanych (np. naroże zewnętrzne). Przykład mostka cieplnego pochodzenia wykonawczego pokazano na rys. 2.8. Wskutek wadliwego połączenia płyt izolacji termicznych powstała szczelina generuje zwiększone straty ciepła oraz powoduje obniżenie temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany.



Rys. 2.8.

Mostek termiczny powstały wskutek wadliwego wykonawstwa.

2.3.

Literatura

- [1] Dylla A: *Praktyczna fizyka cieplna budowli. Szkoła projektowania złączy budowlanych*, Wydawnictwo Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009r.
- [2] Heindl, Krec, Panzhauser, Siegmund. *Waermebrucken. Springer-Verlag*. Wien 1987.
- [3] Klemm P. i in.: *Budownictwo ogólne: Fizyka budowli*, Wydawnictwo ARKADY, 2005r.
- [4] Pawłowski K.: *Współczesna charakterystyka mostka cieplnego*, IZOLACJE nr 9/2008,
- [5] Pawłowski K. *Projektowanie przegród zewnętrznych*. Izolacje nr 2/2013. Warszawa 2013.
- [6] Volland J, Pils M, Skora T. *Waermebrucken. Rudolf Muller Verlag*. Koeln 2012.
- [7] Willems W. Schild K. Dinter S. Stricker D. *Formeln und Tabellen Bauphysik*. Viewegverlag 2007.
- [8] PN-EN ISO 10211:2008, *Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe*.

3. UWZGLĘDNIANIE MOSTKÓW TERMICZNYCH W OBLICZENIACH

3.1.

Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
Δd	dodatkowa grubość izolacji	m
Δp	nadwyżka ciśnienia pary wodnej	Pa
ϑ	temperatura	°C
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
Φ	strumień ciepła	W
χ	punktowy współczynnik przenikania ciepła	W/K
ψ	liniowy współczynnik przenikania ciepła	W/(m·K)
A_i	pole powierzchni i-tej przegrody o regulowanej temperaturze	m ²
b_{tr}	współczynnik redukcji temperatury	-
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
$\frac{H_{(T,D,g,U,A)}}{H_{tr}}$	współczynnik przenoszenia ciepła	W/K
l	długość	m
L	współczynnik sprzężenia cieplnego	W/K
L_{2D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego	W/(m·K)
L_{3D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia trójwymiarowego	W/K
$p_{i(e)}$	ciśnienie pary wodnej	Pa
Q_H	całkowita ilość ciepła przenieszonego ze strefy ogrzewanej w n-tym miesiącu roku	kWh/m-c
R_n	suma oporów cieplnych n-warstw	m ² ·K/W
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej	m ² ·K/W
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	m ² ·K/W
R_T	całkowity opór cieplny	m ² ·K/W
t_m	liczba godzin ogrzewania	h
U	współczynnik przenikania ciepła	W/(m ² ·K)
U_c	skorygowany współczynnik ciepła	W/(m ² ·K)
ΔU	człon korekcyjny	W/(m ² ·K)
ΔU_g	poprawka z uwagi na pustki powietrzne	W/(m ² ·K)
ΔU_f	poprawka z uwagi na łączniki mechaniczne	W/(m ² ·K)
ΔU_r	poprawka z uwagi na dach o odwróconym układzie warstw	W/(m ² ·K)

3.2.

Terminy i definicje

Liniowy współczynnik przenikania ciepła – gęstość strumienia ciepła w stanie ustalonym podzielona przez długość i przez różnicę temperatury między środowiskami po obu stronach mostka cieplnego.

Punktowy współczynnik przenikania ciepła – wielkość strumienia ciepła w stanie ustalonym podzielona przez różnicę temperatury między środowiskami po obu stronach mostka cieplnego.

Współczynnik przenoszenia ciepła – wielkość strumienia ciepła podzielona przez różnicę temperatury między dwoma środowiskami, szczególnie stosowana do obliczania współczynnika przenoszenia ciepła przez przenikanie lub wentylację.

Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie – wielkość strumienia ciepła spowodowana przenikaniem ciepła przez strukturę budynku, podzielona przez różnicę między temperaturami środowiska po obu stronach konstrukcji.

Współczynnik przenoszenia ciepła przez wentylację – wielkość strumienia ciepłego spowodowana powietrzem wchodzącym do przestrzeni klimatyzowanej zarówno przez infiltrację jak i wentylację, podzielona przez różnicę temperatury między temperaturą powietrza wewnętrznego, a temperaturą powietrza dostarczonego.

Współczynnik przenoszenia ciepła budynku – suma współczynników przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację.

Współczynnik sprzężenia cieplnego – strumień ciepła podzielony przez różnicę temperatury pomiędzy dwoma środowiskami, które są połączone cieplnie rozpatrywaną przegrodą.

Następstwem występowania mostków cieplnych, które na ogół występują przy wszelkich połączeniach między komponentami budowlanymi lub gdy struktura przegrody budynku zmienia swoją budowę, w porównaniu do struktur bez mostka jest:

- zmiana wielkości strumienia ciepła,
 - zmiana wewnętrznej temperatury powierzchni.
- Pomimo stosowania podobnych procedur obliczeniowych, nie są one identyczne do obliczania strumienia ciepła i temperatur powierzchni. Stosowane metody obliczeniowe na ogół nie są zrozumiałe, a istniejące normy zawierają metody uproszczone lub dość skomplikowane wytyczne do obliczeń komputerowych. Takim przykładem jest zestaw przywoływanych w rozporządzeniu [1] norm: PN EN ISO 10211: 2008. Mostki cieplne w budynkach. Strumień cieplny i temperatura powierzchni. Obliczenia szczegółowe [3] oraz norma PN EN ISO 14683: 2008. Mostki cieplne

w budynkach - Liniowy współczynnik przenikania ciepła - Metody uproszczone i wartości orientacyjne [4]. Normy te nie zawierają metody obliczeń mostków cieplnych!

Norma [4] to praktycznie zestaw wybranych detali, dla których identyfikuje się typowe liniowe mostki cieplne. Jak podano w zakresie zastosowania normy p.1:

"Niniejsza norma dotyczy uproszczonych metod obliczania strumienia cieplnego przepływającego przez mostki cieplne, pojawiające się na złączach elementów budowlanych. Nie ma ona zastosowania do mostków cieplnych związanych z ościeżami okiennymi i drzwiowymi oraz ścianami osłonowymi.

W normie podano wymagania w odniesieniu do katalogów mostków cieplnych oraz metod obliczeń ręcznych, a także ograniczoną liczbę stabilizowanych wartości orientacyjnych liniowego współczynnika przenikania ciepła".

Detale, dla których podano w normie wielkości liniowych mostków cieplnych oraz liniowego współczynnika sprzężenia cieplnego L_{2D} są uproszczone, a wartości liczbowe mostków, należy traktować jako bardzo orientacyjne.

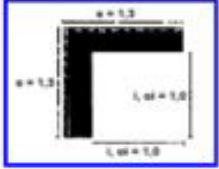
Przewidywana w normie [4], niepewność uzyskania wyniku przy stosowaniu katalogu sięga 20%. Jak podano w dalszej części normy jest ona przydatna w przypadku: „*Gdy detale budowlane nie są jeszcze zaprojektowane, ale wymiary i kształt budynku są zdefiniowane tak, że znane są pola powierzchni różnych elementów obudowy budynku, takich jak dachy, ściany i podłogi, wówczas można dokonać tylko przybliżonego oszacowania udziału mostków cieplnych w całkowitych stratach ciepła. Takie przybliżone oszacowanie można zrobić stosując podane w tablicy 2 [4], wartości orientacyjne liniowego współczynnika przenikania ciepła.*"

Przykładowe wartości z tablicy 2 normy [4], pokazano na rys. 3.1.

Należy zaznaczyć, iż w normie [4], rysunki są mało czytelne, a czasami uniemożliwiają prawidłowe rozpoznanie budowy ściany.

Do innych celów służy norma PN EN ISO 10211 [3]. Jej zakres obejmuje przygotowanie projektan-

ta do tworzenia modeli 2D i 3D, które będą dalej analizowane z użyciem metod komputerowych. Norma zawiera szczegółowe wytyczne, co do sposobu konstruowania i wymiarowania modeli na potrzeby obliczeń komputerowych.

Naroża			
			
C1	C2	C3	C4
$\Psi_e = -0,05$	$\Psi_e = -0,10$	$\Psi_e = -0,20$	$\Psi_e = -0,15$
$\Psi_{oi} = 0,15$	$\Psi_{oi} = 0,10$	$\Psi_{oi} = 0,00$	$\Psi_{oi} = 0,05$
$\Psi_i = 0,15$	$\Psi_i = 0,10$	$\Psi_i = 0,00$	$\Psi_i = 0,05$
$L_{2D} = 0,84$	$L_{2D} = 0,79$	$L_{2D} = 0,70$	$L_{2D} = 0,81$



Rys. 3.1.

Przykładowe wartości liniowych mostków cieplnych i współczynnika sprzężenia cieplnego na podstawie normy [4].

3.3.

Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie

Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie, H_T , oblicza się zgodnie z równaniem [5] (3.1.)

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (3.1)$$

gdzie:

H_D bezpośredni współczynnik przenoszenia ciepła między przestrzenią ogrzewaną lub chłodzoną a środowiskiem zewnętrznym przez obudowę budynku zdefiniowany równaniem (3.2) [W/K],

H_g współczynnik przenoszenia ciepła gruntu w stanie ustalonym [W/K],

H_U współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie przez przestrzeń nieklimatyzowaną [W/K],

H_A współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie do przyległych budynków [W/K].

W normie PN EN ISO 10211 podano ogólną procedurę obliczania całkowitego współczynnika sprzężenia cieplnego całkowitej obudowy lub którejkolwiek jej części, włączając przenoszenie ciepła do gruntu. Jeśli nie rozpatruje się przestrzeni nieklimatyzowanej, to całkowity współczynnik sprzężenia cieplnego odpowiada współczynnikowi przenoszenia ciepła przez przenikanie określonego w normie PN ISO 13789:2008 [5].

Współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie przez elementy budynku, oddzielającego przestrzeń ogrzewaną od powietrza zewnętrznego oblicza się albo bezpośrednio za pomocą metod komputerowych zgodnie z PN EN ISO 10211:2008, albo zgodnie z równaniem (3.2)

$$H_D = \sum A_i U_c + \sum \psi_i l_i + \sum \chi_j \quad (3.2)$$

gdzie:

H_D bezpośredni współczynnik przenoszenia ciepła między przestrzenią klimatyzowaną* lub chłodzoną, a środowiskiem zewnętrznym przez obudowę budynku [W/K],

U_c skorygowany współczynnik przenikania ciepła elementu i obudowy bez uwzględnienia wpływu liniowych i punktowych mostków termicznych [W/(m²·K)],

ψ_i liniowy współczynnik przenikania ciepła i-tego liniowego mostka termicznego [W/(m·K)],

l_i długość i-tego liniowego mostka termicznego [m],

χ_j punktowy współczynnik przenikania ciepła j-tego punktowego mostka termicznego [W/K], obliczony zgodnie z PN EN ISO 10211. Punktowe mostki cieplne, które są zazwyczaj częścią płaskich elementów budowlanych i są już uwzględniane w ich współczynnikach przenikania, nie powinny być tu dodawane,

A_i pole powierzchni przegrody w świetle przegrod do niej prostopadłych pomniejszone o pole powierzchni ewentualnych otworów okiennych i drzwiowych, obliczone w świetle ościeży [m²].

*Przestrzeń klimatyzowana rozpatrywanego budynku powinna być przed obliczeniem jasno zdefiniowana. Elementy budynku, które będą rozpatrywane w obliczeniach, są granicami przestrzeni ogrzewanych lub chłodzonych. Obudowa budynku powyżej gruntu jest modelowana przez płaskie i specjalnie ukształtowane elementy, jak pokazano na rysunku 3.2.

Wpływ liniowych mostków termicznych na wartość współczynnika przenikania ciepła danej przegrody wyraża się wzorem (3.3) [11]:

(3.3)

$$U = \frac{H_D}{A_e} = (A_i \cdot U_{1D} + \sum_k \Psi_k \cdot l_k + \sum_j \chi_j) / A_e \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

gdzie

U współczynnik przenikania ciepła elementu przegrody,

Ψ liniowy współczynnik przenikania ciepła mostków 2D,

χ punktowy współczynnik przenikania ciepła mostków 3D,

A_i powierzchnia elementu (przegrody) o numerze i ,

l_k długość mostka 2D o numerze k ,

H_D współczynnik przenoszenia ciepła złącza

A_e zewnętrzne pole powierzchni przegrody

Jeżeli obliczenia przeprowadzane są dla części budynku, granice tych części powinny być jasno zdefiniowane, aby suma współczynników przenoszenia ciepła przez przenikanie wszystkich części była równa współczynnikowi całego budynku.

3.4. Obliczanie liniowych współczynników przenikania ciepła

Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ [W/(m·K)] to strumień cieplny w stanie ustalonym podzielony przez długość i różnicę temperatur po obu stronach mostka cieplnego. Stanowi człon korekcyjny, jaki uwzględnia się przy obliczaniu współczynnika przenikania ciepła przegrody budowlanej. Wyznaczany jest ze wzoru:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j \quad (3.4)$$

gdzie:

L_{2D} współczynnik sprzężenia cieplnego otrzymany na podstawie obliczeń dwuwymiarowego przepływu ciepła komponentu oddzielającego dwa analizowane środowiska [W/(m·K)],

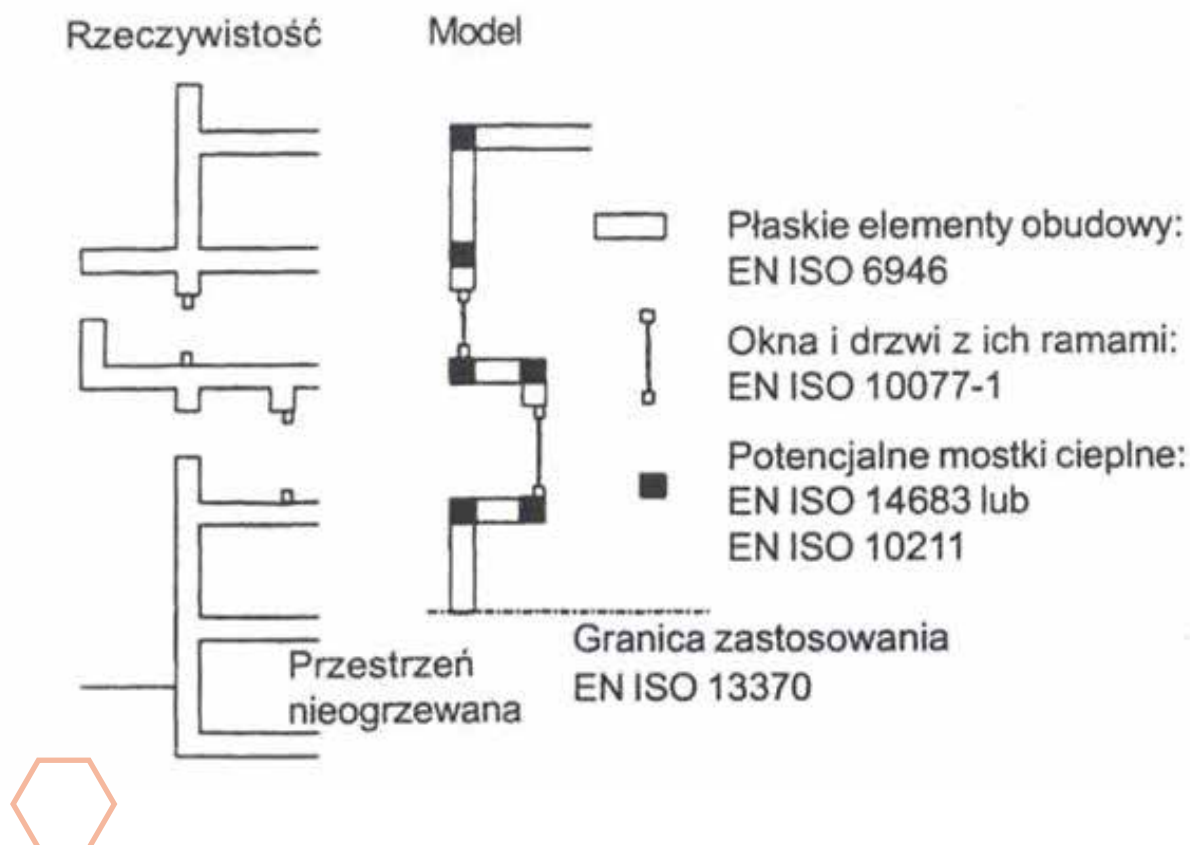
U_j współczynnik przenikania ciepła jednowymiarowego j-tego komponentu oddzielającego dwa analizowane środowiska [W/(m²·K)],

l_j długość, do której ma zastosowanie U_j [m],

N liczba jednowymiarowych komponentów.

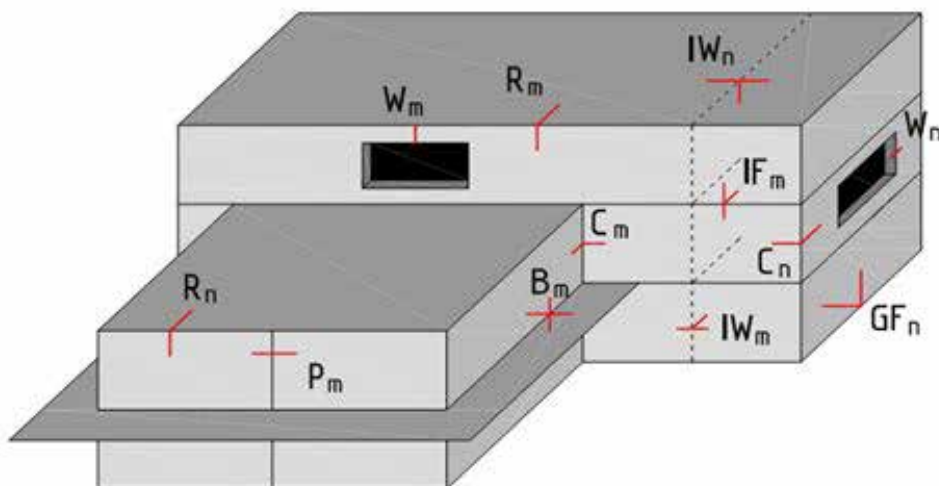
Na rysunku pokazano typowe położenia powszechnie spotykanych typów dwuwymiarowych mostków cieplnych [4]. Duże litery przy każdym mostku cieplnym oznaczają typ mostka, a indeks dolny jest oznaczeniem konkretnego mostka, np. W_n oznacza mostek cieplny na połączeniu obudowy zewnętrznej ze ścianą wewnętrzną, a W_m ozna-

cza inny mostek cieplny tego samego typu. Wykaz normowy obejmuje typowe detale, które należy obowiązkowo sprawdzić przy tego typu analizach. Selekcja w oparciu o normę [4] nie wyczerpuje wszystkich przypadków, w jakich potencjalnie może dojść do wystąpienia liniowego strumienia ciepła.



Rys. 3.2.

Modelowanie obudowy budynku przez płaskie i specjalnie ukształtowane komponenty [5].



Rys. 3.3.

Szkic budynku z rozmieszczeniem typowych mostków termicznych [4].

3.4.1.

Metody wyznaczania liniowego współczynnika przenikania ciepła.

W normie [4] określono cztery metody wyznaczania wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ . Wszystkie wykazują duże zróżnicowanie dokładności (wyrażonej w %). Wykaz metod wraz z przypisanymi dokładnościami, zestawiono w poniższej tabeli.

Lp.	Metoda określenia liniowego mostka cieplnego ψ [W/mK]	Typowa dokładność metody [%]
1.	obliczenia komputerowe	± 5
2.	katalogi mostków cieplnych	± 20
3.	obliczenia ręczne	± 20
4.	wartości orientacyjne	$0 \div 50$



Tablica 3.1.
Metody określania wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła [4].

Z powyższej tabeli wynika, że metoda obliczeń komputerowych zapewnia najdokładniejszą wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła. Według [4] metodę komputerową należy prowadzić zgodnie z [3]. Pozostałe metody cechuje duży błąd obliczeń. Detale występujące w katalogach mostków cieplnych posiadają ustalone parametry, które nie dają się modyfikować (np. wymiary i materiały). To generuje błąd sięgający 20%. Dopuszcza się wykorzystywanie wartości zapisanych w katalogach w sytuacji, gdy mostek katalogowy posiada wymiary i właściwości cieplne zbliżone do analizowanego detalu rzeczywistego lub gdy jest on mniej korzystny cieplnie. Właściwym rozwiązaniem dla projektanta jest stosowanie komputerowych katalogów mostków termicznych, które cechuje pewna elastyczność, to jest możliwość dostosowywania wymiarów, materiałów oraz warunków brzegowych. Dokładność takich obliczeń jest porównywalna z obliczeniami komputerowymi. Wartość współczynnika ψ , można również określać metodą obliczeń ręcznych. Wykonuje się je z użyciem ręcznych kalkulatorów oraz prostych

programów komputerowych. Metoda ta zapewnia dużą dokładność wyników dla szczególnych przypadków mostków termicznych, ale przy analizowaniu nietypowych detali architektoniczno-budowlanych błąd obliczeń może być bardzo wysoki. Najmniej dokładna wydaje się być metoda wartości orientacyjnych liniowego współczynnika przenikania ciepła. Wartości takie zostały zamieszczone w tablicy A.2. normy [4]. Opisywaną metodę zaleca się stosować w przypadku, gdy projektant nie dysponuje dostatecznymi informacjami na temat szczegółowej budowy komponentów przegrody budowlanej. Wartości orientacyjne zostały wyznaczone dla parametrów odpowiadających najgorszej sytuacji.

3.4.2.

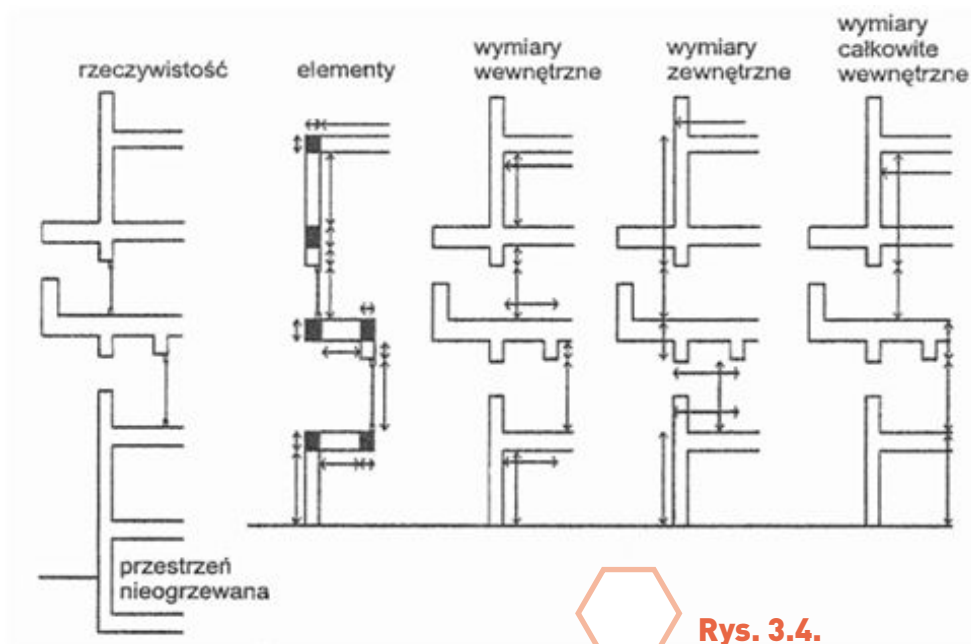
Systemy wymiarowania liniowych mostków termicznych.

Przy wyznaczaniu wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła projektant zobowiązany jest do określenia systemu wymiarowego, na którym opiera swoje analizy. Norma [4], podaje trzy systemy wymiarowania mostków termicznych:

- wymiarowanie wewnętrzne między wykończonymi wewnętrznymi powierzchniami każdego pomieszczenia budynku (bez uwzględnienia grubości przegród wewnętrznych),
- wymiarowanie wewnętrzne między wykończonymi wewnętrznymi powierzchniami zewnętrznych przegród budynku (z uwzględnieniem grubości przegród wewnętrznych),
- wymiarowanie zewnętrzne między wykończonymi zewnętrznymi powierzchniami zewnętrznych przegród budynku.

Dopuszczalny jest każdy z wymienionych wyżej systemów jak na rys 3.4. Projektant, decydując się na któryś z nich, jest obowiązany do konsekwentnego stosowania wybranego systemu we wszystkich częściach analizowanego budynku.

Jeżeli zasadnicza warstwa izolacyjna jest ciągła, liniowy współczynnik przenikania ciepła niektórych połączeń może być mały, szczególnie, kiedy stosowane są wymiary zewnętrzne lub wymiary całkowite wewnętrzne. W tych przypadkach są one często pomijane. Skutkiem tego mogą pojawiać się małe różnice w obliczonych wartościach współczynnika przenoszenia ciepła przez przenikanie między systemami wymiarów, jeśli pewne mostki są zaniedbywane w jednym systemie, a nie są w innym.



Rys. 3.4.

Sposoby przyjmowania wymiarów [4].

3.5.

Obliczanie punktowych współczynników przenikania ciepła

Norma PN EN ISO 10211 określa sposób obliczania punktowego współczynnika przenikania ciepła z równania:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \Psi_j \cdot l_j \quad (3.5)$$

gdzie:

L_{3D} współczynnik sprzężenia cieplnego otrzymany z 3-D obliczeń 3-D komponentu, oddzielającego dwa rozważane środowiska [W/K],

U_i współczynnik przenikania ciepła 1-D komponentu i, oddzielającego dwa rozpatrywane środowiska [W/(m²·K)],

A_i pole powierzchni, na której stosuje się wartość U_i [m²],

Ψ_j liniowy współczynnik przenikania ciepła [W/mK],

l_j długość [m],

N_j liczba komponentów 2-D,

N liczba komponentów 1-D.

Powyższe równanie wykorzystuje się w programach komputerowych do analizy cieplnej i do wyznaczania punktowych mostków cieplnych. Istnieją również mniej dokładne lecz prostsze metody pozwalające wykonać wystarczająco dokładną ocenę strat ciepła związaną z mostkami cieplnymi. Obliczenia takie prowadzi się na ogół zgodnie

z normą PN EN ISO 6946 : 2008 [6]. Zgodnie z aneksem D do normy PN-EN- ISO 6946: 2008 [6], wpływ punktowych mostków cieplnych uwzględnia się poprzez obliczenie skorygowanego współczynnika przenikania ciepła U_c metodą uproszczoną, poprzez zastosowanie dodatków uwzględniających wpływ mostków cieplnych:

$$U_c = U_o + \Delta U \quad (3.6)$$

gdzie:

U_c skorygowany współczynnik przenikania ciepła [W/(m²·K)],

U_o współczynnik przenikania ciepła dla przegrody pełnej [W/(m²·K)],

ΔU człon korekcyjny określony wzorem

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (3.7)$$

gdzie:

ΔU_g poprawka na nieszczelności w warstwie izolacji [W/(m²·K)],

ΔU_f poprawka na łączniki mechaniczne [W/(m²·K)],

ΔU_r poprawka na wpływ opadów dla dachu o odwróconym układzie warstw [W/(m²·K)].

Dla izolacji cieplnej ścian zewnętrznych wykonanej w systemie ETICS (metoda lekka mokra), we wzorze można pominąć poprawkę na nieszczelności w warstwie izolacji cieplnej i nie wspominać o poprawce uwzględniającej wpływ opadów, jako że dotyczy jedynie dachów o odwróconym układzie warstw. Wzór przyjmie więc postać:

$$U_c = U_o + \Delta U_f \quad (3.8)$$

Wartość poprawki należy obliczyć stosując procedurę dokładną (PN EN ISO 10211) lub uproszczoną. Przez procedurę dokładną należy rozumieć metody numeryczne zgodne z PN-EN ISO 10211:2008. Stosując te metody można wyznaczyć wartość χ [W/K], zwaną punktowym współczynnikiem przenikania ciepła.

Znając punktowy współczynnik przenikania ciepła χ , możemy obliczyć wartość poprawki ΔU_f . Zgodnie ze wzorem:

$$\Delta U_f = \chi n \quad (3.9)$$

gdzie :

n ilość łączników na 1 m² powierzchni przegrody,
 χ punktowy współczynnik przenikania ciepła.

Jeżeli nie jest znana wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła, można zgodnie z normą PN-EN ISO 6946:2008 zastosować przybliżoną metodę oceny wpływu łączników mechanicznych, takich jak kotwy ściennie między warstwami muru, łączniki dachowe lub łączniki w złożonych systemach paneli. W metodzie tej dodatek uwzględniający takie łączniki obliczamy zgodnie ze wzorem:

$$\Delta U_f = \alpha \frac{\lambda_f A_f n_f}{d_o} \left(\frac{R_l}{R_{Th}} \right)^2 \quad (3.10)$$

gdzie:

α 0,8 jeżeli łącznik przebija całkowicie warstwę izolacji (np. dla dachów płaskich z podłogą z blachy fałdowej za wyjątkiem łączników teleskopowych),

α 0,8 $\frac{d_i}{d_o}$, jeżeli łącznik jest wpuszczony w podłogę (np. kotwy ściennie w murze, lub podłogę betonowe w przypadku dachów płaskich) zgodnie z rys. 3.5

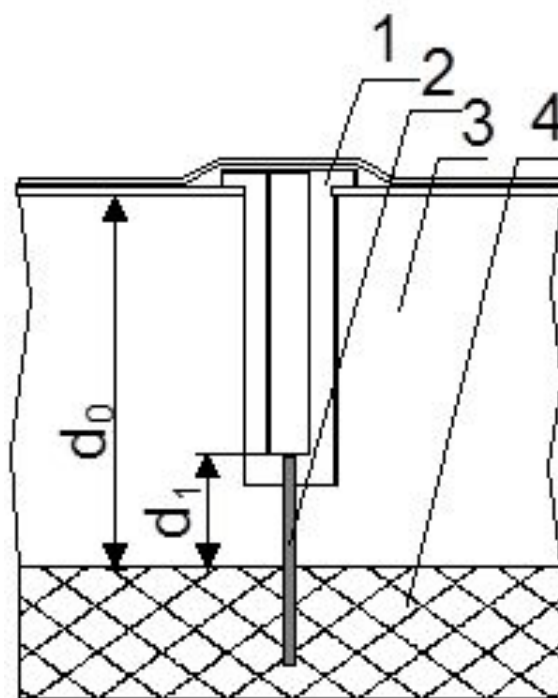
λ_f współczynnik przewodzenia ciepła łącznika,
 n_f ilość łączników na 1 m² powierzchni,
 A_f pole przekroju poprzecznego jednego łącznika,

d_o grubość warstwy izolacji zawierającej łącznik,

d_i długość łącznika, który przebija warstwę izolacji,

R_l opór cieplny warstwy izolacji przebijanej przez łączniki,

R_{Th} całkowity opór cieplny komponentu z pominięciem wszystkich mostków cieplnych obliczany zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008.



Rys. 3.5.

Schemat łącznika wpuszczanego.

1 – łeb z tworzywa sztucznego;

2 – trzpień wpuszczony;

3 – izolacja cieplna;

4 – podłoga.

Zgodnie z normą PN – EN ISO 6946:2008, poprawki nie należy stosować w następujących przypadkach:

- gdy łączniki przechodzą przez pustą wnękę,
- gdy współczynnik przewodzenia ciepła łącznika jest mniejszy niż 1 W/mK.

Ostatni akapit dotyczy łączników z rdzeniem tworzywowym, np. z polipropylenu, które nie powinny być stosowane w systemach dociepleń posiadających ETA, zgodnie z ETAG 14.

Zakres stosowania poprawki ΔU_f , uwzględniający łączniki określa norma PN-EN ISO 6946:2008.

W punkcie 7 normy możemy przeczytać: *Poprawki do współczynnika przenikania ciepła nie są wymagane, jeżeli całkowita poprawka jest mniejsza niż 3% wartości współczynnika przenikania ciepła U.*

Przyjmując, iż zgodnie z rozporządzeniem Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późniejszymi zmianami [1], wartości maksymalne współczynników przenikania ciepła dla celów projektowania wynoszą w budynku mieszkalnym:

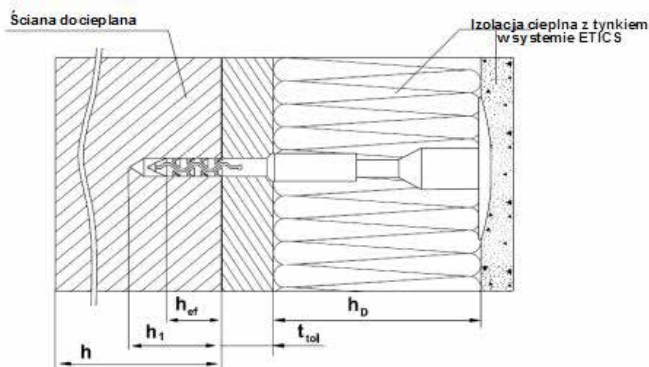
- dla ścian zewnętrznych w pomieszczeniach ogrzewanych $U_{max} < 0,25$ [W/(m² K)],
- dla dachów i stropodachów $U_{max} < 0,20$ [W/(m² K)], możemy łatwo określić graniczny poziom poprawki, który należy uwzględnić w obliczeniach.
Wartość poprawek, poniżej której możemy je zaniedbać w obliczeniach wynosi dla łączników mechanicznych odpowiednio:
- dla ścian zewnętrznych w pomieszczeniach ogrzewanych $\Delta U_f < 0,0075$ [W/(m² K)],
- dla dachów i stropodachów $\Delta U_f < 0,006$ [W/(m² K)].

3.5.1.

Mostki punktowe w systemach ETICS

Od 2009 roku wprowadzane są na rynek Polski złożone systemy izolacji cieplnej ścian zewnętrznych budynków pod wspólną nazwą ETICS. Szczegółowe wytyczne, co do zasad projektowania i wykonywania takich systemów można znaleźć w instrukcji ITB nr 447/2009 [9]. W instrukcji szczególny nacisk położono na sprawę uwzględniania mostków punktowych, spowodowanych łącznikami mechanicznymi. Poprawkę uwzględniającą łączniki mechaniczne oblicza się zgodnie ze wzorem (3.11), czyli analogicznie jak w normie PN-EN ISO 6946:2008. Dla celów projektowania podano w instrukcji trzy wartości punktowego współczynnika przenikania ciepła χ_p , jakie zaleca się stosować przy obliczeniach tj.:

- $\chi_p = 0,002$ W/K dla łączników wykonanych ze stali nierdzewnej z główką pokrytą tworzywem sztucznym oraz łączników ze szczeliną powietrzną przy główce śruby,
- $\chi_p = 0,004$ W/K dla łączników wykonanych ze stali galwanizowanej z główką przykrytą tworzywem sztucznym,



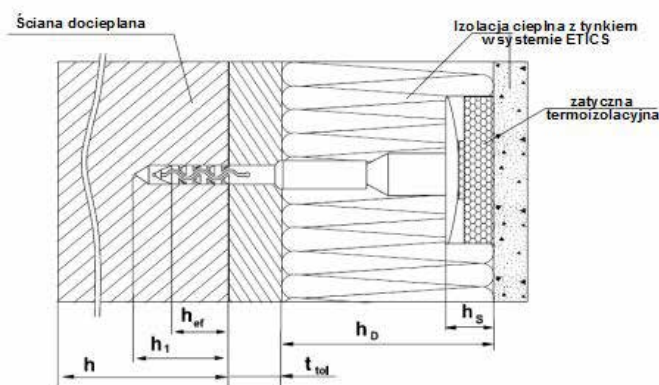
Rys. 3.6.

Łącznik do termoizolacji zapewniający niską wartość χ_p , przy kotwieniu zwykłym, na podstawie ETA-09/0245 [10].

- $\chi_p = 0,008$ W/K w przypadku pozostałych łączników metalowych.

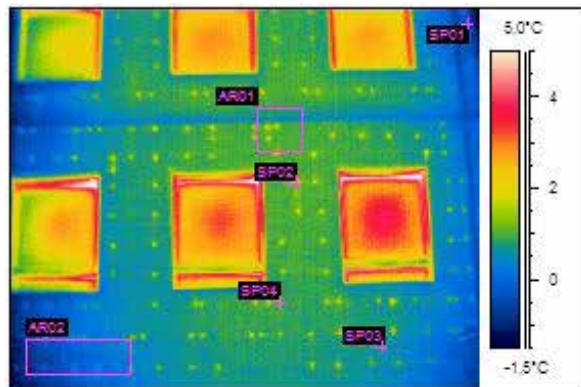
W praktyce stosuje się dwa rozwiązania zapewniające najniższą wartość $\chi_p = 0,002$ [W/K], oprócz łączników z główką pokrytą tworzywem oraz łączników ze szczeliną powietrzną, można stosować łączniki z dodatkową izolacją przy główce, przy kotwieniu zagłębionym.

Rozwiązania takie pokazano na rys. 3.6/7



Rys. 3.7.

Łącznik do termoizolacji zapewniający niską wartość χ_p , przy kotwieniu zagłębionym, na podstawie ETA-09/0245 [10].



Rys. 3.8.

Mostki punktowe na elewacji budynku ocieplonego.

Dla innych łączników powszechnie stosowanych przy dociepleniach, zaleca się stosowanie niższych wartości χ_p tj. 0,004 lub 0,008, lub wartości wynikających z obliczeń.

Zaleca się również, aby kompensować straty spowodowane przez łączniki, stosując dodatkową grubość izolacji cieplnej zgodnie ze wzorem:

$$U = U(max) - \chi_p \cdot n \quad (3.11)$$

Zwiększoną grubość izolacji, wynikająca z faktu zastosowania łączników należy obliczać ze wzoru:

$$\Delta d_i = \lambda_{io} \left(\frac{1}{U(max) - \chi_p \cdot n} - \frac{1}{U(max)} \right) \cdot 100 \quad (3.12)$$

gdzie:

Δd_i dodatkowa grubość izolacji cieplnej kompensująca mostki punktowe, związane z łącznikami mechanicznymi [m],

λ_{io} współczynnik przewodzenia ciepła materiału izolacyjnego [W/(m·K)],

$U(max)$ maksymalna dopuszczana przepisywana wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla ściany zewnętrznej [W/(m²·K)].

Dodatkowa grubość warstwy materiału izolacyjnego Δd_i wynikająca z zastosowania łączników mechanicznych w złożonych systemach izolacji cieplnej ETICS, zależy od jakości termicznej materiału izolacyjnego, wyrażanego współczynnikiem przewodzenia ciepła oraz rodzaju łączników.

3.6.

Określanie temperatury powierzchni wewnętrznej – czynnik temperaturowy f_{Rsi}

Jeżeli istnieją tylko dwa rozpatrywane środowiska i podłoże nie jest częścią modelu geometrycznego, temperatury powierzchni mogą być wyrażone w postaci bezwymiarowej zgodnie z równaniem [7]:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (3.13)$$

gdzie:

θ_{si} temperatura powierzchni wewnętrznej [°C],

θ_i temperatura powietrza wewnętrznego [°C],

θ_e temperatura powietrza zewnętrznego [°C].

Obliczeniowy czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej ($f_{Rsi,min}$) – jest to minimalny dopuszczalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej. Czynnik ten określa się dla każdego miesiąca, na podstawie danych klimatycznych (średnie wieloletnie wartości temperatury oraz wilgotności względnej powietrza zewnętrznego).

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (3.14)$$

gdzie:

$\theta_{si,min}$ – minimalna dopuszczalna temperatura powierzchni wewnętrznej [°C]. Jest to temperatura, poniżej której następuje rozwój pleśni.

$$\theta_{si,min} = \begin{cases} \frac{237,3 \log_e \left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5} \right)} & \text{dla } p_{sat}(\theta_{si}) \geq 610,5 \text{ Pa} \\ \frac{265,5 \log_e \left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5} \right)}{21,875 - \log_e \left(\frac{p_{sat}(\theta_{si})}{610,5} \right)} & \text{dla } p_{sat}(\theta_{si}) < 610,5 \text{ Pa} \end{cases} \quad (3.15)$$

Ciśnienie powietrza wewnętrznego w stanie nasycym oblicza się ze wzoru:

$$p_{sat}(\theta_{si}) = \frac{p_i}{0,8} \quad (3.16)$$

gdzie:

p_i ciśnienie pary wodnej powietrza wewnętrznego [Pa].

Ciśnienie pary wodnej powietrza wewnętrznego wyznacza się zgodnie z poniższym wyrażeniem:

$$p_i = p_e + \Delta p \quad (3.17)$$

gdzie:

Δp nadwyżka wewnętrznego ciśnienia pary wodnej [Pa].

p_e ciśnienie pary wodnej powietrza zewnętrznego [Pa], obliczane na podstawie poniższego wzoru:

$$p_e = \frac{\varphi_e p_{sat}(\theta_e)}{100} \quad (3.18)$$

gdzie:

φ_e wilgotność względna powietrza zewnętrznego [%],

$p_{sat}(\theta_e)$ ciśnienie pary wodnej powietrza zewnętrznego w stanie nasycenia (funkcja temperatury pow. zewnętrznego) [Pa]:

$$(3.19)$$

$$p_{sat}(\theta_e) = \begin{cases} p_{sat}(\theta_e) = 610,5 e^{\frac{17,269 \theta_e}{237,5 + \theta_e}} & \text{dla } \theta_e \geq 0^\circ\text{C} \\ p_{sat}(\theta_e) = 610,5 e^{\frac{21,857 \theta_e}{265,5 + \theta_e}} & \text{dla } \theta_e < 0^\circ\text{C} \end{cases}$$

Nowoprojektowana przegroda zewnętrzna podlega sprawdzeniu ryzyka wystąpienia kondensacji powierzchniowej oraz międzywarstwowej. Możliwość wykroplenia się wilgoci wewnątrz analizowanego komponentu sprawdza się najczęściej za pomocą programów komputerowych do obliczeń wilgotnościowych (porównanie przebiegu wykresu ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz ciśnienia pary wodnej nasyconej).

W przypadku ryzyka wystąpienia kondensacji powierzchniowej sprawdzany jest następujący warunek:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,max} \quad (3.20)$$

gdzie:

$f_{Rsi,max}$ czynnik temperaturowy miesiąca krytycznego (miesiąc, którego wartość $f_{Rsi,min}$ jest największa),

f_{Rsi} czynnik temperaturowy wewnętrznej powierzchni komponentu, wyznaczony dla płaskiego elementu ze wzoru:

$$f_{Rsi} = \frac{U^I - R_{si}}{U^I} \quad (3.21)$$

dla wielowymiarowego strumienia ciepłego na podstawie programu komputerowego, wykorzystującego metodę elementów skończonych lub podobnego, zgodnie z [3].

Do sprawdzenia ryzyka wystąpienia kondensacji na powierzchni wewnętrznej przegrody należy przyjmować następujące wartości oporu przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej R_{si} :

- oszklenie i ramy: 0,13 m²·K/W,
- górna część pomieszczenia: 0,25 m²·K/W,
- dolna część pomieszczenia: 0,35 m²·K/W,
- znaczne ekranowanie powierzchni przez przedmioty, np. meble: 0,50 m²·K/W.

Czynnik temperaturowy powinien być obliczony z błędem mniejszym niż 0,005.

UWAGA: Jeżeli są więcej niż dwie temperatury brzegowe, należy zastosować ważony czynnik temperaturowy (PN EN ISO 10211) [3].

Jeżeli model geometryczny uwzględnia środowiska wewnętrzne o różnych temperaturach, rozpatrywane są co najmniej trzy temperatury brzegowe.

3.7.

Uwzględnianie mostków termicznych w certyfikacji energetycznej budynków

W myśl rozporządzenia w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku [2], w celu wyznaczenia miesięcznych wartości zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania i wentylacji Q_H , konieczne jest obliczenie współczynnika przenoszenia ciepła przez przenikanie dla strefy ogrzewanej wg wzoru:

$$Q_H = Q_{tr} + Q_{ve} \quad (3.22)$$

gdzie:

Q_{tr} całkowita ilość ciepła przenoszona ze strefy ogrzewanej przez przenikanie [kWh/m·c],

Q_{ve} całkowita ilość ciepła przenoszona ze strefy ogrzewanej przez wentylację [kWh/mc],

$$Q_{tr} = H_{tr} \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot t_m \cdot 10^{-3} \quad (3.23)$$

gdzie:

$H_{tr(T)}$ współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie dla strefy ogrzewanej wyznaczany zgodnie z Polska Normą dotyczącą obliczania projektowanego obciążenia cieplnego [W/K], (indeks tr - oznaczenie w rozporządzeniu w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej, indeks T - oznaczenie z normy dotyczącej obliczania obciążenia cieplnego PN-EN 12831:2006 [8])

θ_i temperatura wewnętrzna w pomieszczeniu [°C],

θ_e średnia miesięczna temperatura powietrza zewnętrznego [°C],

t_m^* liczba godzin ogrzewania [h].

* w oryginale rozporządzenia [2] zdefiniowano (prawdopodobnie omyłkowo), iż wartość t_m jest ilością godzin w miesiącu.

Współczynnik strat ciepła $H_{tr(T)}$ uwzględnia wpływ możliwych do wystąpienia mostków termicznych.

Dla typowej metody obliczeń sposób dokładny uwzględniają możliwość korzystania z katalogu mostków cieplnych lub obliczeń numerycznych [8]:

$$H_{tr} = \sum_i [b_{tr}(A_i \cdot U_i + \sum_j l_j \psi_j)] \quad (3.24)$$

gdzie:

b_{tr} współczynnik redukcji temperatury obliczany zgodnie z równaniem 9 normy PN-EN ISO 13789, lub z tabeli 4 normy PN-EN 12831

A_i pole powierzchni i-tej przegrody o regulowanej temperaturze [m²],

U_i współczynnik przenikania ciepła i-tej przegrody, bez mostków [W/(m² K)],

$l_j \psi_j$ dodatek uwzględniający liniowe mostki cieplne [W/K],

Dodatek χ_j na punktowe mostki cieplne występujący w normie PN-EN ISO 13789 we wzorze na obliczanie współczynnika strat ciepła $H_{tr(T)}$, został całkowicie pominięty w obliczeniach na użytek certyfikacji. Zgodnie z rozporządzeniem liniowe współczynniki przenikania ciepła należy obliczać korzystając z norm [3], [4].

3.8.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późniejszymi zmianami.
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 3 czerwca 2014 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2014 poz. 888).
- [3] PN-EN ISO 10211:2008, *Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.*
- [4] PN-EN ISO 14683:2008, *Mostki cieplne w budynkach, Liniowy współczynnik przenikania ciepła, Metody uproszczone i wartości orientacyjne.*
- [5] PN-EN ISO 13789:2008, *Cieplne właściwości użytkowe budynków - Współczynniki przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację -- Metoda obliczania.*
- [6] PN-EN ISO 6946: 2008, *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.*
- [7] PN-EN ISO 13788:2003, *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku - Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa -- Metody obliczania.*
- [8] PN-EN 12831:2006, *Instalacje ogrzewcze w budynkach - Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego*
- [9] Instrukcja ITB nr 447/2009 *Złożone systemy izolacji cieplnej ścian zewnętrznych budynków ETICS. Zasady projektowania i wykonywania, ITB, Warszawa 2009.*
- [10] Europejska Aprobata Techniczna ETA-09/0245.
- [11] Dyla A. *Fizyka ciepła budowli w praktyce.* PWN Warszawa 2015

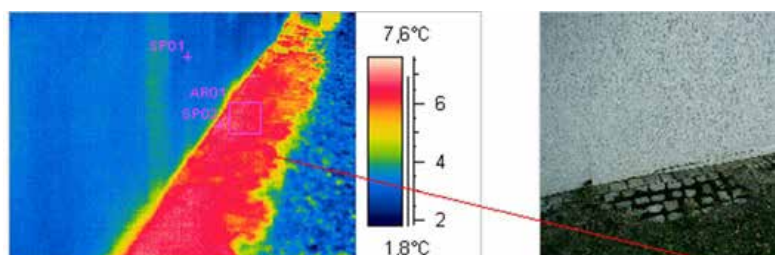
4. TYPOWE MOSTKI TERMICZNE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

4.1.

Diagnostyka mostków termicznych

Wykonując pomiary termograficzne budynków od strony zewnętrznej spodziewamy się, że zróżnicowanie izolacyjności cieplnej zewnętrznych przegród budowlanych uwidoczni się w postaci nierównomiernego pola temperatury na powierzchni przegrody. Ma to miejsce szczególnie w przypadku występowania mostków termicznych. Mostki cieplne występują w charakterystycznych miejscach w budynkach. Poniżej przedstawiono typowe mostki termiczne w obrębie ścian zewnętrznych wraz z krótkim komentarzem.

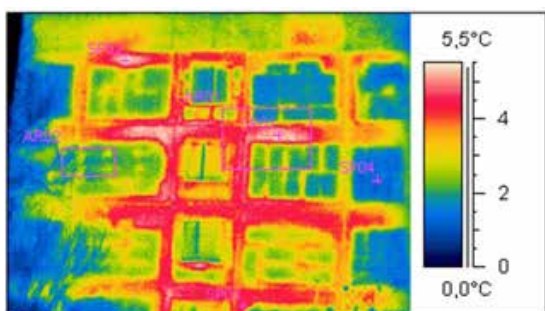
Ściany przyziemia charakteryzujące się dużą pojemnością cieplną (bezładnością) nie są podatne na gwałtowne zmiany temperatury otaczającego je powietrza. Elementy powierzchni o mniejszej bezładności cieplnej nadążając za temperaturą powietrza, mogą mieć niską temperaturę powierzchni zewnętrznej, bliską temperaturze otoczenia. Dla budynków niepodpiwniczonych, w większości przypadków izolacja termiczna powinna być zagłębiona w gruncie, minimalizując oddziaływanie mostków termicznych. Nie jest to konieczne w wyjątkowych sytuacjach, np. w przypadku zastosowania tzw. pustaków cokołowych. Na rys 4.1. pokazano mostek termiczny, powstały w skutek braku zastosowania izolacji termicznej ścian przyziemia (poniżej poziomu terenu). Termoizolacja została zakończona równo z gruntem, powodując zwiększone straty ciepła.



Rys. 4.1.

Mostki termiczne w obrębie ściany przyziemia [1].

Ściany nadziemne wykonywane jako jednowarstwowe są bardziej narażone na negatywne oddziaływanie mostków termicznych, od ścian dwu lub trójwarstwowych. Poprawnie zaprojektowana i wykonana izolacja termiczna umożliwia praktycznie wyeliminowanie lub zminimalizowanie mostków cieplnych ścian kondygnacji nadziemnych. W przypadku konstrukcji szkieletowej, w której elementy drobnowymiarowe (np. bloczki) stanowią jedynie wypełnienie, konieczne jest zastosowanie dodatkowej warstwy termoizolacyjnej. Przykład ściany szkieletowej bez izolacji cieplnej pokazano na rys. 4.2. Poprawnie wykonaną ścianę w aspekcie minimalizacji mostków termicznych przedstawiono na rys. 4.3.



Rys. 4.2.

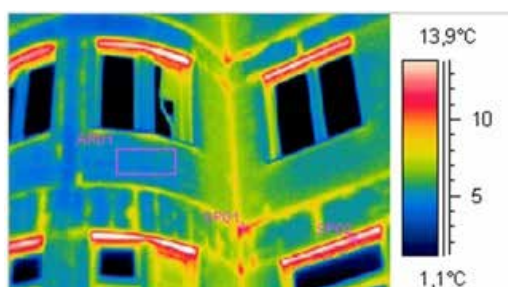
Mostki termiczne w obrębie ściany szkieletowej [1].



Rys. 4.3.

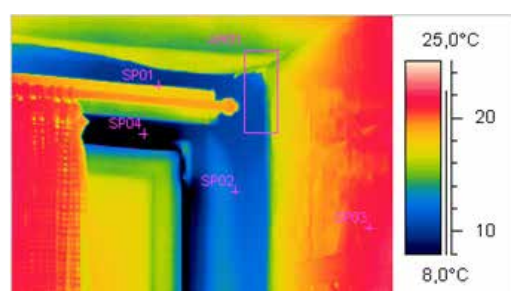
Poprawnie wykonana ściana w aspekcie izolacyjności termicznej [1].

Nadproża okienne wykonane w sposób nieprawidłowy generują mostki cieplne typu liniowego. W przypadkach braku zastosowania nadproży systemowych o wysokiej izolacyjności termicznej lub braku wykonania dodatkowej izolacji cieplnej nadproży o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła dochodzi do zwiększonego przepływu strumienia ciepła i obniżenia temperatury na wewnętrznej powierzchni nadproża oraz wzrostu temperatury na powierzchni zewnętrznej nadproża, co pokazano na rys. 4.4.



Rys. 4.4.

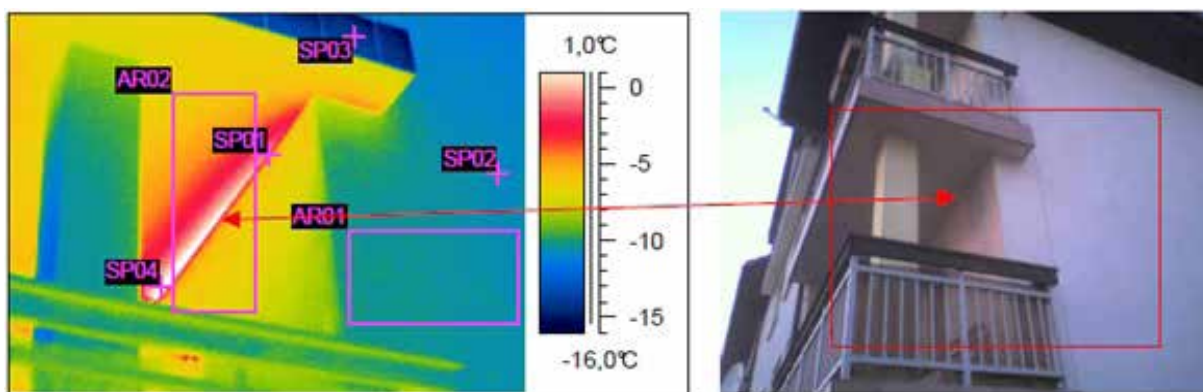
Liniowe mostki termiczne w miejscach nadproży okiennych [1].



Rys. 4.5.

Mostek termiczny w miejscu nadproża okiennego i ściany ostonowej [1].

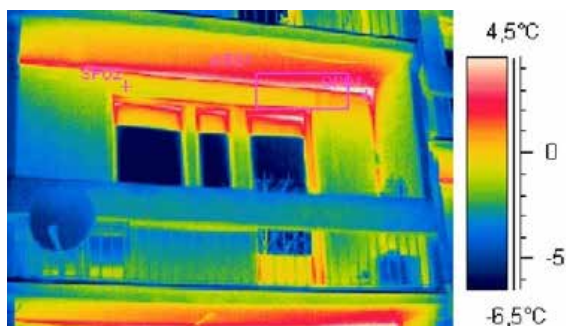
Balkony na ogół są liniowymi mostkami cieplnymi. W przypadku balkonów wspornikowych konstrukcyjnie związanych ze stropem międzykondygnacyjnym, wyeliminowanie mostka cieplnego jest znacznie utrudnione. Ze względu na swoje położenie balkony narażone są na większe oddziaływanie wiatru niż ściana pełna, co powoduje szybsze odprowadzanie ciepła do otoczenia. W budynkach nowych płyta balkonowa powinna być wykonywana z zastosowaniem tzw. łączników izotermicznych (ciepłych), zapewniających ciągłość izolacji termicznej ściany. Innym rozwiązaniem są balkony dostawiane, w których mostki termiczne związane są z zakotwieniem konstrukcji do ściany (mostek typu punktowego). Innym ewentualnym rozwiązaniem jest obustronne ułożenie termoizolacji nad i pod płytą balkonową, zapewniając jej ciągłość ze ścianą zewnętrzną.



Rys. 4.6.

Liniowy mostek na połączeniu płyty balkonowej i ściany zewnętrznej [1].

Pomiary termograficzne na styku ścianek loggii i ściany zewnętrznej wykazują wyższą temperaturę na powierzchni zewnętrznej niż sąsiadujące fragmenty przegrody ściennej. Spowodowane to jest, co najmniej dwoma czynnikami tzn. zmniejszoną konwekcją i możliwością „odbijania” się ciepła od sąsiednich ścian a także wyższym współczynnikiem emisyjności wnętrza. Płyta balkonowa loggii, z punktu widzenia pomiarów termowizyjnych interpretowana jest analogicznie jak przy typowych balkonach wspornikowych z tą różnicą, iż na połączeniu płyty balkonowej i ścianki bocznej loggii powstaje mostek trójwymiarowy. Ścianki loggii powinny zapewniać wysoką izolacyjność termiczną np. poprzez obustronne ich obłożenie termoizolacją.

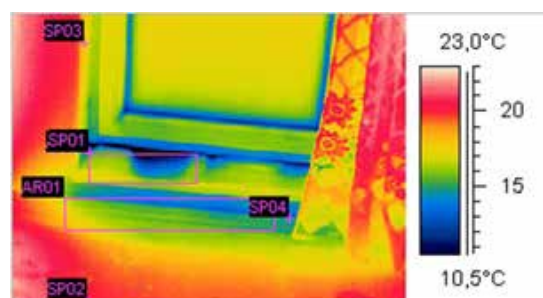


Rys. 4.7.

Liniowy mostek termiczny na połączeniu płyty balkonowej i ściany zewnętrznej [1].

Okna i drzwi jako elementy o małej bezwładności cieplnej (szyby, ramy) powinny być badane pod kątem występowania liniowych mostków cieplnych dwojakiego rodzaju. Mostków cieplnych związanych z połączeniem wkładu szybowego z ramą oraz liniowych mostków cieplnych związanych z osadzeniem okna w przegrodzie. Połączenie stolarki okiennej i drzwiowej ze ścianami zewnętrznymi powinno być wykonane w sposób zapewniający minimalizację mostków termicznych. Takie rozwiązanie jest możliwe w przypadku mocowania stolarki okiennej i drzwiowej w warstwie izolacji termicznej.

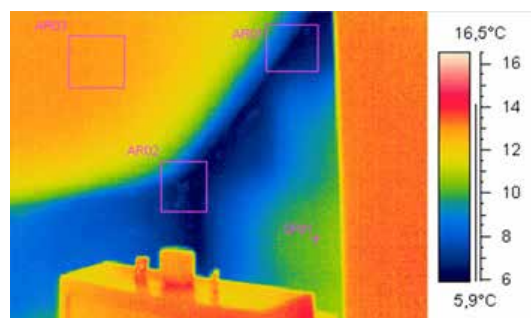
W innych przypadkach dopuszcza się mocowanie stolarki w licu ściany konstrukcyjnej przy założeniu poprawnego zakładu termoizolacji na stolarnie. W celu wyeliminowania mostków konwekcyjnych połączenia okien i drzwi ze ścianą należy dodatkowo uszczelnić ich styk za pomocą izolacji paroszczelnej. Od strony zewnętrznej zaleca się stosowanie izolacji paroprzepuszczalnych.



Rys. 4.8.

Nieszczelności na styku drzwi balkonowych ze ścianą osłonową [1].

Mostki termiczne występują w wielu sytuacjach na styku połączenia ścian zewnętrznych i dachu. Ma to szczególnie miejsce w przypadku wykonywania dachów w konstrukcji drewnianej lub stalowej. Połączenia ściana–dach powinny zostać poprawnie ocieplone i uszczelnione, eliminując tym samym liniowe i konwekcyjne mostki termiczne. Przykład wadliwego wykonania połączenia pokazano na rys. 4.9. W analizowanym budynku mieszkalnym wykonano niepoprawnie ocieplenie wieńca pod murlatą oraz oparcie krokwi przy ścianie szczytowej.



Rys. 4.9. Mostek termiczny w miejscu połączenia dachu i ściany zewnętrznej [1].

4.2.

Literatura

[1] Krause P., Steidl T. Archiwum własne STEKRA. Mikotów 2001-2016.

5. MOSTKI TERMICZNE W UJĘCIU NUMERYCZNYM

5.1.

Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
ϑ	temperatura	°C/K
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
Φ	strumień ciepła	W
χ	punktowy współczynnik przenikania ciepła	W/K
ψ	liniowy współczynnik przenikania ciepła	W/(m·K)
A	pole powierzchni	m ²
$A_{e,k}$	pole powierzchni elementu k między przestrzenią nieogrzewaną i środowiskiem zewnętrznym	m ²
A_{ij}	pole powierzchni j-tego elementu w budynku	m ²
d	grubość	m
d_{ij}	grubość warstwy i-tej w elemencie j-tym	m
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
g	ważony czynnik temperatury	-
h	wysokość	m
H	współczynnik przenoszenia ciepła	W/K
H_T	współczynnik strat ciepła przez przenikanie	W/K
l	długość	m

L_{2D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego	W/(m·K)
L_{3D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia trójwymiarowego	W/K
q	gęstość strumienia ciepła	W/ m ²
R	obliczeniowy opór cieplny	m ² ·K/W
R_n	suma oporów cieplnych n -warstw przegrody	m ² ·K/W
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej	m ² ·K/W
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	m ² ·K/W
R_T	całkowity opór cieplny przegrody	m ² ·K/W
U	współczynnik przenikania ciepła komponentu lub elementu	W/(m ² ·K)
ΔU	człon korekcyjny	W/(m ² ·K)
ΔU_f	poprawka z uwagi na łączniki mechaniczne	W/(m ² ·K)
B'	wymiar charakterystyczny	m

5.2.

Terminy i definicje

Element boczny dwuwymiarowy - (element boczny 2-D) - część modelu geometrycznego 2-D, która rozpatrywana oddzielnie, składa się z płaskich równoległych warstw modelu.

Element centralny dwuwymiarowy (2-D) - część modelu geometrycznego 2-D, która nie jest elementem bocznym 2-D;

Liniowy mostek cieplny: mostek cieplny o jednakowym przekroju poprzecznym w jednym kierunku [2], [3].

Liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego - współczynnik sprzężenia cieplnego otrzymany w wyniku obliczeń dwuwymiarowych [2], [3].

Model geometryczny dwuwymiarowy - model geometryczny 2-D przedstawiony w taki sposób, że dla jednej osi prostopadłej przekrój poprzeczny prostopadły do tej osi nie zmienia się w obrębie granicy modelu.

Płaszczyzny konstrukcyjne - płaszczyzny w modelu geometrycznym 3-D, lub 2-D, które oddzielają różne materiały i/lub model geometryczny od pozostałej konstrukcji, i/lub elementy boczne od elementu centralnego rys. 5.1.

Płaszczyzny przekroju - płaszczyzny konstrukcyjne, które są granicami dla modelu geometrycznego 3-D lub 2-D przez oddzielenie modelu od pozostałej konstrukcji;

Punktowy mostek cieplny - mostek cieplny bez jednakowego przekroju poprzecznego w żadnym kierunku [2], [3].

Płaszczyzny pomocnicze - płaszczyzny, które, oprócz płaszczyzn konstrukcyjnych, dzielą model geometryczny na liczne komórki.

Temperatura brzegowa zewnętrzna - temperatu-

ra powietrza zewnętrznego, przy założeniu, że temperatura powierzchni i temperatura promieniowania widziana przez powierzchnie są równe [2].

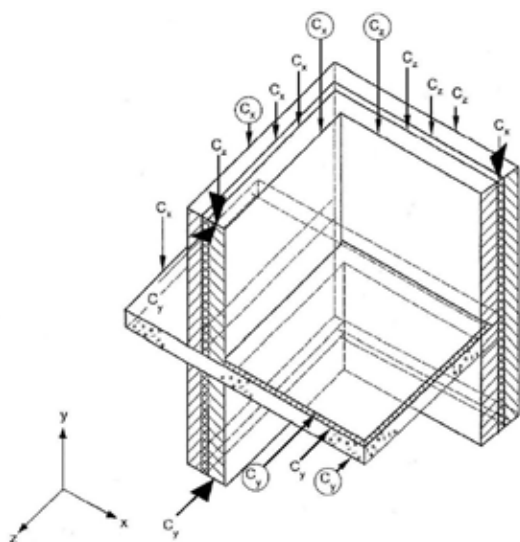
Temperatura brzegowa wewnętrzna - temperatura operatywna, przyjęta dla celów obliczeń (Normy Międzynarodowej), [2] jako średnia wartość arytmetyczna temperatury powietrza zewnętrznego i średniej temperatury promieniowania dla wszystkich powierzchni otaczających środowisko wewnętrzne.

Współczynnik sprzężenia cieplnego - strumień ciepła podzielony przez różnicę temperatury pomiędzy dwoma środowiskami, które są połączone cieplnie rozpatrywaną przegrodą [2], [3].

Mostek cieplny zazwyczaj powoduje powstawanie dwuwymiarowych i trójwymiarowych strumieni ciepła, które można precyzyjnie określić z zastosowaniem szczegółowych metod obliczania numerycznego. Przy analizowaniu detali budowlanych przy użyciu programów komputerowych równie ważne są definicje związane z tworzeniem modeli geometrycznych na potrzeby analizy numerycznej. W zakresie normy ustalono wykaz następujących modeli geometrycznych 3-D i 2-D mostka cieplnego do obliczeń komputerowych:

- strumieni ciepła do oceny całkowitych strat ciepła budynku;
- minimalnych wartości temperatury wewnętrznej powierzchni przegród do oceny ryzyka wystąpienia na nich kondensacji [2], [3];
- liniowych mostków cieplnych.

Przykładowy model geometryczny 3-D przedstawiono na rys.5.1.



Cx płaszczyzny konstrukcyjne prostopadłe do osi X
 Cy płaszczyzny konstrukcyjne prostopadłe do osi Y
 Cz płaszczyzny konstrukcyjne protopadłe do osi Z



Rys. 5.1.
 Przykład modelu geometrycznego 3-D, pokazującego płaszczyzny konstrukcyjne [2].

Na skutek przyjęcia nowych regulacji prawnych, zaczęto uwzględniać problematykę oszczędności energii w procesie projektowania. Obecnie inżynierowie budowlani zwracają uwagę już nie tylko na izolacyjność termiczną przegród zewnętrznych oraz problem kondensacji wilgoci w komponentach budowlanych, ale również na kwestie wpływu liniowych mostków termicznych na straty ciepła. Jednak współcześni projektanci napotykają na niedogodności wynikające z małej liczby rozwiązań analitycznych przewodzenia ciepła. Zwłaszcza w aspekcie dwu- i trójwymiarowego przepływu ciepła. Zgodnie z [1] można napotkać rozwiązania analityczne, odnoszące się do jednowymiarowego niestacjonarnego przepływu ciepła. Wynikają one jednak ze szczególnych zależności warunków brzegowych od czasu. Innym problemem jest złożony charakter tych rozwiązań, co stwarza trudności w zastosowaniu ich w praktyce.

Do rozwiązywania zagadnień fizyki budowy w działalności inżynierskiej niezbędne jest wykorzystywanie programów komputerowych. Współczesne aplikacje umożliwiają liczbowe wprowadzanie danych wejściowych (warunki startowe i brzegowe) oraz uzyskiwanie wyników w postaci liczb. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystują dyskretyzację continuum czasoprzestrzennego, co w technice rozumiane jest, jako podział na mniejsze elementy przy zastosowaniu określonej

siatki. Wartości temperatury (ewentualnie wilgotności materiału) odczytuje się w węzłach tych siatek. Algorytmy programów do analiz ciepłno-wilgotnościowych zbudowane są w oparciu o metody numeryczne – metodę różnic skończonych (MRS lub FDM) oraz metodę elementów skończonych (MES lub FEM).

W niniejszym opracowaniu do analizy wykorzystany został program komputerowy, bazujący na metodzie elementów skończonych.

W zagadnieniach fizyki budowy nie wyprowadza się wzorów obliczeniowych MES bezpośrednio z równań opisujących przewodzenie ciepła. Określa się je metodą residuów ważonych lub z minimalizacji określonego funkcjonatu. MES nie narzuca ograniczeń odnośnie kształtu elementu skończonego. Rozkład temperatury wewnątrz danego elementu przybliża się za pomocą tzw. funkcji kształtu. W płaskich elementach trójkątnych i prostokątnych o czterech węzłach funkcję kształtu stanowi wycinek płaszczyzny. W elementach prostokątnych o większej liczbie węzłów funkcją kształtu jest wycinek powierzchni krzywoliniowej. Rozkład temperatury w danym elemencie przybliżany jest na podstawie poniższej zależności [1]:

$$\tilde{T}(x_i, t) = \sum N_i(x_i) T_i(t) = \underline{N}^T \underline{T} \quad (5.1)$$

gdzie:

$\underline{N}$ wektor funkcji kształtu,

$\underline{T}$ wektor temperatury węzłów.

Wyrównywanie temperatur węzłów jest realizowane w taki sposób, aby spełnione zostało równanie przewodnictwa oraz warunki brzegowe. Uzyskuje się wówczas następujący układ równań:

$$\underline{K} \underline{T} = \underline{Q} \quad (5.2)$$

gdzie:

$\underline{K}$ tzw. macierz przewodnictwa (odpowiadająca macierzy sztywności w zagadnieniach mechaniki), określona ze wzoru:

(5.3)

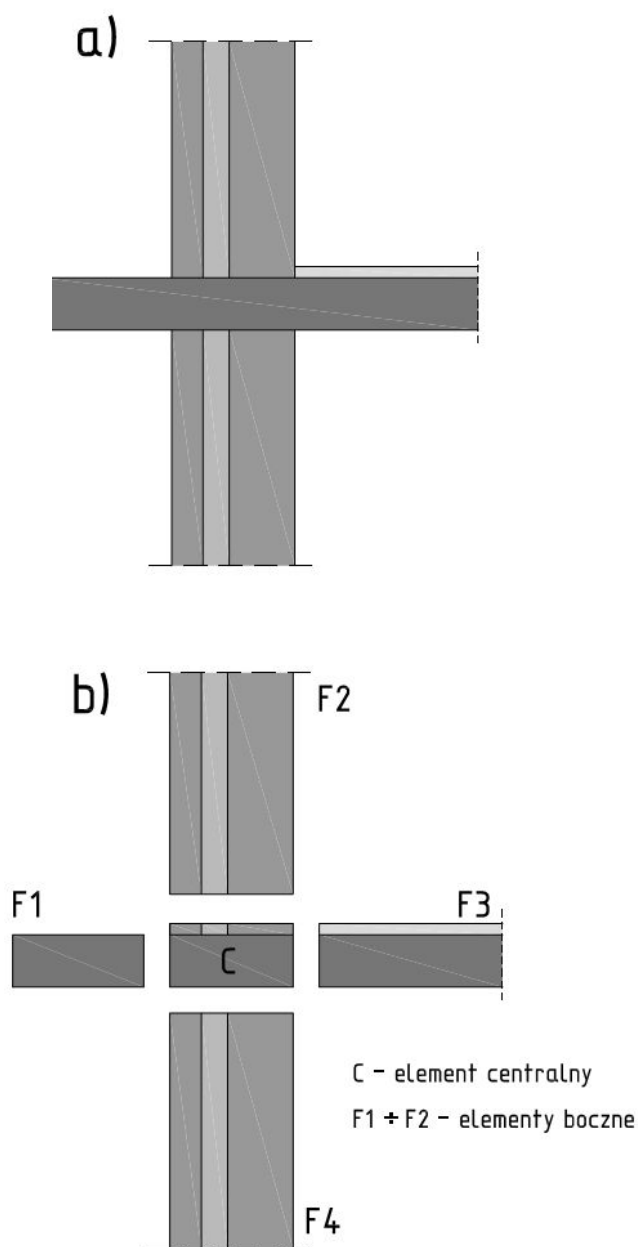
$$\underline{K} = \int_V \left(\lambda_x \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N^T}{\partial y} + \lambda_z \frac{\partial N}{\partial z} \frac{\partial N^T}{\partial z} \right) dV$$

gdzie:

$\underline{Q}$ wektor strumieni ciepłych na brzegach i od źródeł ciepła.

Wymagania, jakie są stawiane dwuwymiarowym modelom liniowych mostków termicznych, opisano w normie [2]. Dotyczą one rozmieszczenia płaszczyzn wycięcia względem elementu centralnego, rozmieszczenia płaszczyzn wycięcia w modelach z gruntem, upraszczania modeli geometrycznych oraz przyjmowania warunków brze-

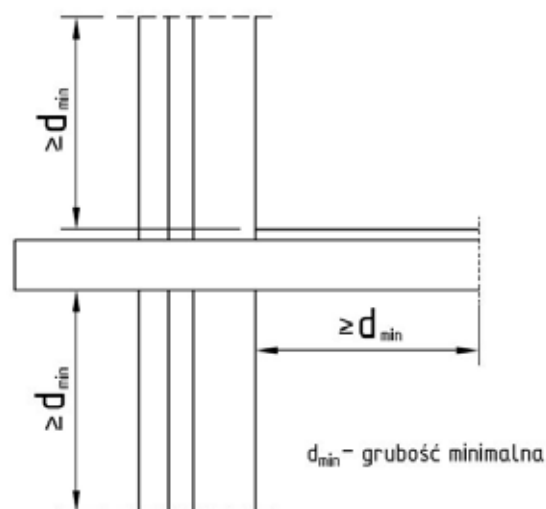
gowych. W normie [2] sformułowane zostały także zależności, na podstawie których, należy wyznaczać liniowy współczynnik przenikania ciepła. Przykładowy podział modelu geometrycznego 2-D na elementy boczne i element centralny przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 5.2.

Podział modelu geometrycznego przykładowego mostka termicznego na elementy boczne i element centralny [7].

Zazwyczaj nie jest łatwe wymodelowanie kompletnego budynku z użyciem pojedynczego modelu geometrycznego. W większości przypadków budynek można podzielić na wiele części, z zastosowaniem płaszczyzn wycięcia. Podział ten należy przeprowadzić w taki sposób, aby w wynikach obliczania między budynkiem podzielonym i budynkiem traktowanym jako całość uniknąć różnic. Taki podział na wiele modeli geometrycznych uzyskuje się przez wybranie odpowiednich płaszczyzn wycięcia. Model geometryczny zawiera element centralny, elementy boczne i w miarę potrzeby podłoże. Model geometryczny jest ograniczony płaszczyznami przekroju.



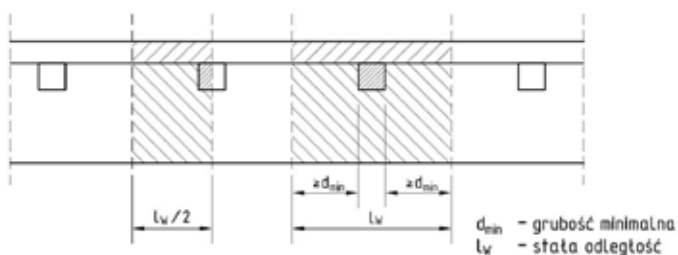
Rys. 5.3.

Rozmieszczenie płaszczyzn wycięcia, co najmniej d_{min} od elementu centralnego w modelu geometrycznym 2-D [2].

Zgodnie z założeniami podanymi w [2], płaszczyzny przekroju należy rozmieszczać:

- w płaszczyźnie symetrii (jeśli jest ona bliżej niż d_{min}^1 od elementu centralnego);
- co najmniej d_{min} od elementu centralnego, jeżeli nie występuje bliższa płaszczyzna symetrii.

¹ d_{min} wartość większa z 1,0 m i trzykrotnej grubości analizowanego elementu bocznego.



Rys. 5.4.

Schemat konstrukcji z liniowymi mostkami termicznymi przy stałych odległościach l_w , pokazujący płaszczyzny symetrii, które mogą być stosowane jako płaszczyzny wycięcia [2].

Płaszczyzny pomocnicze należy stosować w taki sposób, aby spełniony był jeden z poniższych warunków:

- podwojenie liczby podpodziałów nie zmienia obliczeniowego strumienia ciepła o więcej niż o 1%;
- podwojenie liczby podpodziałów nie zmienia czynnika temperaturowego przy powierzchni wewnętrznej f_{Rsi} więcej niż 0,005.

5.3.

Konstruowanie modeli dwuwymiarowych mostków termicznych w obrębie gruntu

Konstruowanie modeli liniowego mostka termicznego w gruncie jest bardziej skomplikowane, niż w przypadku pozostałych modeli. Zasady rozmieszczania płaszczyzn przekroju w gruncie zestawiono w poniższej tabeli. Zilustrowano je również na rysunku nr 5.5 [2].

Do obliczeń dwuwymiarowych stosuje się pionową płaszczyznę symetrii po środku podłogi tak, że modeluje się jedną połowę budynku. Szerokość podłogi przyjmuje się równą wymiarowi charakterystycznemu podłogi B' , który oblicza się zgodnie z normą [4].

Kierunek	Odległość od elementu centralnego	
	Cel obliczenia	
	Jedynie obliczenia temperatury powierzchni	Strumień ciepła i temperatury powierzchni
Odległość w poziomie od przekroju pionowego, wewnątrz budynku	co najmniej trzy razy grubość ściany	$0,5 \times \text{wymiar podłogi}^1$
Odległość w poziomie od przekroju pionowego, na zewnątrz budynku	co najmniej trzy razy grubość ściany	$2,5 \times \text{szerokość podłogi}^2$
Odległość w pionie od przekroju poziomego, poniżej poziomu gruntu	co najmniej 3 m	$2,5 \times \text{szerokość podłogi}^2$
Odległość w pionie od przekroju poziomego, poniżej poziomu podłogi (stosuje się jedynie wtedy, gdy rozważany poziom podłogi jest więcej niż 2 m poniżej poziomu gruntu)	co najmniej 1 m	$2,5 \times \text{szerokość podłogi}^2$

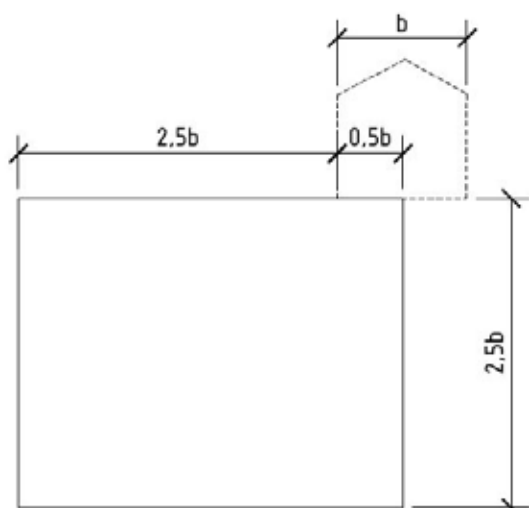


Tablica 5.1.

Rozmieszczenie płaszczyzn wycięcia modelu z gruntem [2].

¹ W przypadku obliczania liniowego współczynnika przenikania ciepła, jest to $0,5 \times B'$ lub 4 m (najmniejsza z wartości).

² W przypadku obliczania liniowego współczynnika przenikania ciepła, jest to wartość większa od $2,5 \times B'$ lub 20 m (najmniejsza z wartości).



Rys. 5.5.

Rozmieszczenie płaszczyzn wycięcia dla modelu 2-D zawierającego grunt [2].

5.4.

Uproszczenia modelu geometrycznego

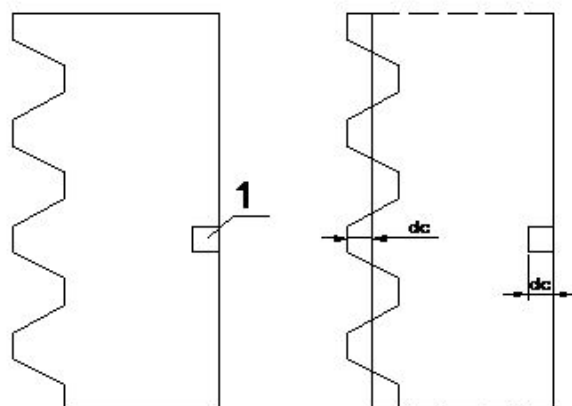
Norma [2] określa również warunki stosowania uproszczeń modelu geometrycznego. Dotyczą one dopasowania wymiarów oraz stosowania prawie jednorodnych warstw materiałowych. Dopasowanie wymiarów jest dopuszczalne w przypadku materiałów o współczynniku przewodzenia ciepła mniejszym niż $3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i obejmuje następujące operacje:

- zmianę położenia powierzchni bloku materiału przylegającego do wewnętrznej lub zewnętrznej powierzchni modelu geometrycznego (przykład zastosowania uproszczenia – powierzchnie skośne, krawędzie zaokrąglone, powierzchnie profilowane); miejscowa korekta d_c usytuowania powierzchni niepiaskich, odniesiona do usytuowania średniego powierzchni nie może przekraczać: $d_c = R_c \lambda$ (R_c jest równe $0,03 \text{ [m}^2\text{K/W]}$, λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła rozpatrywanego materiału)



Tablica 5.2.

Objaśnienia dla rysunku nr 5.7 [2].



1- gniazdo ściany.

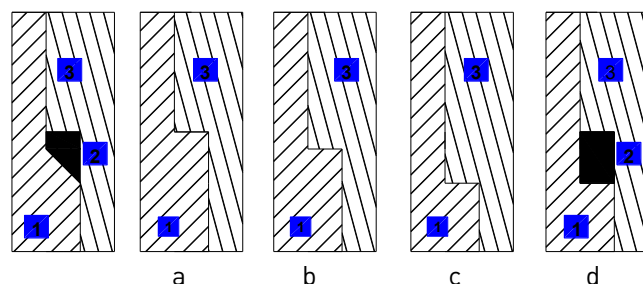
d_c - miejscowe dopasowanie prostopadłe do położenia średniego powierzchni wewnętrznej lub zewnętrznej.



Rys. 5.6.

Zmiana położenia powierzchni wewnętrznej lub zewnętrznej [2].

- zmianę powierzchni przylegania dwóch elementów wykonanych z różnych materiałów (np. wgłębienia dla taśm uszczelniających, gniazda ściennie);



Rys. 5.7.

Zróżnicowane możliwości zmiany położenia powierzchni przylegania między trzema blokami materiału, zależnie od stosunku ich współczynników przewodzenia ciepła, λ [2].

Kombinacja		Uproszczenia			
Blok materiału	Współczynnik przewodzenia ciepła	a	b	c	d
1	λ_1	$\lambda_1 > \lambda_2$	$\lambda_1 > \lambda_3$	$\lambda_1 < \lambda_3$	$\lambda_1 < \lambda_2$
2	λ_2	-	-	-	-
3	λ_3	-	$\lambda_3 > \lambda_2$	$\lambda_3 > \lambda_2$	$\lambda_3 < \lambda_2$

- pominięcie warstw o grubości nie większej niż 1 mm lub warstw o pomijalnym wpływie na przenoszenie ciepła (np. cienkie membrany wodochronne);
- pominięcie elementów dodatkowych, dołączonych do powierzchni zewnętrznej (np. rynny i rury spustowe).

Z kolei stosowanie prawie jednorodnych warstw materiałowych polega na włączeniu mniejszych liniowych i/lub punktowych mostków termicznych w analizowaną warstwę. Tego typu zabieg stosuje się, gdy:

- warstwy danego materiału występują w części konstrukcji, która po uproszczeniu staje się elementem bocznym;
- współczynnik przewodzenia ciepła prawie jednorodnej warstwy jest nie większy niż 1,5 krotności współczynnika przewodzenia ciepła materiałów występujących w warstwie przed uproszczeniem.

5.5.

Metodyka obliczeń dla modelu geometrycznego

Mając określoną geometrię modelu, przeprowadzany jest jego podział na przylegające do siebie komórki. Każdą komórkę opisuje współczynnik przewodzenia ciepła λ oraz emisyjność ε . Charakterystycznymi punktami komórek są węzły. Dzięki zastosowaniu prawa Fourier'a i przy uwzględnieniu warunków brzegowych, otrzymywany jest układ równań (funkcja temperatur w węzłach). Pierwiastki tych równań wyszukiwane są bezpośrednią techniką rozwiązania lub metodą iteracyjną. W efekcie uzyskuje się temperatury w węzłach siatki podziału (pole temperatury modelu). Na ich podstawie, w oparciu o prawo Fourier'a, wyznaczane są strumienie ciepła. Gęstość strumienia ciepła, prostopadłego do powierzchni rozgraniczającej komórkę materiałową i przyległe środowisko, powinna spełniać zależność [2]:

$$q = \frac{(\theta - \theta_s)}{R_s} \quad (5.4)$$

gdzie:

- θ wewnętrzna lub zewnętrzna temperatura odniesienia °C,
- θ_s temperatura przy wewnętrznej lub zewnętrznej powierzchni °C,
- R_s wewnętrzny lub zewnętrzny opór przejmowania ciepła danej powierzchni [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$].

Pozostałe zasady, dotyczące obliczania rozkładu temperatury i gęstości strumienia ciepła w węzłach, to [2]

- przyjmowanie adiabatycznych płaszczyzn przekroju modelu (występowanie zerowego strumienia ciepła na tych płaszczyznach);

- obliczanie rozkładu temperatury w obrębie każdej komórki materiałowej przez interpolację pomiędzy węzłami;
- wykonywanie walidacji zastosowanej do analizy metody komputerowej.

Przyjęta metoda komputerowa powinna spełniać następujące wymagania:

- powinna dostarczać wartości temperatury i strumienia ciepła;
- gęstość podziału obiektu na komórki określa użytkownik, jednak stopień podpodziału jest uzależniony od możliwości obliczeniowych sprzętu i oprogramowania. Dlatego w przypadku testu odniesienia, metoda powinna umożliwiać wyznaczenie temperatury i strumienia ciepła w położeniach innych niż wymienione;
- rozwiązanie walidowaną metodą powinno być zbieżne z rozwiązaniem analitycznym (pod warunkiem, że takie rozwiązanie istnieje);
- liczbę podpodziałów należy określać w sposób następujący: sumę wartości absolutnych dla wszystkich strumieni ciepła, wpływających do obiektu, oblicza się dwukrotnie – dla n węzłów (bądź komórek) i dla $2n$ węzłów (komórek). Różnica pomiędzy tymi wynikami nie powinna być większa niż 1%. W przeciwnym razie, należy wykonywać dalsze podpodziały, dopóki opisywane kryterium nie zostanie spełnione;
- w przypadku techniki iteracyjnej, iterację należy kontynuować, dopóki suma wszystkich strumieni wpływających do elementu, podzielona przez połowę sumy wartości bezwzględnych tych strumieni jest mniejsza niż 0,0001.

5.6.

Obliczanie strumienia ciepła i liniowego współczynnika przenikania ciepła

Wartość strumienia ciepłego Φ_l na metr długości liniowego mostka termicznego ze środowiska wewnętrznego (indeks „i”) do środowiska zewnętrznego (indeks „e”) opisuje równanie:

$$\Phi_l = L_{2D}(\theta_i - \theta_e) \quad (5.5)$$

W wypadku przepływu ciepła ze środowiska „i” do związanego cieplnie środowiska „j”, wielkość strumienia ciepłego $\Phi_{i,j}$ określa zależność:

$$\Phi_{i,j} = L_{2D,i,j}(\theta_i - \theta_j) \quad (5.6)$$

gdzie:

- $L_{i,j}^{2D}$ współczynniki sprzężenia cieplnego między każdą parą środowisk [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$].

Przy występowaniu więcej niż dwóch środowisk o różnych temperaturach (różne temperatury wewnętrzne lub różne temperatury zewnętrzne), całkowity strumień ciepła Φ oblicza się ze wzoru:

$$\Phi = \sum_{i \leq j} [L_{2D,i,j} (\theta_i - \theta_j)] \quad (5.7)$$

Wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła ψ danego mostka termicznego oblicza się zgodnie ze wzorem (3.4)

W przypadku połączeń typu ściana-podłoga na gruncie norma [2] podaje dwie opcje wyznaczania liniowego współczynnika przenikania ciepła: A i B. Zgodnie z zaleceniami opcji A, liniowy współczynnik przenikania ciepła połączenia ściana-podłoga ψ_g oblicza się ze wzoru (5.8) dla wymiarów wewnętrznych lub z równania (5.9) dla wymiarów zewnętrznych. Chcąc wyznaczyć opisywany parametr, należy zamodelować połączenie zgodnie z rysunkiem nr 5.8.

$$\psi_g = L_{2D} - h_W U_W - 0,5 B' U_g \quad (5.8)$$

$$\psi_g = L_{2D} - (h_W + h_f) U_W - 0,5 (B' + w) U_g \quad (5.9)$$

gdzie:

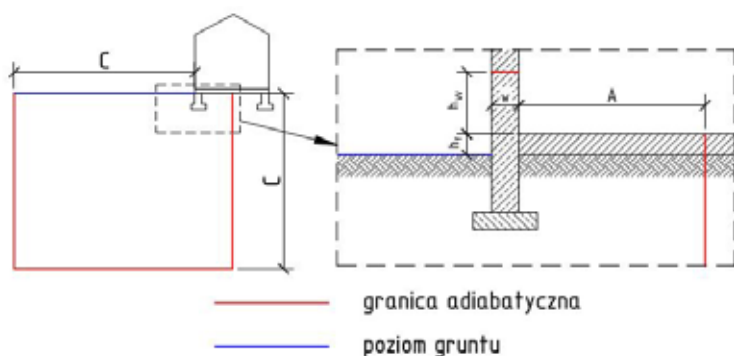
U_w współczynnik przenikania ciepła ściany powyżej gruntu zgodnie z obliczeniami komputerowymi [$W/(m^2 \cdot K)$],

h_w minimalna odległość od połączenia do płaszczyzny przekroju poprzecznego (wyznaczana podobnie jak d_{min} : $\max\{1,0 \text{ m}; 3 \times w\}$) [m],

w grubość ściany zewnętrznej [m],

h_f wysokość górnej powierzchni płyty podłogi powyżej poziomu gruntu [m],

U_g współczynnik przenikania ciepła podłogi, uzyskany z procedury uproszczonej wg normy [4], B' wymiar charakterystyczny podłogi (zgodnie ze wzorem normy PN-EN ISO 13370:2008 [4]).



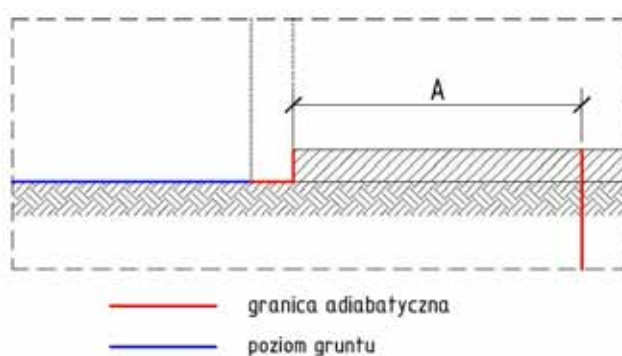
Rys. 5.8.

Model geometryczny obliczania liniowego współczynnika przenikania ciepła dla połączenia ściana-podłoga (opcja A) [2].

W opcji B konieczne jest opracowanie dodatkowego modelu komputerowego, w którym dokonuje się zamiany wszystkich materiałów poniżej poziomu gruntu z podłożem (z zachowaniem wszystkich izolacji podłogi) oraz usuwa się dolną część ściany do zewnętrznego poziomu gruntu. Wówczas liniowy współczynnik przenikania ciepła oblicza się z następującej zależności:

$$\psi_g = L_{2D} - h_W U_W - L_{2D,a} \quad (5.10)$$

Model geometryczny, potrzebny do uzyskania współczynnika sprzężenia cieplnego, należy wykonać zgodnie z poniższym rysunkiem 5.9.



Rys. 5.9.

Model drugiego obliczenia komputerowego (według opcji B). Parametr A jak na rys. 5.8 [2].

5.7.

Programy obliczeniowe

5.7.1.

Wprowadzenie

Na krajowym rynku istnieje obecnie jeden program dostępny w języku polskim - System Analizy Termicznej. Program jest dość skomplikowany w obsłudze, wymaga walidacji i poprawy modułu drukowania. W Internecie można znaleźć wiele narzędzi obliczeniowych dostępnych komercyjnie lub bezpłatnie, w tym np. DAVID 32, HAM-lab, Unorm, Champs-bes, czy program THERM.

Programy dedykowane dla budownictwa, przede wszystkim Unorm wersja 2012 i David 32, są wersją pośrednią pomiędzy katalogiem mostków cieplnych a programem obliczeniowym. Programy nie dają projektantowi pełnych możliwości samodzielnego modelowania dowolnego detalu architektonicznego. Okazują się jednak przydatne

w praktyce inżynierskiej dla typowych rozwiązań, stosowanych głównie w budownictwie szkieletowym – szkielet drewniany.

Istnieje też kilka programów komercyjnych dających projektantowi duże możliwości samodzielnego wykonywania obliczeń, z zapewnieniem dużego wsparcia w postaci gotowych przykładów i przyjaznych interfejsów graficznych.

Takim narzędziem obliczeniowym jest program THERM®, działający w systemie operacyjnym Microsoft Windows. Jest to program komputerowy opracowany w Lawrence Berkeley National Laboratory, przeznaczony dla: architektów, inżynierów budownictwa, nauczycieli akademickich, studentów wydziałów budownictwa i architektury i innych osób zainteresowanych problemami wymiany ciepła. Przy użyciu programu THERM można modelować dwuwymiarowy przepływ ciepła w detalach budowlanych takich jak: okna, ściany, dachy, fundamenty i inne, w których mostki termiczne stanowią istotny problem. Analizy dokonane przy użyciu THERM, umożliwiają prawidłowe obliczenie gęstości strumienia ciepła i pola temperatury w przekroju. Obliczenia dwuwymiarowego przepływu ciepła bazują na metodzie elementów skończonych (MES), co umożliwia modelowanie skomplikowanych geometrycznie przekrojów architektoniczno-budowlanych. Wykonane obliczenia, dla praktycznie dowolnego detalu z zachowaniem wymagań, co do jego geometrii jak w normie [2], pozwalają na wyznaczenie częściowych (krawędziowych) współczynników przenikania ciepła U_x i U_y , a w konsekwencji liniowego współczynnika przenikania ψ [W/mK]. Ustalenie temperatury w dowolnym punkcie węzłów siatki elementu dwuwymiarowego, w tym w dowolnym miejscu brzegu wewnętrznego, pozwala na obliczenie czynnika temperaturowego f_{Rsi} , co jest wymagane w projekcie budowlanym. Graficzny interfejs umożliwia wykreślenie przekrojów analizowanych elementów o znanych wymiarach lub import gotowych rysunków w postaci plików dxf., a także plików graficznych typu bmp.

Wyniki obliczeń otrzymuje się w postaci:

1) graficznej, w tym:

- rozkładu izoterm w przekroju modelowanego elementu,
- barwnego pola temperatury w przekroju,
- barwnego pola gęstości strumienia ciepła.

2) tekstowej w tym:

- współczynniki przenikania ciepła U [W/(m²·K)],
- wartość strumienia ciepła [W/m],
- wartość gęstości strumienia [W/m²].

Uzyskane wyniki w postaci barwnych rysunków można łatwo przenieść do dowolnego programu graficznego lub edytora tekstów. Dodatkowo można wygenerować siatkę MES z numeracją węzłów.

5.7.2.

Weryfikacja przyjętego narzędzia analitycznego

Norma [2] wymaga, aby przyjęta do obliczeń metoda została poddana walidacji. W tym celu przeprowadzono weryfikację poprawności wyników uzyskiwanych z programu THERM.

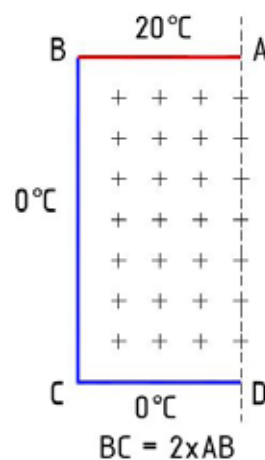
W ramach procedury sprawdzającej zastosowano test odniesienia, wymagany dla analizy dwuwymiarowego przepływu ciepła. Test został szeroko omówiony w załączniku A normy [2].

W dalszej części zamieszczona została treść zastosowanych przypadków testu walidacyjnego oraz wyniki, jakie uzyskano w programie THERM.

Przypadek nr 1

Opis procedury: przenoszenie ciepła przez połowę prostokątnej kolumny, o znanych temperaturach powierzchni, obliczono analitycznie, jak pokazano na rysunku nr 5.10. Rozwiązanie analityczne w 28 punktach równoodległej sieci zestawiono na tym samym rysunku. Różnica pomiędzy wynikami, odczytami z normy [2], a wynikami uzyskanymi z programu komputerowego nie może przekraczać 0,1 K.

Numeryczne rozwiązania w węzłach siatki modelu komputerowego [°C]			
9,7	13,4	14,7	15,1
5,3	8,6	10,3	10,8
3,2	5,6	7,0	7,5
2,0	3,6	4,7	5,0
1,3	2,3	3,0	3,2
0,7	1,4	1,8	1,9
0,3	0,6	0,8	0,9



Rys. 5.10.

Przypadek nr 1 testu odniesienia z rozkładem wyników analitycznych w węzłach siatki modelu odniesienia.

Numeryczne rozwiązania w węzłach siatki modelu komputerowego [°C]			
9,6	13,3	14,7	15,0
5,3	8,6	10,3	10,8
3,2	5,6	7,0	7,5
2,0	3,6	4,7	5,0
1,3	2,3	3,0	3,2
0,7	1,4	1,8	1,9
0,3	0,6	0,8	0,9



Rys. 5.11.

Wyniki numeryczne przypadku nr 1 testu odniesienia, uzyskane w programie komputerowym THERM.

Wyniki numeryczne przypadku nr 1 testu odniesienia, przedstawione na rysunku nr 5.11, nie różnią się więcej niż 0,1 K w stosunku do wartości analitycznych, określonych w normie [2]. W trzech punktach węzłowych odnotowano wyniki mniejsze o 0,1 K niż wskazuje model odniesienia. Natomiast w pozostałych punktach uzyskane wartości są identyczne z normowymi. Na tej podstawie można stwierdzić, iż przyjęty algorytm obliczeniowy programu spełnia warunki pierwszego testu walidacyjnego.

Przeprowadzony test walidacyjny pokazał, iż algorytm programu THERM jest zgodny z wymaganiami normy [2]. Aplikację tą można wykorzystywać do prowadzenia analizy dwuwymiarowego przepływu ciepła.

5.7.3.

Przykład obliczeniowy

Liniowe mostki cieplne obliczamy zawsze na potrzeby uwzględnienia ich przy obliczaniu wartości współczynnika strat ciepła przez przegrodę.

Każdy obliczany liniowy mostek cieplny musi być przypisany do określonej powierzchni i mieć przypisaną na tej powierzchni długość, na jakiej występuje!

Program THERM rozróżnia liniowe mostki cieplne odległe od siebie nie mniej niż $3d$, gdzie d jest całkowitą grubością przegrody lub minimum 1 m, jeśli w rozpatrywanym obszarze znajdują się dwa lub więcej liniowe mostki cieplne to w stosowanej w programie metodzie obliczeń MES nie ma możliwości obliczenia każdego z nich osobno.

Uzyskany wynik będzie sumą dwóch składników, z których każdy jest wartością niewiadomą.

Dane wyjściowe - raport

Obliczenia prowadzone zgodnie z normą [2] powinny być zakończone raportem.

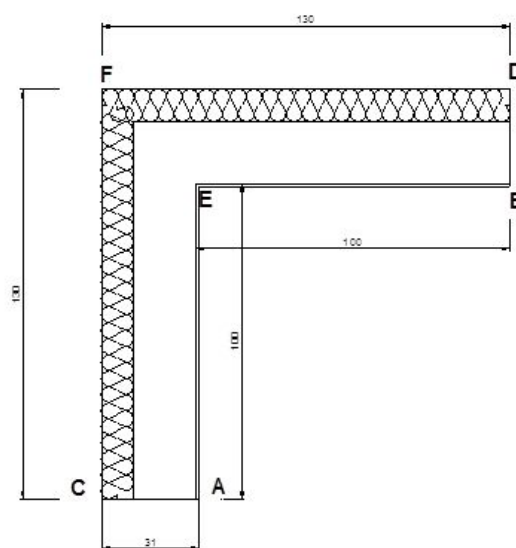
W raporcie winny znaleźć się następujące wyniki:

- współczynnik sprzężenia cieplnego L_{2D} między pomieszczeniami przylegającymi włączonymi w przenoszenie ciepła przez komponenty budowlane np. parę środowisk: pomieszczenie mieszkalne ogrzewane - powietrze zewnętrzne; pomieszczenie mieszkalne ogrzewane - pomieszczenie nieogrzewane (piwnica, strych, itp.),
- liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ , liniowego mostka cieplnego z ustaleniem czy zostały zastosowane wymiary wewnętrzne czy zewnętrzne.
- czynnik temperaturowy f_{Rsi} , dla punktów najniższych temperatur powierzchni w każdym pomieszczeniu związanym (łącznie z położeniem tych punktów). Jeżeli zastosowano więcej niż dwie temperatury brzegowe w raporcie należy podać ważne czynniki temperatury. Schematy określania ważonych czynników temperatury podano w załączniku C do normy [2].

Wszystkie wartości wyjściowe powinny być podawane z dokładnością, co najmniej do trzech cyfr znaczących.

Przykład obliczeniowy

Naroże wypukłe, ocieplone, otynkowane od strony wewnętrznej tynkiem gipsowym:



Rys. 5.12.

Model geometryczny.

Współczynnik sprężenia cieplnego dla jednowymiarowego przepływu ciepła:

$$L_{1D} = U_c * l_c \quad (5.11)$$

gdzie:

U_c całkowity współczynnik przenikania ciepła liczony zgodnie z PN-EN-ISO 6946 [6];

l_c całkowita długość aktywnej krawędzi na której występuje współczynnik przenikania ciepła.

(5.12)

$$R_T = R_{si} + R_{se} + d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + d_3/\lambda_3 + d_4/\lambda_4$$

Na wykonanym wcześniej modelu wykonujemy obliczenia. Geometryczny mostek cieplny obliczamy zaznaczając: krawędź wewnętrzna jako **None** - krawędź nieaktywna, a krawędź zewnętrzna jako **Edge** - krawędź aktywna.

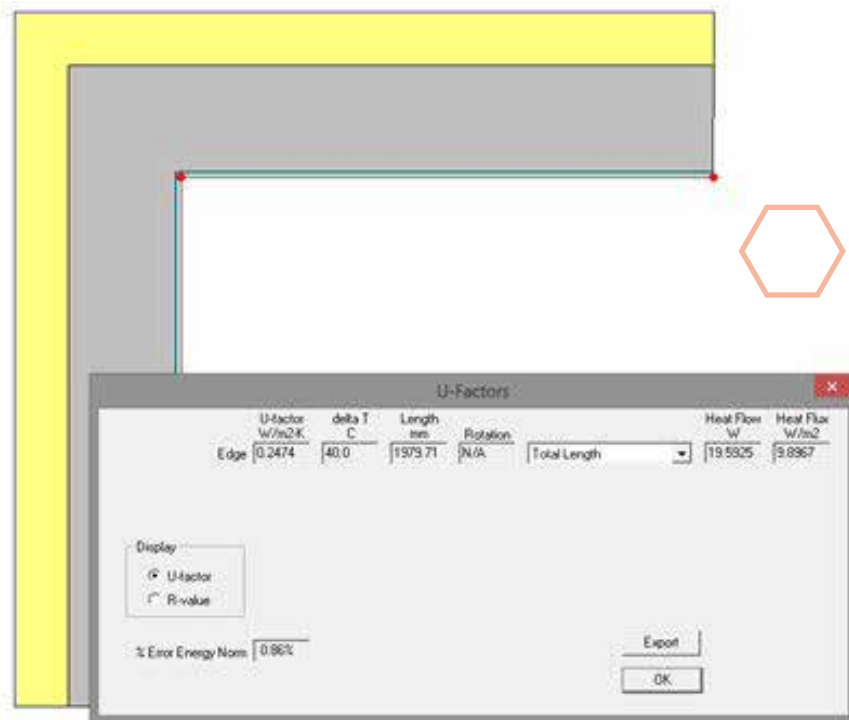
Lp.	Układ warstw	Grubość warstwy [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m ² K)]
1.	Tynk cienkowarstwowy w systemie ETICS	0,003	1,000
2.	Styropian	0,10	0,040
3.	Beton komórkowy – bloczki o gęstości 400 kg/m ³	0,200	0,110
4.	Tynk gipsowy maszynowy /wewnętrzny/	0,010	0,300
5.	Opory przejmowania ciepła	$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$	



Tablica 5.3.
Dane wejściowe.

$$R_T = 0,13 + 0,003 + 2,5 + 1,81 + 0,033 + 0,04 = 4,52 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_c = 0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$



Rys. 5.13.

Wyniki obliczeń współczynnika przenikania ciepła dla elementu naroża.



Dla dwuwymiarowego przepływu ciepła odczytujemy wartość $U_{2D-Edge}$ - dla krawędzi aktywnej. Całkowity współczynnik sprzężenia cieplnego:

$$\begin{aligned} L^{1D} &= U_{2D-Edge} \cdot l_c \\ L^{1D} &= 0,2474 \cdot (1,0+1,0) = 0,4948 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \\ L^{2D} &= 0,1884 \cdot (1,3+1,3) = 0,4898 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła dla naroża obliczamy wg wzoru [2]:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^N U_j l_j \quad (5.14)$$

Dla wymiarów wewnętrznych A-E-B

$$\psi_{A-B} = 0,4948 - 0,22 \cdot (1,0+1,0) = 0,0548 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Dla wymiarów zewnętrznych C-F-D

$$\psi_{C-D} = 0,4898 - 0,22 \cdot (1,30+1,30) = -0,082 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Analiza uzyskanego wyniku

Został obliczony całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła dla naroża wypukłego, dla wewnętrznego i zewnętrznego sposobu wymiarowania fragmentu ściany. Zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami należy przypisać wartość liniowego mostka cieplnego do określonej ściany.

W przypadku naroża i dwuwymiarowego układu współrzędnych trzeba przypisać poszczególne wartości do osi X i osi Y.

W przypadku przekroju symetrycznego (jak w tym przypadku) wartość ψ wystarczy podzielić na dwie ściany. Końcowa wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła wynikającego z mostka geometrycznego dla każdej ze ścian w rozpatrywanym przypadku wynosi:

Dla wymiarowania wewnętrznego:

$$\psi_{i-i} = 0,0548 / 2 = 0,027 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Dla wymiarowania zewnętrznego:

$$\psi_{e-e} = -0,082 / 2 = -0,041 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Ujemna wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła oznacza, iż stosując zewnętrzny system wymiarowania przegrody np. na potrzeby obliczenia charakterystyki energetycznej EP możemy w obliczeniach pominąć liniowe mostki ciepłone w postaci naroży wypukłych.

5.8.

Literatura

- [1] Praca zbiorowa pod kierunkiem Klemm P.: *Budownictwo ogólne: Fizyka budowli*, Wydawnictwo ARKADY, 2005r.
- [2] PN-EN ISO 10211:2008, *Mostki cieplne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe*.
- [3] PN-EN ISO 14683:2008, *Mostki cieplne w budynkach, Liniowy współczynnik przenikania ciepła, Metody uproszczone i wartości orientacyjne*.
- [4] PN-EN ISO 13370:2008, *Ciepłne właściwości użytkowe budynków – Przenoszenie ciepła przez grunt – Metody obliczania*.
- [5] PN-EN ISO 6946: 2008, *Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania*.
- [6] PN-EN ISO 13788:2003, *Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa - Metody obliczania*.
- [7] Instrukcja ITB nr 402/2004 *Ciepłno-wilgotnościowa ocena mostków cieplnych*. Warszawa. Instytut Techniki Budowlanej, 2004.

Drugim elementem obliczeń dwuwymiarowych jest obliczenie czynnika temperaturowego f_{Rsi} . W obliczeniach założono wilgotność powietrza w pomieszczeniu $\phi=55\%$. Jako miejsce krytyczne wybrano naroże. Wartość liczbowa czynnika f_{Rsi} należy obliczyć samodzielnie korzystając ze wzoru normy [6]

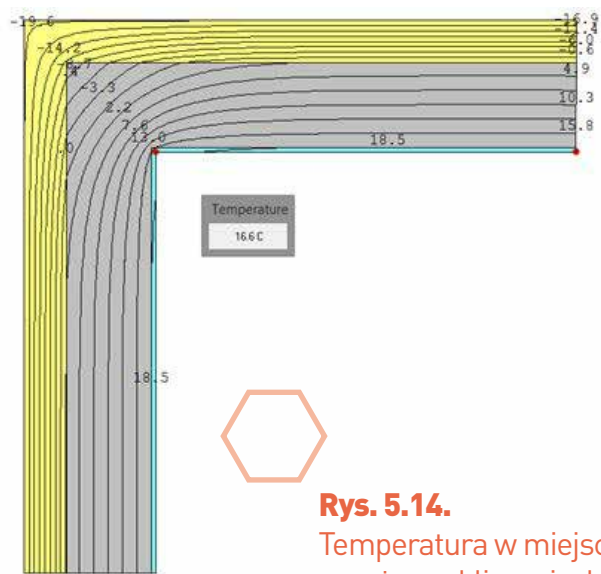
$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (5.15)$$

gdzie :

θ_{si} obliczona temperatura powierzchni wewnętrznej w miejscu krytycznym,

T_i temperatura powietrza wewnętrznego,

T_e temperatura powietrza zewnętrznego



Rys. 5.14.

Temperatura w miejscu naroża w obliczeniach dwuwymiarowych.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} = \frac{16,6 - (-20)}{20 - (-20)} = 0,915$$

$$f_{Rsi} = 0,915 > f_{Rsi\max} = 0,72$$

Wniosek: W narożu nie istnieje ryzyko wystąpienia kondensacji powierzchniowej dla zadanych parametrów.

6. KATALOG MOSTKÓW CIEPLNYCH

6.1.

Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
q	gęstość strumienia ciepła	W/ m ²
R	obliczeniowy opór cieplny	m ² ·K/W
R_n	suma oporów cieplnych n -warstw przegrody	m ² ·K/W
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej	m ² ·K/W
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	m ² ·K/W
R_T	całkowity opór cieplny	m ² ·K/W
$R_{T,v}$	całkowity opór cieplny z dobrze wentylowaną warstwą powietrza	m ² ·K/W
U	współczynnik przenikania ciepła komponentu lub elementu	W/(m ² ·K)
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
L_{2D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego	W/(m·K)
L_{e2D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego, liczony dla wymiarów zewnętrznych	W/(m·K)
L_{i2D}	współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego, liczony dla wymiarów wewnętrznych	W/(m·K)
l	długość elementu	m
Φ	strumień ciepła	W
θ, t_1, t_2, t_3	temperatura powierzchni w punkcie z obliczenia dwuwymiarowego	°C/K
Ψ	liniowy współczynnik przenikania ciepła	W/(m·K)
Ψ_i	liniowy współczynnik przenikania ciepła liczony dla wymiarów wewnętrznych	W/(m·K)
Ψ_e	liniowy współczynnik przenikania ciepła liczony dla wymiarów zewnętrznych	W/(m·K)
$\theta_{si min}$	minimalna temperatura na powierzchni przegrody od strony wewnętrznej	°C

6.2.

Materiały przyjęte do obliczeń

W wytypowanych do obliczeń detalach architektonicznych przyjęto następujące dane materiałowe oraz charakteryzujące je współczynniki przewodzenia ciepła:

Beton komórkowy - bloczki o gęstości 400 kg/m ³	$\lambda = 0,110$ [W/(mK)]
Zaprawa klejąca w systemie ETICS	$\lambda = 1,000$ [W/(mK)]
Tynk cieńkowarstwowy w systemie ETICS	$\lambda = 1,000$ [W/(mK)]
Tynk gipsowy maszynowy /wewnętrzny/	$\lambda = 0,300$ [W/(mK)]
Styropian EPS	$\lambda = 0,040$ [W/(mK)]
Styropian XPS	$\lambda = 0,029$ [W/(mK)]
Jastrych cementowy	$\lambda = 1,000$ [W/(mK)]
Beton C 20/25	$\lambda = 2,300$ [W/(mK)]

Podłoga drewniana /deski/
 Rama okienna drewniana
 Parapet okienny drewnopodobny
 Płyta OSB
 Folia /papa/
 Piasek
 Głina
 Żwirek

$\lambda = 0,180 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 0,180 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 0,230 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 0,230 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 0,180 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 2,000 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 1,500 \text{ [W/(mK)]}$
 $\lambda = 2,000 \text{ [W/(mK)]}$

6.3.

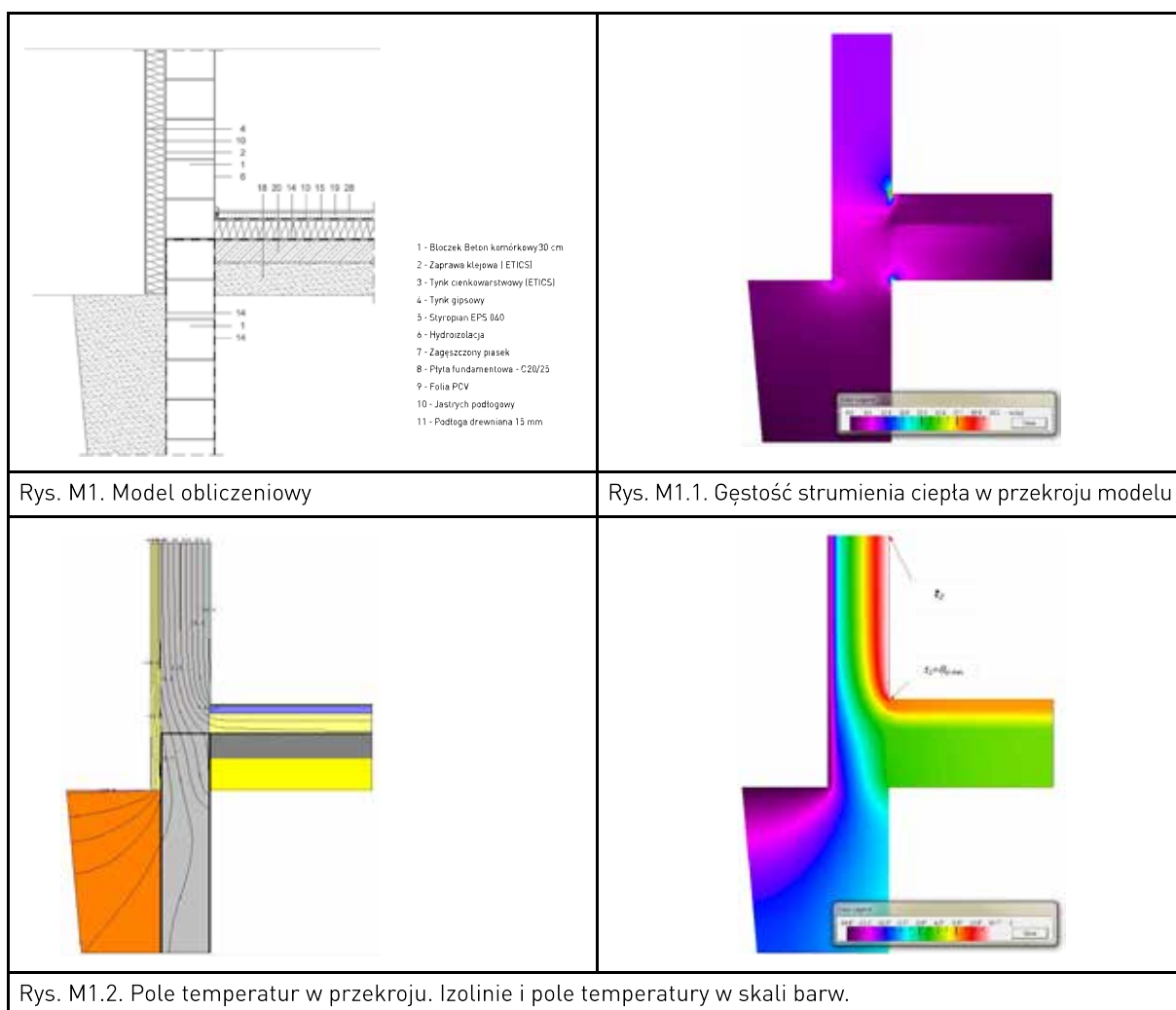
Katalog liniowych mostków cieplnych

Katalog dotyczy połączeń ścian zewnętrznych z betonu komórkowego i obejmuje najczęściej występujące w budynkach mieszkalnych liniowe mostki cieplne. W katalogu przedstawiono wyniki obliczeń dla wybranych detali o scharakteryzowanych właściwościach fizycznych i geometrycznych i są one właściwe tylko dla tych parametrów. Stosowanie liniowych przybliżeń nie jest właściwe zwłaszcza dla mostków niesymetrycznych tj. takich, dla których nie można jednoznacznie zdefiniować osi symetrii geometrycznej. W tabelach podano całkowite wartości liniowych mostków cieplnych ψ_e - dla wymiarowania zewnętrznego oraz ψ_i - dla wymiarowania wewnętrznego (rzadko stosowane). Wszystkie podane wartości służą do obliczenia wartości współczynnika przenoszenia ciepła H_T i w obliczeniach winny być przypisane do

pionowych przegród zewnętrznych. Dodatkowo dla każdego mostka podano temperatury w miejscu krytycznym, to jest temperaturę minimalną w miejscu mostka oraz temperaturę powierzchni wewnętrznej przegrody poza mostkiem, a także obliczono wartość f_{Rsi} . W przypadku gdy wartość ta nie spełnia wymagań obowiązujących przepisów prawnych, została w tabelach z wynikami zaznaczona na czerwono. Ocenę ryzyka kondensacji powierzchniowej dla wszystkich przykładów wykonano dla obliczeniowej temperatury wewnętrznej $t_i = +20^\circ\text{C}$ i obliczeniowej temperatury zewnętrznej $t_e = -20^\circ\text{C}$.

W obliczeniach detali przyziemia, stykających się z gruntem, przyjęto obszar różniący się od obszaru pokazanego na załączonych rysunkach.

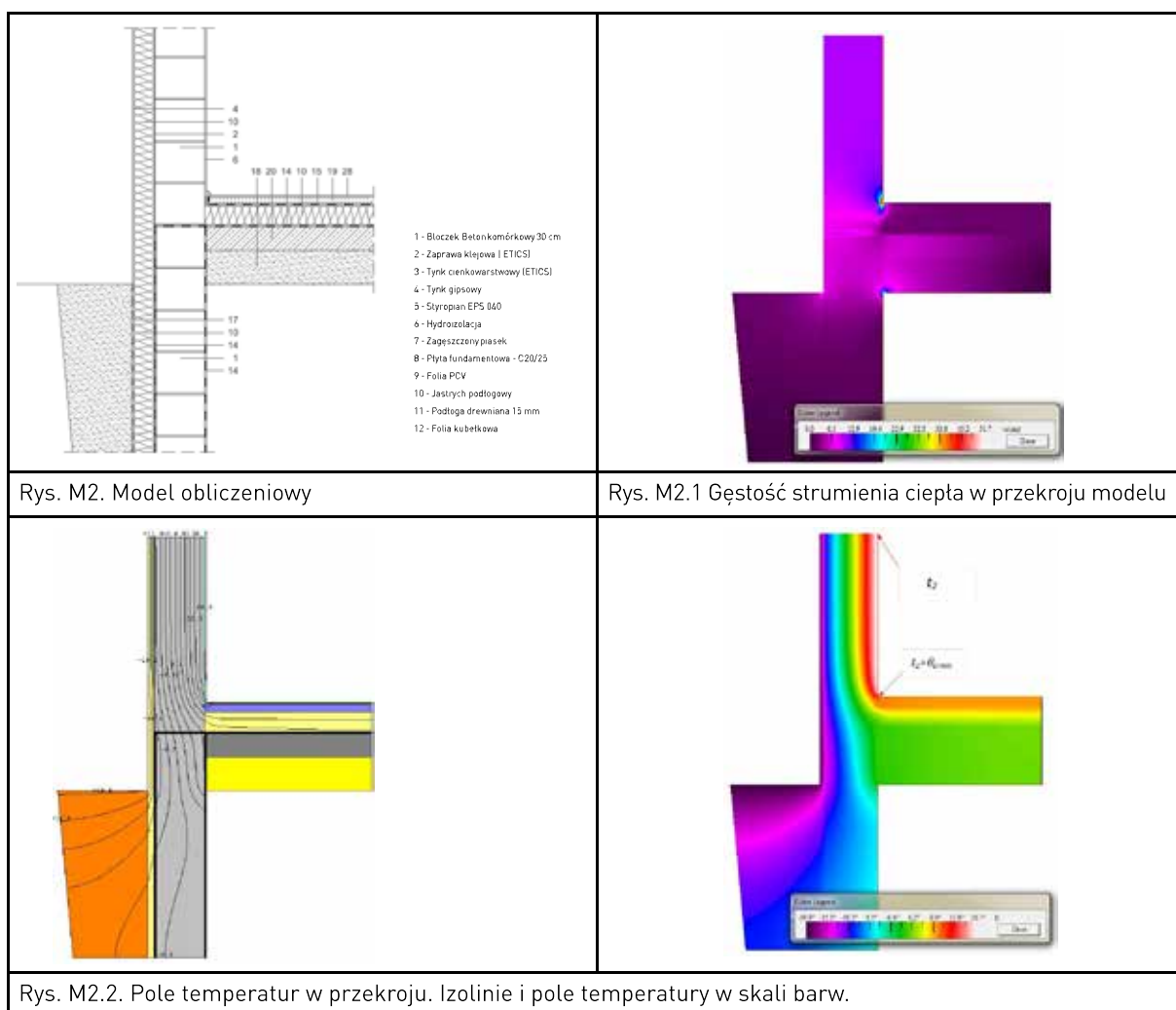
DETAL 1 – Połączenie ściany zewnętrznej z podłogą na gruncie. Ściana przyziemia nieocieplona.



Tablica 6.1. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	11,75	10,54	9,15
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,3378	0,3005	0,2288
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2938	0,2635	0,2040
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0484	0,0423	0,0274
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,4210	0,3624	0,2634
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,9	13,1	14,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,9	13,1	14,1
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,83	0,85
Błąd obliczeń	%	4,25	4,13	4,2

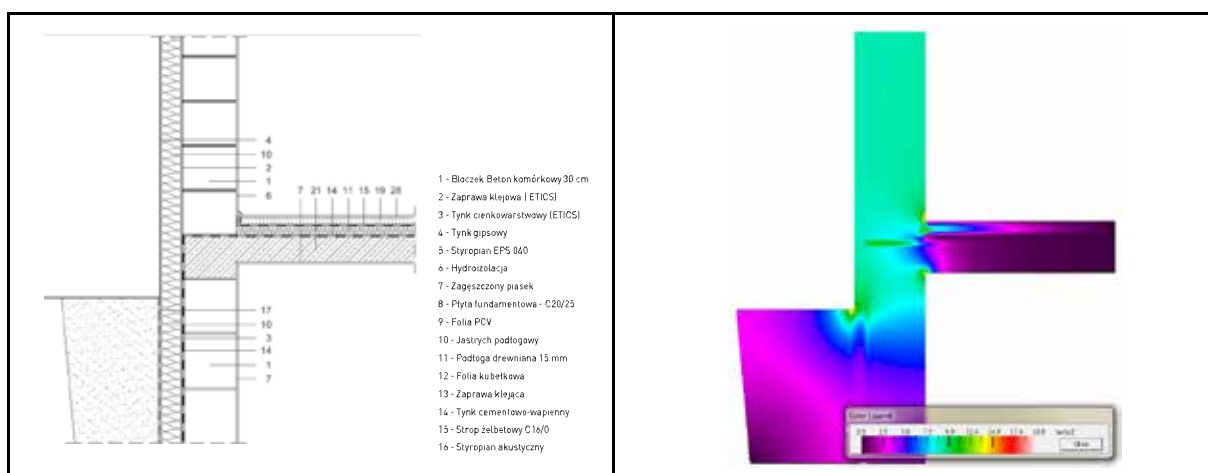
DETAL 2 – Połączenie ściany zewnętrznej z podłogą na gruncie. Ściana przyziemia ocieplona.



Tablica 6.2. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe ściany

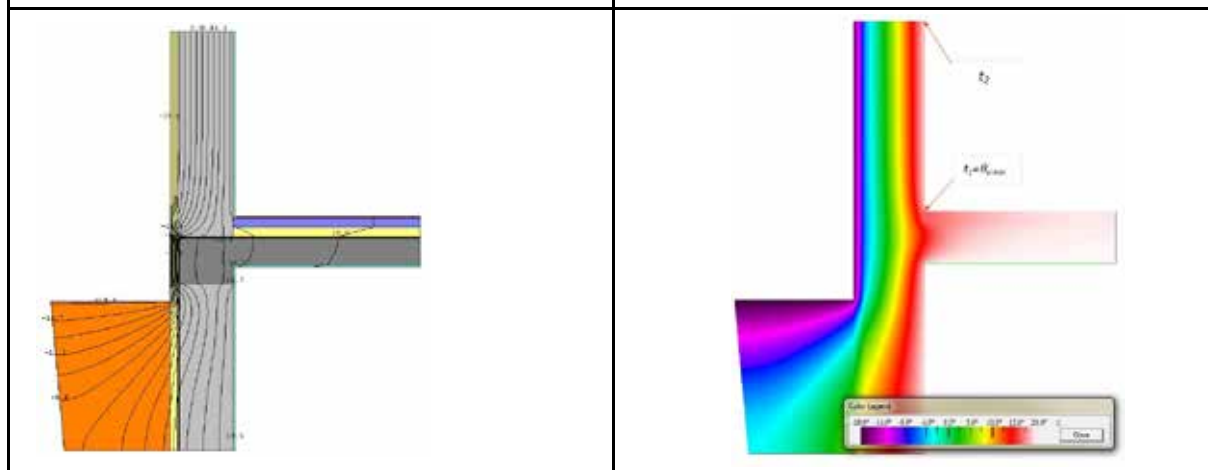
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła	$\Phi [\text{W}]$	13,48	12,69	9,16
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,3370	0,3173	0,2290
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,2925	0,2340	0,2025
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	-0,0489	-0,0251	-0,0268
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,0408	0,0307	0,0257
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	12,6	13,9	14,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	18,6	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} [^\circ\text{C}]$	12,6	17,9	14,2
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,85	0,86
Błąd obliczeń	%	3,88	3,21	3,07

DETAL 3 – Połączenie ściany zewnętrznej ze stropem nad piwnicą ogrzewaną. Ściana przyziemia ocieplona.



Rys. M3. Model obliczeniowy

Rys. M3.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

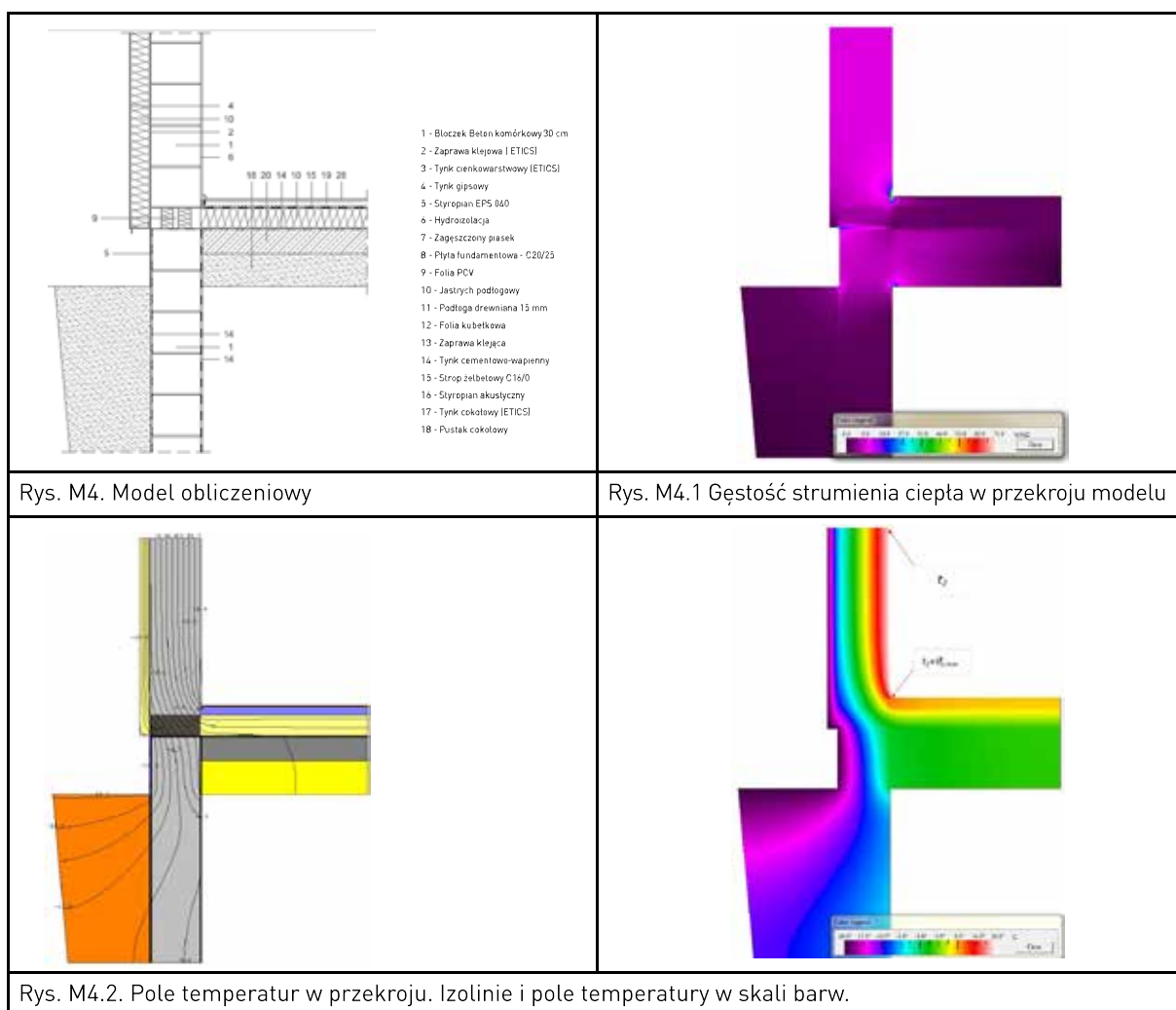


Rys. M3.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.3. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe ściany.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła (ściana)	$\Phi \text{ [W]}$	9,95	8,73	6,38
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{e2D} \text{ [W/mK]}$	0,5675	0,4415	0,2975
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D} \text{ [W/mK]}$	0,2488	0,2185	0,1595
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e \text{ [W/mK]}$	0,1989	0,1145	-0,0295
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i \text{ [W/mK]}$	-0,0029	-0,0048	-0,0638
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	16,6	17,0	17,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} \text{ [}^\circ\text{C]}$	16,6	17,0	17,8
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,85	0,93	0,95
Błąd obliczeń	%	2,00	1,92	1,70

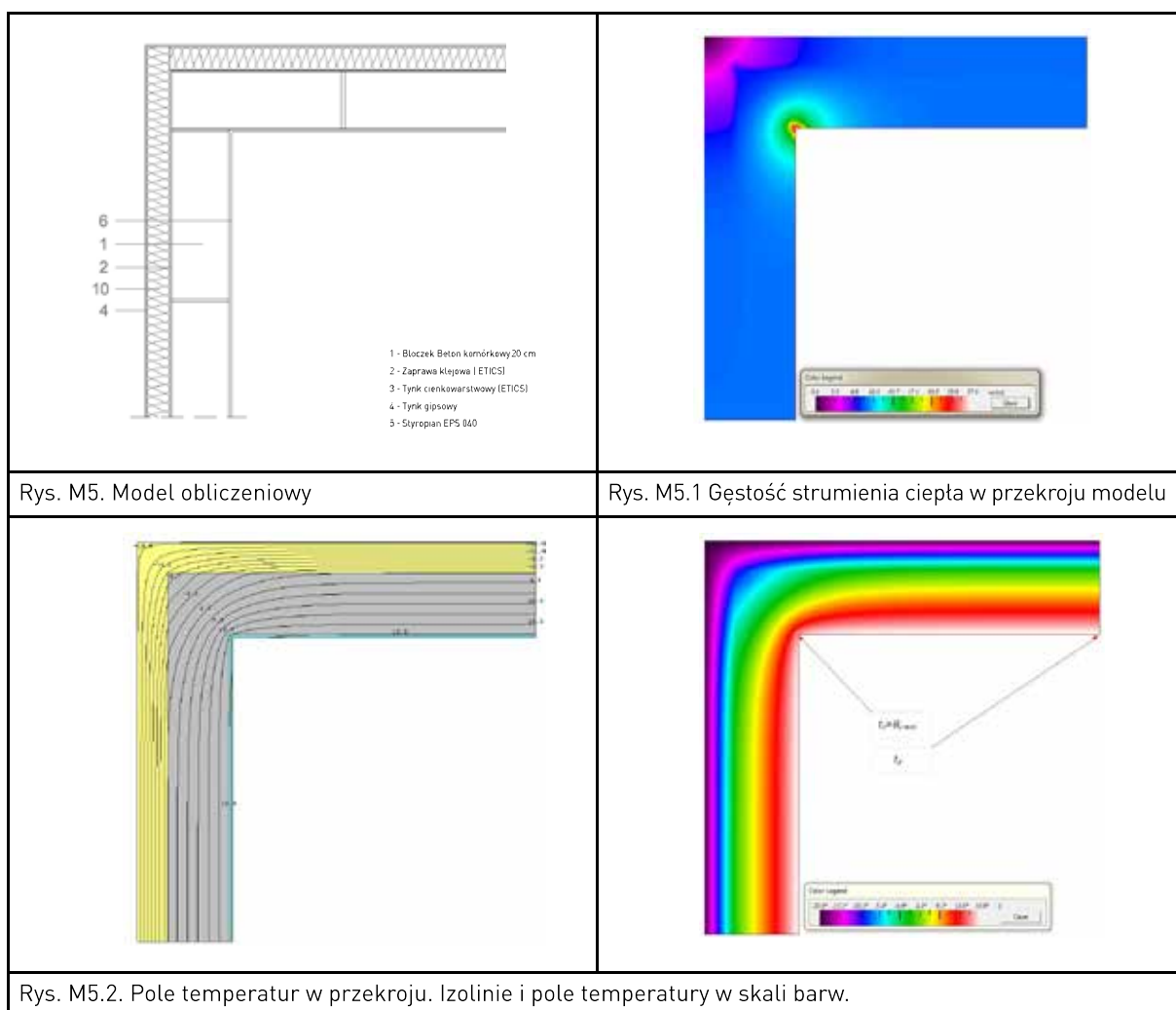
DETAL 4 – Połączenie ściany zewnętrznej z podłogą na gruncie z pustakiem cokołowym



Tablica 6.4. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła	$\Phi \text{ [W]}$	13,65	12,59	9,94
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} \text{ [W/mK]}$	0,3412	0,3144	0,2485
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} \text{ [W/mK]}$	0,3538	0,3234	0,2599
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e \text{ [W/mK]}$	0,0875	0,0623	-0,036
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i \text{ [W/mK]}$	0,2962	0,2773	0,2242
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	12,4	12,6	13,3
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} \text{ [}^\circ\text{C]}$	12,4	12,6	13,3
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,82	0,83
Błąd obliczeń	%	3,88	2,91	2,20

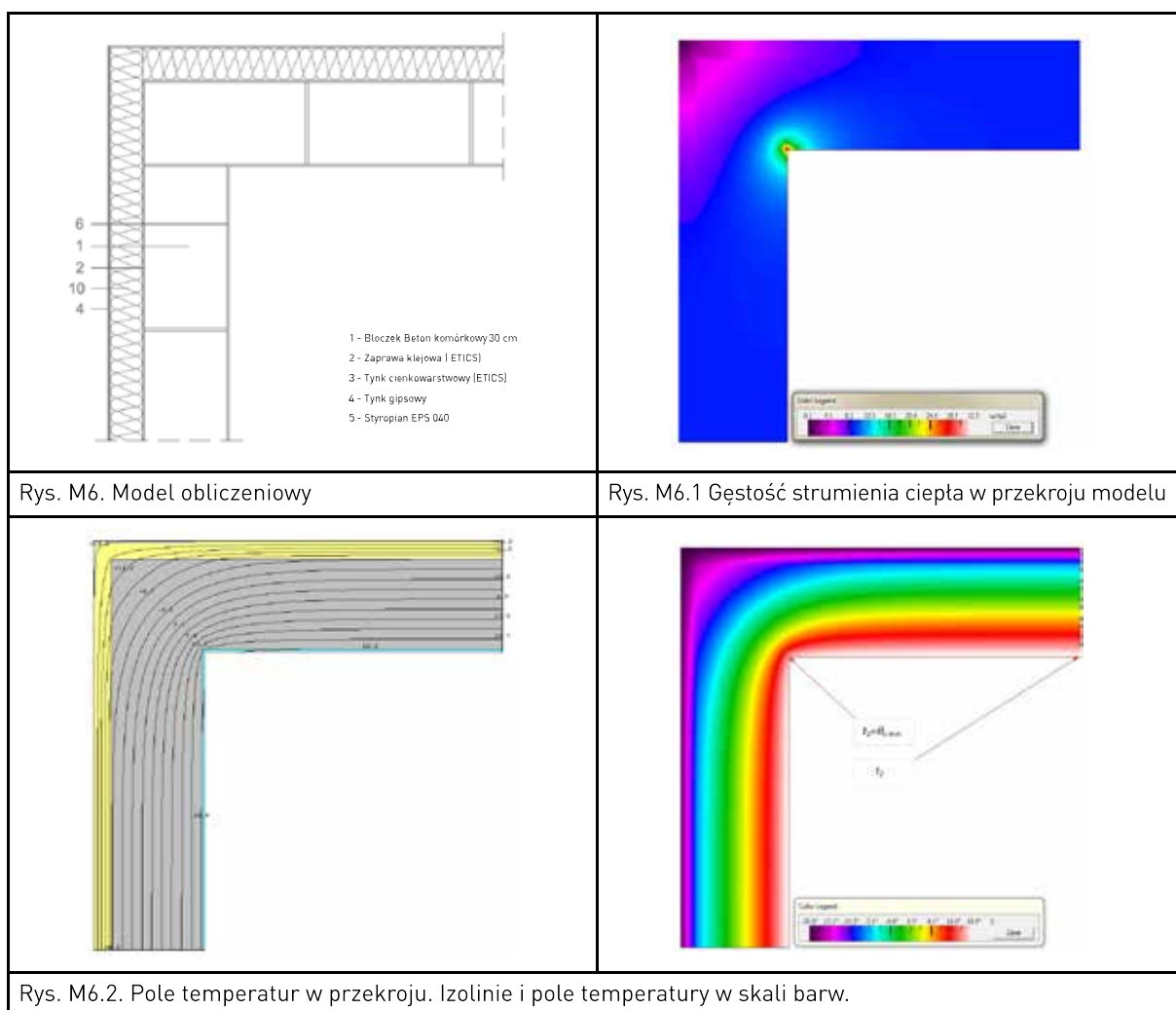
DETAL 5 – Naroże - ściana z bloczków z betonu komórkowego o grubości 20 cm.



Tablica 6.5. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,08\text{ m}$	$d_2=0,10\text{ m}$	$d_3=0,18\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	21,83	19,60	14,00
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5459	0,4899	0,3500
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5458	0,4898	0,3500
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0904	-0,0849	-0,0730
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0538	0,0514	0,0465
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,3	16,6	17,4
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,9	19,2
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,3	16,6	17,4
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,91	0,92	0,94
Błąd obliczeń	%	0,93	0,92	0,91

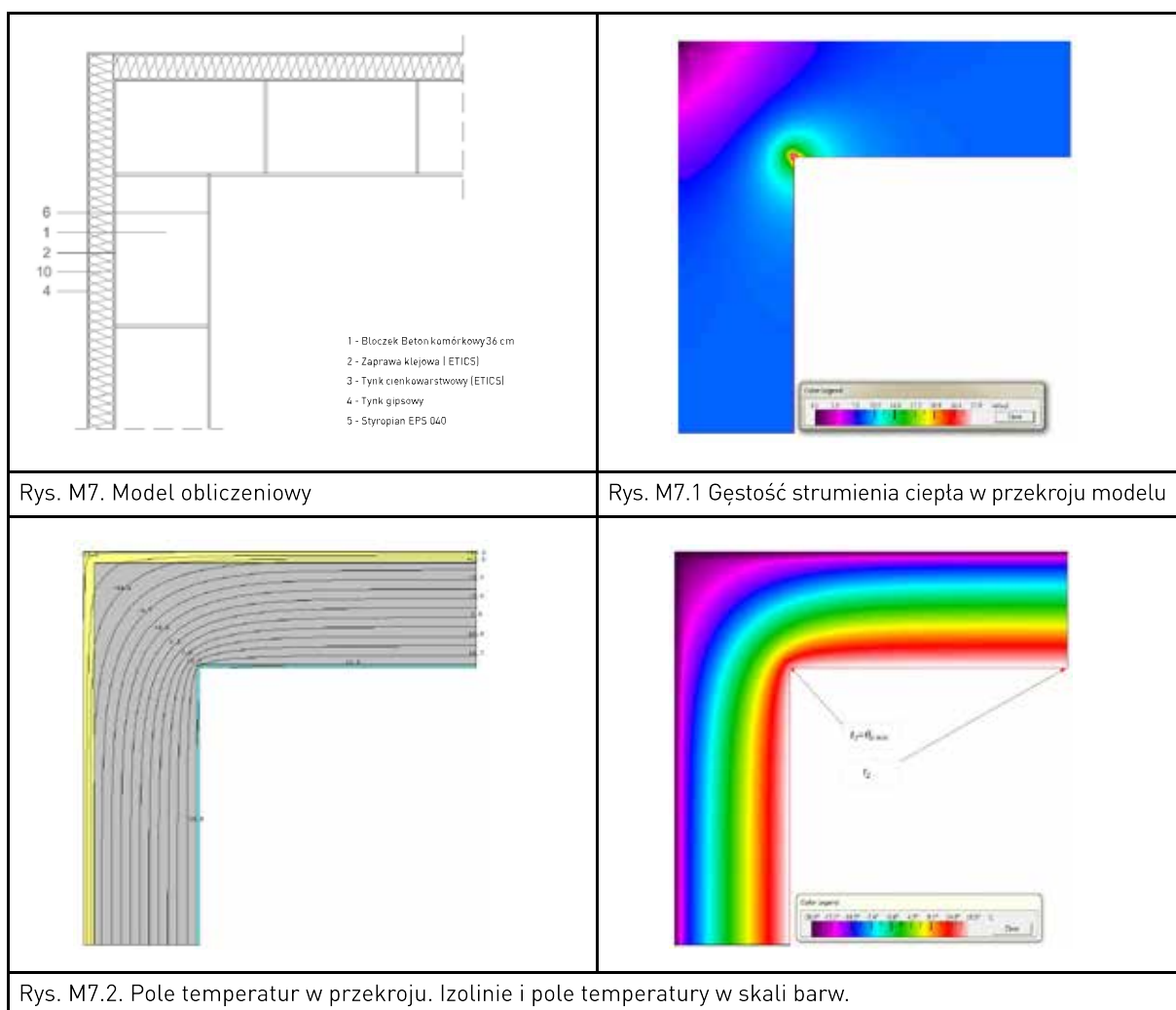
DETAL 6 – Naroże - ściana z bloczków z betonu komórkowego o grubości 30 cm.



Tablica 6.6. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,6\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	22,46	20,16	15,52
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5615	0,5040	0,3880
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5615	0,5040	0,3880
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,1198	-0,1007	-0,0906
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0581	0,0572	0,0543
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,1	16,5	17,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,1	16,7	17,1
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,90	0,91	0,93
Błąd obliczeń	%	0,84	0,95	0,86

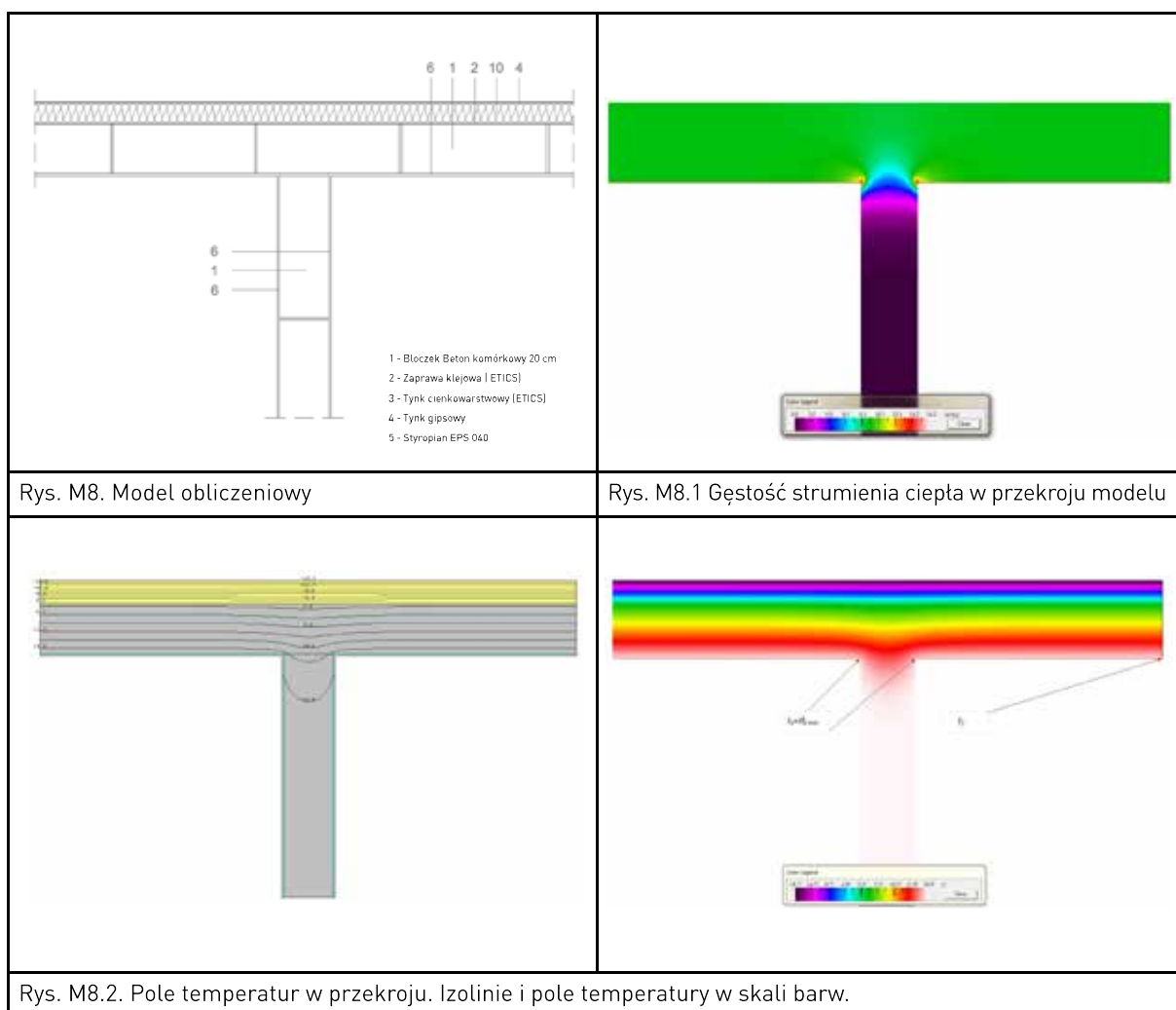
DETAL 7 – Naroże - ściana z bloczków z betonu komórkowego o grubości 36 cm.



Tablica 6.7. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,02\text{ m}$	$d_2=0,04\text{ m}$	$d_3=0,10\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	22,03	19,85	15,41
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5508	0,4963	0,3853
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5508	0,4963	0,3853
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,1375	-0,1248	-0,1011
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0588	0,0586	0,0566
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,2	16,5	16,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,0
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,2	16,5	16,9
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,91	0,91	0,92
Błąd obliczeń	%	0,88	0,87	0,80

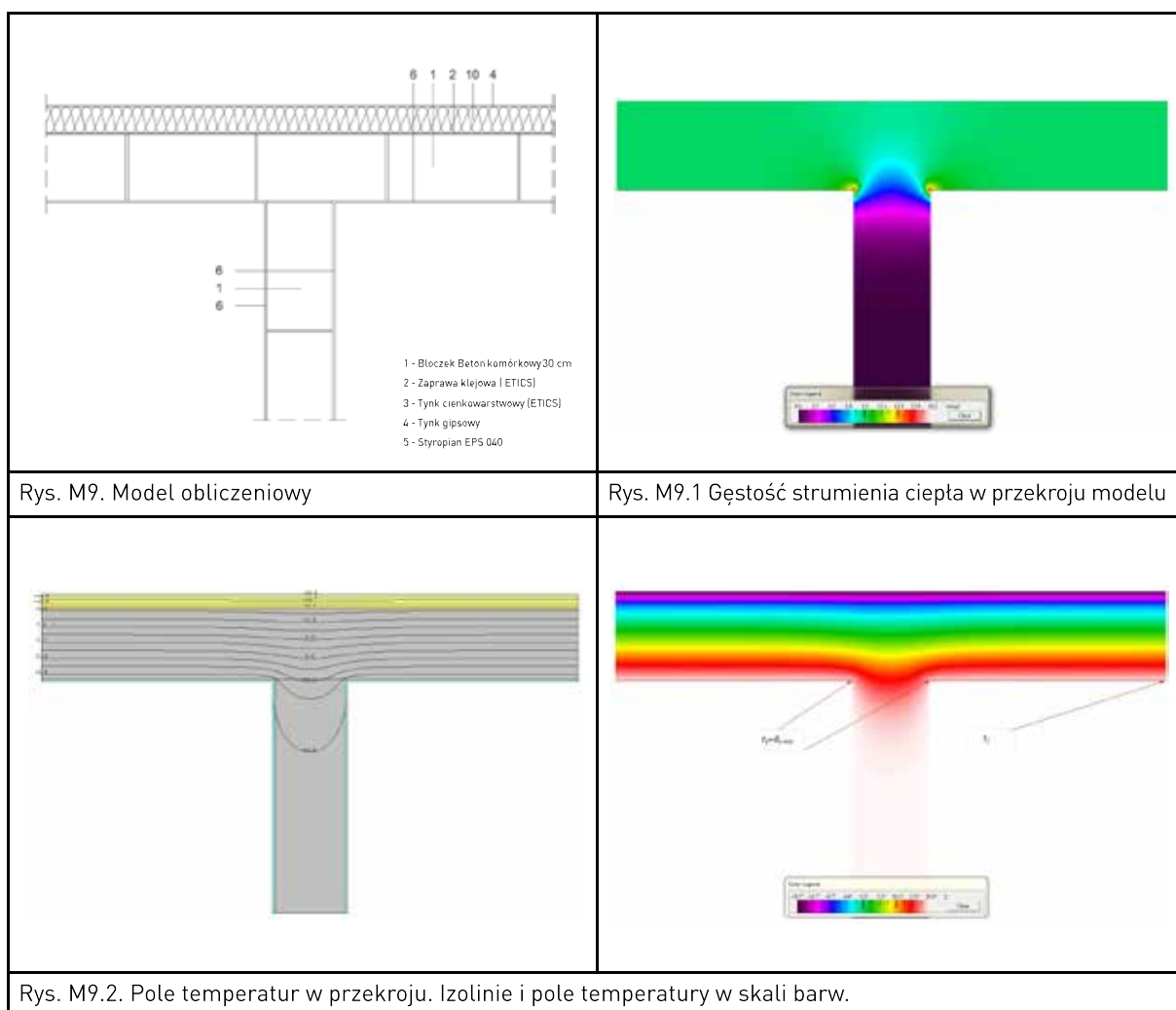
DETAL 8 – Połączenie ściany wewnętrznej i zewnętrznej grubości 20 cm.



Tablica 6.8. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,08\text{ m}$	$d_2=0,10\text{ m}$	$d_3=0,18\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	21,70	17,96	13,43
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5425	0,4830	0,3355
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5045	0,4490	0,3118
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0041	-0,0032	-0,0017
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0125	0,0114	0,0083
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,1	18,3	18,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,2
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,1	18,3	18,8
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,95	0,96	0,97
Błąd obliczeń	%	1,02	0,97	0,80

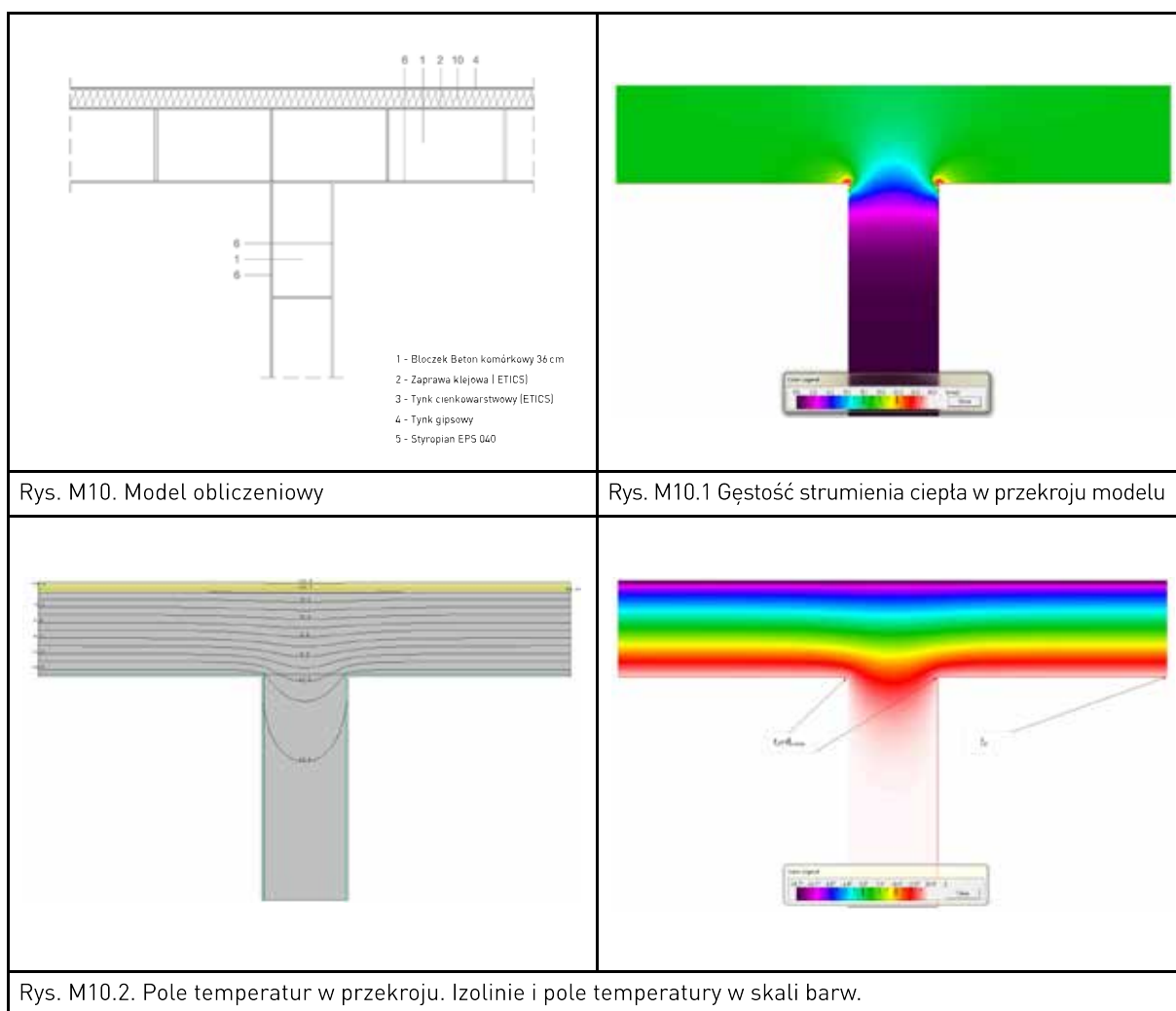
DETAL 9 – Połączenie ściany wewnętrznej i zewnętrznej grubości 30 cm.



Tablica 6.9. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	20,86	18,53	13,88
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5755	0,5115	0,3833
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5213	0,4633	0,3470
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0092	-0,0073	-0,0044
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0179	0,0167	0,0133
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,8	18,0	18,5
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,8	18,0	18,5
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,95	0,95	0,96
Błąd obliczeń	%	1,16	1,09	0,95

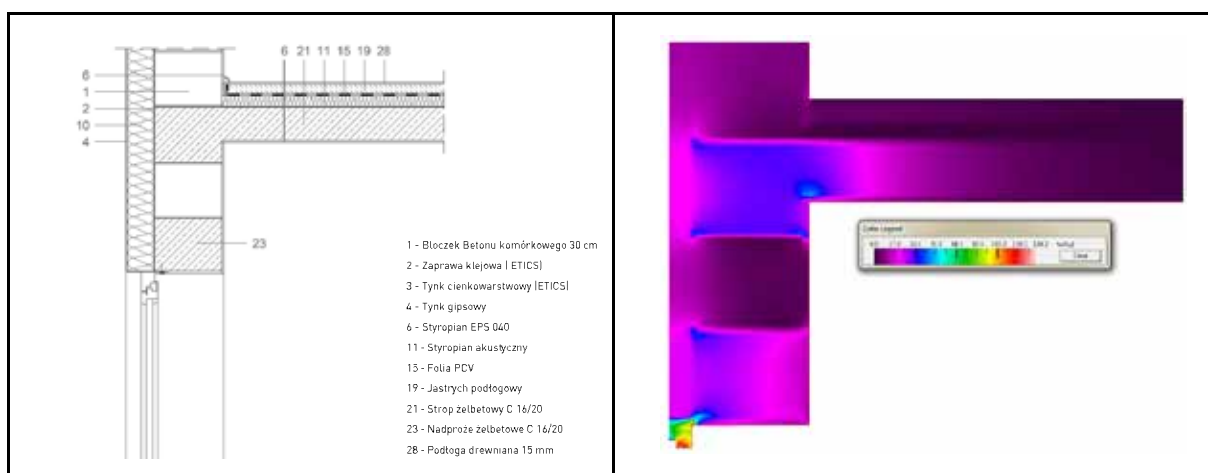
DETAL 10 – Połączenie ściany wewnętrznej i zewnętrznej grubości 36 cm.



Tablica 6.10. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

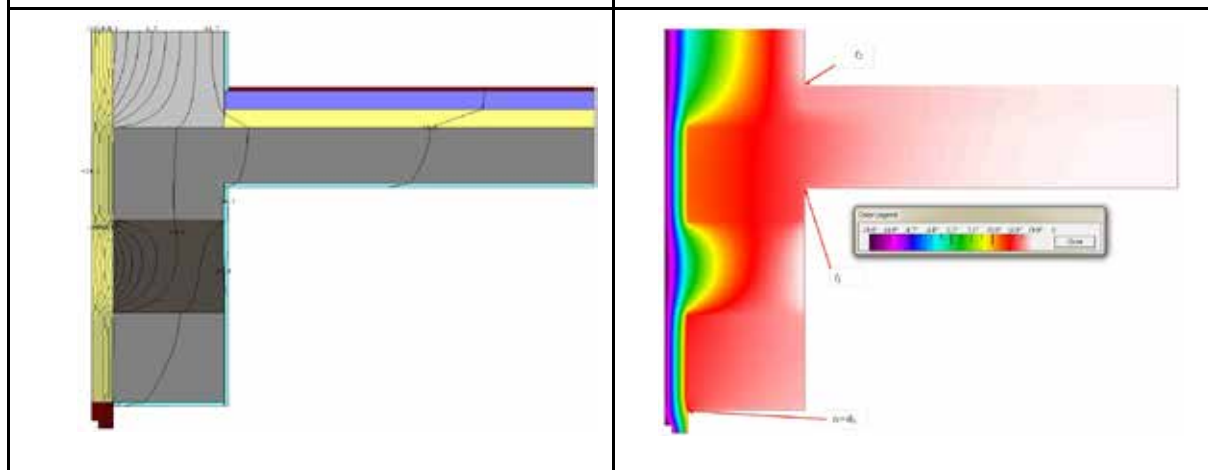
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,02\text{ m}$	$d_2=0,04\text{ m}$	$d_3=0,10\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	20,50	18,26	13,77
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5748	0,5125	0,3868
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5123	0,4568	0,3443
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0129	-0,0102	-0,0058
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0203	0,0191	0,0156
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,8	18,0	18,5
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,6	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,8	18,0	18,5
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,95	0,95	0,96
Błąd obliczeń	%	0,98	1,11	0,97

DETAL 11 – Sposób zamocowania stolarki okiennej w ścianie z wieńcem żelbetowym.



Rys. M11. Model obliczeniowy

Rys. M11.2 Gęstość strumienia ciepła

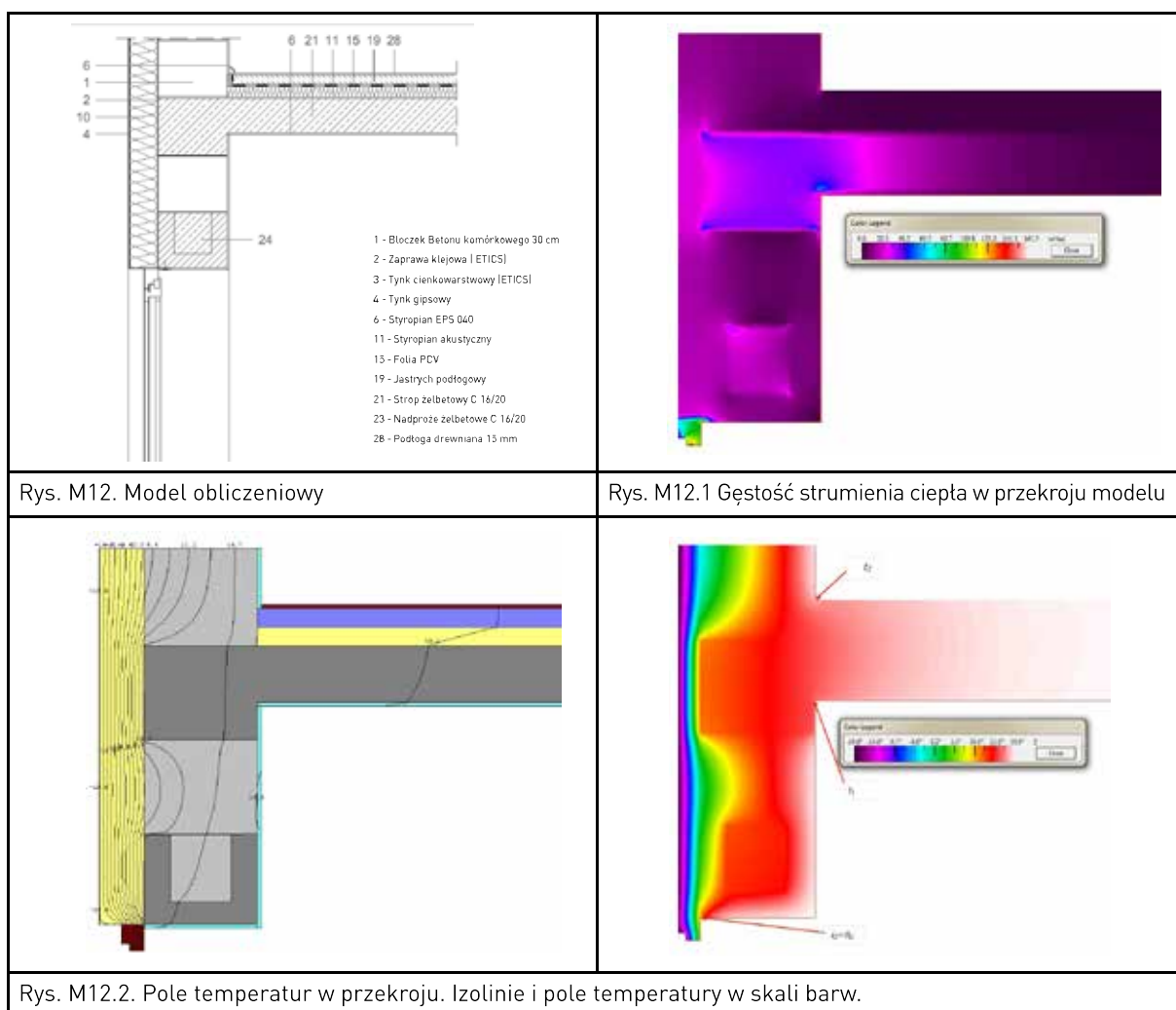


Rys. M11.1. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.11. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi [\text{W}]$	17,18	12,19	10,66
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,4035	0,3048	0,2665
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,4295	0,3355	0,2884
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	0,1467	0,0095	0,0841
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,1628	0,0989	0,0452
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	15,4	16,6	17,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	17,6	18,0	18,7
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3 [^\circ\text{C}]$	11,4	12,5	12,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} [^\circ\text{C}]$	11,4	12,5	12,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,785	0,81	0,82
Błąd obliczeń	%	2,14	2,23	2,37

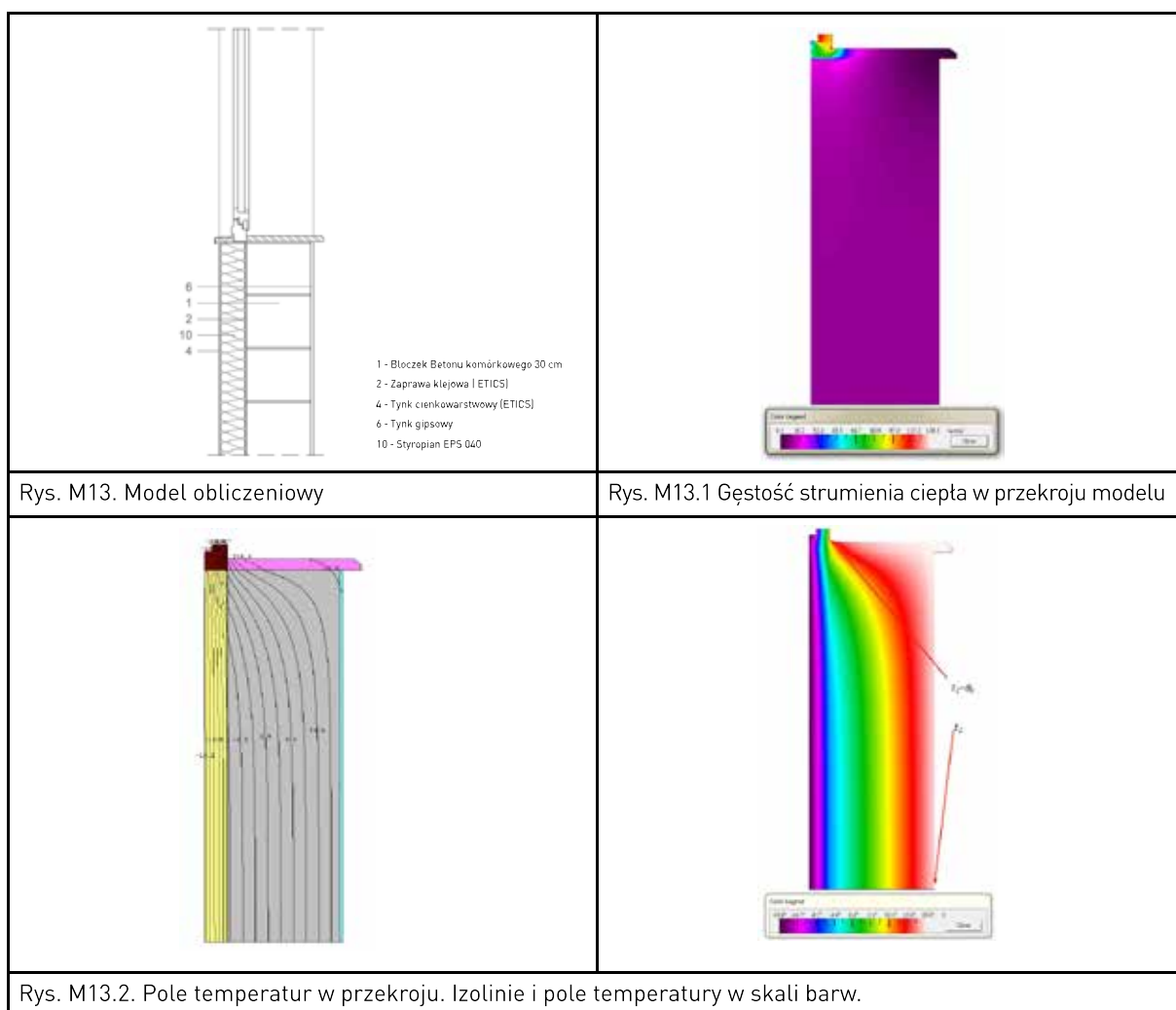
DETAL 12 – Sposób zamocowania stolarki okiennej w ścianie z wieńcem prefabrykowanym.



Tablica 6.12. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	11,00	9,05	8,98
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,4288	0,3810	0,2635
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2810	0,2263	0,2245
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1364	0,1554	-0,0060
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0141	-0,0106	-0,0424
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,2	16,5	17,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,3	17,9	18,6
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,6	10,2	13,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,6	10,2	13,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,74	0,75	0,84
Błąd obliczeń	%	2,35	2,38	2,14

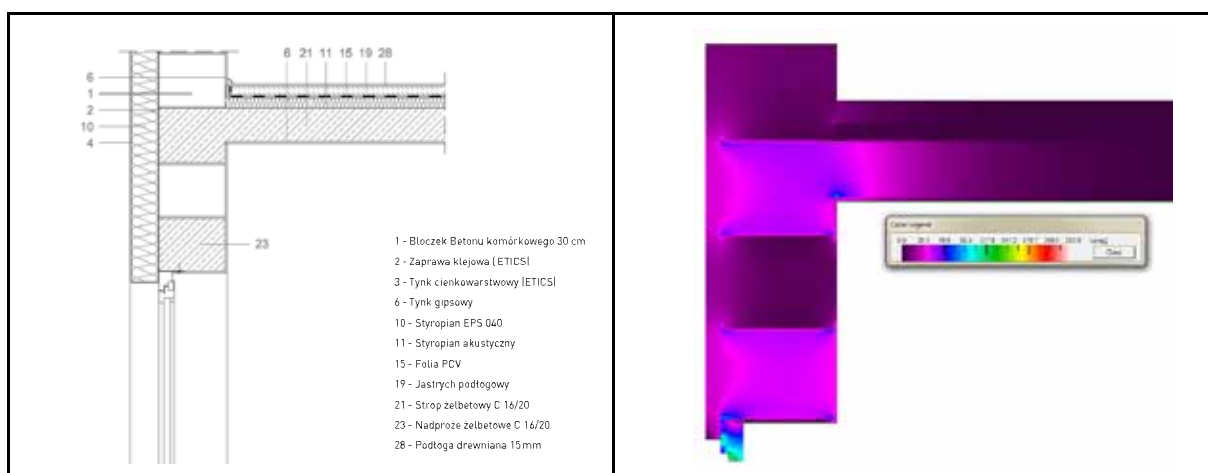
DETAL 13 – Zamocowanie stolarki okiennej w warstwie izolacji – parapet.



Tablica 6.13. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

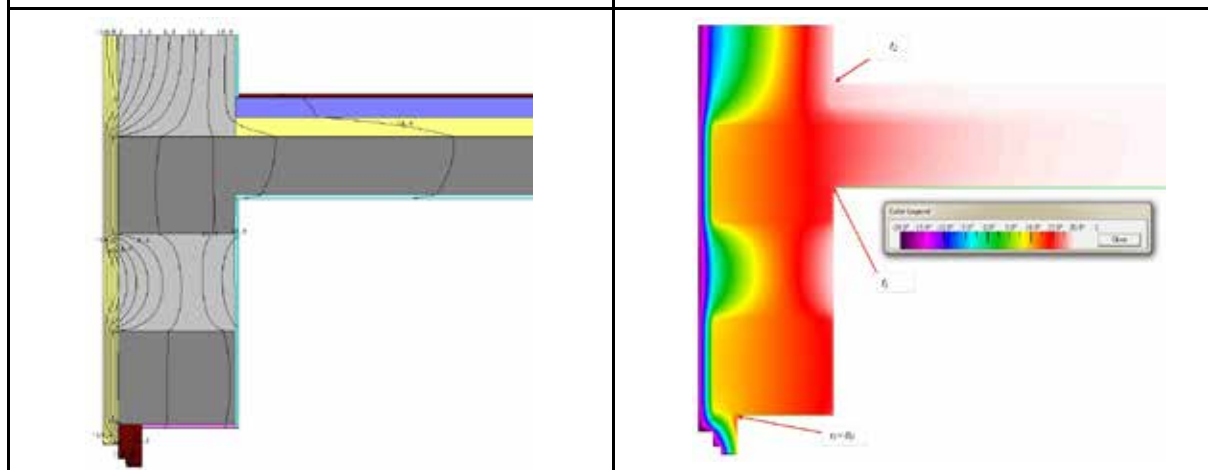
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	12,22	10,30	5,67
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,3055	0,2575	0,1945
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2958	0,1915	0,1418
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0386	0,0319	-0,0493
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0415	-0,0341	-0,0838
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,8	10,6	11,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,8	10,6	11,1
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,74	0,77	0,78
Błąd obliczeń	%	2,06	1,94	2,84

DETAL 14 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie gr 30 cm – nadproże monolityczne.



Rys. M14. Model obliczeniowy

Rys. M14.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

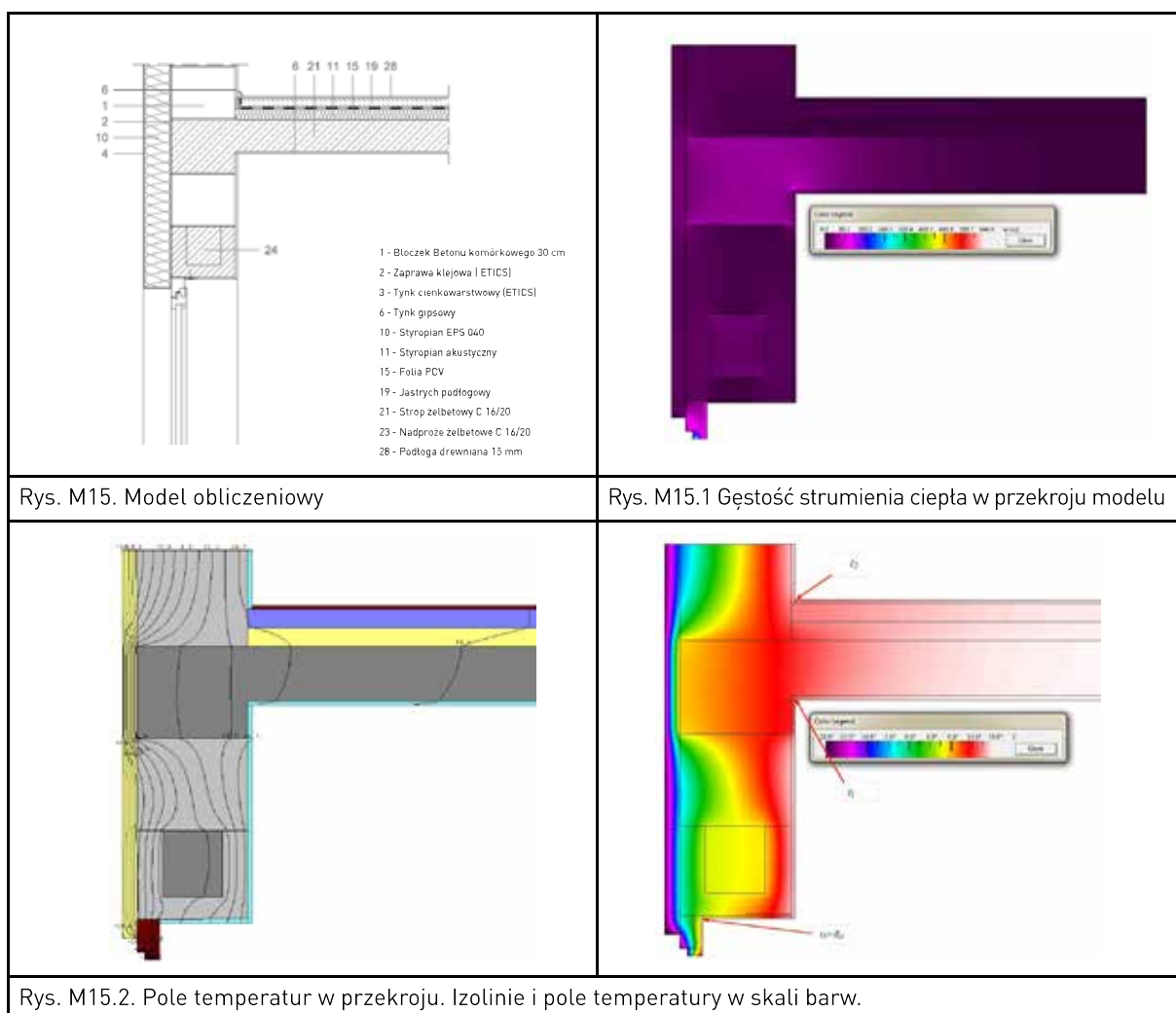


Rys. M14.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.14. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	22,95	18,24	10,44
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5738	0,4560	0,2610
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,3950	0,2240	0,1490
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,3038	0,2187	0,0837
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,2043	0,1571	0,0643
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,7	16,7	18,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,8	18,2	17,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	10,5	15,2	16,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	10,5	15,2	16,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,76	0,88	0,92
Błąd obliczeń	%	2,12	2,36	2,24

DETAL 15 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie gr 30 cm – nadproże prefabrykowane.



Rys. M15. Model obliczeniowy

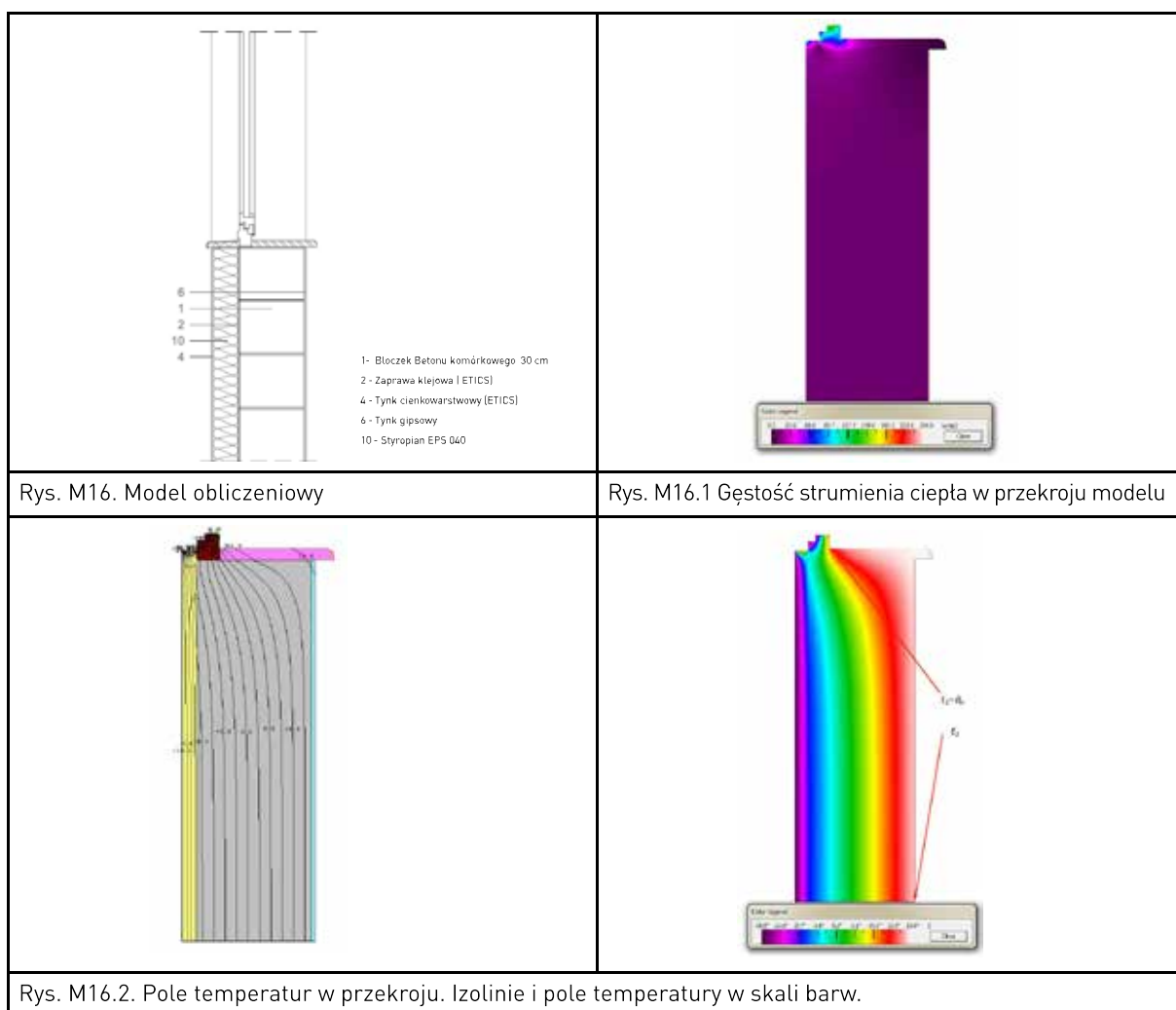
Rys. M15.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

Rys. M15.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.15. Obliczone parametry ciepło-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	19,38	14,23	9,28
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,4845	0,3558	0,2320
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2585	0,2915	0,1463
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,2171	0,1185	0,0053
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,1704	0,1246	0,0207
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,6	16,6	17,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,6	16,9	18,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	7,3	7,9	9,5
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	7,3	7,9	9,5
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,683	0,710	0,74
Błąd obliczeń	%	2,09	2,02	2,14

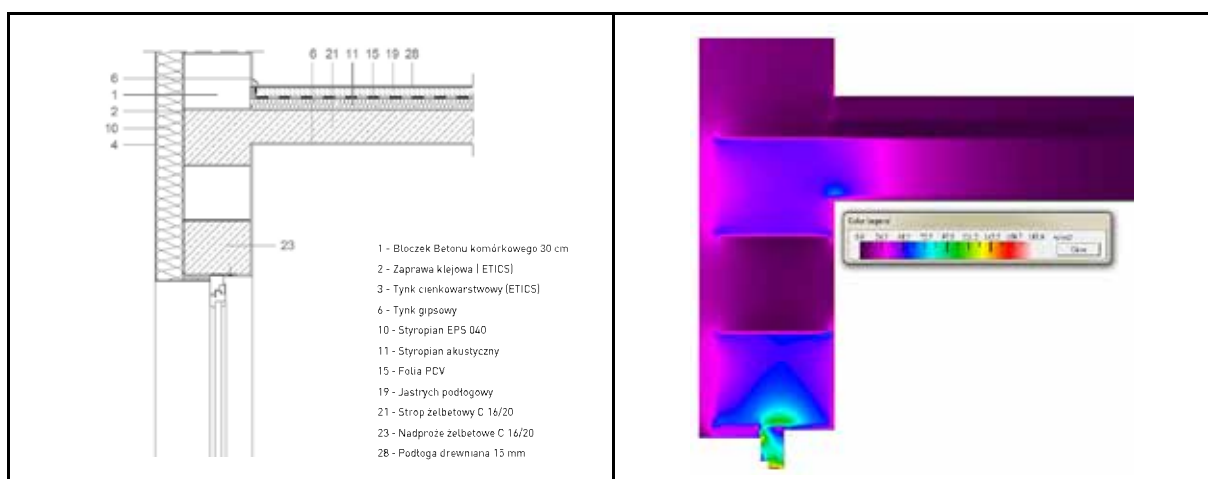
DETAL 16 – Zamocowanie stolarki okiennej w warstwie izolacji – parapet za izolacją.



Tablica 6.16. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

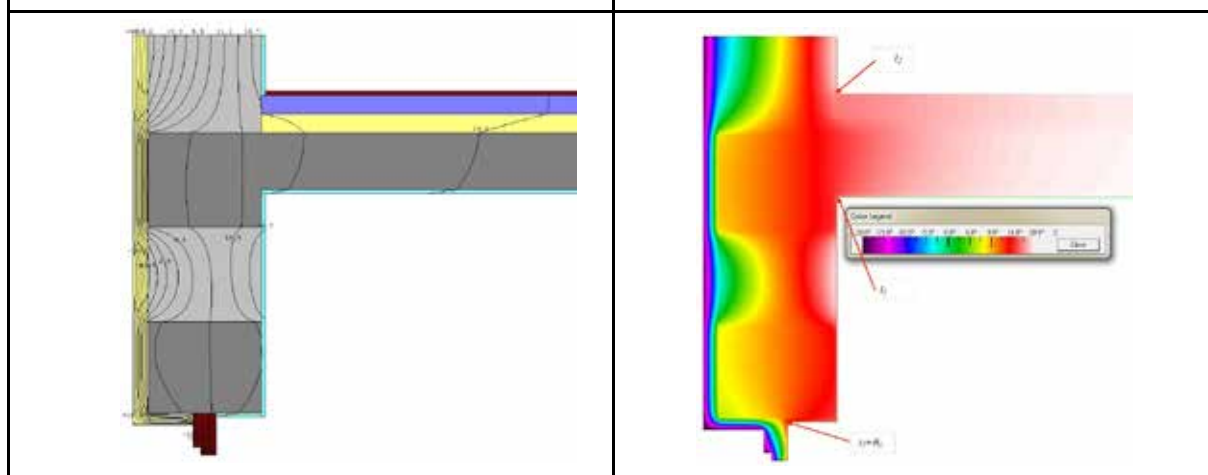
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	8,93	7,94	6,57
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,2735	0,2345	0,1643
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2233	0,1985	0,1505
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0134	0,0033	-0,0083
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	-0,0307	-0,0268	-0,0180
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,8	10,6	11,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,8	10,6	11,1
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,74	0,77	0,78
Błąd obliczeń	%	2,06	1,94	2,84

DETAL 17 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie ocieplonej z ocieplonym nadprożem monolitycznym.



Rys. M17. Model obliczeniowy

Rys. M17.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

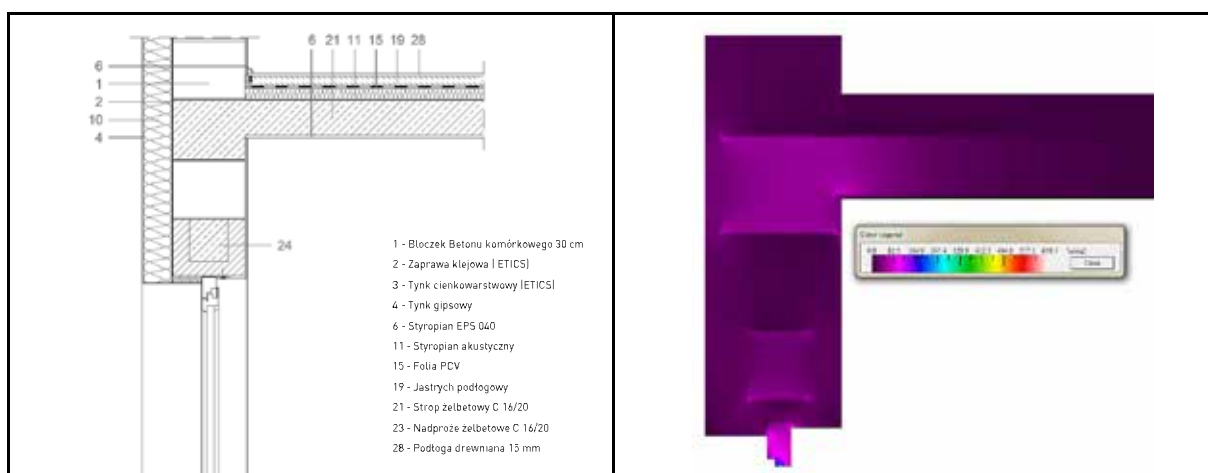


Rys. M17.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

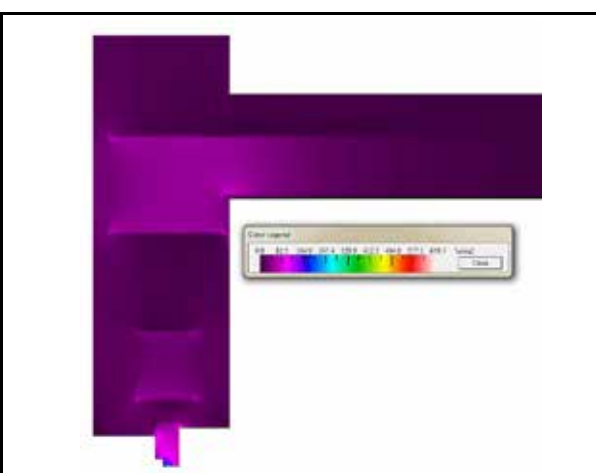
Tablica 6.17. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	21,73	18,65	14,88
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5432	0,4664	0,3270
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,6471	0,6245	0,4059
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,2814	0,2341	0,1397
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,5001	0,368	0,3338
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,4	18,2	18,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,4	16,8	18,0
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,9	14,2	14,4
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,9	14,2	14,4
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,86	0,86
Błąd obliczeń	%	2,74	2,90	2,18

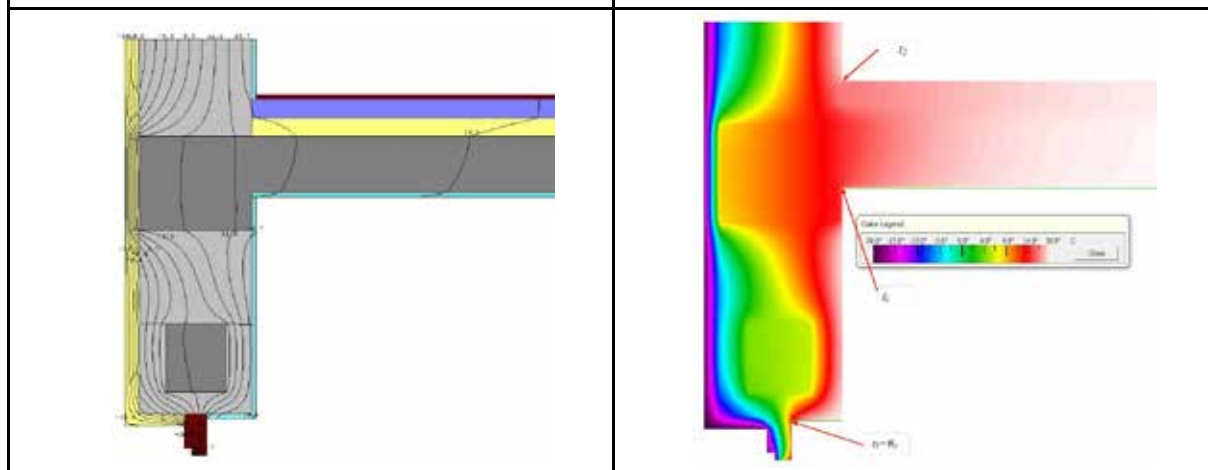
DETAL 18 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie ocieplonej z ocieplonym nadprożem prefabrykowanym.



Rys. M18. Model obliczeniowy



Rys. M18.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

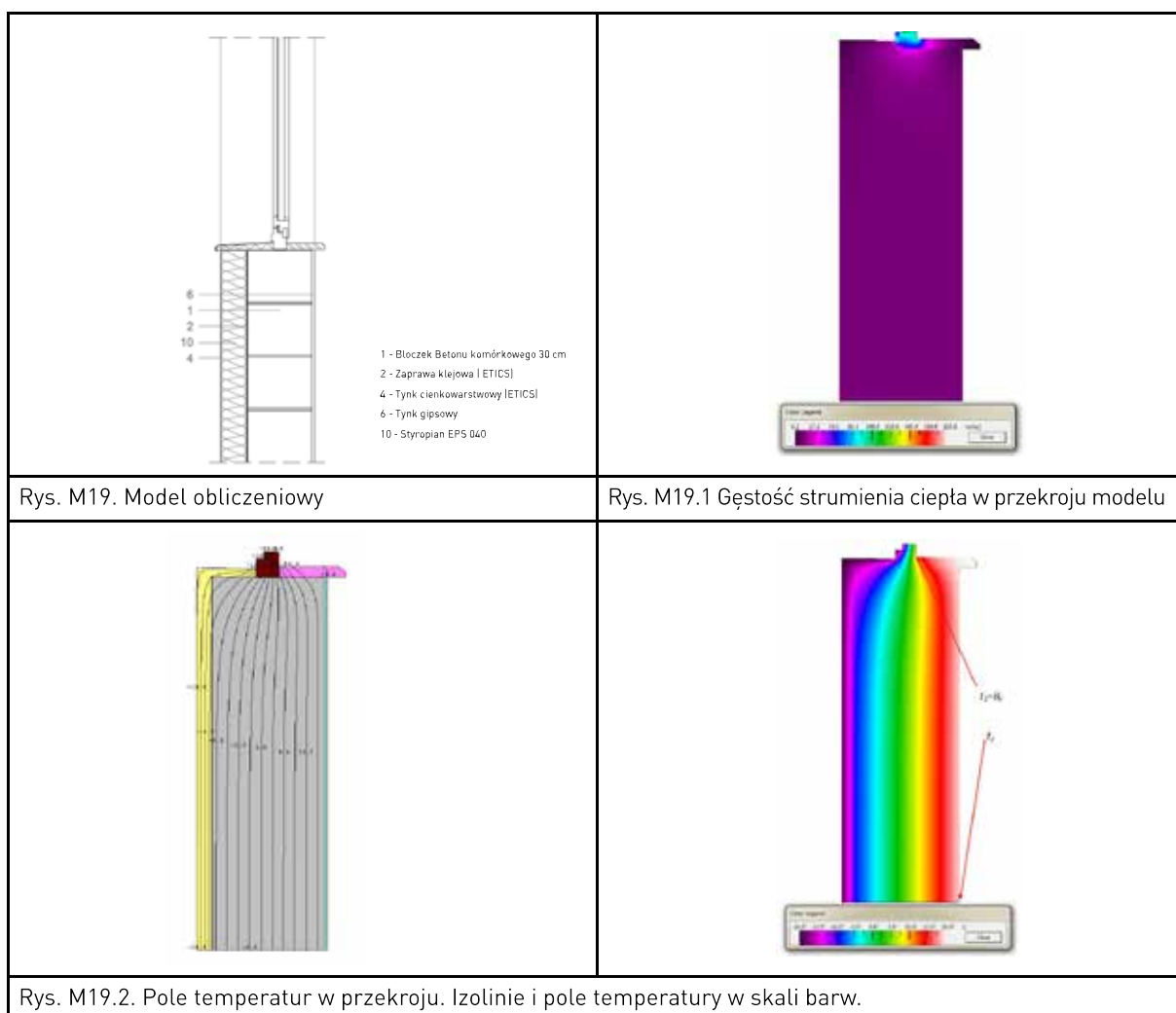


Rys. M18.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.18. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	10,57	8,95	7,07
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5135	0,4243	0,2930
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2643	0,2238	0,1768
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,2293	0,1516	0,0790
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0761	0,0568	0,0520
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,7	16,7	17,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,6	18,0	18,5
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,6	13,3	13,4
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,6	13,3	13,4
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,83	0,84
Błąd obliczeń	%	2,35	2,63	2,78

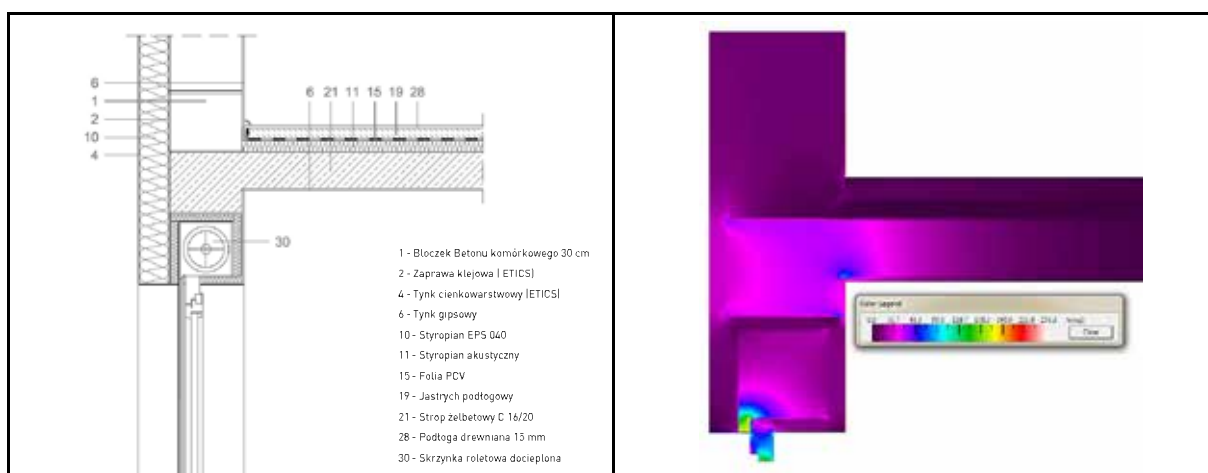
DETAL 19 – Zamocowanie stolarki okiennej – parapet ocieplony.



Tablica 6.19. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

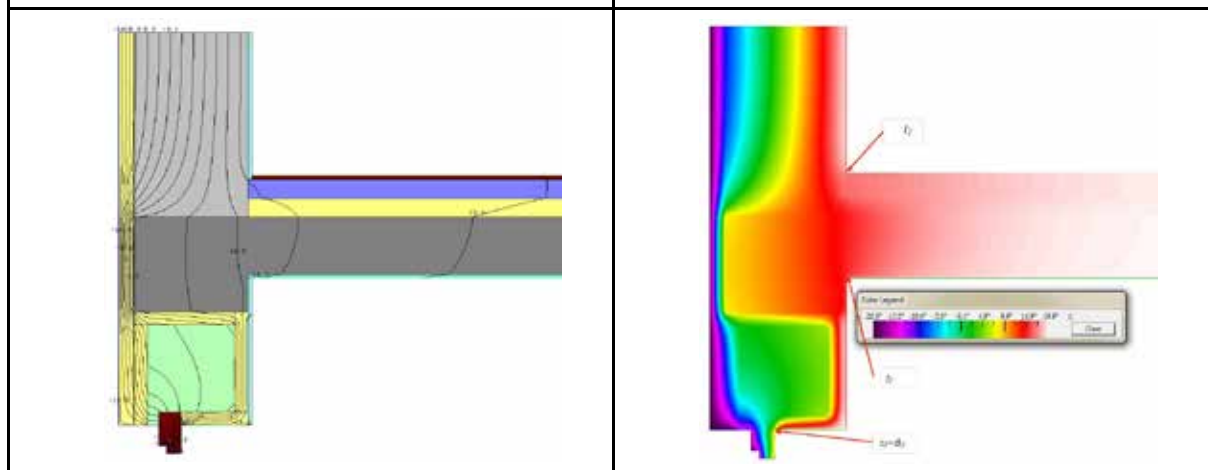
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	10,06	8,27	7,36
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,2365	0,2068	0,1483
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2515	0,2288	0,1840
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0241	-0,0244	-0,0245
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	-0,0026	0,0033	0,0155
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,4	10,1	10,2
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	9,4	9,6	10,2
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,735	0,750	0,755
Błąd obliczeń	%	2,72	2,02	2,18

DETAL 20 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie ocieplonej z roletą okienną.



Rys. M20. Model obliczeniowy

Rys. M20.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

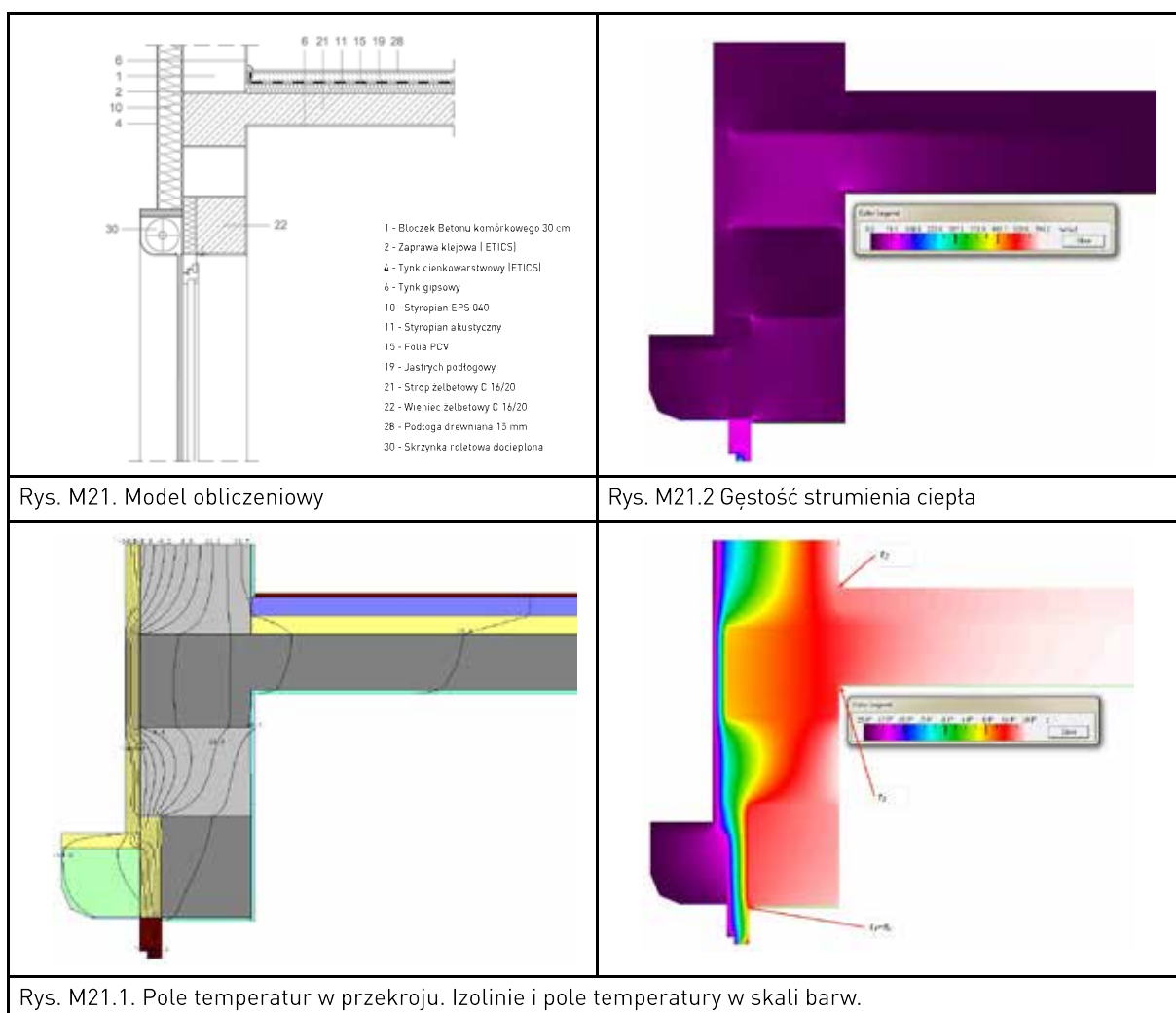


Rys. M20.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.20. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi [\text{W}]$	13,82	12,82	8,00
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,3455	0,3205	0,2000
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,4143	0,2430	0,1938
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	0,0824	0,0862	0,0256
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,1198	0,0715	0,0647
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	15,3	16,2	17,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	15,7	17,8	18,4
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3 [^\circ\text{C}]$	7,9	8,3	8,5
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} [^\circ\text{C}]$	7,9	8,3	8,5
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,70	0,71	0,71
Błąd obliczeń	%	2,76	2,89	2,20

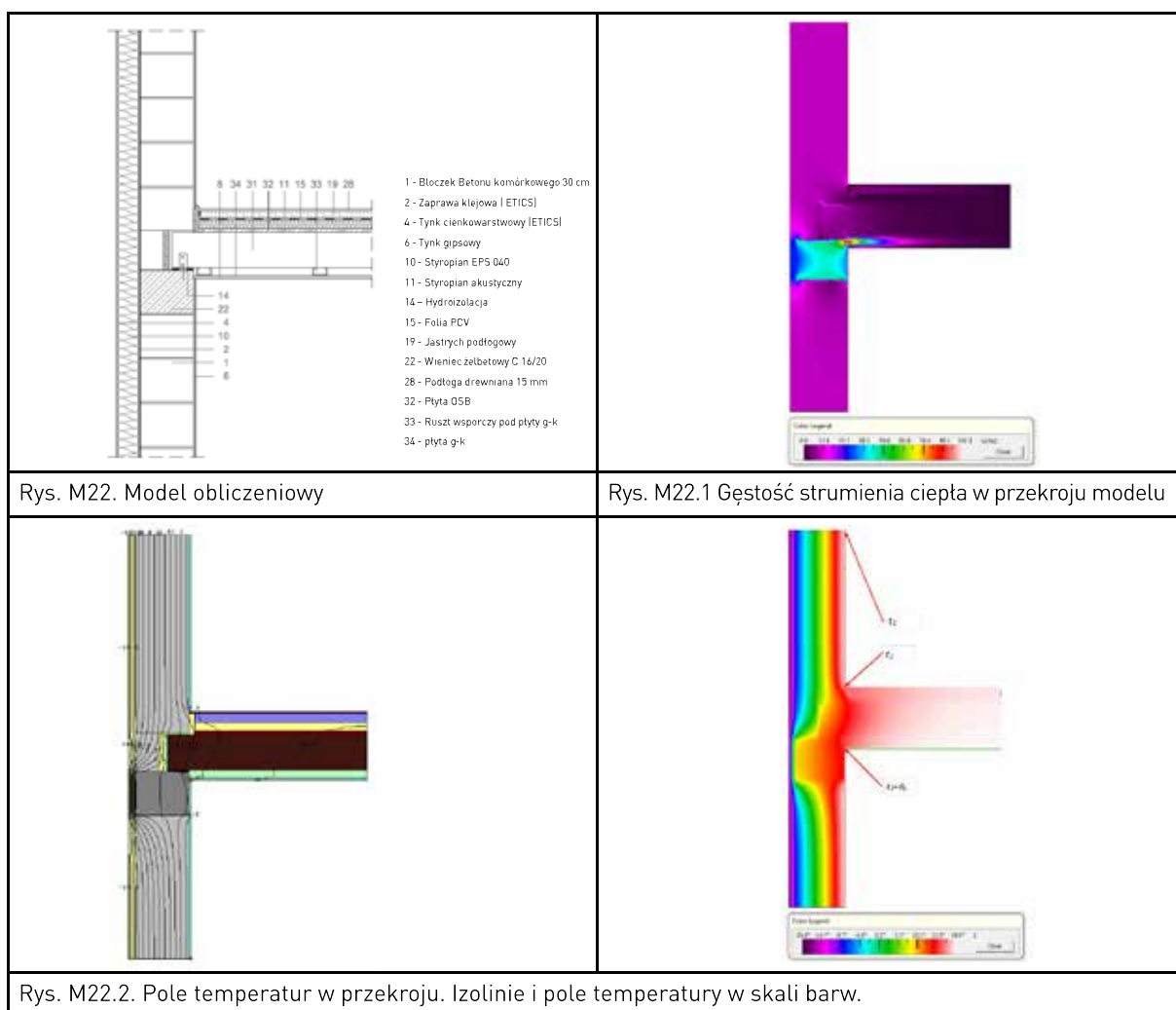
DETAL 21 – Zamocowanie stolarki okiennej w ścianie z wieńcem żelbetowym wraz z roletą okienną.



Tablica 6.21. Obliczone parametry ciepno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi [\text{W}]$	14,40	12,66	10,30
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,3602	0,3166	0,2575
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,4083	0,3996	0,1916
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	0,1418	0,1361	0,1269
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,3061	0,3029	0,1559
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	15,8	16,7	18,0
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	17,8	18,2	18,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3 [^\circ\text{C}]$	14,1	14,3	14,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} [^\circ\text{C}]$	14,1	14,3	14,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,85	0,86	0,87
Błąd obliczeń	%	2,23	2,32	2,39

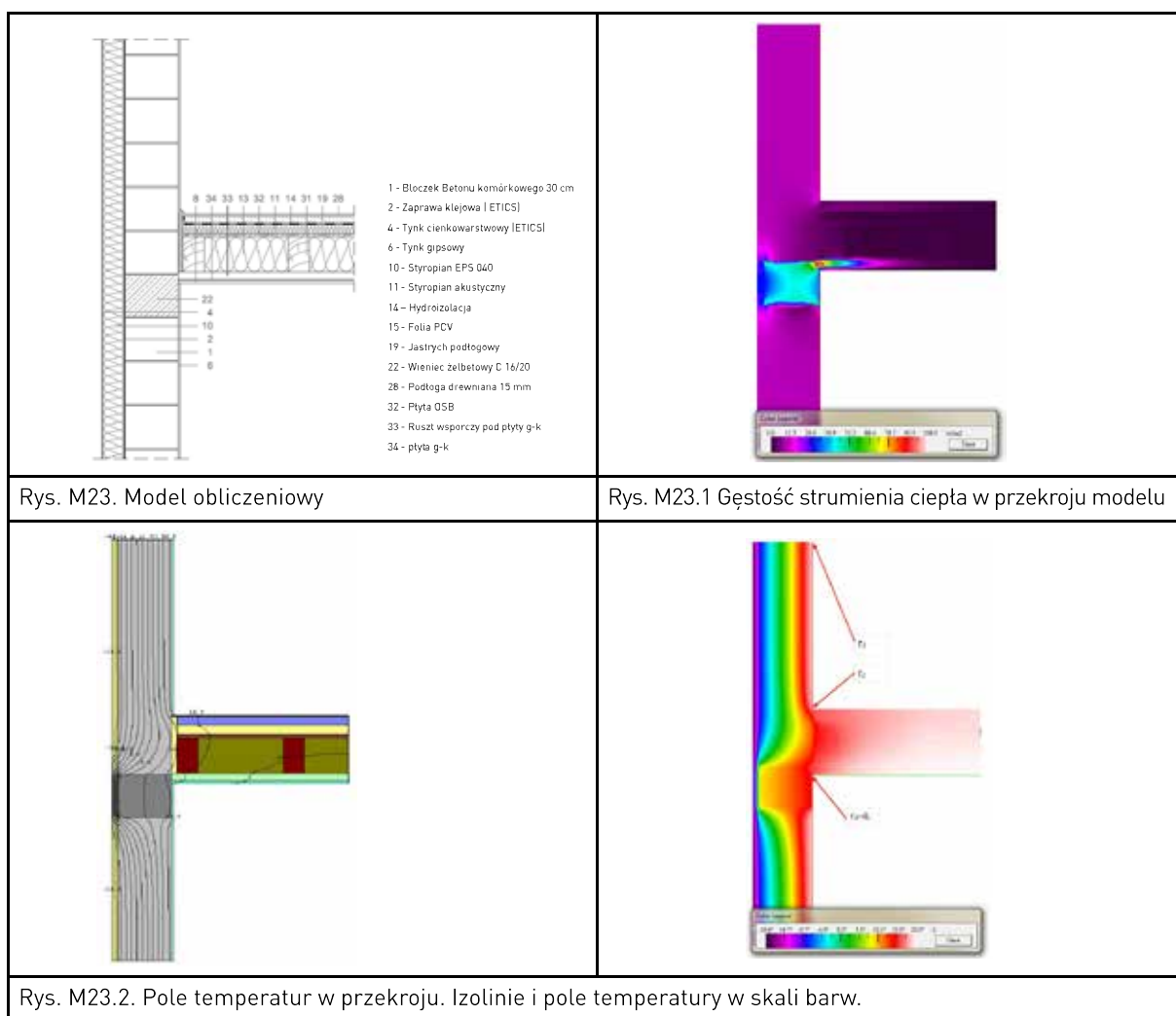
DETAL 22 – Połączenie stropu drewnianego ze ścianą zewnętrzną.



Tablica 6.22. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi \text{ [W]}$	30,91	26,15	18,19
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} \text{ [W/mK]}$	0,7728	0,6538	0,4548
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} \text{ [W/mK]}$	0,6358	0,5358	0,3833
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e \text{ [W/mK]}$	0,1677	0,1169	0,0536
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i \text{ [W/mK]}$	0,1299	0,0869	0,0479
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	16,9	18,0	18,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,5	19,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3 \text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,2	18,0
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} \text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,2	18,0
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,90	0,91	0,95
Błąd obliczeń	%	2,15	1,9	2,5

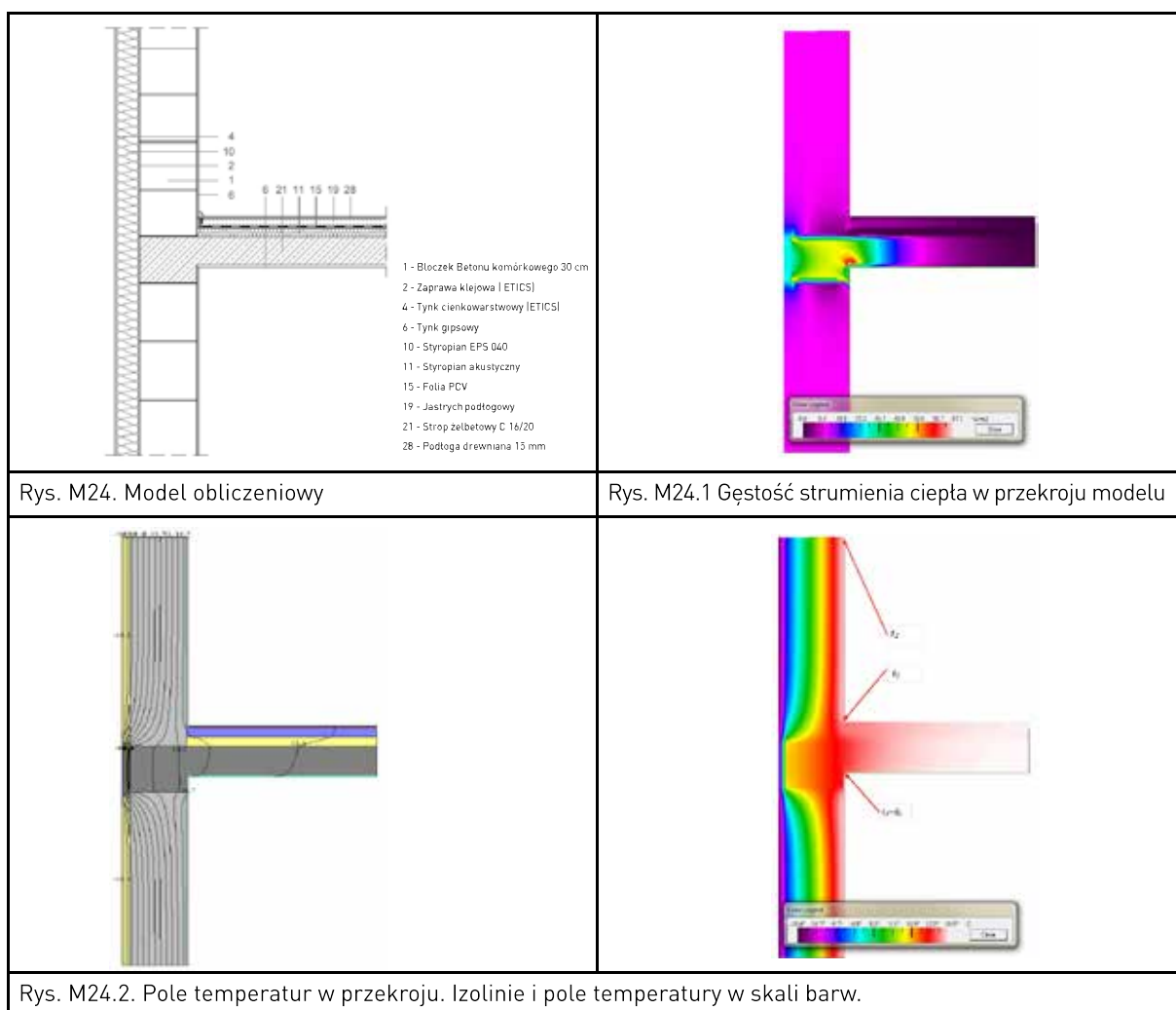
DETAL 23 – Połączenie stropu drewnianego ze ścianą dwuwarstwową z bloczków gr 30 cm.



Tablica 6.23. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	30,65	21,84	15,43
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,7663	0,6478	0,4515
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,6395	0,5460	0,3855
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1612	0,1109	0,0504
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,1336	0,0972	0,0501
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,7	17,1	18,0
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,9	17,6
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,9	17,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,90	0,92	0,94
Błąd obliczeń	%	2,18	1,94	2,50

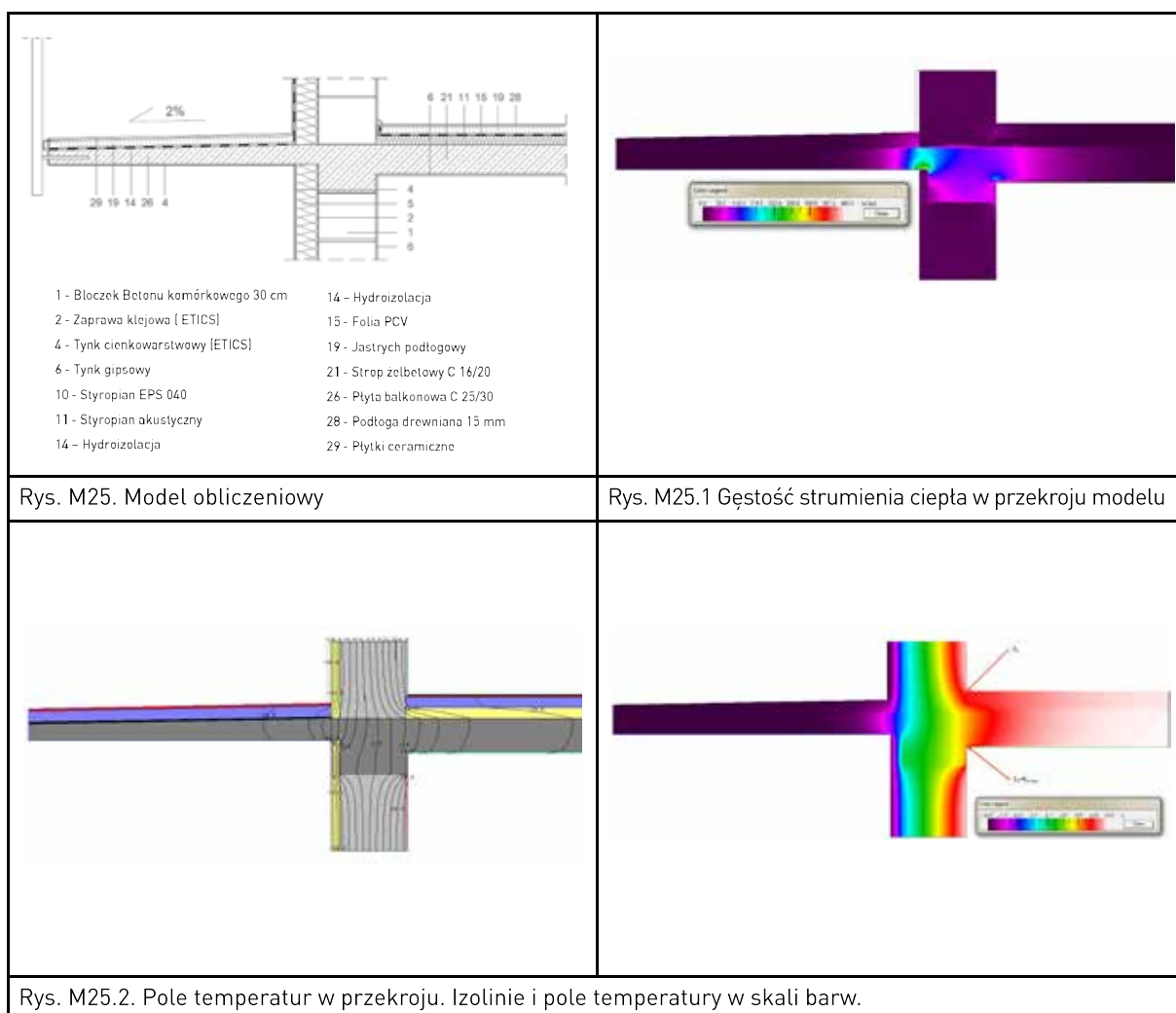
DETAL 24 –Połączenie stropu żelbetowego ze ścianą z bloczków gr 30 cm, dwuwarstwową.



Tablica 6.24. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	21,78	18,75	15,60
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,7430	0,6275	0,4345
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5445	0,4688	0,3343
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1710	0,1200	0,0553
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0411	0,0222	0,0006
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,4	17,9	18,2
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,5	18,8	19,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 3	$t_3\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,1	16,7	17,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,1	16,7	17,9
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,88	0,92	0,93
Błąd obliczeń	%	2,1	2,8	2,71

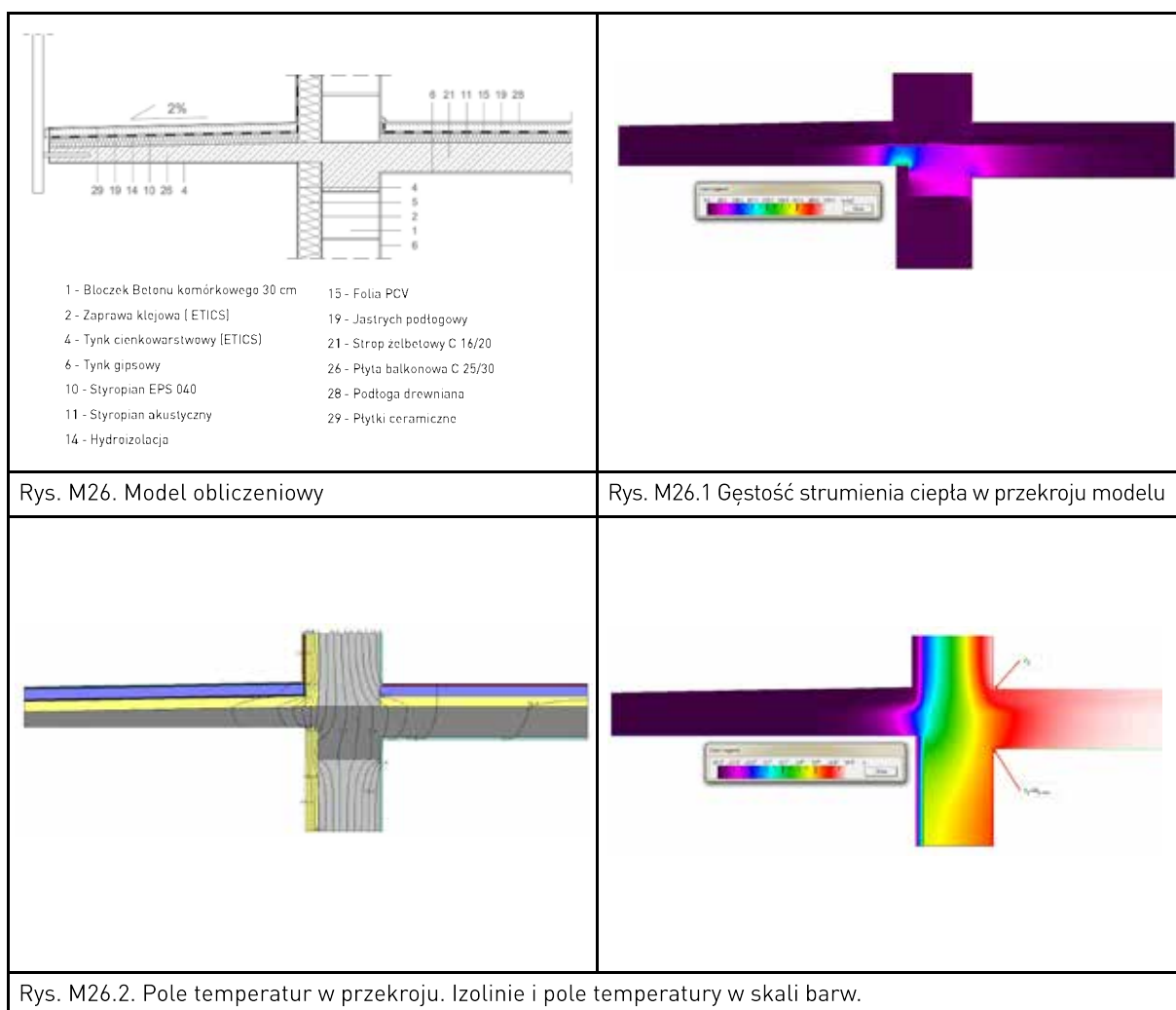
DETAL 25 – Balkon wspornikowy żelbetonowy w ścianie o gr.30 cm - płyta bez ocieplenia.



Tablica 6.25. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe całego węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	16,25	14,52	11,42
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,4063	0,3630	0,2855
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,5750	0,4700	0,4200
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,2207	0,1774	0,0999
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,4021	0,2971	0,2471
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	14,8	15,6	16,4
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	10,1	11,4	12,7
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	10,1	11,4	12,7
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,77	0,78	0,82
Błąd obliczeń	%	2,98	2,33	2,77

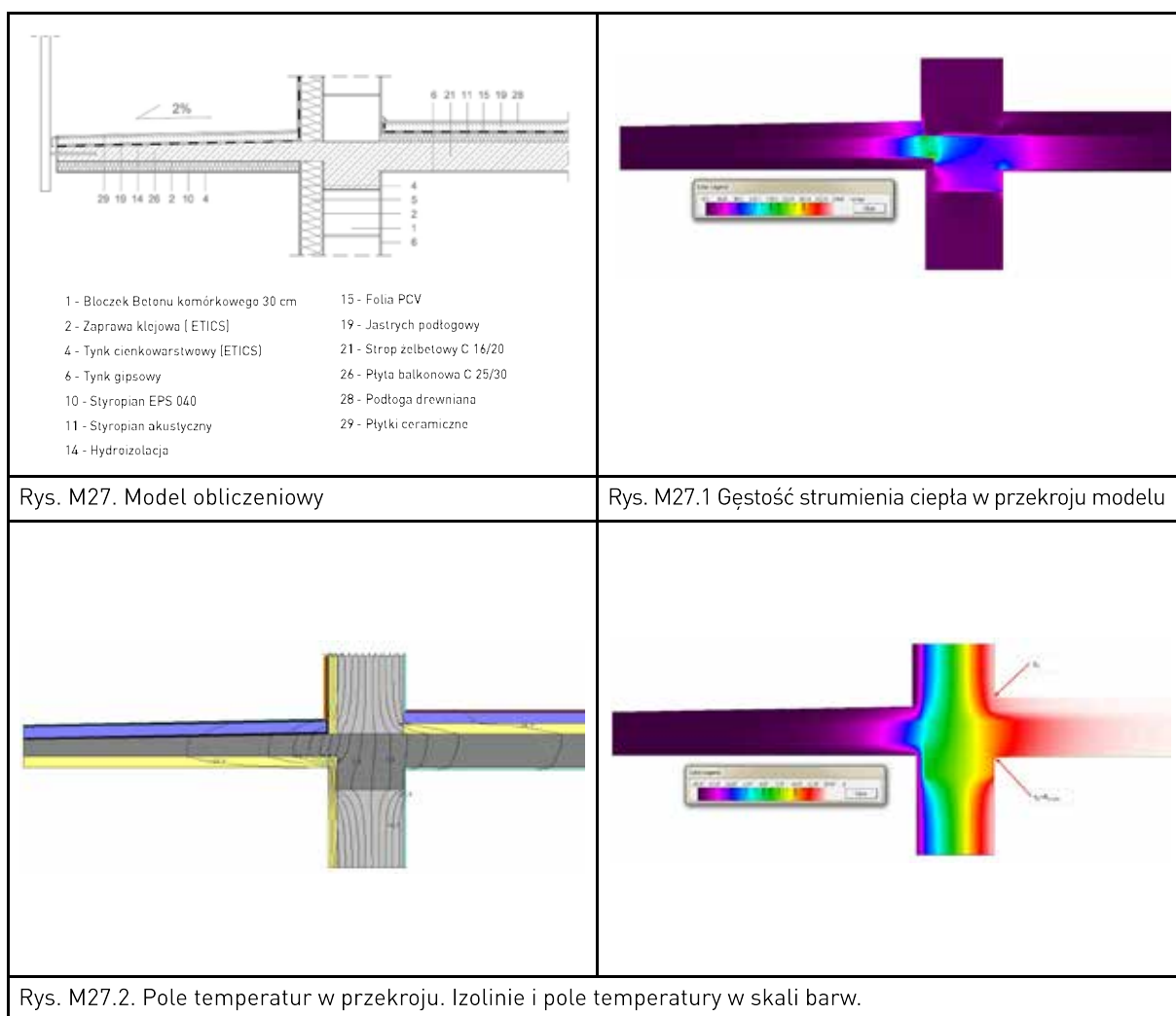
DETAL 26 – Balkon wspornikowy żelbetowy w ścianie o gr.30 cm z ociepleniem płyty od góry.



Tablica 6.26. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	14,55	13,32	11,08
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,3638	0,3330	0,2770
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,4650	0,4145	0,3563
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1782	0,1474	0,0914
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,2921	0,2416	0,1834
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,5	15,9	16,8
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	11,2	11,7	12,4
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	11,2	11,7	12,4
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,78	0,78	0,81
Błąd obliczeń	%	2,98	2,33	2,77

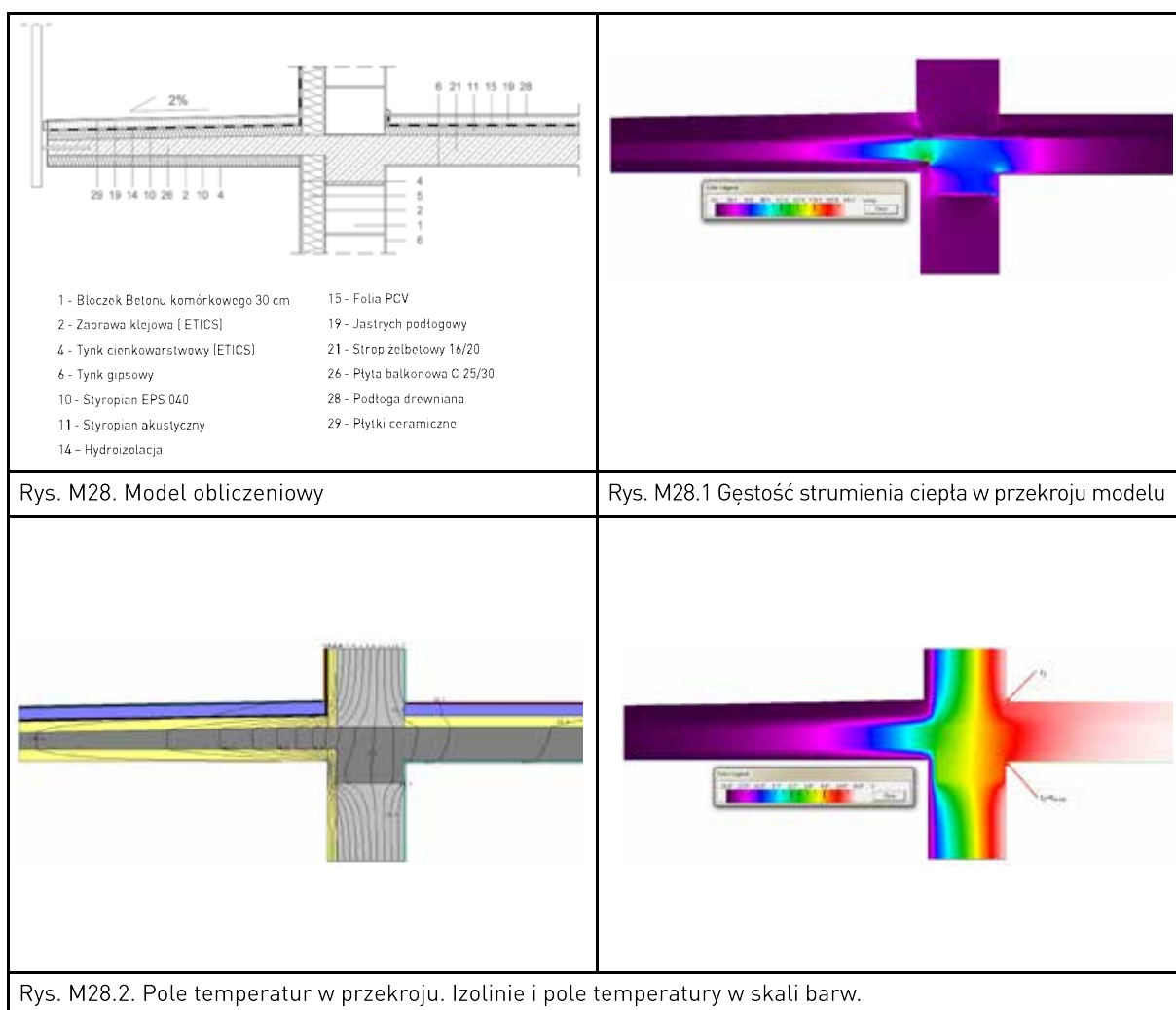
DETAL 27 – Balkon wspornikowy żelbetonowy w ścianie o gr.30 cm z ociepleniem płyty od dołu.



Tablica 6.27. Obliczone parametry ciepło-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	13,17	12,13	10,10
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,3293	0,3033	0,2525
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,3805	0,3665	0,3105
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1437	0,1177	0,0669
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,2076	0,1936	0,1376
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,1	12,6	13,7
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,2	16,8
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,1	12,6	13,7
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,80	0,82	0,84
Błąd obliczeń	%	2,32	2,71	2,60

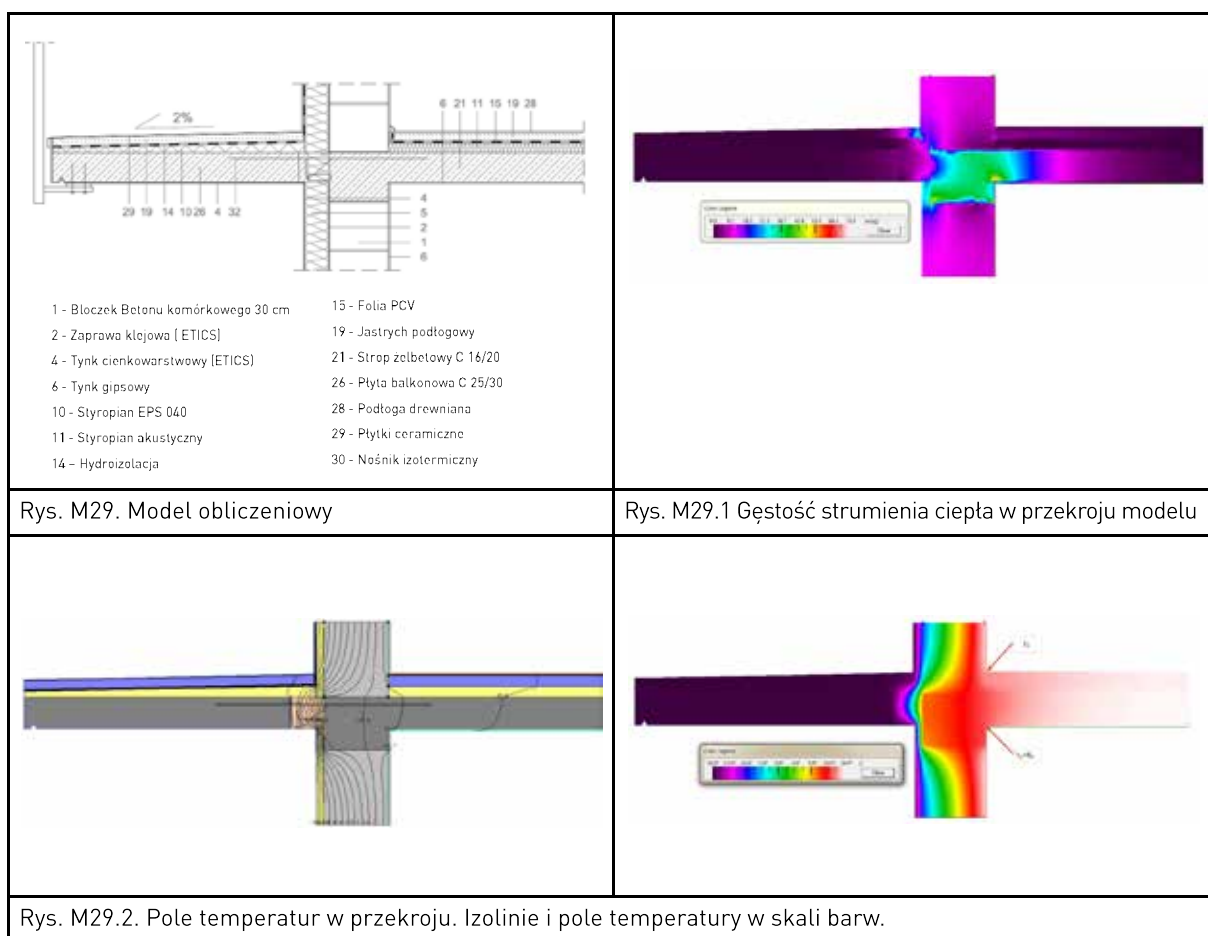
DETAL 28 – Balkon wspornikowy żelbetowy w ścianie o gr.30 cm. z ociepleniem dwustronnym płyty.



Tablica 6.28. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	11,15	10,13	6,78
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,2475	0,2058	0,1405
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,2788	0,2533	0,1695
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0612	0,0404	0,0171
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,1056	0,0997	0,0547
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,1	12,6	13,7
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,9	16,2	16,8
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,1	12,6	13,7
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,80	0,82	0,84
Błąd obliczeń	%	2,32	2,71	2,60

DETAL 29 – Balkon wspornikowy żelbetowy w ścianie o gr.30 cm z łącznikiem termoizolacyjnym.

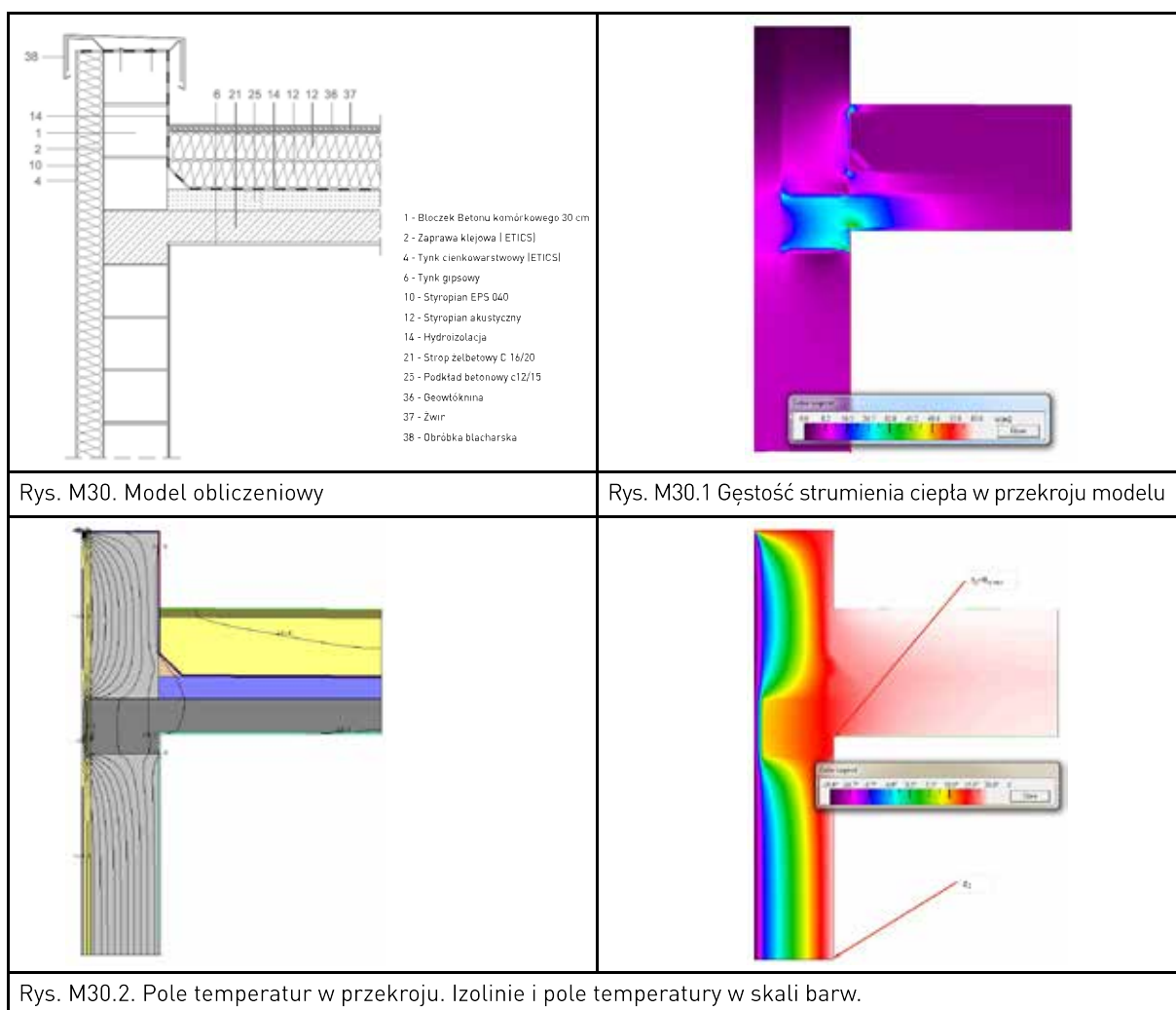


Uwaga - w obliczeniach nie uwzględniono stalowych prętów łącznikowych. Należy je uwzględnić, jako mostek punktowy χ dla konkretnego przypadku, znając średnicę pręta oraz ilość prętów na 1 mb płyty wspornikowej.

Tablica 6.29. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	11,13	9,28	6,15
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,2825	0,2320	0,1538
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,1940	0,1558	0,1153
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1063	0,0757	0,0366
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0211	0,0024	0,0006
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	14,9	15,2	16,6
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	17,2	17,5	17,8
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	14,9	15,2	16,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,87	0,88	0,91
Błąd obliczeń	%	2,32	2,27	2,39

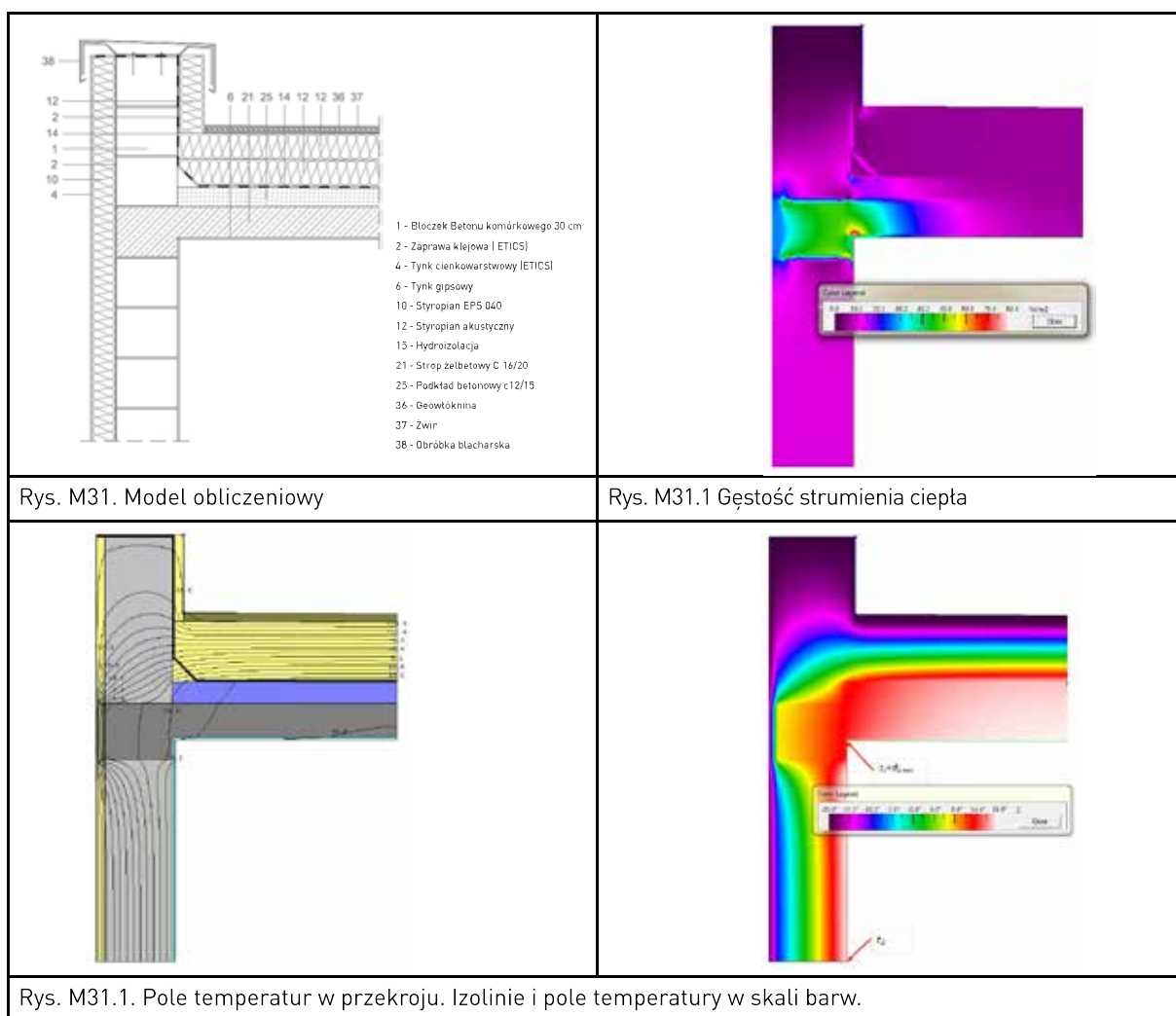
DETAL 30 – Stropodach płaski odwrócony. Attyka nieocieplona.



Tablica 6.30. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe ściany

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła (ściana)	$\Phi\text{ [W]}$	13,44	11,89	7,96
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5603	0,4455	0,2890
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,3360	0,2973	0,1990
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0631	0,0450	0,0020
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0843	0,0740	0,0322
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,5	18,7	18,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	13,8	17,3	18,3
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	13,8	17,3	18,3
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,85	0,93	0,96
Błąd obliczeń	%	2,34	3,32	1,90

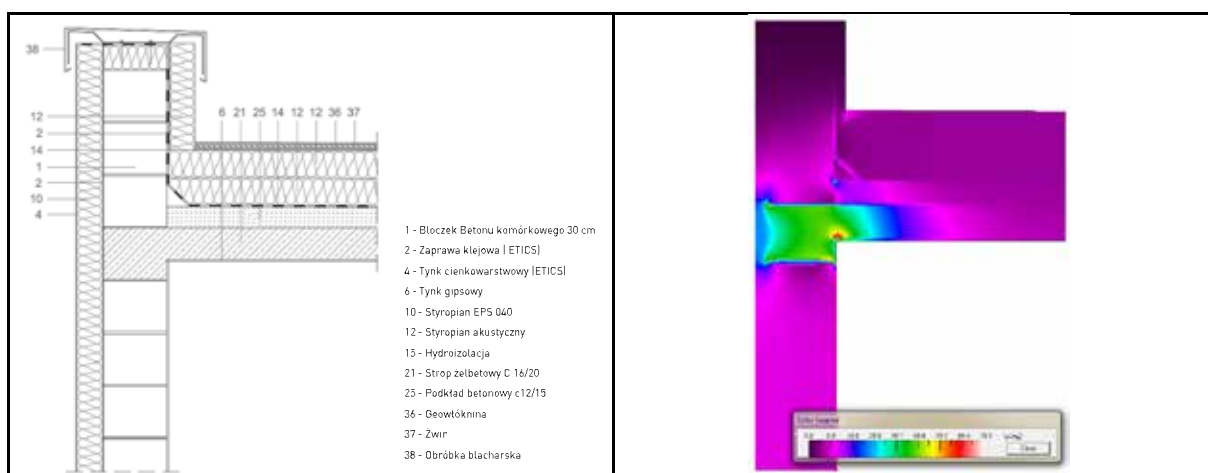
DETAL 31 – Stropodach płaski odwrócony. Attyka z ociepleniem pionowym.



Tablica 6.31. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe – ściana.

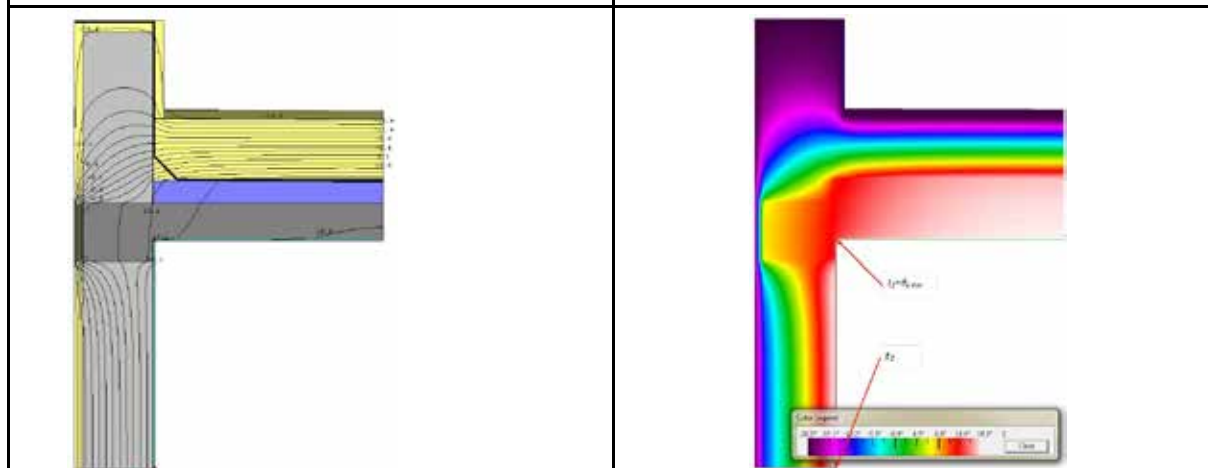
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła (ściana)	$\Phi [\text{W}]$	12,66	10,87	7,86
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,5375	0,4383	0,2978
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,3165	0,2718	0,1965
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	0,0252	0,0117	-0,0216
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,0648	0,0489	0,0297
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	14,1	15,7	16,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	18,5	18,8	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \min} [^\circ\text{C}]$	14,1	15,7	16,9
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,85	0,89	0,92
Błąd obliczeń	%	2,28	2,17	2,72

DETAL 32 – Stropdach płaski odwrócony. Attyka z ociepleniem pionowym i poziomym.



Rys. M32. Model obliczeniowy

Rys. M32.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

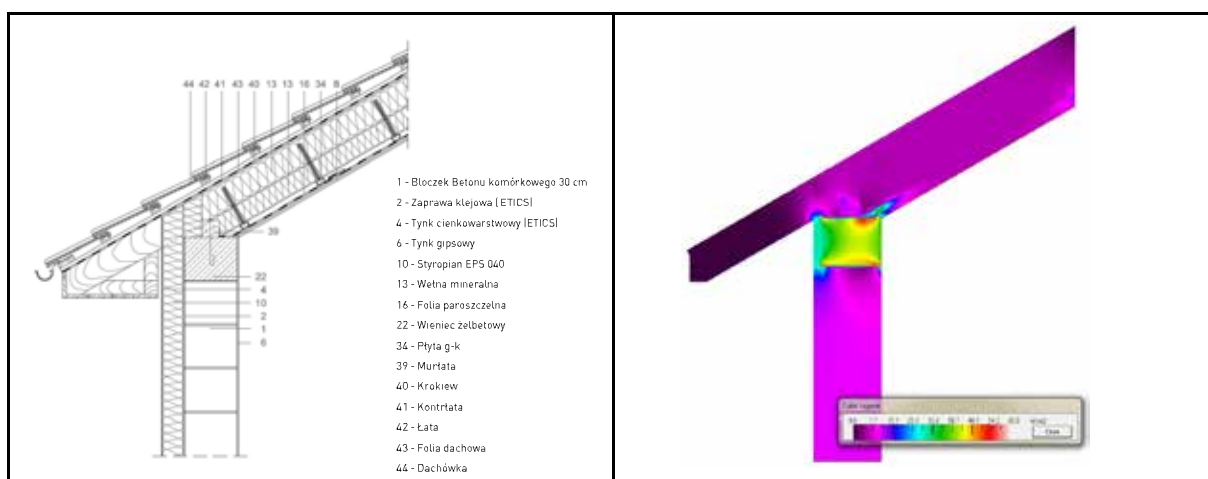


Rys. M32.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.32. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe - ściana

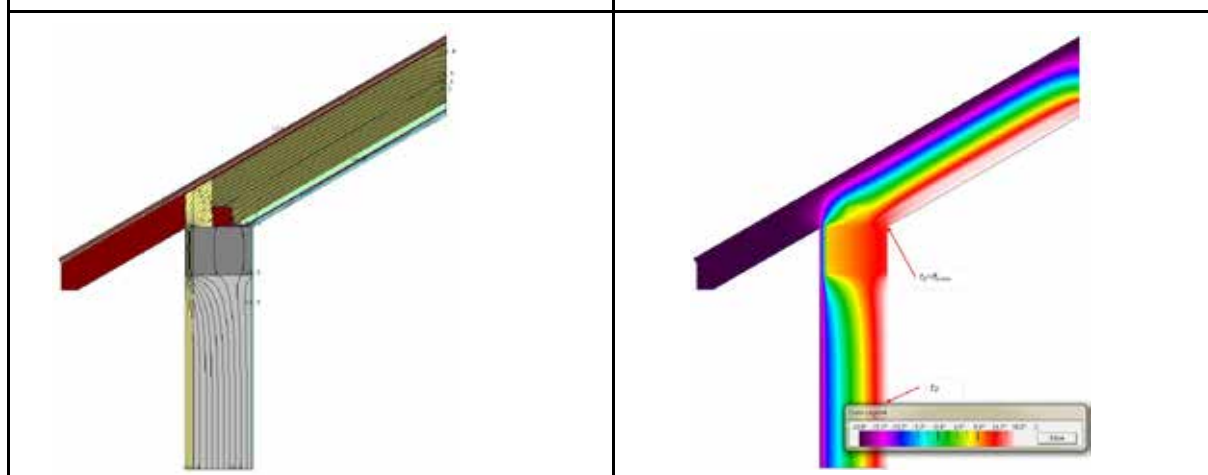
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	12,68	10,87	7,84
Współczynnik sprzężenia cieplnego(ściana)	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,5303	0,4410	0,3043
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,3170	0,2718	0,1960
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0383	0,0000	-0,0353
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0653	0,0485	0,0292
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	14,9	15,7	16,9
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	14,9	15,7	16,9
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,87	0,89	0,92
Błąd obliczeń	%	2,27	2,08	2,84

DETAL 33 – Połączenie dachu skośnego ze ścianą zewnętrzną o gr. 30 cm.



Rys. M33. Model obliczeniowy

Rys. M33.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

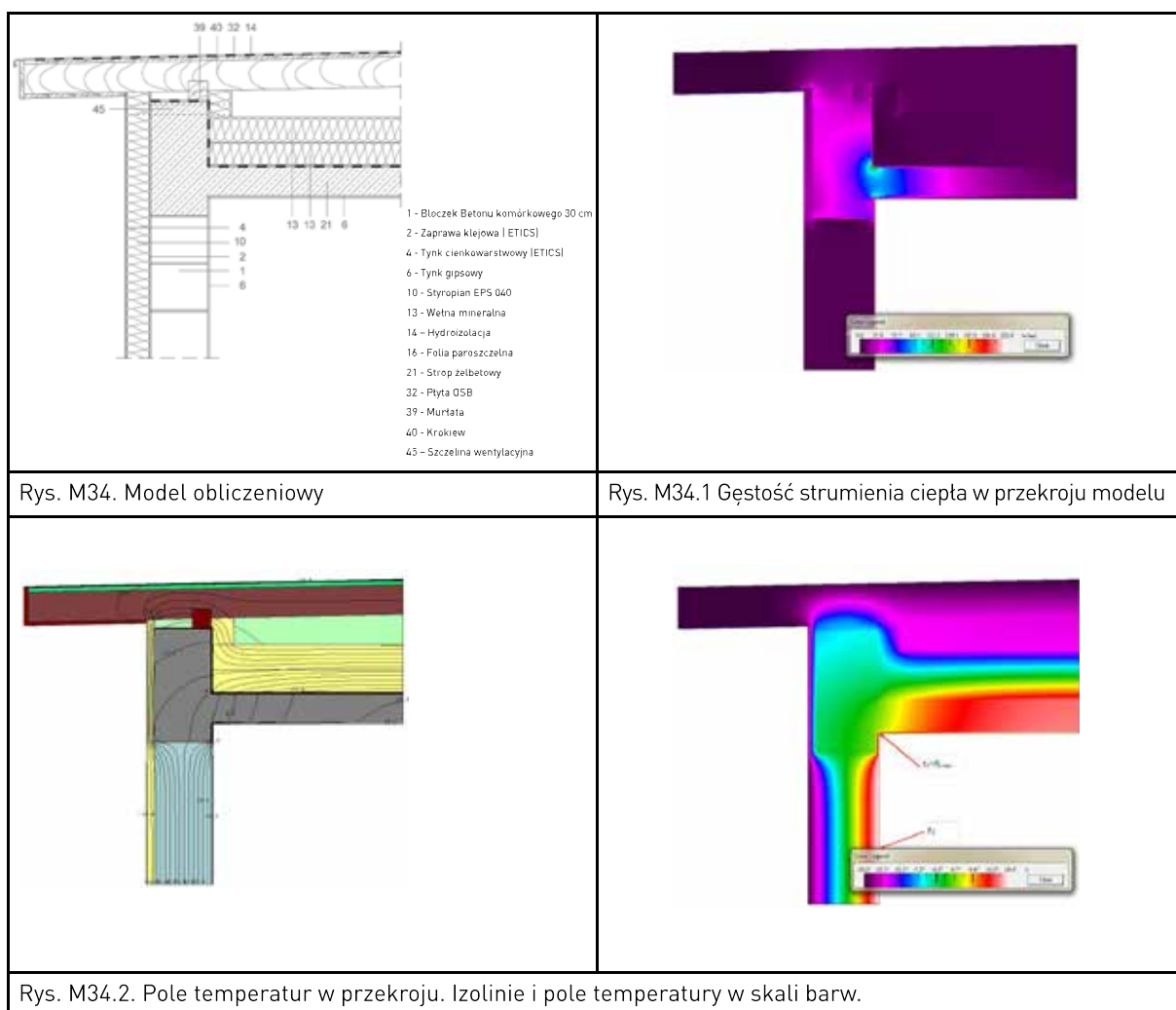


Rys. M33.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.33. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe tylko dla ściany.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła (ściana)	$\Phi\text{ [W]}$	18,90	16,19	11,66
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,4725	0,3673	0,2363
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,4765	0,4048	0,2915
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,1573	0,0898	0,0352
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,1592	0,1233	0,0812
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,7	16,6	17,5
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,7	16,6	17,5
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,89	0,92	0,94
Błąd obliczeń	%	2,34	2,20	1,89

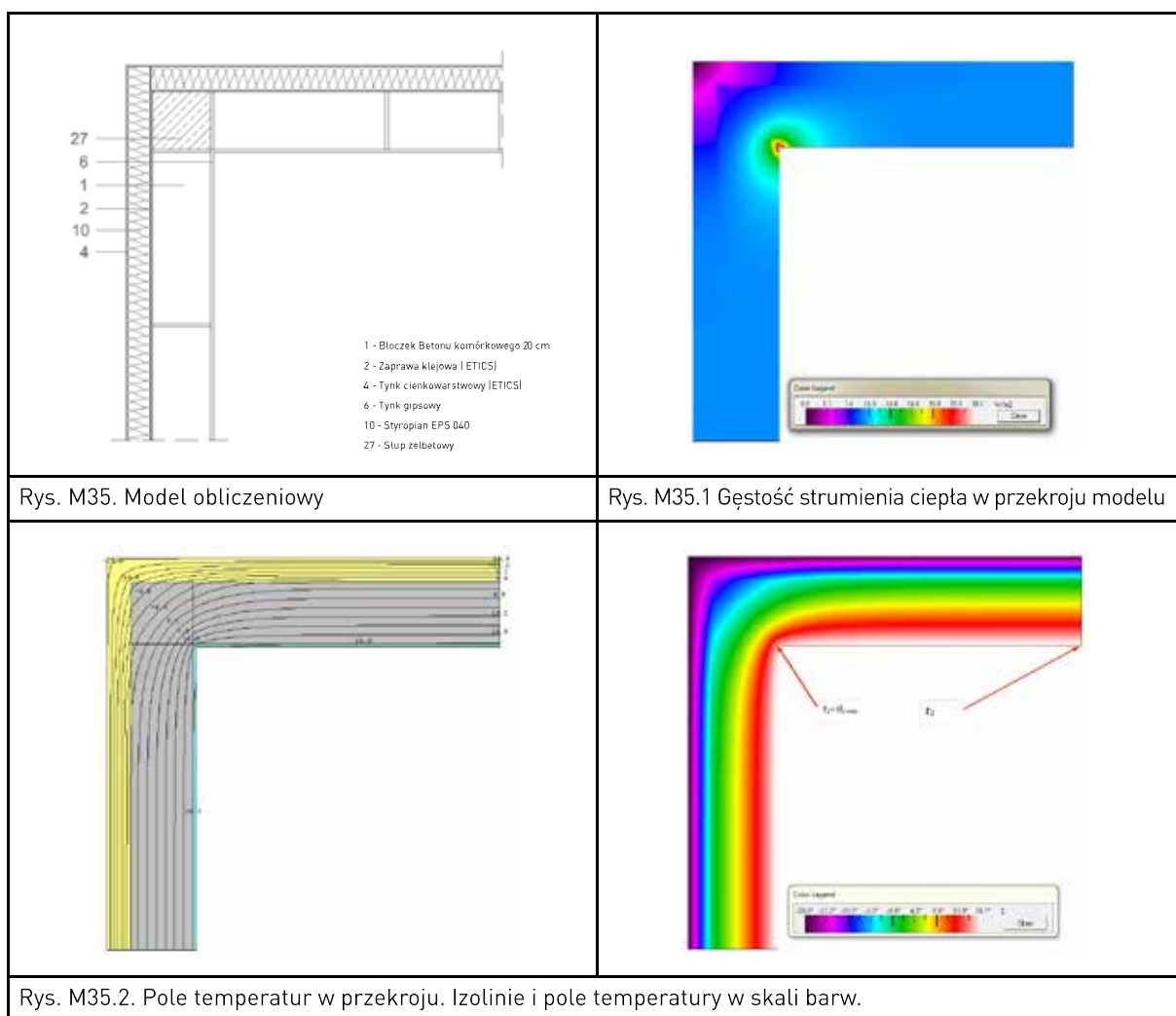
DETAL 34 – Połączenie stropodachu wentylowanego ze ścianą zewnętrzną o gr. 30 cm.



Tablica 6.34. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe tylko dla ściany.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,06 \text{ m}$	$d_3=0,12 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła (ściana)	$\Phi \text{ [W]}$	18,50	17,38	10,90
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{e2D} \text{ [W/mK]}$	0,4623	0,4345	0,2725
Współczynnik sprzężenia cieplnego (ściana)	$L_{i2D} \text{ [W/mK]}$	0,3950	0,3263	0,2350
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_e \text{ [W/mK]}$	0,1124	0,1241	0,0450
Liniowy współczynnik przenikania ciepła (ściana)	$\psi_i \text{ [W/mK]}$	0,1807	0,1359	0,0928
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$	11,9	13,6	14,4
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} \text{ [}^\circ\text{C]}$	13,5	13,6	14,4
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,80	0,84	0,86
Błąd obliczeń	%	2,53	2,81	2,13

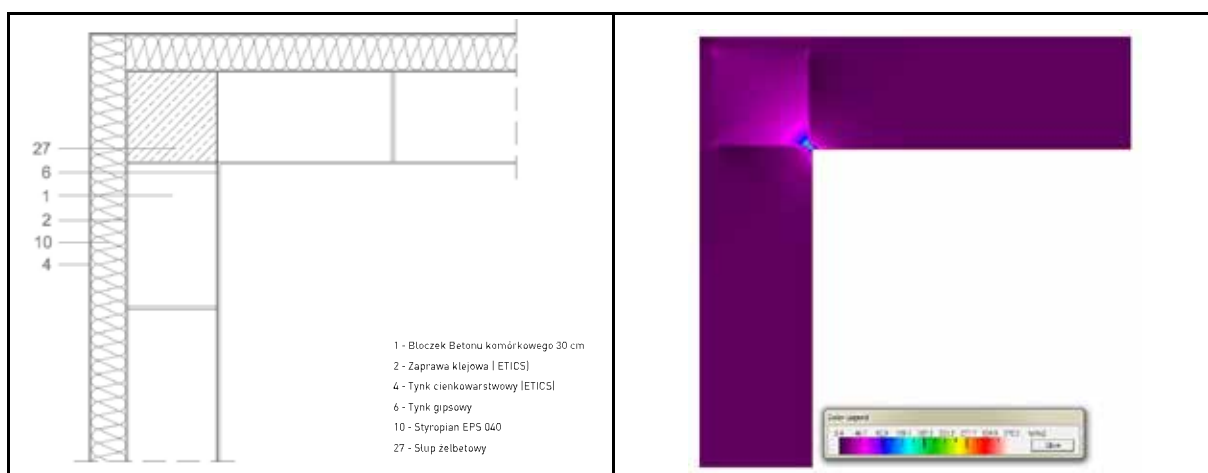
DETAL 35 – Naroże zewnętrzne ze słupem żelbetowym. Grubość ściany 20 cm.



Tablica 6.35. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła

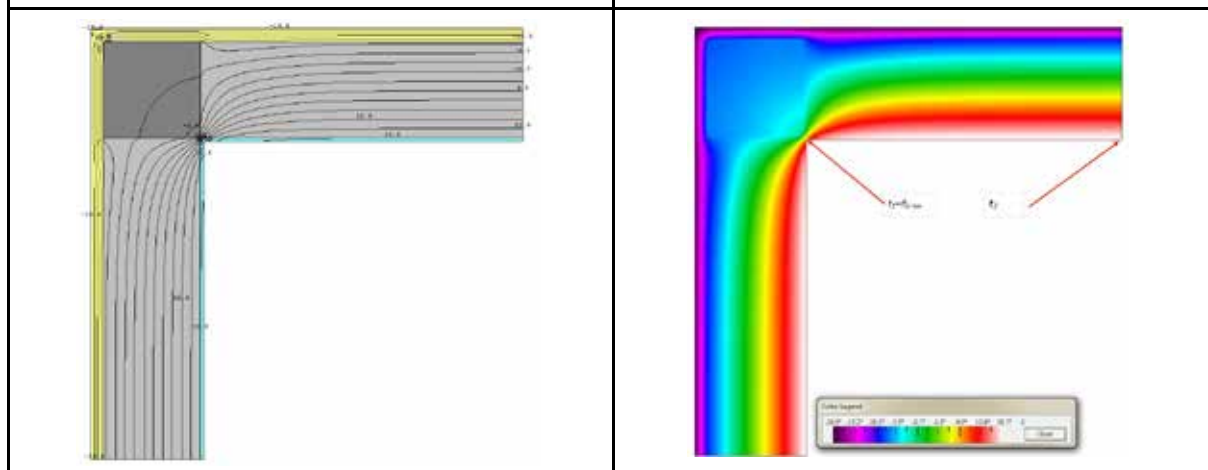
Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,10\text{ m}$	$d_3=0,18\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,22	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	24,08	21,49	15,14
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,6020	0,5373	0,3785
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,6020	0,5373	0,3785
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	-0,0838	-0,0374	-0,0445
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,1100	0,0996	0,0750
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	11,8	12,2	14,3
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,4	18,8	19,2
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,3	12,2	14,3
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,80	0,81	0,86
Błąd obliczeń	%	0,82	2,29	2,23

DETAL 36 – Naroże zewnętrzne ze słupem żelbetowym. Grubość ściany 30 cm.



Rys. M36. Model obliczeniowy

Rys. M36.1 Gęstość strumienia ciepła w przekroju modelu

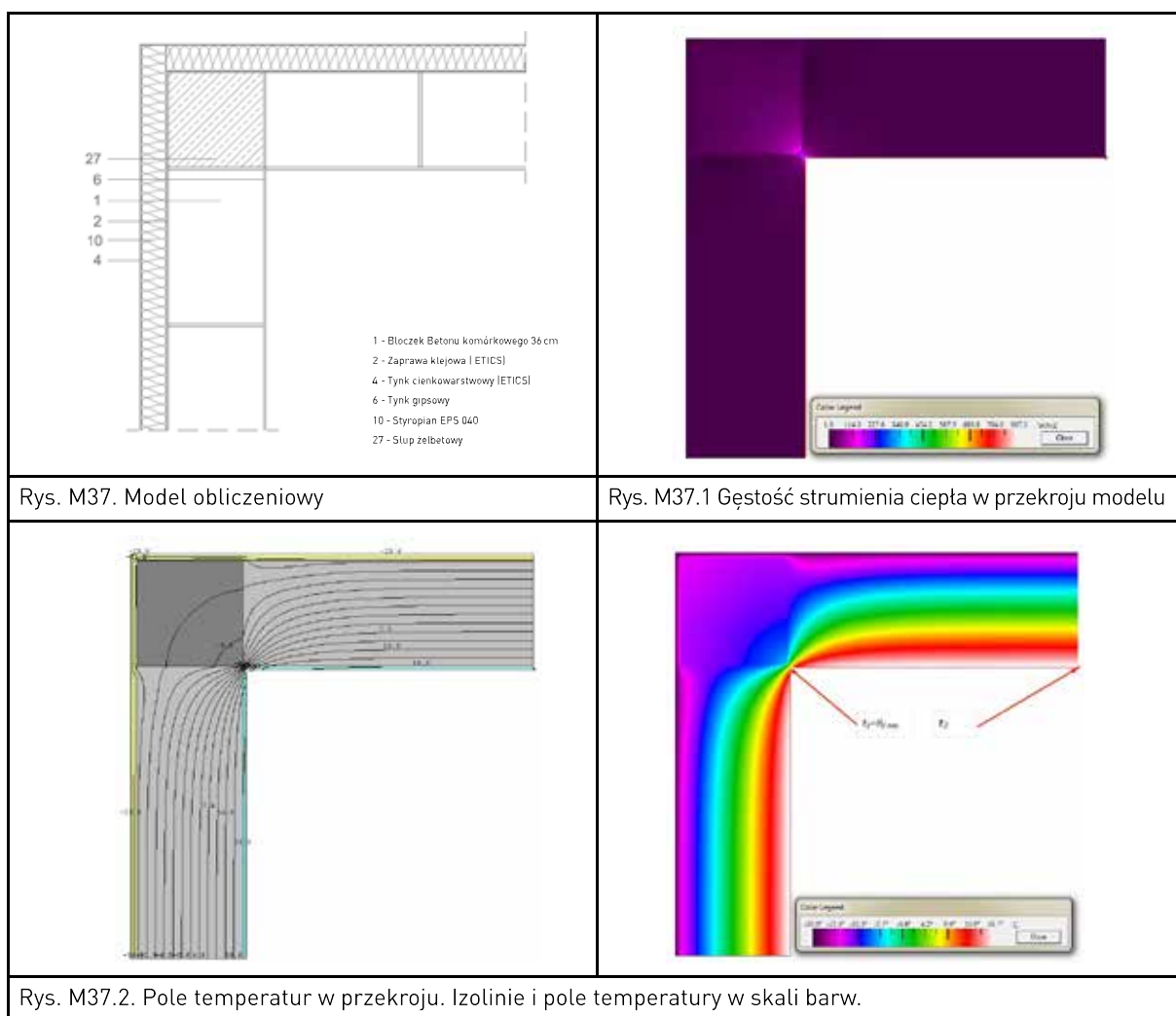


Rys. M36.2. Pole temperatur w przekroju. Izolinie i pole temperatury w skali barw.

Tablica 6.36. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04 \text{ m}$	$d_2=0,10 \text{ m}$	$d_3=0,18 \text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi [\text{W}]$	27,07	23,99	18,00
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,6768	0,5999	0,4501
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D} [\text{W}/\text{mK}]$	0,6768	0,5999	0,4501
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e [\text{W}/\text{mK}]$	-0,0046	-0,0112	-0,0270
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i [\text{W}/\text{mK}]$	0,1734	0,1557	0,1179
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1 [^\circ\text{C}]$	8,9	10,3	12,6
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2 [^\circ\text{C}]$	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si \text{ min}} [^\circ\text{C}]$	8,9	10,3	12,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,72	0,76	0,82
Błąd obliczeń	%	2,59	2,47	2,36

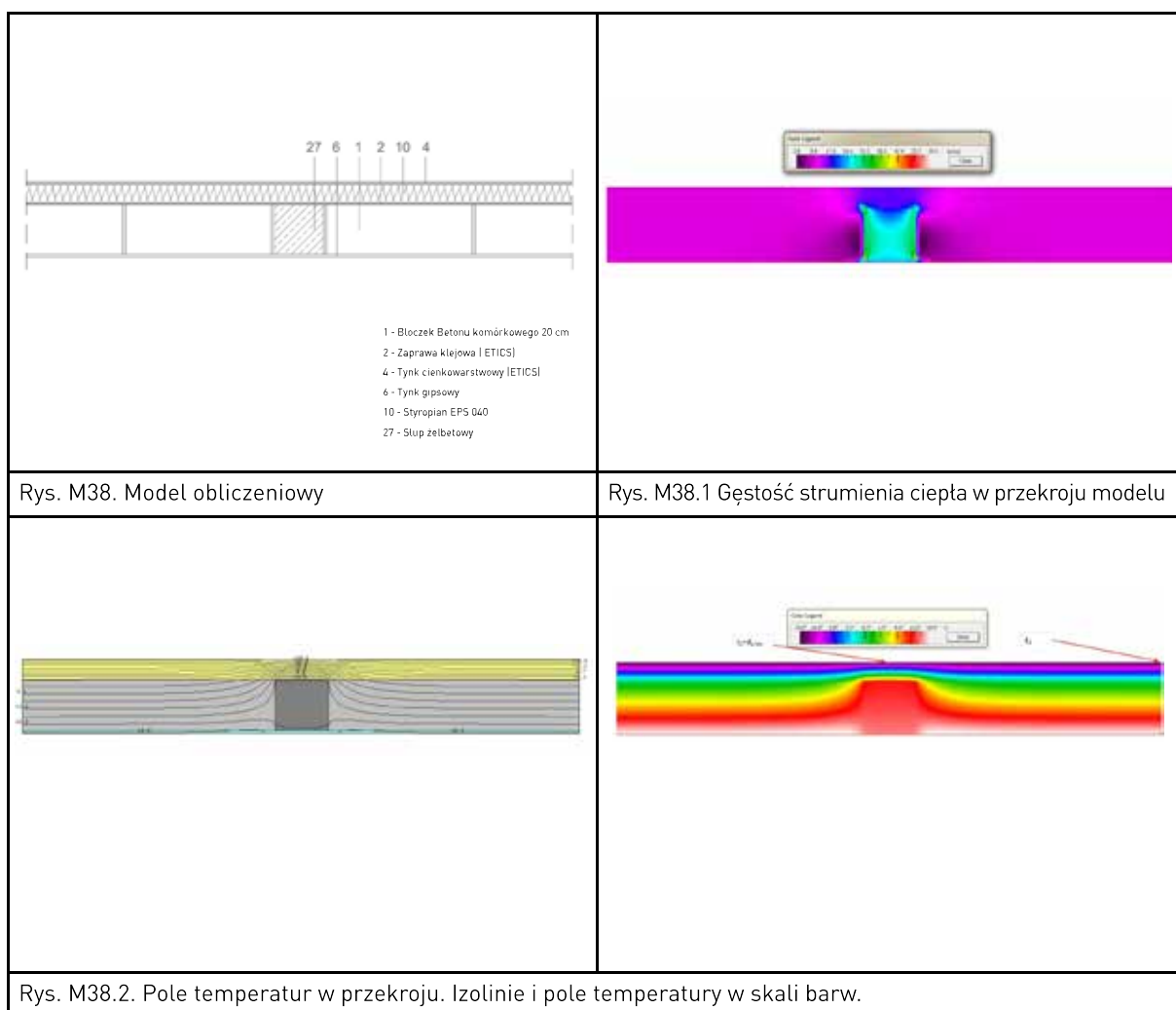
DETAL 37 – Naroże zewnętrzne ze słupem żelbetowym. Grubość ściany 36 cm.



Tablica 6.37. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,02\text{ m}$	$d_2=0,04\text{ m}$	$d_3=0,10\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	U [W/(m ² K)]	0,25	0,22	0,17
Strumień ciepła	Φ [W]	28,38	25,10	18,80
Współczynnik sprzężenia cieplnego	L_{e2D} [W/mK]	0,7096	0,6275	0,4701
Współczynnik sprzężenia cieplnego	L_{i2D} [W/mK]	0,7096	0,6275	0,4701
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	ψ_e [W/mK]	0,0212	0,0153	0,0102
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	ψ_i [W/mK]	0,2175	0,1899	0,1413
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	t_1 [°C]	7,2	8,5	11,6
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	t_2 [°C]	18,7	18,8	19,1
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\ min}$ [°C]	7,2	8,5	11,6
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,68	0,71	0,79
Błąd obliczeń	%	2,17	2,34	2,95

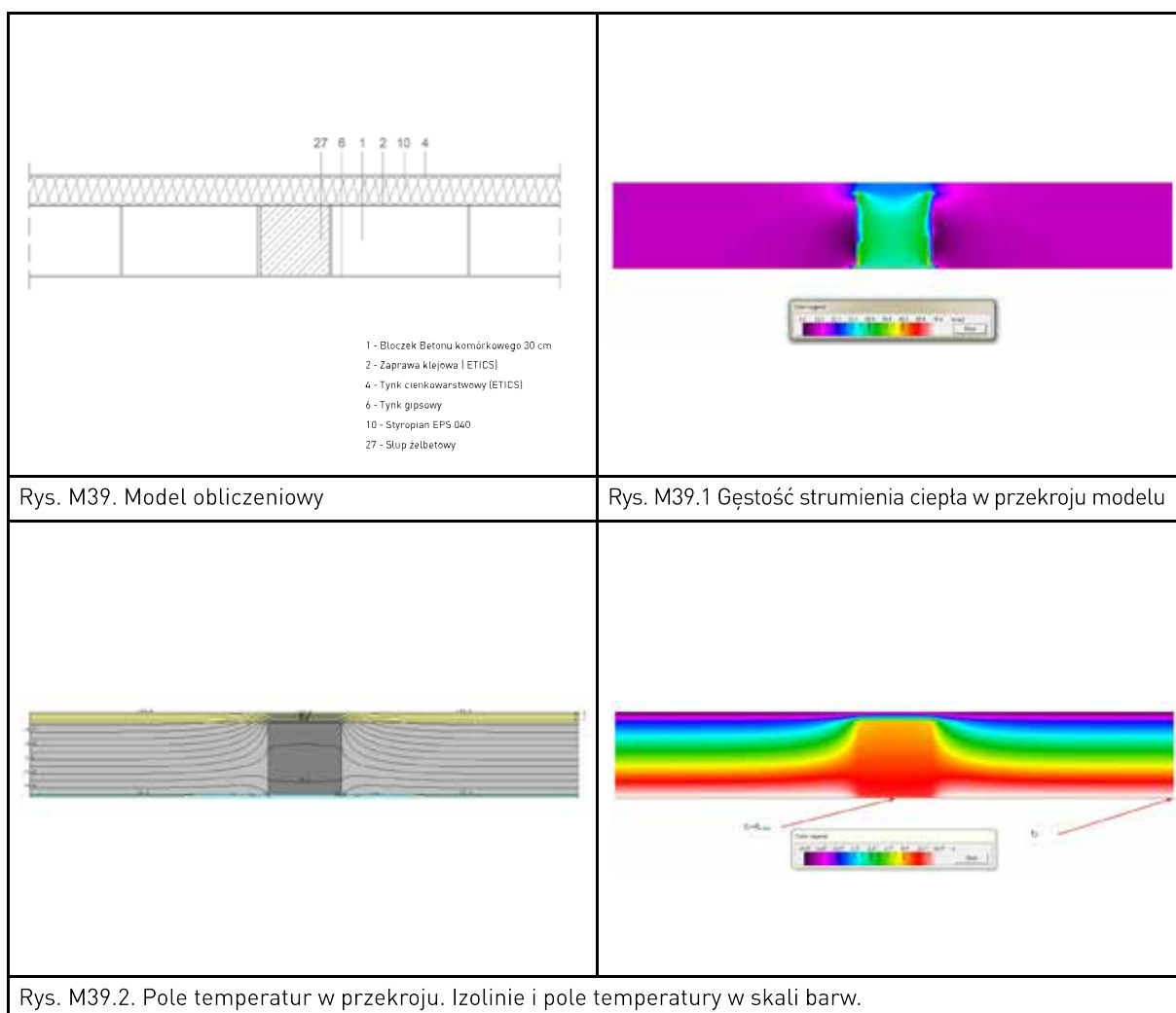
DETAL 38 – Ściana zewnętrzna gr. 20 cm, ze słupem żelbetowym.



Tablica 6.38. Obliczone parametry cieplno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,08\text{ m}$	$d_2=0,10\text{ m}$	$d_3=0,18\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,15
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	24,29	21,38	0,1428
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,6075	0,5323	0,3570
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,6075	0,5323	0,3570
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,0609	0,0460	0,0198
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,0609	0,0460	0,0198
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,2	16,9	18,1
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,4	18,6	19,0
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	16,2	16,9	18,1
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,91	0,92	0,95
Błąd obliczeń	%	2,44	2,25	2,46

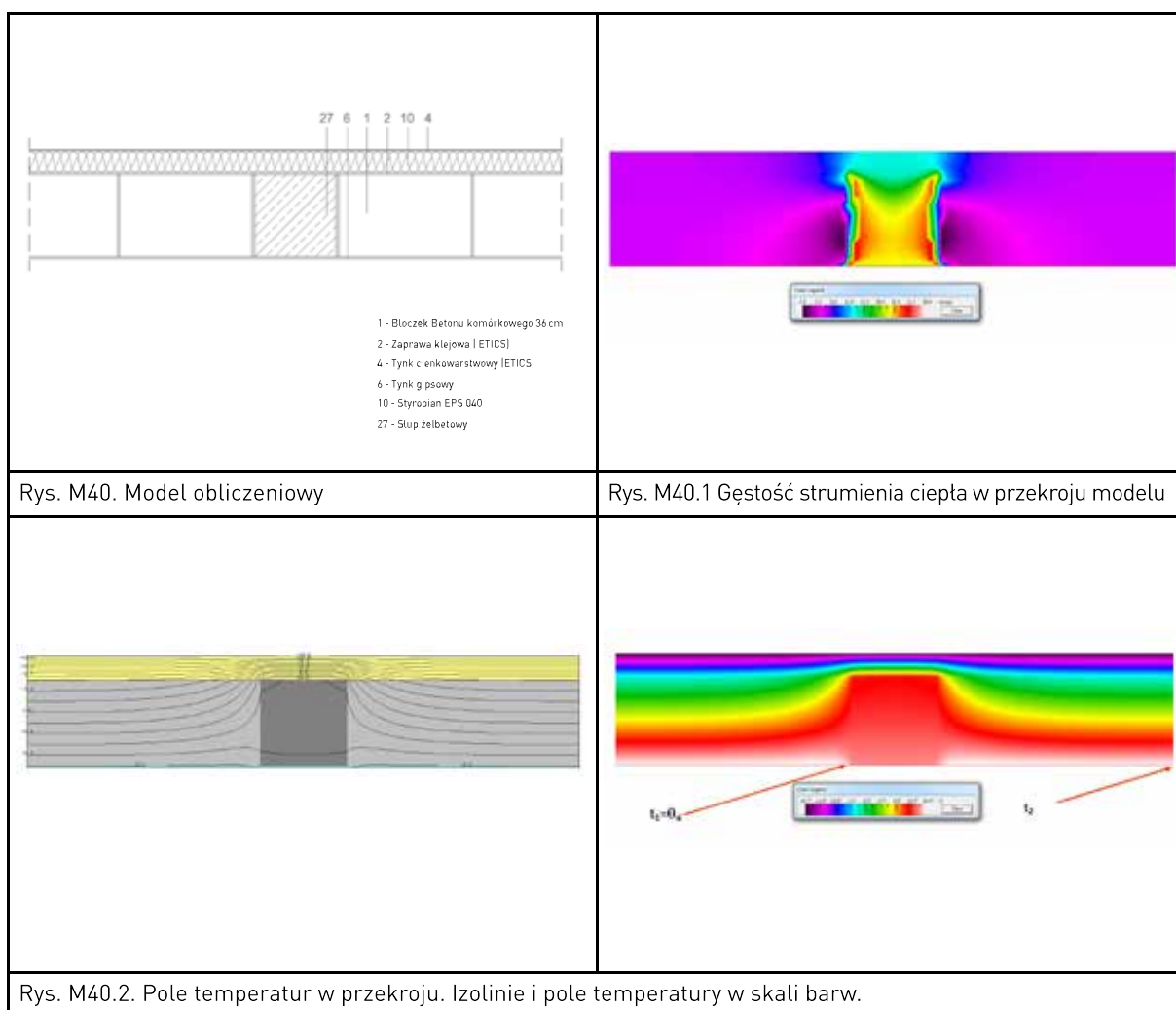
DETAL 39 – Ściana zewnętrzna gr. 30 cm, ze słupem żelbetowym.



Tablica 6.39. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	31,41	26,22	18,00
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,7853	0,6555	0,4500
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,7853	0,6555	0,4500
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,2005	0,1367	-0,0688
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,2005	0,1367	-0,0688
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,8	17,3	16,7
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,8	19,1	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	15,8	17,3	16,7
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,90	0,93	0,92
Błąd obliczeń	%	2,74	2,37	2,70

DETAL 40 – Ocieplona ściana zewnętrzna gr. 36 cm, ze słupem żelbetowym.



Tablica 6.40. Obliczone parametry ciepłno-wilgotnościowe węzła.

Parametr		Wartości przy grubości termoizolacji		
		$d_1=0,04\text{ m}$	$d_2=0,06\text{ m}$	$d_3=0,12\text{ m}$
Współczynnik przenikania ciepła	$U\text{ [W/(m}^2\text{K)]}$	0,25	0,23	0,17
Strumień ciepła	$\Phi\text{ [W]}$	39,33	30,59	19,71
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{e2D}\text{ [W/mK]}$	0,9833	0,7648	0,4928
Współczynnik sprzężenia cieplnego	$L_{i2D}\text{ [W/mK]}$	0,9833	0,7648	0,4928
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_e\text{ [W/mK]}$	0,3956	0,2420	0,1002
Liniowy współczynnik przenikania ciepła	$\psi_i\text{ [W/mK]}$	0,3956	0,2420	0,1002
Temperatura na powierzchni w punkcie 1	$t_1\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,6	15,3	16,7
Temperatura na powierzchni w punkcie 2	$t_2\text{ [}^\circ\text{C]}$	18,4	18,6	18,9
Minimalna temperatura na powierzchni przegrody	$\theta_{si\text{ min}}\text{ [}^\circ\text{C]}$	12,6	15,3	16,7
Czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	f_{Rsi}	0,82	0,88	0,92
Błąd obliczeń	%	2,72	2,34	2,70



Z recenzji: Dr inż. Małgorzaty Fedorczak-Cisak

„Opiniowana publikacja zawiera wszystkie niezbędne elementy potrzebne do oceny rozwiązań projektowych mostków termicznych.”

Dr inż. Małgorzata Fedorczak-Cisak



Stowarzyszenie
Producentów Betonów
02-829 Warszawa,
ul. Mączyńskiego 2
tel. 022 643-64-79,
fax 022 643-78-41
www.s-p-b.pl;
e-mail: biuro@s-p-b.pl

Z recenzji: Łukasza Drobieca

„Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca jest opracowana na dobrym poziomie merytorycznym i zawiera wszystkie niezbędne informacje do rozwiązywania i obliczania mostków termicznych jak i kompleksowej analizy cieplno-wilgotnościowej przegród”.

Dr hab. inż. Łukasz Drobiec

SKŁAD I DRUK ART STYL
www.artstyl-reklama.com.pl