

Fizyka budowli - podręcznik

Podstawy ochrony cieplno-wilgotnościowej

Spis treści

05 Mostki cieplne

- 06 Informacje ogólne o mostkach cieplnych
- 06 Rodzaje mostków cieplnych
- 08 Parametry charakteryzujące mostki cieplne
- 09 Liniowe mostki cieplne
- 10 Punktowe mostki cieplne
- 11 Trójwymiarowe mostki cieplne (naroża pomieszczeń)

13 Zabezpieczenie przed wilgocią

- 14 Ogólne informacje o zabezpieczeniu przed wilgocią
- 14 Wilgotność powietrza
- 16 Powierzchniowa kondensacja pary wodnej
- 17 Powstawanie zagrzybienia
- 18 Temperatura punktu rosy θ_T
- 18 Temperatura powstawania zagrzybienia θ_s
- 18 Temperatura powierzchni od strony pomieszczenia θ_{si}
- 19 Współczynnik temperaturowy f_{Rsi}

21 Współczynniki

- 22 Współczynnik przewodzenia ciepła λ
- 24 Opór cieplny; wartość R
- 25 Współczynnik przenikania ciepła; wartość U
- 26 Współczynnik sprzężenia cieplnego
- 27 Liniowe i punktowe współczynniki przenikania ciepła ψ i χ

Mostki cieplne

Informacje ogólne o mostkach cieplnych

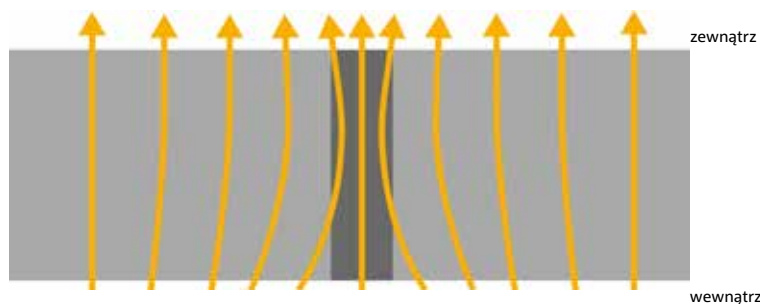
Mostki cieplne to obszary lokalnie ograniczone w przegrodach budowlanych, charakteryzujące się wysoką przenikalnością cieplną w porównaniu z sąsiadującymi powierzchniami. Zwiększone przenikanie ciepłe powoduje powiększenie strat energii (ciepła) z budynku, a w konsekwencji wzrost kosztów eksploatacyjnych. Ma to bezpośredni wpływ na obniżenie temperatury na powierzchni wewnętrznej przegrody, co wiąże się z ryzykiem **powstania zagrzybienia** (zagrożenia dla zdrowia). W miejscu mostków cieplnych obserwuje się czasami tworzenie skroplin pary wodnej i związane z tym występowanie szeregu innych procesów destrukcyjnych, niszczących przegrodę, a w szczególności warstwy i powłoki wykończeniowe.

Przyczyny powstawania mostków cieplnych mogą być różne. Wysoka przenikalność cieplna bierze się z tego, że kształt elementu budowlanego nie jest równy („**geometryczny mostek cieplny**”), lub z faktu, że do wykonania przegrody budowlanej użyto materiałów o zwiększonej **przewodności cieplnej** („**materiałowy mostek cieplny**”).

Rodzaje mostków cieplnych

Materiałowe mostki cieplne

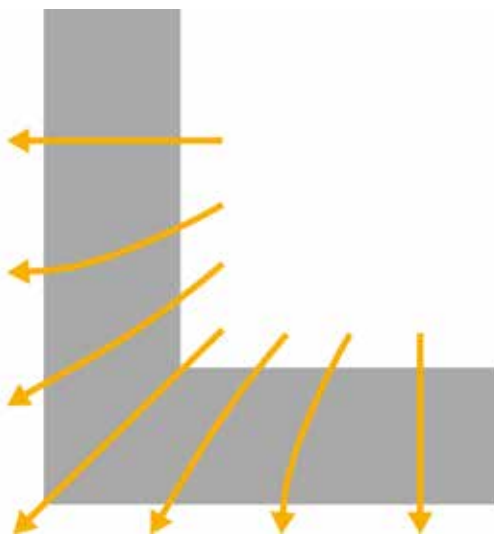
Materiałowe mostki cieplne powstają w miejscach, gdzie przylegają do siebie materiały budowlane o bardzo różnej przewodności cieplnej. Typowym tego przykładem są kotwy przechodzące przez warstwę izolacyjną. Odptyw ciepła przez metalowe kotwy jest znacznie intensywniejszy niż przez pozostałą część przegrody wykonanej z materiału izolacyjnego.



Rysunek 1: Przekrój przez dwa materiały (ciemnoszary o wysokiej przewodności, jasnoszary o niewielkiej przewodności). Kierunek przepływu ciepła został zaznaczony strzałką. Strumień ciepła przepływa przez materiały z ciepłego pomieszczenia (dolna krawędź rysunku) do zimnego pomieszczenia (górną krawędź rysunku).

Geometryczne mostki cieplne

Geometryczne mostki cieplne powstają wówczas, gdy powierzchnia oddająca ciepło jest znacznie większa niż powierzchnia je przyjmująca. Przykładem tego są naroża budynków, gdzie na powierzchniach przejmujących ciepło po stronie wewnętrznej znacznie spadają temperatury, ponieważ ciepło może intensywnie uchodzić przez większe, oddające je powierzchnie zewnętrzne. Obniżenie temperatury na powierzchni wewnętrznej jest również spowodowane ograniczoną cyrkulacją powietrza w narożu.



Rysunek 2: Przekrój naroża ścian zewnętrznych budynku, strzałki wskazują kierunek strumienia ciepła ze środowiska ciepłego do zimnego. Na przepływ strumienia ciepła przez ścianę, która nie posiada elementów zróżnicowanych materiałowo, istotny wpływ ma tylko jej geometria.

Podsumowując konsekwencją występowania mostków cieplnych jest:

- Groźba powstawania zagrzybienia
- Ryzyko występowania negatywnych wpływów na zdrowie (alergie itd.)
- Niebezpieczeństwo powierzchniowej kondensacji pary wodnej
- Wzrost kosztów eksploatacyjnych
- Większe straty ciepła
- Lokalne odczucie chłodu

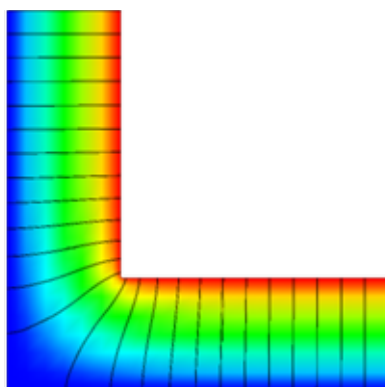
Parametry charakteryzujące mostki ciepłne

Do określania właściwości mostków ciepłnych służą parametry charakteryzujące przenikanie ciepła w miejscu liniowego mostka ciepłnego ψ i punktowego mostka ciepłnego χ . **Współczynniki przenikania ciepłnego ψ i χ** dostarczające informacji o stratach energii ciepłnej. Do innych zalicza się współczynnik temperaturowy oraz minimalną temperaturę powierzchni przegrody, słuzące do oceny ryzyka zagrzybienia oraz powierzchniowej kondensacji pary wodnej.

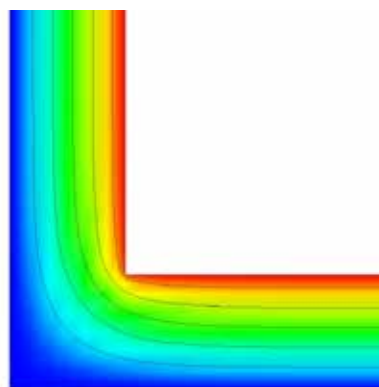
Obliczenie tych parametrów możliwe jest wyłącznie przy użyciu metody elementów skończonych (MES) w odniesieniu do konkretnych występujących mostków ciepłnych. Polega ona na modelowaniu przy użyciu programów MES złącza i komponentów przegród budynku znajdujących się w obrębie mostka ciepłnego, podając odpowiednią przewodność ciepłą zastosowanych materiałów. Wykorzystywane w tej metodzie warunki przy obliczaniu i modelowaniu definiuje PN-EN ISO 10211.

Obliczenia metodą MES dostarczają nie tylko wartości parametrów, lecz również umożliwiają graficzne zaprezentowanie rozkładu temperatury (patrz rysunek 4) czy też linii strumienia ciepła (patrz rysunek 3) w przegrodzie zewnętrznej.

Graficzny rozkład linii strumienia ciepła pokazuje którędy przez daną konstrukcję przepływa ciepło, co pozwala na rozpoznanie pod względem jakości ciepłnej słabych punktów (mostków ciepłnych). Izotermy to linie lub powierzchnie łączące miejsca o tej samej temperaturze, ukazujące rozkład temperatury w analizowanym elemencie budowlanym. Linie strumienia ciepła oraz izotermy są zawsze względem siebie prostopadłe (patrz rysunki 3 i 4).



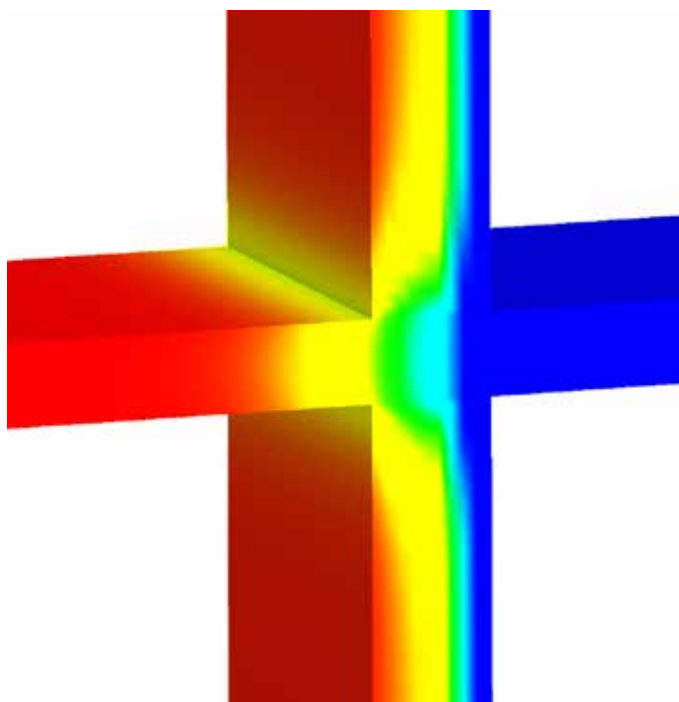
Rysunek 3: Obraz termalny w przekroju przez naroże zewnętrzne z liniami strumienia ciepła.



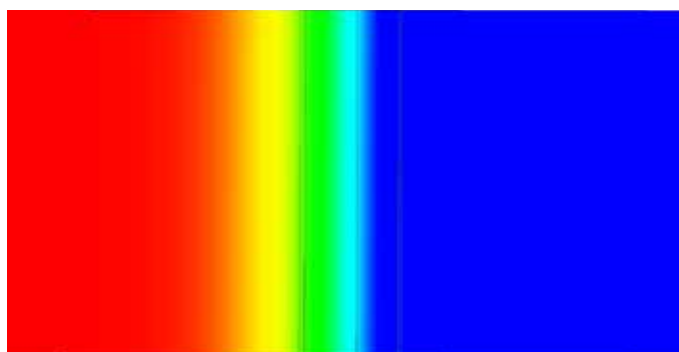
Rysunek 4: Obraz termalny w przekroju przez naroże zewnętrzne z izotermami.

Liniowe mostki cieplne

Liniowe mostki cieplne to zakłócenia w otulinie termicznej, występujące na określonej długości. Typowymi przykładami liniowych mostków są łączenia balkonów z płytą stropową lub wieńcem. W miejscu przecięcia przez płytę balkonową ściany zewnętrznej, a w szczególności warstwy izolacji cieplnej powstaje liniowy mostek cieplny. Straty energetyczne powstające w miejscu liniowego mostka cieplnego charakteryzuje **liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ** .



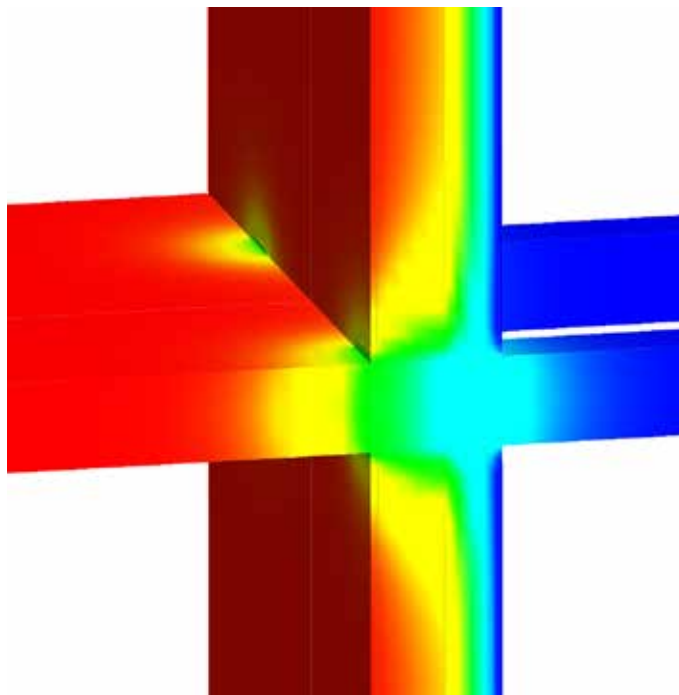
Rysunek 5A: Liniowy mostek cieplny przy liniowym połączeniu balkonu ze stropem międzykondygnacyjnym. Po lewej stronie konstrukcja znajduje się w ciepłym wnętrzu - obszar zaznaczony na czerwono, po prawej – konstrukcja w strefie zewnętrznej, zimnej - oznaczona na niebiesko. Obszary na wewnętrznej powierzchni o żółto-zielonym zabarwieniu wskazują na fakt, że w tych miejscach osiągnęte są bardzo niskie temperatury powierzchniowe.



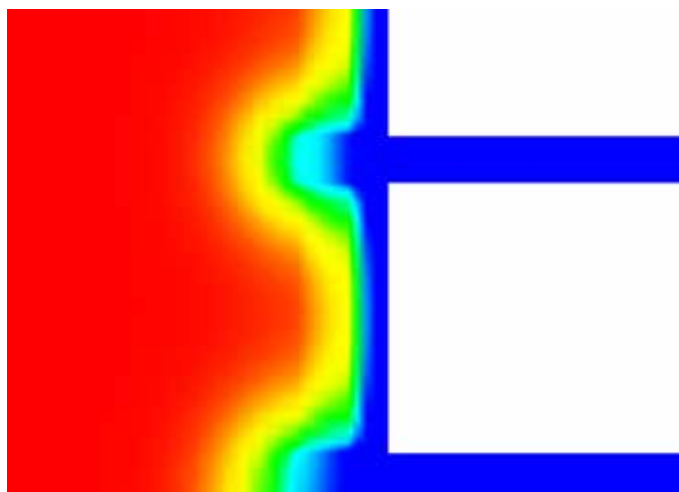
Rysunek 5B: Widok z góry; przekrój przez płytę balkonową przedstawioną na rysunku 5A. Widać, że przepływ ciepła na linii przyłączenia balkonu jest stały i przebiega w poprzek linii na połączeniu stropu z płytą balkonową.

Punktowe mostki cieplne

Punktowymi mostkami cieplnymi są zaktócenia w termicznej otulinie, które są miejscowo na tyle ograniczone, iż występują tylko punktowo. Typowymi przykładami punktowych mostków są elementy mocujące takie jak kotwy stalowe do mocowania izolacji, stalowe kotwy i konsoly stanowiące podparcie dla elewacji z betonu, klinkieru, kamienia naturalnego, belki stalowe (np. elementy daszków, balkonów itp.) mocowane do konstrukcji budynku. Straty ciepła spowodowane punktowymi mostkami cieplnymi charakteryzuje **punktowy współczynnik przenikania ciepła χ** .



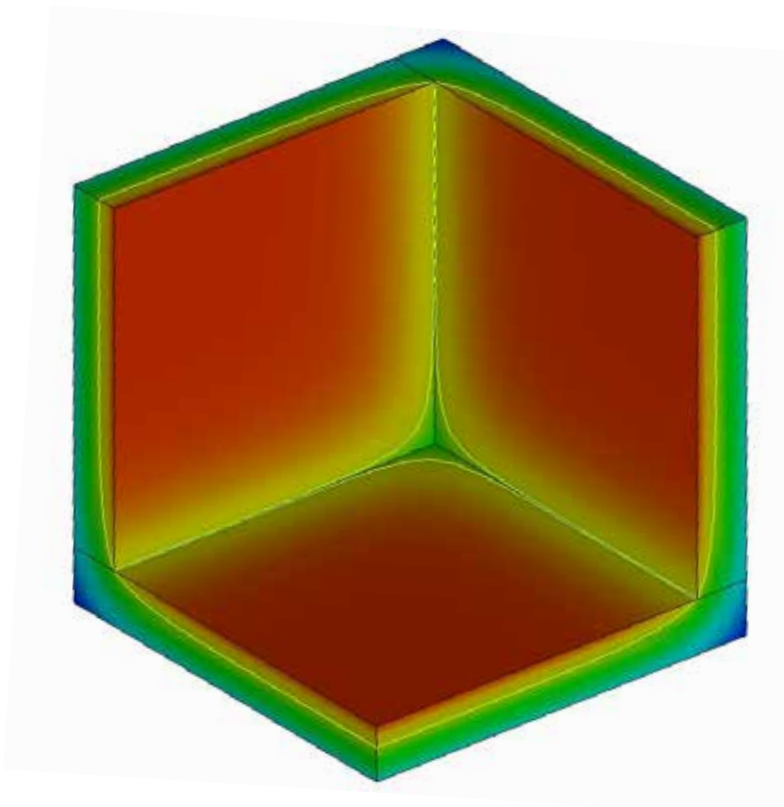
Rysunek 6A: Punktowy mostek cieplny na punktowym przyłączeniu balkonu. W tym przypadku do betonowego stropu zostały dołączone stalowe dźwigary. Po lewej stronie znajduje się ciepła powierzchnia wewnętrzna zaznaczona na czerwono, po prawej – zimna przestrzeń zewnętrzna zabarwiona na niebiesko. Żółto-zielone obszary na wewnętrznych powierzchniach informują, że w tych miejscach występują bardzo niskie temperatury.



Rysunek 6B: Widok z góry; przekrój przez płytę balkonową przedstawioną na rysunku 6A. Widać zwiększone przyływy (straty) ciepła spowodowane przez stalowe dźwigary. Tutaj straty cieplne są miejscowo ograniczone, czyli są punktowe.

Trójwymiarowe mostki cieplne (naroża pomieszczeń)

Typowym przykładem takiego mostka jest naroże pomieszczenia. Na rysunku 3 zaprezentowano przepływ **strumienia ciepła** przez dwuwymiarowe naroże ścian zewnętrznych. W przypadku trójwymiarowego naroża w pomieszczeniu problem ten jeszcze się nasila. Już przy modelu geometrycznym 2-D (dwuwymiarowym) temperatura na powierzchni przegród tworzących naroże obniża się. W narożu trójwymiarowym (model geometryczny 3-D) zwiększa się niekorzystny stosunek powierzchni zewnętrznej do powierzchni wewnętrznej, co powoduje dalszy spadek temperatury powierzchniowej.



Rysunek 7: Wycinek naroża trójwymiarowego, w strefie zewnętrznej przegrody występują niskie temperatury, co zilustrowane zostało zimnymi barwami. Na powierzchniach zakolorowanych na czerwono występuje wysoka temperatura. W stronę powierzchni zewnętrznej przepływa strumień ciepła. Na trzech liniowych krawędziach powstają liniowe mostki cieplne, zaś najniekorzystniejszym punktem geometrycznym jest naroże w miejscu połączenia trzech przegród zewnętrznych, co skutkuje jeszcze większym obniżeniem temperatury powierzchniowej niż w przypadku naroża utworzonego przez połączenie dwóch przegród zewnętrznych.

Zabezpieczenie przed wilgocią

Ogólne informacje o zabezpieczeniu przed wilgocią

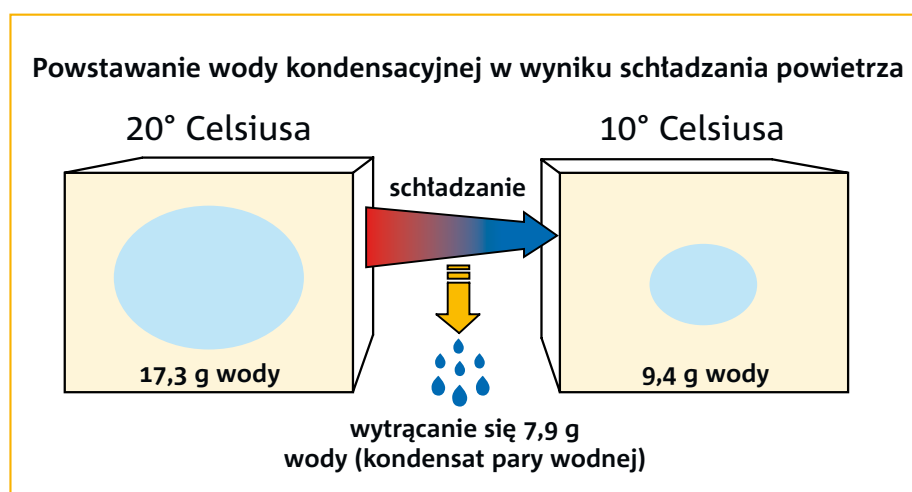
Wilgoć we wnętrzach budynków, związana jest ze sposobem użytkowania pomieszczenia, w tym produkcją wilgoci oraz działaniem systemu wentylacyjnego. Źródłem wilgoci może być: wydzielanie pary wodnej podczas oddychania, proces gotowania, kąpiel, przygotowanie posiłków itp. Wilgoć w przegrodach budynku może również pochodzić z opadów atmosferycznych lub być podciągana z gruntu.

Przy wysokim zawilgoceniu może dochodzić do rozwoju grzybów pleśniowych i innych mikroorganizmów. Z kolei elementy budynku mogą zostać uszkodzone w wyniku korozji mechanicznej będącej efektem zamarzania wody. Ponadto przy występującej wilgoci należy spodziewać się pogorszenia ochrony cieplnej oraz związanych z tym zwiększonych strat ciepła.

By zapobiec takim negatywnym skutkom należy przestrzegać wymagań dotyczących zabezpieczeń przeciwwilgociowych i kształtowania odpowiednich warunków wilgotnościowych na powierzchni i we wnętrzu przegród budowlanych. Warunki wilgotnościowe na powierzchni przegród budowlanych charakteryzują pewne parametry, takie jak **współczynnik temperaturowy** czy też **temperatura na powierzchni przegrody od strony pomieszczenia**. Należy pamiętać o konieczności przestrzegania ich wartości granicznych.

Wilgotność powietrza

Wilgotność bezwzględna powietrza to zawartość pary wodnej w mieszance powietrza. To, ile maksymalnie pary wodnej może znajdować się w powietrzu zależy przede wszystkim od temperatury. Im wyższa temperatura, tym więcej pary wodnej może zawierać powietrze.

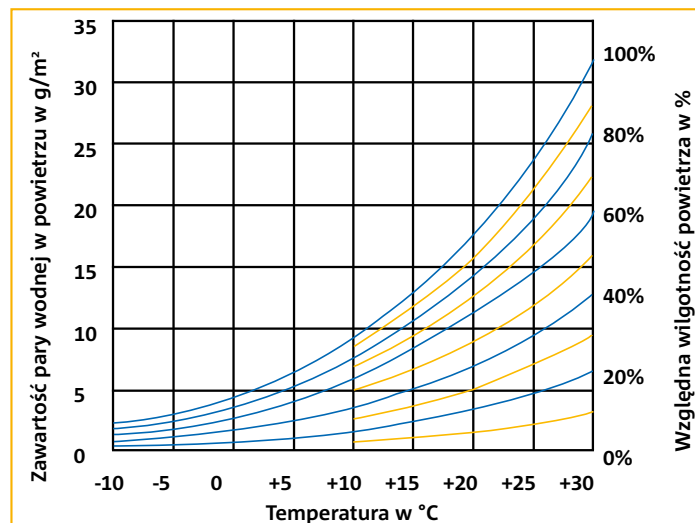


Rysunek 8: Ilość pary wodnej w 1 m³ powietrza; sześcian wypełniony powietrzem (z lewej strony) zawiera pewną ilość pary wodnej. Po schłodzeniu powietrza, może w nim utrzymać się mniejsza ilość pary wodnej (prawa strona). W takich warunkach dochodzi do powstawania kondensatu pary wodnej.

Jak widać na rysunku 8, przy schładzaniu powietrza część zawartej w nim pary wodnej przekształca się w wodę (kondensat pary wodnej). Do tego zjawiska może dochodzić na zimnych powierzchniach przegród budowlanych m.in. w pomieszczeniach użytkowanych przez ludzi i innych z wysoką zawartością wilgoci w powietrzu. Przy wysokiej wilgotności powietrza na zimnych powierzchniach, zanim jeszcze dojdzie do wytrącania się wody kondensacyjnej, występuje także niebezpieczeństwo tworzenia się **pleśni**. Do oceny wpływu wilgoci zawartej w powietrzu na procesy kondensacji pary wodnej i rozwoju pleśni stosuje się również parametr **wilgotność względna powietrza**.

Wilgotność względna powietrza

Wilgotność względna powietrza, jako wartość procentowa opisuje stopień nasycenia powietrza parą wodną. W tym przypadku 100 % wilgotność względna wskazuje na maksymalne nasycenie powietrza parą wodną. Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że wilgotność względna uzależniona jest również od temperatury i dlatego daną wartość wilgotności względnej należy zawsze odnosić do danej temperatury. Ponieważ to właśnie od temperatury zależy maksymalna ilość pary wodnej, jaka może zostać przyjęta przez powietrze. Wraz ze zmianą temperatury powietrza w pomieszczeniu zmienia się również wilgotność względna. Jeżeli na przykład temperatura powietrza w pomieszczeniu zostanie obniżona z 20° C do 18° C przy wilgotności względnej powietrza wynoszącej 50 %, wówczas wilgotność względna powietrza wzrasta o 7 %. Powodem tego jest fakt, że przy zmniejszającej się temperaturze powietrza spada maksymalna ilość pary wodnej, którą może przyjąć powietrze.



Rysunek 9: Wykres Carrier'a (zgodnie z PN EN ISO 13788 (załącznik E)), określany również mianem krzywej nasycenia, przedstawia stosunek pomiędzy możliwą do przyjęcia ilością pary wodnej, wilgotnością względną i temperaturą powietrza.

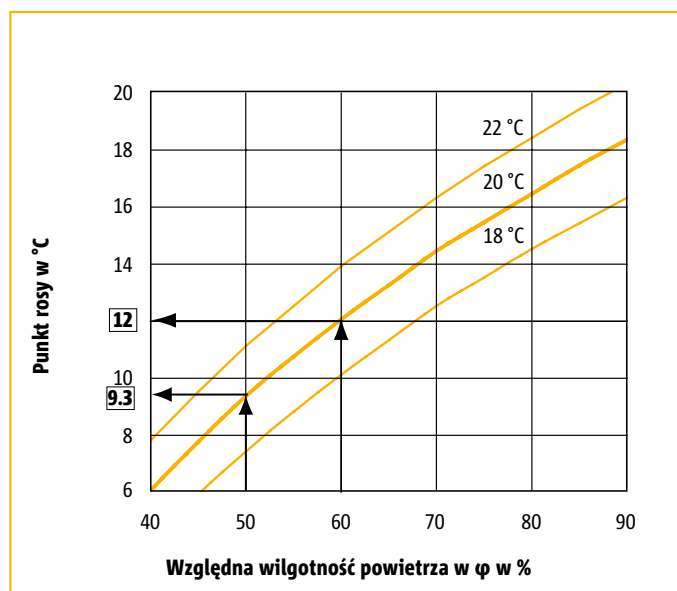
Powierzchniowa kondensacja pary wodnej

Powierzchniowa kondensacja pary wodnej (inaczej powstawanie kropli) oznacza kondensację wilgoci na chłodnych powierzchniach, związaną z obniżeniem temperatury warstwy powietrza stykającej się z zimną powierzchnią przegrody budowlanej. Przy obniżającej się temperaturze zmniejsza się zdolność powietrza do utrzymywania wilgoci. Podczas tego zjawiska zawarta w pomieszczeniu wilgoć ulega skropleniu na zimnej powierzchni: tworzy się kondensat, patrz rysunek 8. Temperatura graniczna, od której dochodzi do tego zjawiska, nazywana jest (**temperaturą punktu rosy**).

Temperatura punktu rosy zależy od temperatury powietrza i od wilgotności powietrza w pomieszczeniu (rysunek 10). Im wyższa jest wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu i wyższa temperatura, tym wyższa jest również temperatura punktu rosy tzn. tym łatwiej na zimniejszych powierzchniach będą tworzyć się kropliny.

Najczęściej występujące warunki mikroklimatyczne w pomieszczeniach charakteryzują się średnio temperaturą powietrza na poziomie ok. 20 °C i wilgotnością względną rzędu ok. 50 %. To daje nam temperaturę punktu rosy na poziomie 9,3 °C.

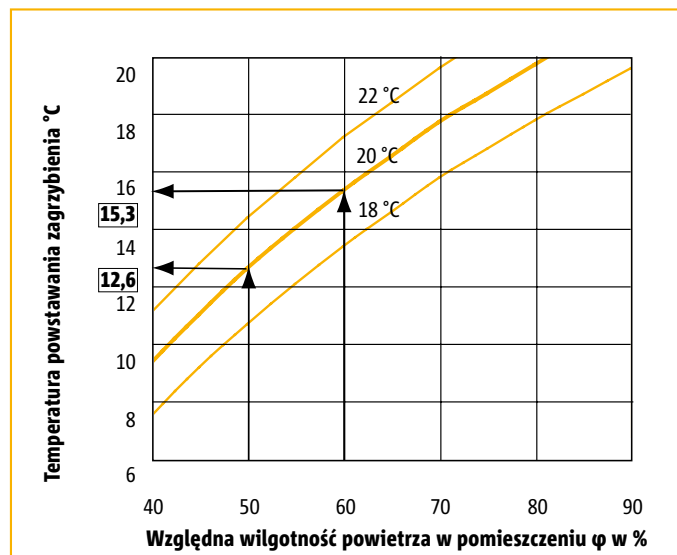
W pomieszczeniach z dużą wilgotnością, takich jak np. łazienka, osiągnięta jest wyższa wilgotność względna powietrza na poziomie 60 % i więcej. Odpowiednio wyższa jest wówczas temperatura punktu rosy, a ryzyko powstawania kropli zwiększa się. I tak temperatura punktu rosy przy wilgotności pomieszczenia na poziomie 60 % wynosi już 12,0 °C. Na krzywej (rysunek 10) bardzo dobrze widoczna jest zależność temperatury punktu rosy od wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu: już nieznaczne podwyższenie wilgotności względnej powietrza w pomieszczeniu prowadzi do znacznego wzrostu temperatury punktu rosy. To zaś skutkuje zwiększeniem ryzyka tworzenia się kropli na zimnych elementach budowlanych.



Rysunek 10: Zależność punktu rosy od wilgotności względnej i temperatury powietrza w pomieszczeniu.

Powstawanie zagrzybienia

Warunki na powierzchni elementów budowlanych sprzyjające tworzeniu się zagrzybienia występują przy wilgotności względnej powietrza powyżej 80 %. Oznacza to, że na zimnych powierzchniach elementów budowlanych powstawać będzie pleśń, gdy są one co najmniej tak zimne, że w warstwie powietrza, która bezpośrednio z nimi styka się, wilgotność względna powietrza osiąga poziom co najmniej 80%. Temperatura, w której występuje to zjawisko, to **temperatura powstawania zagrzybienia** θ_s . Tak więc do ryzyka powstania zagrzybienia dochodzi już w temperaturach wyższych od **temperatury punktu rosy**. Przy temperaturze powietrza równej 20 °C i wilgotności względnej równej 50 % dopuszczalna temperatura z uwagi na ochronę przed zagrzybieniem jest równa 12,6 °C (rysunek 11), czyli o 3,3 °C powyżej temperatury punktu rosy (patrz rysunek 10). W zapobieganiu szkodom budowlanym związanym z tworzeniem się zagrzybienia istotnym czynnikiem jest temperatura, poniżej której rozpoczyna się ten proces. Dlatego temperatura na powierzchni przegrody **musi być** wyższa od tej minimalnej, od której proces powstawania zagrzybienia się rozpoczyna (wymagania normy: PN EN ISO-13788-2003).



Rysunek 11: Zależność temperatury, w której dochodzi do tworzenia się pleśni od wilgotności względnej i temperatury powietrza.

Podsumowując należy odnotować, że nie wystarczy, gdy temperatury powierzchni wewnętrznych są wyższe od temperatury punktu rosy powietrza w pomieszczeniu, temperatura na powierzchni przegrody musi być też wyższa od temperatury, w której dochodzi do tworzenia się pleśni! Wartość graniczna wilgotności względnej powietrza przy powierzchni elementu budowlanego wynosi 80 %. W odniesieniu do powietrza o temperaturze równej 20 °C i wilgotności względnej równej 50 % dopuszczalna temperatura z uwagi na ochronę przed zagrzybieniem jest równa 12,6 °C.

$$\theta_{\min} \geq 12,6 \text{ °C}$$

Częste problemy związane z powstawaniem pleśni występują podczas renowacji starych budowli. Zazwyczaj bowiem stare okna i ich mocowanie w starych budynkach, nie tylko przyczyniają się do znacznych strat ciepła, to na dodatek na powierzchni przegród w miejscu mocowania może dochodzić do powierzchniowej kondensacji pary wodnej. Gdy przy remontach odnawiane zostają okna, dochodzi do wzrostu temperatury powierzchniowej, zaś na skutek zwiększonej szczelności nowych okien wzrasta również wilgotność względna powietrza. W wyniku powyższego może dochodzić do powstawania zagrzybienia już przy temperaturach powierzchniowych powyżej 12,6 °C. Zjawisku temu można zapobiec zapewniając przede wszystkim odpowiednią wentylację pomieszczenia.

Temperatura punktu rosy θ_T

Temperatura punktu rosy powietrza w pomieszczeniu, to temperatura, przy której para wodna nie może utrzymywać się w postaci gazowej i oddaje wilgoć w formie kondensatu. W takiej sytuacji wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu wynosi 100 %.

Temperatura powstawania zagrzybienia θ_s

Na zimnych powierzchniach elementów budowlanych będzie tworzyła się pleśń, gdy powierzchnia elementu budowlanego jest co najmniej tak zimna, że powietrze stykające się z nim charakteryzuje się wilgotnością względną na poziomie 80 %. Temperatura, przy której do tego dochodzi to tak zwana temperatura powstawania zagrzybienia θ_s .

Temperatura powierzchni od strony pomieszczenia θ_{si}

Temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia θ_{si} dostarcza informacji o przenikalności cieplnej elementu budowlanego. Gdy temperatura powierzchni przegrody od strony pomieszczenia mimo wysokiej temperatury powietrza we wnętrzu budynku jest niska, wówczas można wywnioskować, że przez dany element przepływa strumień ciepła o dużej gęstości, mamy do czynienia z dużymi stratami ciepła.

W obrębie mostków cieplnych występują najniższe temperatury powierzchniowe, z tego względu wymagane jest spełnienie odpowiednich warunków temperaturowych, wyrażanych minimalną temperaturą powierzchniową $\theta_{si,min}$. Wartość minimalnej temperatury powierzchniowej wskazuje na to czy na powierzchni mostka cieplnego może tworzyć się kondensat lub zagrzybienie. Minimalna temperatura powierzchni jest więc parametrem pozwalającym na dokonanie oceny czy w danym miejscu na powierzchni mostka cieplnego nie wystąpią warunki, które będą sprzyjały kondensacji pary wodnej lub rozwojowi pleśni. Temperatura $\theta_{si,min}$ zależy bezpośrednio od konstrukcji mostka cieplnego (geometria i przewodność cieplna materiałów tworzących mostek cieplny).

Współczynnik temperaturowy f_{Rsi}

Współczynnik temperaturowy jest parametrem służącym do oceny niebezpieczeństwa tworzenia się pleśni na powierzchni przegród budowlanych. Współczynnik temperaturowy f_{Rsi} to różnica pomiędzy temperaturą powierzchni i temperaturą powietrza na zewnątrz ($\theta_{si} - \theta_e$) podzielona przez różnicę temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego ($\theta_i - \theta_e$):

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

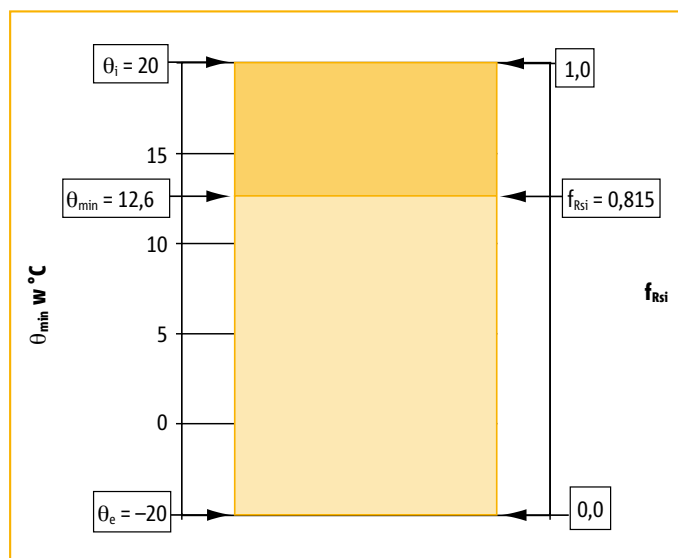
Minimalne wymagania zgodnie z PN-EN ISO 13788 i Warunkami Technicznymi

Minimalny wymóg dotyczący wartości f_{Rsi} ma na celu zapobieganie powstawania szkód budowlanych w wyniku tworzenia się pleśni. W tym przypadku obowiązuje zasada:

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max} \text{ (wg PN-EN ISO 13788 ; p.5.3)}$$

Ta wartość graniczna musi zostać sprawdzona dla najniekorzystniejszego miejsca konstrukcji. Sprawdzenie dokonywane jest w oparciu o katalog mostków cieplnych lub poprzez obliczenia. Wymagania określone w Warunkach Technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U.nr 75, poz. 690 z późn zm.) dopuszcza na przyjęcie minimalnej wartości współczynnika $f_{Rsi} = 0,72$ na określonych w p.2.2.2 Załącznika Nr 2. warunkach. Dopuszcza się stosowanie tego wymogu, w przypadku pomieszczeń ze średnią miesięczną temperaturą powietrza $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i średnią wilgotnością względną powietrza na poziomie 50%. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, iż właściwie jest to możliwe tylko w przypadku pomieszczeń klimatyzowanych. W pomieszczeniach z wentylacją grawitacyjną wilgotność powietrza może kształtować się bardzo różnie i jest ona uzależniona od warunków zewnętrznych oraz sposobu użytkowania pomieszczeń. W szczególności w budynkach mieszkalnych, mieszkaniach z dziećmi, budynkach zamieszkania zbiorowego itp. o dużym zagęszczeniu, z wentylacją grawitacyjną, wilgotność względna powietrza może znacznie przekraczać 50%. W związku z tym warunek ten powinien być sprawdzany według metodologii podanej w normie PN-EN ISO 13788.

Wartość f_{Rsi} jest wartością względną i ma tę zaletę, że zależy wyłącznie od konstrukcji mostka cieplnego i warunków przejmowania ciepła na powierzchni przegrody a nie jak w przypadku wartości θ_{si} od założonych temperatur powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku. Współczynnik temperaturowy ma wartość $f=1$, gdy minimalna temperatura powierzchni od strony pomieszczenia θ_{min} wynosi tyle co temperatura powietrza w pomieszczeniu, a $f=0$ gdy jest równa temperaturze zewnętrznej (patrz rysunek 12).



Rysunek 12: Zależność między temperaturą powierzchniową a współczynnikiem temperaturowym f_{Rsi} .

Współczynniki

Współczynnik przewodzenia ciepła λ

Współczynnik przewodzenia ciepła charakteryzuje intensywność wymiany ciepła przez dany materiał. Niska wartość λ oznacza słabą przewodność cieplną i możliwość uzyskania względnie wysokiego oporu cieplnego komponentu wykonanego z takiego materiału. I tak na przykład stal ma bardzo wysoki współczynnik przewodzenia ciepła (15 do 50 W/(mK)), zaś materiały termoizolacyjne bardzo niski (na poziomie ok. 0,035 W/(mK)).

Współczynnik przewodzenia ciepła wyraża ilość ciepła w W, przepływająca w 1 s przez 1 m² homogenicznej warstwy materiału o grubości 1 m prostopadle do powierzchni, gdy różnica temperatur na przeciwległych powierzchniach tego prostopadłościanu wynosi 1 K. Pomiary laboratoryjne przewodności cieplnej wykonywane są w warunkach temperaturowych od 10 °C do 9 °C.

Ekwiwalentny współczynnik przewodzenia ciepła λ_{eq}

Ekwiwalentny współczynnik przewodzenia ciepła λ_{eq} elementu budowlanego składającego się z kilku materiałów budowlanych określa przewodność cieplną jednorodnego zastępczego materiału budowlanego w kształcie prostopadłościanu o tych samych wymiarach, który w miejscu całego elementu budowlanego w stanie zamontowanym pozwala uzyskać ten sam efekt cieplny.

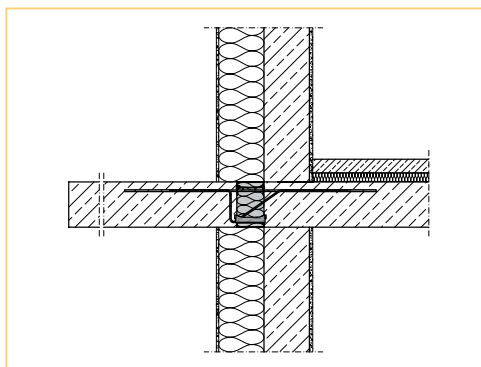
Zgodnie z Europejskim Dokumentem Oceny (European Assessment Document – EAD) dla nośnych elementów termoizolacyjnych, wprowadzonym w 2017 roku, współczynnik λ_{eq} wyznacza się następująco.

W metodzie zgodnej z EAD dokonuje się szczegółowych obliczeń mostków cieplnych w trzech wymiarach z nośnym elementem termoizolacyjnym. Tutaj tworzony jest szczegółowy model złożonej konstrukcji nośnego elementu termoizolacyjnego i wyznaczana jest strata ciepła przez mostek cieplny. Na podstawie występującej straty ciepła oblicza się ekwiwalentny współczynnik przewodzenia ciepła λ_{eq} i ekwiwalentny opór cieplny R_{eq} .

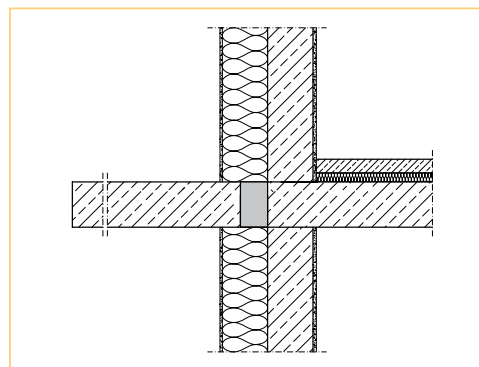
Ekwiwalentne współczynniki przewodzenia ciepła λ_{eq} elementu Schöck Isokorb® podane są w Informacjach technicznych.

Szczegółowe obliczenia mostków cieplnych

Chcąc przeprowadzić szczegółowy dowód mostków cieplnych, w celu obliczenia wartości ψ lub f_{Rsi} , do modelowania detali połączenia można zastosować wartość λ_{eq} . W tym celu w jego miejscu na modelu wyznacza się jednorodny prostokąt o wymiarach korpusu izolacyjnego elementu Schöck Isokorb® i przypisuje się ekwiwalentny współczynnik przewodzenia ciepła λ_{eq} , patrz rysunek. W ten sposób można obliczyć parametry fizyczno-budowlane konstrukcji.



Rysunek 13: Przekrój ze szczegółowym modelem Schöck Isokorb.



Rysunek 14: Przekrój z uproszczonym elementem izolacyjnym.

Metoda obliczeń do wyznaczania λ_{eq} została poddana walidacji w oparciu o Europejski Dokument Oceny (European Assessment Document – EAD) dla nośnych elementów termoizolacyjnych i na tej podstawie dla elementu Schöck Isokorb® w Europejskiej Ocenie Technicznej (European Technical Assessment – ETA).

Obliczenia można dokonać w dostępnym na rynku oprogramowaniu do obliczania mostków cieplnych przy zastosowaniu cieplnych warunków brzegowych według ISO 6946. W ten sposób oprócz strat ciepła przez mostek cieplny (współczynnik ψ) można również obliczyć temperatury powierzchni θ_{si} oraz współczynnik temperaturowy f_{Rsi} .

Poszczególne wartości λ_{eq} znajdują się w parametrach fizyki budowli w Internecie na stronie:

www.schock.pl/download/fizyka-budowli

Opór cieplny; wartość R

Opór cieplny to opór stawiany strumieniowi ciepła, przepływającemu przez powierzchnię 1m^2 warstwy materiału, o grubości d tegoż materiału, gdy różnica temperatury na grubości d wynosi 1K . Wartość R obliczana jest jako iloraz grubości warstwy materiału przez współczynnik przewodzenia ciepła:

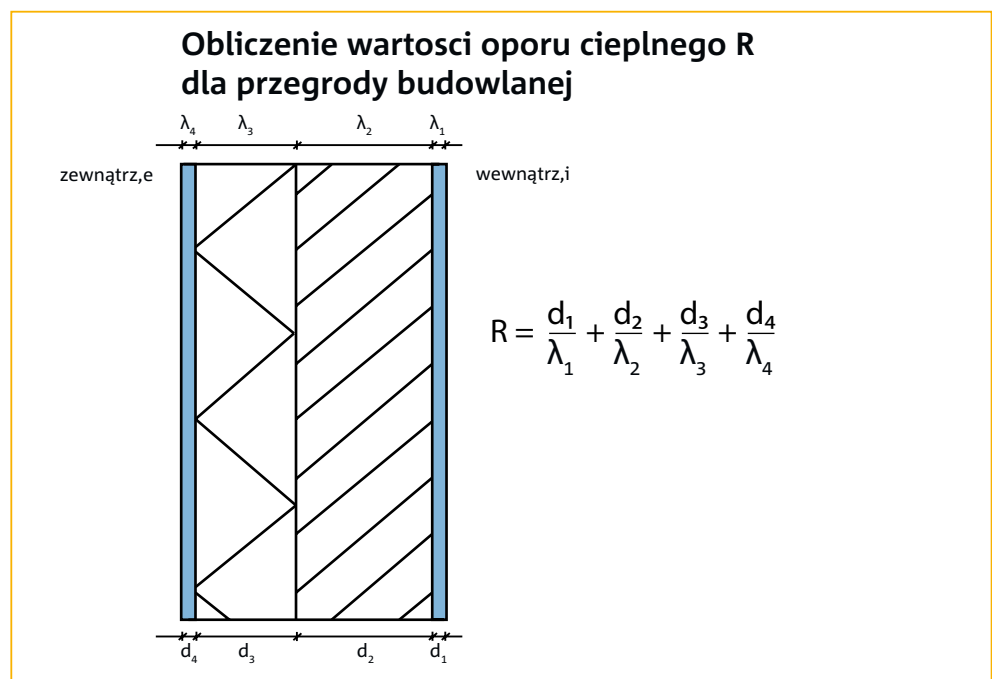
$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

λ : współczynnik przewodzenia cieplnego w $\text{W}/(\text{mK})$

d : grubość warstwy materiału w m

Obliczenie wartości R może być przeprowadzane także dla elementu budowlanego składającego się z kilku warstw:

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n}$$

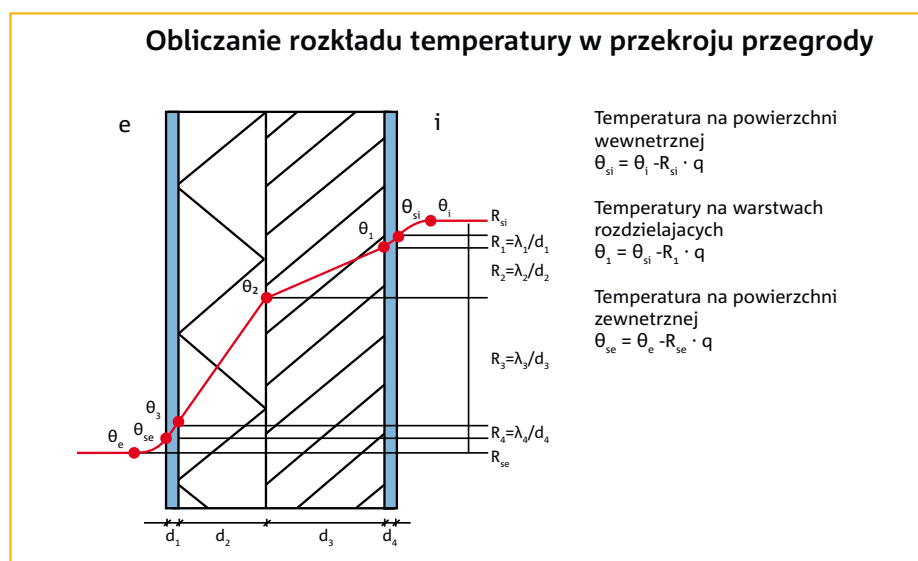


Współczynnik przenikania ciepła; wartość U

Współczynnik przenikania ciepła charakteryzuje izolacyjność cieplną przegrody budowlanej. Jego wartość zależy od oporu cieplnego R i oporów przyjmowania ciepła (R_{si} i R_{se}) na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody. Tak więc wartość U wyraża zdolność przegrody do przenikania przez nią ciepła.

Wartość U obliczana jest jako odwrotność całkowitego oporu cieplnego przegrody:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}}$$



Rysunek 15: Zmiana temperatury w przekroju ściany zewnętrznej. Spadek temperatury (w kierunku przepływu ciepła) lub inaczej wzrost temperatury w kierunku odwrotnym zależy od grubości warstwy i przewodności cieplnej materiału zastosowanego w danej warstwie, czyli od wartości oporów R. Na krawędziach elementu budowlanego oddziałuje dodatkowo jeszcze wartość R_{si} i wartość R_{se} . Po prawej stronie wykresu odłożone zostały wartości oporów R, a po lewej odpowiadające im spadki lub wzrosty temperatury w przekroju przegrody.

Na wykresie temperatury (rysunek 15) widoczny jest przebieg temperatury przez przegrodę budowlaną. Ponadto w tym miejscu na osi rzędnych odłożono wartości R warstw przegrody oraz wartości R_{si} i R_{se} oporów przyjmowania ciepła. Odwrotność sumy wartości R daje wartość współczynnika przenikania ciepła (wartość U).

Współczynnik sprzężenia cieplnego

Współczynnik sprzężenia cieplnego L_{2D} to iloraz mocy strumienia ciepła do różnicy temperatury między dwoma pomieszczeniami oddzieloną analizowaną konstrukcją. Tak więc współczynnik L_{2D} wyraża moc strat ciepła przez daną konstrukcję.

Wzór z PN EN ISO 10211:

$$L_{2D} = \frac{\Phi}{\Delta T} \text{ [W/(mK)]}$$

W przypadku konstrukcji z mostkami cieplnymi współczynnik sprzężenia cieplnego L_{3D} składa się z powierzchniowych strat ciepła przez elementy budowlane nieposiadające zakłóceń oraz sumy strat ciepła na skutek występowania liniowych i punktowych mostków cieplnych, jak zapisane to jest w poniższym wzorze (zgodnie z PN EN ISO 10211):

Wzór z PN EN ISO 10211:

$$L_{3D,i,j} = \sum_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \cdot A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \psi_{m(i,j)} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_{n(i,j)}$$

Przy czym:

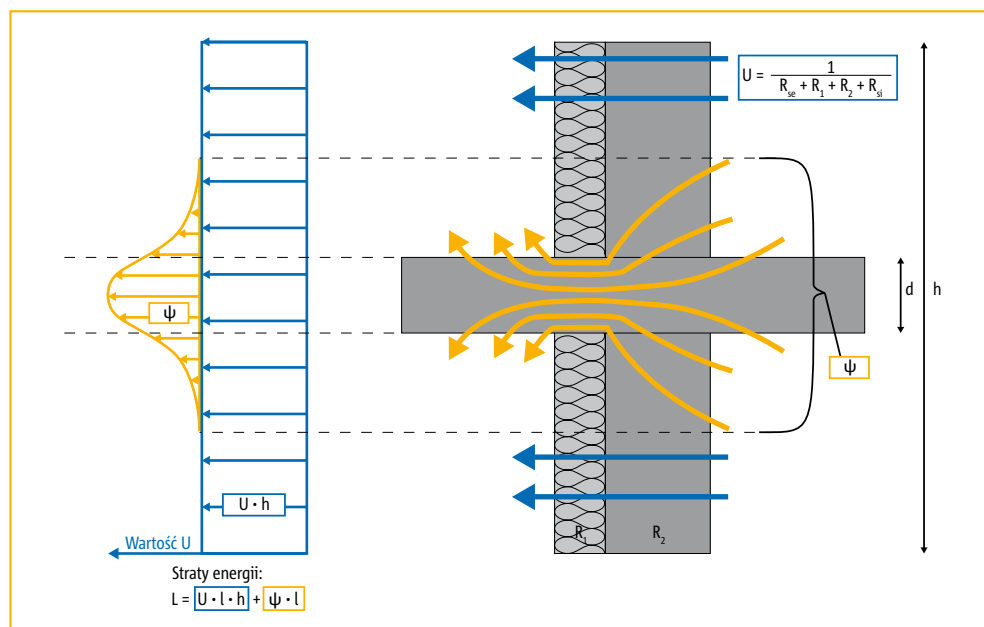
- $U_{k(i,j)}$ to współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę z części k pomieszczenia lub budynku;
- A_k powierzchnia, dla której obowiązuje wartość $U_{k(i,j)}$;
- $\psi_{m(i,j)}$ liniowy współczynnik przenikania ciepła części m pomieszczenia lub budynku;
- l_m długość, na której obowiązuje wartość $\psi_{m(i,j)}$;
- $\chi_{n(i,j)}$ punktowy współczynnik przenikania ciepła z części n pomieszczenia lub budynku;
- N_k ilość współczynników przenikania ciepła;
- N_m ilość liniowych współczynników przenikania ciepła;
- N_n ilość punktowych współczynników przenikania ciepła.

Liniowe i punktowe współczynniki przenikania ciepła ψ i χ

Współczynnik przenikania ciepła ψ i χ opisuje moc strat ciepła powstających w wyniku mostka cieplnego. Rozróżnia się liniowy mostek cieplny (np. przyłączenie balkonu) i punktowy mostek cieplny (np. kotwa w ścianie lub stropodachu przebijająca warstwę izolacji cieplnej).

Liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ charakteryzuje dodatkowe straty ciepła w miejscu występowania liniowego mostka cieplnego, odniesione do metra bieżącego tego mostka. Punktowy współczynnik przenikania ciepła χ charakteryzuje odpowiednio dodatkową stratę ciepła przez punktowy mostek cieplny.

Wartość współczynnika ψ zależy od konstrukcji, wymiarów oraz wartości U przyłączonych elementów budowlanych, ponieważ konstrukcje elementów i sposób ich połączenia wpływają na warunki przenikania ciepła. Z tego względu zmienia się wartość współczynnika ψ , gdy zmienia się konstrukcja przegród sąsiadujących z mostkiem cieplnym, nawet wówczas, gdy mostek cieplny pozostaje niezmienny.



Rysunek 16: Charakter strat ciepła przez ścianę z płytą balkonową na całej długości. Po prawej stronie zaprezentowano konstrukcję ze strumieniami ciepła zilustrowanymi w postaci strzałek. Po lewej stronie na powyższym przekroju zaprezentowano intensywność strat ciepła w obrębie danego połączenia elementów konstrukcyjnych. Są one przedstawione także pod postacią wzoru, wartość l podana we wzorze to długość konstrukcji prostopadle do płaszczyzny rysunku.

Na rysunku 16 zilustrowano graficznie wpływ liniowego mostka cieplnego, wyrażony wartością współczynnika ψ dla płyty balkonowej, która w sposób ciągły przechodzi przez ścianę. Ta dodatkowa strata ciepła przez płytę balkonową ma wpływ na sąsiadującą z płytą ścianę zewnętrzną. W praktyce oznacza to, że na skutek odpywania ciepła przez płytę balkonową schładza się także ściana nad i pod mostkiem cieplnym. Na strzałkach, znajdujących się na rysunku z prawej strony widać, jaką drogą przepływa strumień ciepła. Podczas gdy w ścianach bez elementów zakłócających występuje jedynie poziomy strumień ciepła (pokazany na niebiesko), strumień ciepła w mostkach cieplnych jest trójwymiarowy (zaprezentowany na żółto). Z powyższego wynika, dlaczego obliczanie wartości współczynnika ψ jest bardziej skomplikowane niż wartości współczynnika U .

Z tego powodu do obliczania dwu i trójwymiarowego przepływu ciepła absolutnie konieczne jest posiadanie stosownego programu obliczeniowego. Normatywną podstawą jest tutaj PN-EN ISO 10211. W normie tej uregulowane zostały warunki brzegowe dla obliczania liniowych i punktowych współczynników przenikania ciepła.

Aby obliczyć liniowy współczynnik przenikania ciepła ψ należy od wartości współczynnika sprzężenia cieplnego L_{2D} odjąć straty ciepła uwzględnione współczynnikiem przenikania ciepła U .

Wyciąg z PN EN ISO 10211:

9.2 Obliczenia liniowych i punktowych współczynników przenikania ciepła

Wartości współczynnika ψ są określane w oparciu o:

$$\psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j$$

Przy czym:

- L_{2D} to współczynnik sprzężenia cieplnego z obliczenia dwuwymiarowego elementu na połączeniu dwóch przegród zewnętrznych;
- U_j współczynnik przenikania ciepła jednowymiarowego elementu budowlanego j (przegrody zewnętrznej);
- l_j długość, dla której obowiązuje wartość U_j .

Wartości χ są wyznaczane według wzoru:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j \cdot l_j$$

Przy czym:

- L_{3D} współczynnik sprzężenia cieplnego z wyliczeń 3-D;
- U_i współczynnik przenikania ciepła jednowymiarowego elementu budowlanego (przegrody zewnętrznej);
- A_i powierzchnia przegrody, na której obowiązuje wartość U_i ;
- ψ_i liniowy współczynnik przenikania ciepła liniowego mostka cieplnego na długości;
- l_j długość, na której obowiązuje wartość ψ_j ;
- N_j ilość dwuwymiarowych elementów budowlanych;
- N_i ilość jednowymiarowych elementów budowlanych.

Liniowy współczynnik przenikania ciepła

(Definicja z PN EN ISO 10211):

Gęstość strumienia ciepła w stanie ustalonym podzielona przez długość i przez różnicę temperatury między środowiskami po obu stronach mostka cieplnego.

Punktowy współczynnik przenikania ciepła

(Definicja z PN EN ISO 10211):

Wielkość strumienia ciepła w stanie ustalonym podzielona przez różnicę temperatury między środowiskami po obu stronach mostka cieplnego.

Schöck Sp. z o.o.
ul. Jana Olbrachta 94
01-102 Warszawa
telefon: 22 533 19 16
faks: 22 533 19 19
internet: www.schock.pl
e-mail: biuro@schock.pl

