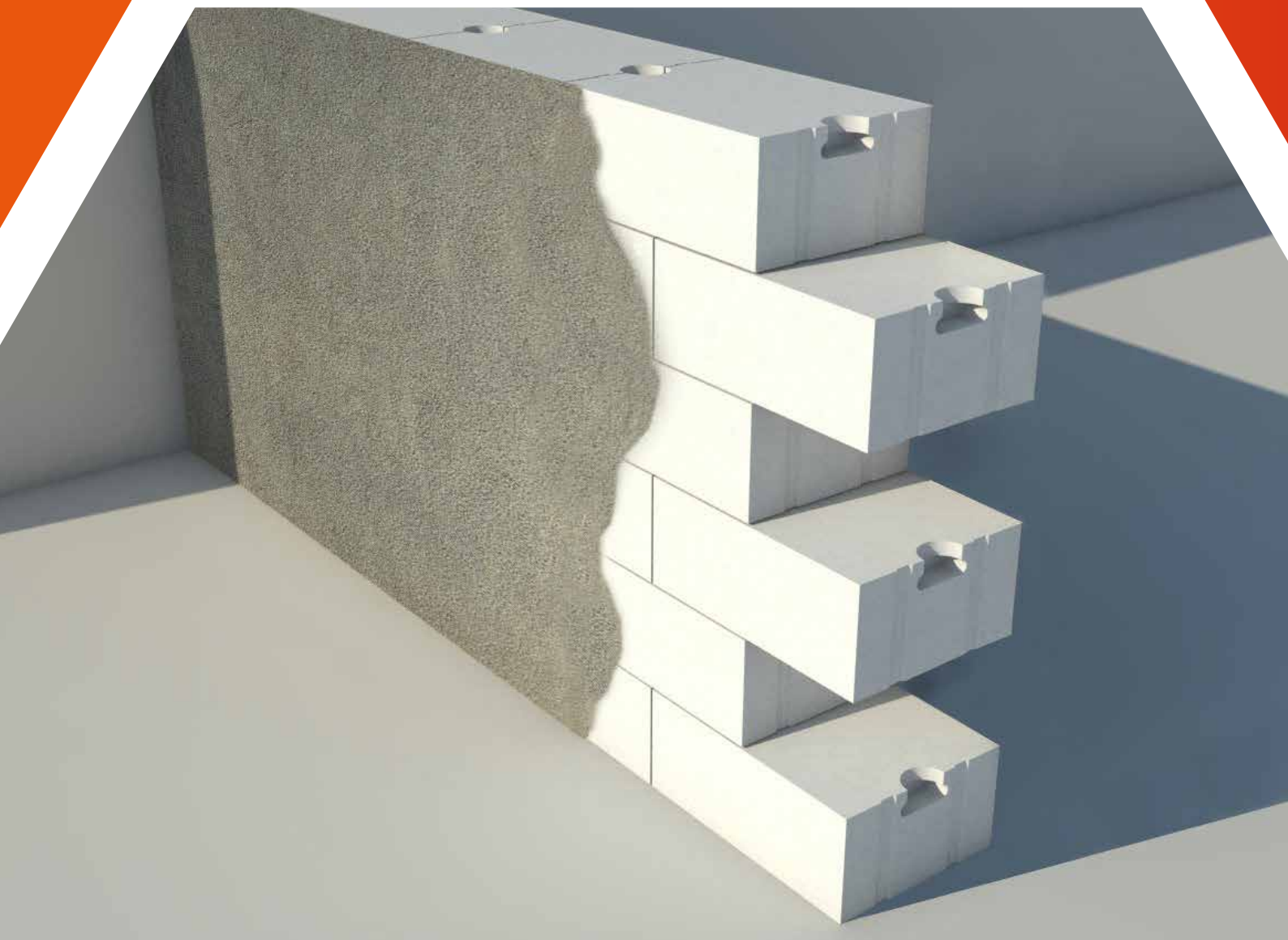
ISBN 978-83-941005-7-5

CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE PROJEKTOWANIE ŚCIAN Z **BETONU KOMÓRKOWEGO**

Zeszyt 3 Część 1 Przegrody pełne



1. Wprowadzenie

Fizyka budowli stanowi dział wiedzy, którego znajomość jest nieodzowna w procesie projektowania obiektów budowlanych o różnym przeznaczeniu użytkowym. Podstawą właściwego kształtowania mikroklimatu pomieszczeń jest znajomość podstawowych procesów fizycznych wynikających z oddziaływania czynników środowiskowych generowanych zarówno wewnątrz budynku, jak również poza nim. Szczególnie istotnego znaczenia nabierają tutaj praktyczne metody obliczeniowe w oparciu o które ocenia się przydatność zastosowanych materiałów oraz przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych w aspekcie zarówno ochrony cieplnej jak również wilgotnościowej. Fizyka cieplna budowli ustala zasady projektowania i wykonywania przegród zewnętrznych w budynkach, zapewniające w pomieszczeniach utrzymanie właściwych warunków mikroklimatycznych, ograniczenie strat ciepła oraz długotrwałe i bezawaryjne użytkowanie tych pomieszczeń. Zagadnienia te stały się bardzo ważne w ostatnich latach z powodu zaostrzenia przepisów ograniczających zużycie energii w budynkach. Wobec powyższego istotnego znaczenia nabierają metody obliczeniowe, umożliwiające przeprowadzenie obliczeń cieplno-wilgotnościowych przegród zarówno jednorodnych jak również niejednorodnych, z uwzględnieniem szeregu wariantów wymiany ciepła i ruchu wilgoci. Teoretyczny opis i praktyczne przykłady zastosowań metod obliczeniowych zostały zebrane w pracy zbiorowej [1]. Jednakże trzeba mieć na uwadze fakt iż wymagania cieplne i wilgotnościowe oraz stosowne normy co jakiś czas się zmieniają, a co za tym idzie wszelkie podręczniki czy opracowania powinny być na bieżąco modyfikowane.

W oparciu o metody obliczeniowe można dokonać właściwego doboru rodzaju materiału przegród oraz przyjąć optymalne rozwiązania materiałowe, zapewniające założony mikroklimat, jak również minimalizację strat ciepła z pomieszczeń budynków o różnym przeznaczeniu użytkowym.

Wiele badań opisanych w literaturze krajowej i zagranicznej dotyczy akumulacyjności cieplnej budynków. W publikacji [2] rozważano bezwładność cieplną na odczuwanie komfortu cieplnego, a dokładniej wpływ bezwładności cieplnej na całkowite obciążenie cieplne układu. Rozważania prowadzono za pomocą badań numerycznych z wykorzystaniem równania Fouriera.

Niebagatelne znaczenie na oszczędność energii w budownictwie ma akumulacyjność cieplna przegrody. Zużycie energii do ogrzewania, chłodzenia i wentylacji ciągle wzrasta, dlatego systemy magazynowania energii zaprzątają coraz większą uwagę badaczy. Badacze w pracy [3] stwierdzili, że w obszarze o dużej różnicy temperatur pomiędzy dniem i nocą, izolacja termiczna montowana na powierzchni zewnętrznej przegrody sprawdza się lepiej niż na wewnętrznej. Powodem tego zjawiska, jak stwierdzili, jest inna akumulacyjność cieplna przegrody z izolacją na zewnątrz niż wewnątrz. Akumulacyjność cieplna przegród i jej wpływ na efektywność energetyczną budynków jest obszarem zainteresowań wielu badaczy i opublikowanych licznych prac na ten temat. W artykule [4] autorzy badali wpływ pojemności cieplnej i oporu cieplnego na zachowanie termiczne ściany z wykorzystaniem teorii continuum w parametrach rozłożonych. W ostatnich latach pojawiły się liczne prace w których opisywano próby pomiarów in-situ współczynnika przenikania ciepła [5,6]. Przykładem takich badań jest praca Bakera [7]. Inną pracą z tego zakresu jest praca Stevensa [8]. W artykule Rye [9] autorka stwierdziła, że tradycyjne budynki są nieefektywne energetycznie, szczególnie w odniesieniu do strat ciepła przez ściany. Również Evangelsiti [10] stwierdza, że dokładna ocena współczynnika przenikania ciepła U ścian jest niezbędna do obliczania rocznego zużycia energii. Jak widać z krótkiego przeglądu literaturowego zagadnienia strat ciepła są zagadnieniem zajmującym badaczy z całego świata. Dlatego też autorzy niniejszej pracy starali się przedstawić w czytelny sposób za-

1.2. Literatura

[1] Klemm P (pod redakcją). Budownictwo Ogólne. Tom II. Fizyka Budowli. Wyd. Arkady, 2008.
[2] Morillón D., Sámano D.A., Ávila F.E., Zayas J.L.F. Th ecomfort zone and the oscillation of the driving temperaturę. Applied Energy, Vol. 57, No. 1 (1997), pp. 1 – 11
[3] Huang Y., Niu J., Chung T. Study on performance of Energy-efficient retrofitting measures on commercial building external walls in cooling-dominant cities. Applied Energy, 103 (2013), p. 97-108
[4] Tsilingiris P.T. Parametric space distribution effeccts of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behawior of walls and structures
[5] Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y. Review on thermal Energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy, 92 (2012), p. 593-605.
[6] Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal Energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and application. Appl Therm Eng, 23, (2003), p. 251-283.
[7] Baker, P. (2011). U-values and traditional buildings, in situ measurements and their comparisons to calculated values. Edinburgh: Historic Scotland.
[8] Stevens G., Bradford J. (2013). Do U-value insulation? England's field trial of solid wall insulation. ECEE Summer Study, 1269 – 1280
[9] Rye C. (2015). Are traditional buildings really carbon villains? Why it metters when insulating solid walls. Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation, Vol. 4, No. 2, 119 – 126
[10] Evangelisti L., Guattari C., Gori P., de Lietto Vollaro R. (2015) InSitu Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance. Sustainability, 7, 10388 – 10398
[11] Asdrubali, F.; D'Alessandro, F.; Baldinelli, G.; Bianchi, F. (2014). Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries—A case study. Case Stud. Constr. Mater., 1, 53–59.
[12] Walker R., Pavia S. (2015). Thermal performance of a selection of insulation materials suitable for historic buildings. Building and Environment, Vo.94, Part 1, 155 – 165.

gadnienia ochrony cieplno-wilgotnościowej budynków. W rozdziale drugim przedstawiono wybrane wymagania w zakresie cieplno-wilgotnościowym dla budynków. Rozdział trzeci dotyczy zagadnień ochrony cieplnej w projektowaniu przegród ściennych. Czwarty rozdział dotyczy kształtowania ścian zewnętrznych pod względem wilgotnościowym. W piątym rozdziale omówiono diagnostykę cieplną i szczelność powietrzną budynków, a w rozdziale szóstym przedstawiono wybrane parametry fizyczne betonu komórkowego. Siódmy rozdział zawiera przykłady obliczeń cieplno-wilgotnościowych zróżnicowanych ścian z betonu komórkowego.

Autorzy monografii:
Dr inż. Paweł Krause
Dr inż. Tomasz Steidl
Dr inż. Artur Nowoświat

Recenzenci:
Dr hab. inż. Łukasz Drobiec
Prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki



1. WPROWADZENIE 2
1.1. Literatura 2

2. WYMAGANIA W ZAKRESIE CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYM DLA BUDYNKÓW 6
2.1. Symbole i jednostki 6
2.2. Terminy i definicje 7
2.3. Historia 8
2.4. Wymagania aktualne 9
2.4.1. Higiena i zdrowie 9
2.4.2. Oszczędność energii i izolacyjności termiczna 10
2.4.3. Szczelność na przenikanie powietrza 11
2.5. Literatura 12

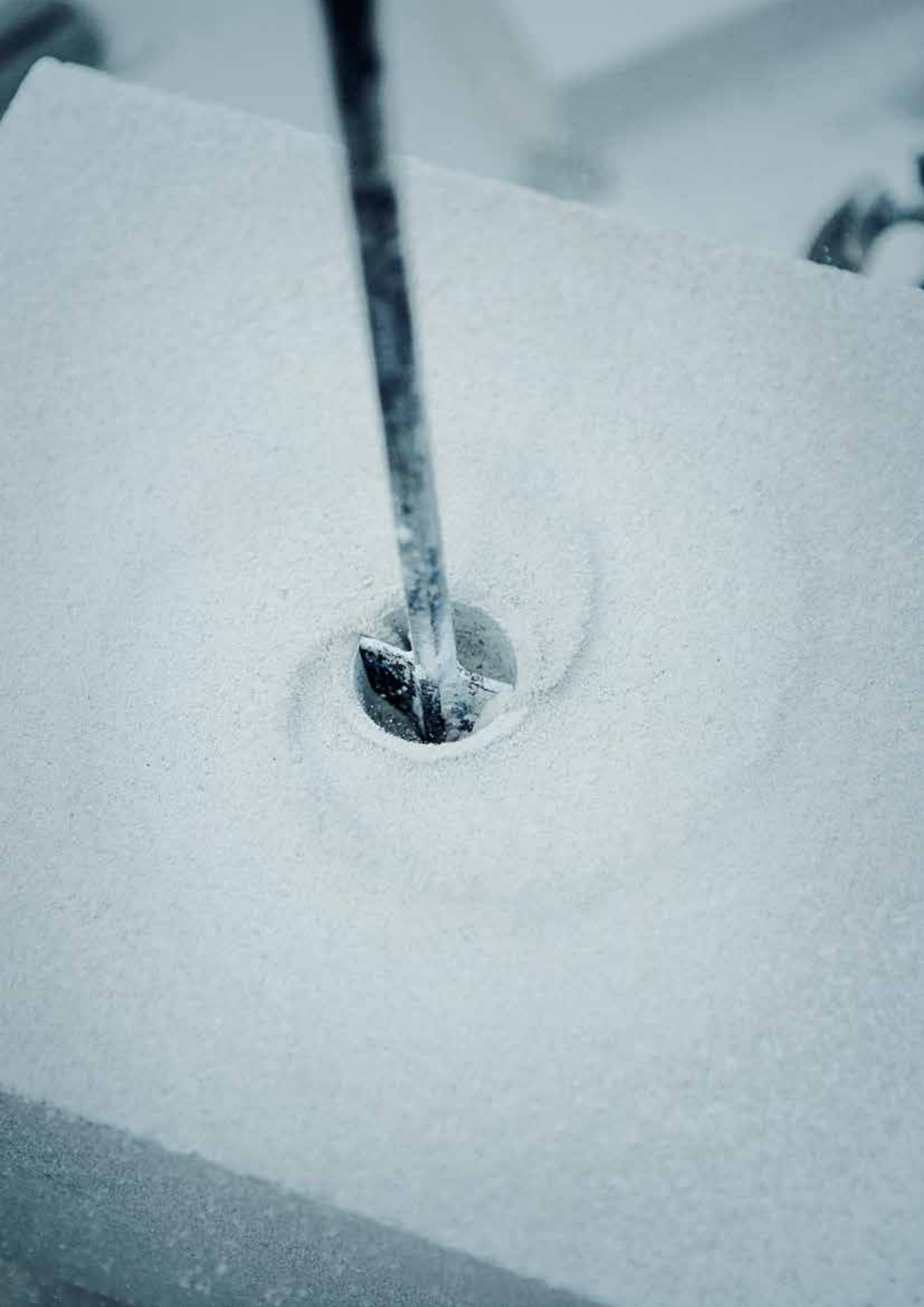
3. IZOLACYJNOŚĆ TERMICZNA ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH 13
3.1. Symbole i jednostki 13
3.2. Terminy i definicje 15
3.3. Charakterystyki termiczne przegród ściennych 16
3.4. Rozkład temperatury i akumulacyjność cieplna przegrody 23
3.5. Literatura 29

4. KSZTAŁTOWANIE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH POD WZGLĘDEM WILGOTNOŚCIOWYM 30
4.1. Symbole i jednostki 30
4.2. Terminy i definicje 32
4.3. Zawilgocenie przegród budowlanych 32
4.4. Oszacowanie ryzyka kondensacji wewnętrznej wskutek dyfuzji pary wodnej w przegrodach budowlanych 33
4.5. Literatura 45

5. DIAGNOSTYKA CIEPLNA I SZCZELNOŚĆ POWIETRZNA BUDYNKÓW 45
5.1. Symbole i jednostki 45
5.2. Terminy i definicje 48
5.3. Diagnostyka cieplna budynków 46
5.3.1 Badania niszczące 47
5.3.2. Badania nieniszczące 48
5.4. Szczelność powietrzna budynków 50
5.5. Literatura 53

6. ROZWIĄZANIA MATERIAŁOWE ŚCIAN Z BETONU KOMÓRKOWEGO 54
6.1. Gęstość bloczków 54
6.2. Wymiary 54
6.3. Współczynnik przewodzenia betonu komórkowego 55
6.4. Współczynnik oporu dyfuzyjnego 57
6.5. Literatura 58

7. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH 59
7.1. Ściana jednowarstwowa 59
7.2. Ściana dwuwarstwowa 61
7.3. Ściana trójwarstwowa 62
7.4. Ściana trójwarstwowa z pustką niewentylowaną 64
7.5. Ściana trójwarstwowa z pustką słabo wentylowaną 66
7.6. Ściana trójwarstwowa z pustką wentylowaną 68
7.7. Ściana niejednorodna dwuwarstwowa 69
7.8. Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką niewentylowaną 71
7.9. Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką słabo wentylowaną 74
7.10. Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką wentylowaną 76



2. WYMAGANIA W ZAKRESIE CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWYM DLA BUDYNKÓW

2.1. Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
θ	temperatura w skali Celsjusza	°C
φ	wilgotność względna powietrza	%
A_f	powierzchnia użytkowa ogrzewana budynku	m^2
$A_{f,C}$	powierzchnia użytkowa chłodzona budynku	m^2
$A_{f,i}$	powierzchnia użytkowa ogrzewana (chłodzona) i-tej części budynku o jednolitej funkcji użytkowej	m^2
q	gęstość strumienia ciepła	W/m^2
EP	wskaźnik obliczeniowy zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej odniesiony do 1 m^2 powierzchni o regulowanej temperaturze	$kWh/m^2 \cdot rok$
ΔEP_C	cząstkowa maksymalna wartość wskaźnika EP na potrzeby chłodzenia	$kWh/m^2 \cdot rok$
EP_{H+W}	cząstkowa maksymalna wartość wskaźnika EP na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej	$kWh/m^2 \cdot rok$
EP_i	maksymalna wartość wskaźnika EP określającego roczne obliczeniowe zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, przygotowania ciepłej wody użytkowej, chłodzenia oraz oświetlenia wbudowanego, dla części i-tej budynku o jednolitej funkcji użytkowej o powierzchni $A_{f,i}$	$kWh/m^2 \cdot rok$
ΔEP_L	cząstkowa maksymalna wartość wskaźnika EP na potrzeby oświetlenia	$kWh/m^2 \cdot rok$
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
$f_{Rsi,min}$	obliczeniowy czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
k*	współczynnik przenikania ciepła*	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot °C)$
k_B*	współczynnik przenikania ciepła całego budynku*	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot °C)$
k_{max}*	maksymalny współczynnik przenikania ciepła*	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot °C)$
$k_{ść}$*	współczynnik przenikania ciepła dla całej ściany*	$kcal/(m^2 \cdot h \cdot °C)$
n_{50}	krotność wymiany powietrza przy różnicy ciśnienia między wnętrzem a otoczeniem budynku równej 50 Pa	h^{-1}
θ_e	temperatura powietrza zewnętrznego	°C
θ_i	temperatura powietrza wewnętrznego	°C
θ_{si}	temperatura powierzchni wewnętrznej	°C
U	współczynnik przenikania ciepła	$W/(m^2 \cdot K)$
U_c	całkowity współczynnik przenikania ciepła liczony wg normy PN-EN ISO 6946	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_{c,max}$	całkowity maksymalny współczynnik przenikania ciepła łącznie z liniowymi mostkami cieplnymi	$W/(m^2 \cdot K)$

λ	współczynniki przewodzenia ciepła materiału	W/mK
λ_D	deklarowany współczynniki przewodzenia ciepła materiału	W/mK
μ	współczynnik oporu dyfuzyjnego	-
S_d	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza	m
δ_o	paroprzepuszczalność powietrza w odniesieniu do ciśnienia cząstkowego pary wodnej	kg/(m·s·Pa)
δ_p	paroprzepuszczalność materiału w odniesieniu do ciśnienia cząstkowego pary wodnej	kg/(m·s·Pa)
p	p ciśnienie pary wodnej	Pa
p_i	ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu wewnętrznym	Pa
p_e	ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu zewnętrznym	Pa
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	m^2K/W
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni na powierzchni zewnętrznej	m^2K/W
D	współczynnik dyfuzji pary wodnej w materiale	m^2/s
Ma	zakumulowana zawartość wilgoci na jednostkę powierzchni stykowej	kg/m^2
d_i	grubość i – tej warstwy przegrody	m
* jednostki historyczne, obecnie nieużywane		

2.2.
Terminy i definicje

Materiał - część wyrobu, niezależnie od formy dostawy, kształtu i wymiarów, bez żadnej okładziny lub powłoki.

Wyrób - końcowa forma materiału gotowego do użytku, o danym kształcie i wymiarach, z wszelkimi okładzinami lub powłokami.

Wyrób budowlany – oznacza każdy wyrób lub zestaw wyprodukowany i wprowadzony do obrotu w celu trwałego wbudowania w obiektach budowlanych lub ich częściach, którego właściwości wpływają na właściwości użytkowe obiektów budowlanych w stosunku do podstawowych wymagań dotyczących obiektów budowlanych.

Element budynku - główna część budynku, taka jak ściana, strop i dach.

Komponent budowlany - element budynku lub jego część.

Przegroda budowlana - jest to konstrukcja oddzielająca pomieszczenie od środowiska zewnętrznego lub innego pomieszczenia.

Powierzchnia użytkowa – jest to część powierzchni netto, która odpowiada celom zgodnym z przeznaczeniem i funkcją budynku [N11]. Wysokość w świetle: równa lub większa od 2,30 m – zaliczania jako 100%, równa lub większa od 1,40 m lecz mniejszej od 2,20 m zaliczana do obliczeń jako 50%, mniejsza od 1,40 m powierzchnia pomijana całkowicie.

Powierzchnia o regulowanej temperaturze powietrza – ogrzewana lub chłodzona powierzchnia użytkowa netto.

Energia cieplna - jest taką umowną formą energii, która może być przekazywana z jednego ciała na inne w przypadku istnienia różnicy temperatur tych ciał, lecz bez przenoszenia substancji.

Wskaźnik EP – wielkość określająca roczne obliczeniowe zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej, a w przypadku budynków użyteczności publicznej, zamieszkania zbiorowego, produkcyjnych, gospodarczych i magazynowych – również do oświetlenia wbudowanego, obliczona według przepisów dotyczących metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków.

Współczynnik przenikania ciepła – strumień cieplny w stanie ustalonym podzielony przez pole powierzchni i różnicę temperatury po obu stronach układu.

Maksymalny współczynnik przenikania ciepła – maksymalna dopuszczalna wartość współczynnika przenikania ciepła określona w odniesieniu do określonych wymagań.

Całkowity współczynnik przenikania ciepła liczony wg normy PN-EN ISO 6946 – jest to wartość współczynnika przenikania ciepła obliczony z godnie z PN-EN ISO 6946 wraz z odpowiednimi poprawkami na nieszczelności w warstwie izolacji, łączniki mechaniczne, oraz na odwrócony układ warstw w stropodachach.

Współczynnik przenikania ciepła dla całej ściany - wartość współczynnika przenikania ciepła określona dla przegrody ściennej*.

Współczynnik przenikania ciepła całego budynku – średnia wartość współczynnika przenikania ciepła określona dla wszystkich przegród w budynku*.

Wilgotność względna powietrza - stosunek ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu do ciśnienia pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze.

Obliczeniowy czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej - minimalny dopuszczalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej.

Dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza - grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym jak rozważana warstwa materiału.

Krytyczna wilgotność powierzchni - wilgotność względna przy powierzchni, prowadząca do pogorszenia powierzchni, szczególnie rozwojem pleśni.

Warstwa jednorodna cieplnie - warstwa o stałej grubości, o właściwościach cieplnych jednorodnych lub takich, które można uważać za jednorodne.

2.3.
Historia

Pierwsze polskie normy dotyczące zagadnień izolacyjności cieplnej przegród PN/B-02405 [N1], PN–53/B-02405 [N2], PN–57/B-02405 [N3] pt. „Współczynniki przenikania ciepła k" przedstawiały w sposób ogólny zasady obliczeń współczynnika przenikania ciepła k. Minimalna izolacyjność termiczna odnosiła się do ściany o grubości 2 cegieł [9]. Termoizolacyjność przegród budowlanych w tym czasie traktowana była, jako tzw. „grubość równoważna z cegły". Kolejna norma PN-64/B-03404, bazująca na doświadczeniach badawczych i prowadzonych analizach wprowadziła obligatoryjne maksymalne wartości współczynnika przenikania ciepła na poziomie k =1,0-1,25 kcal/(m²hºC) [N4]. Dodatkowo norma ta obejmowała sprawdzenie temperatury punktu rosy oraz podstawy obliczania mostków cieplnych [N4]. W normie PN-B/74-03404, opublikowanej w połowie lat siedemdziesiątych, pominięto strefy klimatyczne oraz sprawdzenie temperatury punktu rosy. Minimalny współczynnik przenikania ciepła dla przegród budowlanych określono na poziomie k_{maks}= 1,0 kcal/(m²hºC). Oprócz tego podano dodatkowo wartości współczynnika przenikania ciepła k dla istniejących przegród zewnętrznych podlegających przebudowie (ociepleniu) [N5]. W kolejnych krokach zakres zagadnień cieplno-wilgotnościowych zaczął obejmować nowe elementy fizyczne, takie jak np. kondensację pary wodnej w przegrodzie budowlanej, kondensację pary wodnej na wewnętrznej powierzchni przegrody, wielkość powierzchni okien i ich szczelność. Dodatkowo wprowadzono ograniczenia, dotyczące współczynnika przenikania ciepła dla całej ściany $k_{ść}$, oraz dla całego budynku k_B. W latach osiemdziesiątych zaostrzono przepisy wymagań ochrony cieplnej budynków poprzez wprowadzenie normy PN-B/82-02020 [N6]. Norma ta w sposób istotny nakazywała obniżyć projektowaną wartość maksymalną współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych pełnych, które dla ścian wynosiły k_{max} = 0,75 W/(m²·K) [N6]. Wprowadzono także maksymalną wartość współczynnika przenikania ciepła okien i zalecenie ograniczenia powierzchni przegród przezroczystych oraz postawiono wymaganie ograniczenia współczynnika infiltracji powietrza dla okien i drzwi balkonowych.

W kolejnej normie PN-91/B-02020 zaostrzono jeszcze bardziej wartość maksymalną współczynnika przenikania ciepła przegród zewnętrznych. Współczynnik ten dla ścian zewnętrznych wynosił k_{max} = 0,55 W/(m²·K). Dodatkowo wprowadzono obligatoryjne ograniczenia powierzchni przegród przeszklonych. Zmieniono wymagania związane z kondensacją międzywarstwową, wprowadzając dość niejasne dla projektantów przepisy, co do paroprzepuszczalności i związanego z tym układu warstw w przegrodzie [N7].

Wymagania w zakresie oszczędności energii, jako elementu strategii energetycznej państwa, znalazły swoje pierwsze odbicie w rozporządzeniu Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z 1994 r. opublikowane Dz.U nr 10/95 poz. 46 „Warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie" (skrót WT). Wprowadzono wtedy nowe pojęcie wskaźnika E, określającego obliczeniowe zapotrzebowanie energii końcowej budynku w standardowym sezonie grzewczym [9]. Ostateczny uściślony tekst zmian w zakresie powyższego wskaźnika, znajdujemy w Dziale X rozporządzenia z 1997 roku (Dz.U.nr 132. poz. 878), w którym określono jego wartości graniczne. W rozporządzeniu zamieszczono załącznik

pt. „Wymagania izolacyjności cieplnej i inne wymagania związane z oszczędnością energii" zawierające graniczne wartości współczynników przenikania ciepła przez przegrody zewnętrzne k_{max} dla budynków jednorodzinnych, użyteczności publicznej i przemysłowych [2]. Bardzo ważna zmiana przepisów prawnych została opublikowana w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury Dz.U. nr 75 z 15. 06. 2002 r. [3]. W rozporządzeniu tym uściślono treść przepisów przez powołanie się na wymagania określone w załączniku. Współczynnik przenikania ciepła oznaczono symbolem „U" zamiast „k" od roku 1999 zgodnie z normą PN -EN ISO 6946 [N10].

2.4.
Wymagania aktualne

Zagadnienia dotyczące, ogólnie rozumianej, efektywności energetycznej w budownictwie oraz projektowania dla uniknięcia ryzyka wystąpienia pleśni czy też kondensacji pary wodnej zawarte są w podstawowym akcie prawnym dotyczącym zagadnień związanych z budownictwem tj. w Ustawie Prawo Budowlane [8]. W Artykule 5 prawa budowlanego możemy przeczytać, iż *obiekt budowlany jako całość oraz jego poszczególne części, należy [...], projektować i budować w sposób [...] zapewniający spełnienie podstawowych wymagań dotyczących obiektów budowlanych [...] dotyczących, między innymi:*

- *Higieny, zdrowia i środowiska,*
- *Oszczędności energii i izolacyjności cieplnej.*

Aktualne wymagania dotyczące zagadnień oszczędności energii i odpowiedniej izolacyjności termicznej nakazuje wykonanie odpowiedniej charakterystyki energetycznej budynku oraz racjonalizacja użytkowania energii. Sposób sporządzania takiej charakterystyki omawia szczegółowo wdrożona w 2015 r, ustawa „O charakterystyce energetycznej budynków" [6]. Wymóg związany zracjonalnościązużyciaenergiiwbudownictwiedotyczy etapów: projektowania, budowy, użytkowania i utrzymania budynków. Akty wykonawcze do ustawy zawierają szereg wymagań szczegółowych dotyczących zagadnień fizyki cieplnej. Jednym z najważniejszych aktów wykonawczych do ustawy Prawo Budowlane jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [3]. Innym aktem prawnym związanym z zagadnieniami ochrony cieplnej budynków jest Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego [5]. W myśl zapisów rozporządzenie to nakłada na projektanta obowiązek wykazania, że przyjęte w projekcie architektoniczno-budowlanym rozwiązania budowlane i instalacyjne spełniają wymagania dotyczące oszczędności energii zawarte w przepisach techniczno-budowlanych. Dodatkowym wymogiem, w stosunku do budynku ogrzewanego, wentylowanego i klimatyzowanego, jest przedstawienie rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych przegród zewnętrznych wraz z niezbędnymi szczegółami budowlanymi, które mają wpływ na właściwości cieplne i szczelność powietrzną przegród, jeżeli ich odwzorowanie nie było wystarczające na innych rysunkach (np. rzutach lub przekrojach). W przypadku budynków poddawanych termomodernizacji, dla których wykonywany jest audyt energetyczny, stawiane są wymagania dotyczące minimalnej wartości oporu cieplnego „R" przegród po termomodernizacji. Są one zawarte w załączniku nr 1 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego [4].

2.4.1.
Higiena i zdrowie

W zakresie zagadnień cieplno-wilgotnościowych wymagania zawarte są w dziale VIII pt. „Higiena i zdrowie", w dziale X pt. „Oszczędność energii i izolacyjność cieplna" oraz w załączniku nr 2 pt. „Wymagania izolacyjności cieplnej i inne wymagania związane z oszczędnością energii". W zakresie projektowania przegród ściennych w świetle zagadnień cieplno-wilgotnościowych istotnymi wymogami tych wymagań są [7]:

1) nie przekroczenie w pomieszczeniach, określonych w przepisach odrębnych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia wydzielanych przez grunt, materiały budowlane i elementy wyposażenia oraz powstających w trakcie użytkowania zgodnego z przeznaczeniem pomieszczeń,
2) nie dopuszczenie do przedostawania się i rozwoju w pomieszczeniach szkodliwych organizmów i mikroorganizmów,
3) uniemożliwienie nadmiernego zawilgocenia powierzchni i wnętrza przegród w pomieszczeniach, przy zachowaniu odpowiedniej wilgotności względnej powietrza.

Zapisy te przeniesione do prawodawstwa polskiego znalazły swoje odbicie w ustawie Prawo Budowlane [8] oraz w Warunkach Technicznych [3].

Na podstawie zapisów [3] w § 309 czytamy: *budynek powinien być zaprojektowany i wykonany z takich materiałów i wyrobów oraz w taki sposób, aby nie stanowił zagrożenia dla higieny i zdrowia użytkowników lub sąsiadów, w szczególności w wyniku m.in. występowania wilgoci w elementach budowlanych lub na ich powierzchniach oraz niekontrolowanej infiltracji powietrza zewnętrznego.* Budynek

powinien być także zaprojektowany i wykonany w taki sposób, aby opady atmosferyczne, woda w gruncie i na jego powierzchni, woda użytkowana w budynku oraz para wodna w powietrzu w tym budynku nie powodowały zagrożenia zdrowia i higieny użytkowania (§ 315). W paragrafach 315-319 zawarto wymogi dot. m.in. wody opadowej i podciąganej kapilarnie. Z punktu widzenia projektowania przegród budowlanych bardzo ważne wymagania zawarto w paragrafach 321 i 322. Na wewnętrznej powierzchni nieprzezroczystej przegrody zewnętrznej nie może występować kondensacja pary wodnej umożliwiająca rozwój grzybów pleśniowych, a także we wnętrzu przegrody nie może występować narastające w kolejnych latach zawilgocenie spowodowane kondensacją pary wodnej (§ 321).

W celu zachowania powyższego warunku dotyczącego wewnętrznej powierzchni przegrody, w odniesieniu do przegród zewnętrznych budynków mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego, użyteczności publicznej, produkcyjnych, magazynowych i gospodarczych rozwiązania przegród zewnętrznych i ich węzłów konstrukcyjnych, należy je projektować tak, by charakteryzowały się współczynnikiem temperaturowym f_{Rsi} o wartości nie mniejszej niż wymagana wartość krytyczna, obliczona zgodnie z Polską Normą [N8], dotyczącą metody obliczania temperatury powierzchni wewnętrznej koniecznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej. Wymaganą wartość krytyczną współczynnika temperaturowego f_{Rsi} w pomieszczeniach ogrzewanych do temperatury co najmniej 20°C w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej należy określać przy założeniu, że średnia miesięczna wartość wilgotności względnej powietrza wewnętrznego jest równa ϕ = 50%, przy czym dopuszcza się przyjmowanie wymaganej wartości tego współczynnika równej 0,72. Dla mostków cieplnych obliczenia należy wykonać przy zastosowaniu przestrzennego modelu przegrody według normy [N9] dotyczącej obliczania strumieni cieplnych i temperatury powierzchni.



Rys. 2.1.
Zagrzybienie fragmentu ściany zewnętrznej.

Rozporządzenie [3], dopuszcza kondensację pary wodnej wewnątrz przegrody w okresie zimowym, o ile struktura przegrody umożliwi wyparowanie kondensatu w okresie letnim i nie nastąpi przy tym degradacja materiałów budowlanych przegrody na skutek tej kondensacji.

Projektując przegrody budowlane należy pamiętać, aby rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne zewnętrznych przegród budynku, warunki cieplno-wilgotnościowe, a także intensywność wymiany powietrza w pomieszczeniach, uniemożliwiały powstanie zagrzybienia. Do budowy przegród budowlanych należy stosować materiały, wyroby i elementy budowlane odporne lub uodpornione na zagrzybienie i inne formy biodegradacji, odpowiednio do stopnia zagrożenia korozją biologiczną (§ 322) [3].

2.4.2.
Oszczędność energii i izolacyjności termiczna

W aspekcie oszczędności energii i izolacyjności termicznej budynek i jego instalacje ogrzewcze, wentylacyjne i klimatyzacyjne, ciepłej wody użytkowej, a w przypadku budynku użyteczności publicznej, zamieszkania zbiorowego, produkcyjnych, gospodarczych i magazynowych – również oświetlenia

wbudowanego, powinny być zaprojektowane i wykonane w sposób, zapewniający spełnienie następujących wymagań minimalnych (§ 328) [3]:

1) wartość wskaźnika EP [kWh/(m²rok)] określającego roczne obliczeniowe zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej, a w przypadku budynków użyteczności publicznej, zamieszkania zbiorowego, produkcyjnych, gospodarczych i magazynowych – również do oświetlenia wbudowanego, obliczona według przepisów dotyczących metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków, jest mniejsza od wartości obliczonej zgodnie ze wzorem, o którym mowa w § 329 ust. 1 lub 3, przy uwzględnieniu cząstkowych maksymalnych wartości wskaźnika EP, o których mowa w § 329 ust. 2;
2) przegrody oraz wyposażenie techniczne budynku odpowiadają przynajmniej wymaganiom izolacyjności cieplnej określonym w załączniku nr 2 do rozporządzenia [3] oraz powierzchnia okien odpowiada wymaganiom określonym w pkt 2.1. załącznika nr 2 do rozporządzenia [3].

W przypadku budynku podlegającego przebudowie, jeżeli przegrody oraz wyposażenie techniczne budynku podlegające przebudowie odpowiadają przynajmniej wymaganiom izolacyjności cieplnej określonym w załączniku nr 2 do rozporządzenia [3] oraz powierzchnia okien odpowiada wymaganiom określonym w pkt 2.1. załącznika nr 2 do rozporządzenia [3] wymagania minimalne uznaje się za spełnione dla budynku. Wartości współczynnika przenikania ciepła U_C ścian, stropów i stropodachów dla wszystkich rodzajów budynków, uwzględniające poprawki ze względu na pustki powietrzne w warstwie izolacji, łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacyjną oraz opady na dach o odwróconym układzie warstw, obliczone zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi obliczania oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła oraz przenoszenia ciepła przez grunt, nie mogą być większe niż wartości $U_{C(max)}$ określone w rozporządzeniu [3]. Przykładowo dla ścian zewnętrznych przy $t_i \geq 16°C$ współczynnik przenikania ciepła wynosi $U_{C(max)} = 0{,}25$ [W/(m²·K)] (od 01.01.2014 do 31.12.2016), $U_{C(max)} = 0{,}23$ [W/(m²·K)] od 01.01.2017 do 31.12.2020), $U_{C(max)} = 0{,}20$ [W/(m²·K)] (od 01.01.2021).

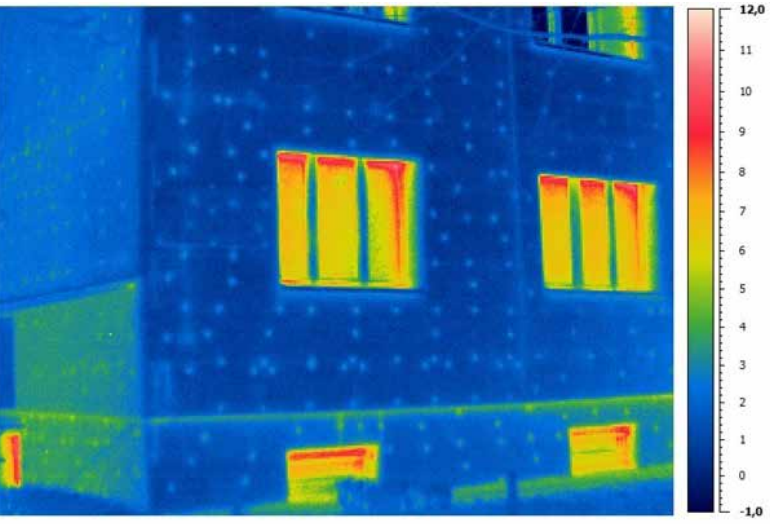
2.4.3.
Szczelność na przenikanie powietrza

Wymagania w zakresie szczelności powietrznej zawarte są w załączniku nr 2 do rozporządzenia [3]. W budynkach takich jak budynki mieszkalne, zamieszkania zbiorowego, użyteczności publicznej i produkcyjnym przegrody zewnętrzne nieprzezroczyste, złącza między przegrodami i częściami przegród (między innymi połączenie stropodachów lub dachów ze ścianami zewnętrznymi) przejścia elementów instalacji (takie jak kanały instalacji wentylacyjnej i spalinowej przez przegrody zewnętrzne) oraz połączenia okien z ościeżami należy projektować i wykonywać pod kątem osiągnięcia ich całkowitej szczelności na przenikanie powietrza. Zalecana (nie wymagana!), szczelność powietrzna budynków wynosi:

- w budynkach z wentylacją grawitacyjną lub wentylacją hybrydową - $n_{50} < 3{,}0$ 1/h,
- w budynkach z wentylacją mechaniczną lub klimatyzacją - $n_{50} < 1{,}5$ 1/h.

Dodatkowo zalecane jest, by po zakończeniu budowy budynek mieszkalny, zamieszkania zbiorowego, użyteczności publicznej i produkcyjny został poddany próbie szczelności przeprowadzonej zgodnie z Polską Normą dotyczącą określania przepuszczalności powietrznej budynków w celu uzyskania zalecanej szczelności budynków.

Wymagana przez NFOŚiGW zgodnie z programem [1] szczelność powietrzna budynków powinna wynosić dla budynków NF15 - $n_{50} < 0{,}6$ 1/h; dla budynków NF40 - $n_{50} < 1{,}0$ 1/h.



Rys. 2.2.
Rozkład pola temperatury na zewnętrznej powierzchni budynku.



Rys. 2.3.
Urządzenie do pomiaru szczelności powietrznej budynków.

2.5.
Literatura

[1] *Program priorytetowy. Poprawa efektywności energetycznej. Część 2) Dopłaty do kredytów na budowę domów energooszczędnych. Załącznik nr 3 do Programu Priorytetowego pt. Wytyczne określające podstawowe wymogi niezbędne do osiągnięcia oczekiwanych standardów energetycznych dla budynków mieszkalnych oraz sposób* weryfikacji projektów i sprawdzenia wykonanych domów energooszczędnych. NFOŚiGW. Warszawa 2015.
[2] Rozporządzenie Prezydenta Rzeczpospolitej z dn. 16.02.1928 r. *Prawo budowlane i zabudowanie osiedli, wraz z późniejszymi zmianami.*
[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki ich usytuowanie.* Dz. U. 2002 poz. 75 wraz z późniejszymi zmianami.
[4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 marca 2009 r. *w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego.* Dz.U. 2009 nr 43 poz. 346 wraz z późniejszymi zmianami.
[5] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. *w sprawie szczegółowego zakresu i formy projektu budowlanego.* Dz.U. 2012 poz. 462 wraz z późniejszymi zmianami.
[6] Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. *o charakterystyce energetycznej budynków.*
Dz. U. z 2014 r. poz. 1200 wraz z późniejszymi zmianami.
[7] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) Nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające Dyrektywę 89/106/EWG. Dziennik Urzędowy UE, 2011 r.
[8] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. *Prawo budowlane.* Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414 wraz z późniejszymi zmianami.
[9] Krause P., Steidl T. *Uszkodzenia i naprawa przegród budowlanych w aspekcie izolacyjności termicznej*. Maszynopis. Praca niepublikowana. Gliwice 2016.
[N1] PN/B-02405. *Współczynniki przenikania ciepła k.*
[N2] PN–53/B-02405. *Współczynniki przenikania ciepła k*.
[N3] PN–57/B-02405. *Współczynniki przenikania ciepła k.*
[N4] PN-64/B-03404. *Współczynniki przenikania ciepła k dla przegród budowlanych*.
[N5] PN-B/74-03404. *Współczynniki przenikania ciepła k dla przegród budowlanych.*
[N6] PN-82/B-02020. *Ochrona cieplna budynków.*
[N7] PN-91/B-02020:1991. *Ochrona cieplna budynków - Wymagania i obliczenia.*
[N8] PN-EN-ISO 13877:2007. *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej – Metody obliczania.*
[N9] PN EN ISO10211:2008. *Mostki cieplne w budynkach. Strumień cieplny i temperatura powierzchni. Ogólne metody obliczania.*
[N10] PN-EN ISO 6946:2008. *Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania.*
[N11] PN-EN ISO 9836:2015. *Właściwości użytkowe w budownictwie Określanie i obliczanie wskaźników powierzchniowych i kubaturowych.*

3. IZOLACYJNOŚĆ TERMICZNA ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

3.1.
Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
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)
ε	emisyjność powierzchni do półprzestrzeni	
θ	temperatura w skali Celsjusza	°C
θ_{si}	temperatura powierzchni wewnętrznej	°C
θ_i , t_i	temperatura wewnętrzna	°C
θ_e , t_e	temperatura zewnętrzna	°C
$\theta_{si} - \theta_{se}$	różnica temperatur powierzchni przegrody od strony napływu i odpływu ciepła	K
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
$\lambda_{10,dry}$	współczynnik przewodzenia ciepła zmierzony w stanie suchym, w średniej temperaturze 10°C	W/(m·K)
λ_D	deklarowany współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
λ_{ob}	obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
ρ_{ij}	gęstość materiału warstwy i-tej w elemencie j-tym	kg/m^3
σ	stała Stefana-Boltzmanna	5,67 x 10^{-8} W/(m^2·K^4)
τ	czas stygnięcia	h
A	pole powierzchni	m^2
$A_{e,k}$	pole powierzchni elementu k między przestrzenią nieogrzewaną i środowiskiem zewnętrznym	m^2
A_i	całkowite pole powierzchni wszystkich elementów między środowiskiem wewnętrznym i nieogrzewaną przestrzenią	m^2
A_{ij}	pole powierzchni j-tego elementu w budynku	m^2
c_{ij}	ciepło właściwe materiału warstwy i-tej w elemencie j-tym	J/(kg·K)
C_m	wewnętrzna pojemność cieplna strefy budynku lub całego budynku	J/K

d	grubość	m
d_{ij}	grubość warstwy i-tej w elemencie j-tym	m
F_T	temperaturowy czynnik konwersji	-
F_M	wilgotnościowy czynnik konwersji	-
F_a	czynnik konwersji zależny od czasu od wyprodukowania materiału	-
f_u	współczynnik konwersji ze względu na wilgotność materiału	-
f_a	współczynnik konwersji ze względu na zmianę parametru λ w czasie (starzenie)	-
h	współczynnik przenoszenia ciepła na powierzchni	$W/(m^2 \cdot K)$
h_c	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję	$W/(m^2 \cdot K)$
h_r	współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie	$W/(m^2 \cdot K)$
h_{r0}	współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie ciała czarnego	$W/(m^2 \cdot K)$
h_i , α_i	współczynnik przejmowania ciepła-powierzchnia wewnętrzna	$W/(m^2 \cdot K)$
h_e , α_e	współczynnik przejmowania ciepła-powierzchnia zewnętrzna	$W/(m^2 \cdot K)$
n	krotność wentylacji przestrzeni nieogrzewanej, w liczbie wymian powietrza na godzinę	h^{-1}
q	gęstość strumienia ciepła	W/m^2
R	obliczeniowy opór cieplny (powierzchnia do powierzchni)	$m^2 \cdot K/W$
R_g	opór cieplny przestrzeni powietrznej	$m^2 \cdot K/W$
R_n	Suma oporów wszystkich warstw aż do warstwy n liczonych od zewnątrz wraz z oporem przejmowania ciepła R_{si}	$m^2 \cdot K/W$
R_{se}	opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej	$m^2 \cdot K/W$
R_{si}	opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	$m^2 \cdot K/W$
R_T	całkowity opór cieplny (środowisko do środowiska)	$m^2 \cdot K/W$
R'_T	kres górny całkowitego oporu cieplnego	$m^2 \cdot K/W$
R''_T	kres dolny całkowitego oporu cieplnego	$m^2 \cdot K/W$
R_{Th}	całkowity opór cieplny komponentu z pominięciem wszystkich mostków cieplnych	$m^2 \cdot K/W$
$R_{T,u}$	całkowity opór cieplny z niewentylowaną warstwą powietrza	$m^2 \cdot K/W$
$R_{T,v}$	całkowity opór cieplny z dobrze wentylowaną warstwą powietrza	$m^2 \cdot K/W$
R_u	opór cieplny przestrzeni nieogrzewanej	$m^2 \cdot K/W$
T_m	średnia temperatura termodynamiczna powierzchni i jej otoczenia	K
t_o	temperatura początkowa ciała	K
U	współczynnik przenikania ciepła komponentu lub elementu	$W/(m^2 \cdot K)$
$U_{e,k}$	współczynnik przenikania ciepła elementu k między przestrzenią nieogrzewaną i środowiskiem zewnętrznym	$W/(m^2 \cdot K)$
v	prędkość wiatru w pobliżu powierzchni	m/s
V	objętość przestrzeni nieogrzewanej	m^3

3.2.
Terminy i definicje

Całkowity opór cieplny - jest to suma oporów cieplnych wszystkich warstw materiału przegrody wraz z oporami przejmowania ciepła

Ciepło - jest formą przekazywania (przenoszenia) części energii (nazywanej energią cieplną) przez granice układu (między ciałami) wskutek istnienia (między nimi) skończonej różnicy temperatur, ale bez przenoszenia substancji. Ciepło nie jest formą energii, lecz sposobem jej przenoszenia, które bez doprowadzenia pracy do układu, zawsze transportowane jest od źródła ciepła o wyższej temperaturze do źródła ciepła o niższej temperaturze.

Ciepło właściwe - jest to ilość ciepła potrzebna, przy stałym ciśnieniu, do podwyższenia temperatury jednego kilograma masy danego materiału o jeden kelwin.

Deklarowana wartość cieplna - oczekiwana wartość właściwości cieplnej materiału lub wyrobu budowlanego, oceniona na podstawie danych pomiarowych w warunkach odniesienia temperatury i wilgotności, podana dla określonej frakcji i poziomu ufności i odpowiadająca uzasadnionemu oczekiwanemu okresowi przydatności technicznej w warunkach normalnych.

Ekwiwalentny współczynnik przewodzenia ciepła - wartość, którą oblicza się dzieląc grubość danego elementu murowego, lub murowego złożonego, przez jego opór cieplny.

Energia cieplna - nazwa potoczna (nietechniczna), umownie jest taką formą energii, która może być przekazywana z jednego ciała na inne w przypadku istnienia różnicy temperatur tych ciał, lecz bez przenoszenia substancji.

Gęstość pozorna - jest to masa przypadająca na jeden metr sześcienny objętości danego ciała.

Gęstość strumienia ciepła - jest to ilość ciepła przepływająca z jednego ośrodka do drugiego w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni.

Ilość ciepła - ilość energii przeniesionej bez wykonania pracy mechanicznej.

Obliczeniowa wartość cieplna - wartość właściwości cieplnej materiału budowlanego lub wyrobu w określonych warunkach zewnętrznych lub wewnętrznych, które mogą być uznane za typowe dla właściwości użytkowych tego materiału lub wyrobu, w przypadku, gdy został on zastosowany w komponencie budowlanym.

Obliczeniowy opór cieplny - wartość oporu cieplnego wyrobu budowlanego w określonych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych, którą można uważać za typową właściwość użytkową tego wyrobu po wbudowaniu go w komponent budowlany.

Obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła - wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału lub wyrobu budowlanego w określonych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych, którą można uważać za typową właściwość użytkową tego materiału lub wyrobu po wbudowaniu go w komponent budowlany.

Okres obliczeniowy - okres rozpatrywany do obliczeń strat i zysków ciepła. Uwaga: w metodach uproszczonych okresem obliczeniowym jest miesiąc a w metodach dokładnych godzina. Dla budynków mieszkalnych obliczenia mogą być także przeprowadzane dla sezonu grzewczego.

Opór cieplny przegrody - jest sumą wszystkich oporów cieplnych warstw materiału przegrody.

Opór cieplny warstwy materiału - jest to stosunek grubości warstwy do wartości współczynnika przewodzenia ciepła tego materiału.

Opór przejmowania ciepła - jest to odwrotność współczynnika przejmowania ciepła.

Pole temperatury - jest to układ wartości temperatur w przestrzeni, rozpatrywany w tej samej chwili. Pole temperatury nazywamy ustalonym jeżeli układ temperatur nie zmienia się w czasie i nazywamy nieustalonym jeśli jest zmienny w czasie.

Przestrzeń nieogrzewana - pomieszczenie lub przestrzeń zamknięta nie będące częścią przestrzeni ogrzewanej.

Przestrzeń ogrzewana - pomieszczenie lub przestrzeń zamknięta ogrzewane do wartości temperatury obliczeniowej.

Straty ciepła przez przenikanie - straty ciepła przez przenikanie przez obudowę budynku oraz przez grunt.

Straty ciepła w budynku - ilość ciepła przenikającego ze strefy ogrzewanej do środowiska zewnętrznego na skutek przenikania lub wentylacji w określonym przedziale czasu.

Strefa ogrzewana - część przestrzeni ogrzewanej z założoną temperaturą wymaganą, w ramach której zakłada się, że lokalne różnice w wartościach temperatury wewnętrznej są pomijane.

Strumień cieplny - ilość ciepła przepływająca do lub z układu, podzielona przez czas.

Warstwa jednorodna cieplnie - warstwa o stałej grubości, o właściwościach cieplnych, które można uważać za jednorodne.

Warunki referencyjne - zestaw warunków identyfikujących stan równowagi przyjęty za podstawę, do której są odnoszone wartości cieplne wyrobów i materiałów budowlanych.

Wewnętrzne zyski ciepła - ciepło wytwarzane wewnątrz budynku przez mieszkańców (ciepło jawne metabolizmu) oraz pochodzące ze źródeł innych niż instalacja grzewcza lub instalacja ciepłej wody użytkowej (oświetlenia, urządzenia, wyposażenie biur itp.).

Współczynnik przejmowania ciepła - jest to ilość strumienia ciepła przepływającego w warunkach ustalonych z ośrodka gazowego lub cieczy przez 1 m^2 powierzchni przegrody lub też przepływające-

go z powierzchni przegrody do ośrodka gazowego lub cieczy przy różnicy temperatur powierzchni przegrody i ośrodka równej 1 K.

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 strat ciepła - współczynnik przenikania ciepła z przestrzeni ogrzewanej do środowiska zewnętrznego.

Zużycie ciepła - ciepło, jakie powinno być dostarczone do przestrzeni ogrzewanej przez idealny system grzewczy w celu utrzymania wymaganej temperatury w danym przedziale czasu. Uwaga: zużycie ciepła może uwzględniać dodatkowe straty ciepła z budynku wynikające z nierównomiernego rozkładu temperatury i braku idealnego sterowania temperaturą, jeżeli są one uwzględnione przez zwiększenie wartości wymaganej temperatury wewnętrznej, a nie są uwzględnianie w stratach ciepła systemu grzewczego.

Zużycie energii do ogrzewania - ilość energii cieplnej dostarczonej do systemu grzewczego w celu pokrycia zużycia ciepła.

Zysk ciepła - ciepło wytwarzane wewnątrz lub przenikające do przestrzeni ogrzewanej ze źródeł innych niż instalacja grzewcza lub ciepłej wody użytkowej. Uwaga: uwzględnia się zyski wewnętrzne i zyski od promieniowania słonecznego.

Zyski ciepła od promieniowania słonecznego - ciepło dostarczane przez promieniowanie słoneczne docierające do wnętrza budynku przez okna, pasywne systemy słoneczne takie jak szklarnie, izolacje transparentne lub ściany słoneczne. Uwaga: systemy aktywne pozyskiwania energii promieniowania słonecznego są uwzględniane jako część systemu grzewczego.

3.3.
Charakterystyki termiczne przegród ściennych

Wartości współczynnika przenikania ciepła U_C ścian dla wszystkich rodzajów budynków, uwzględniający poprawki ze względu na pustki powietrzne w warstwie izolacji, łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacyjną oblicza się zgodnie z PN-EN ISO 6946 [N2]. W normie tej podano metodę obliczania oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła komponentów budowlanych i elementów budynku, z wyjątkiem drzwi, okien i innych komponentów szklonych, komponentów, przez które odbywa się przenoszenie ciepła do gruntu oraz komponentów, przez które przewiduje się nawiew powietrza. Metoda obliczania oparta jest na odpowiednich wartościach obliczeniowych współczynnika przewodzenia ciepła lub wartościach obliczeniowych oporu cieplnego materiałów i wyrobów. Metodę stosuje do komponentów i elementów zawierających zarówno warstwy jednorodne jak i takich, które zawierają warstwy niejednorodne cieplnie oraz takich, które mogą zawierać warstwy powietrza. Główna zasada metody obliczania polega na określeniu oporu cieplnego dla każdej jednorodnej cieplnie części komponentu a następnie zsumowaniu tych poszczególnych oporów, otrzymując w ten sposób całkowity opór cieplny komponentu łącznie z oporami przejmowania ciepła na powierzchni.

Opór cieplny warstw jednorodnych

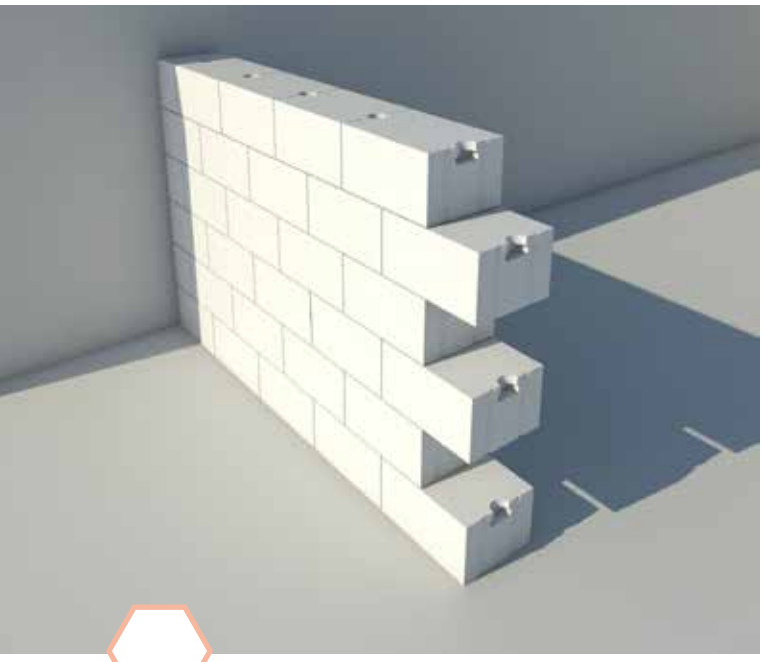
Obliczeniowe charakterystyki cieplne można wyrażać albo jako obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła, albo jako obliczeniowy opór cieplny. Jeżeli podany jest współczynnik przewodzenia ciepła opór cieplny warstwy wyrażamy wzorem:

$$R = \frac{d}{\lambda} \qquad (3.1)$$

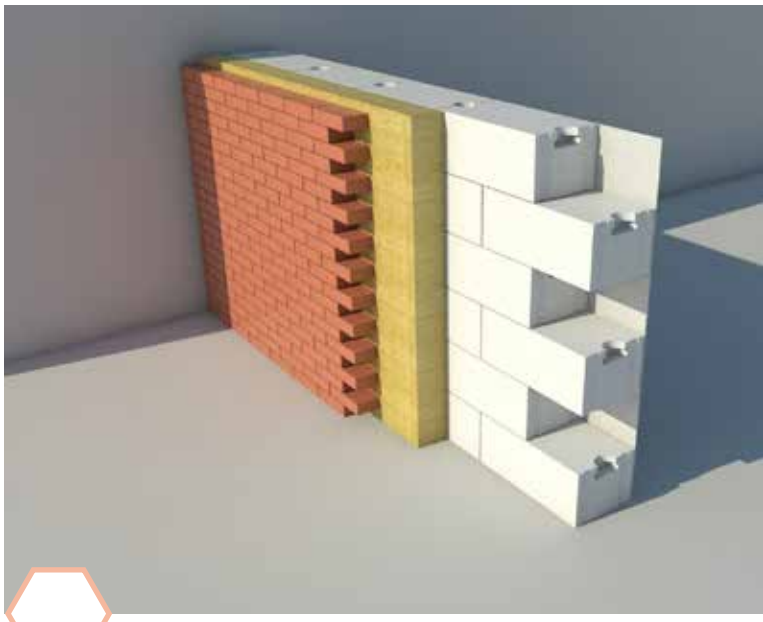
gdzie:

d – grubość warstwy materiału w komponencie,
λ – obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła materiału obliczony zgodnie z ISO 10456 [N3].

Grubość warstwy materiału w komponencie d, może różnić się od grubości nominalnej, (np. gdy materiał ściśliwy jest wbudowany w stanie ściśniętym, d jest mniejsze niż grubość nominalna). W miarę potrzeby grubość d może uwzględniać odchyłki grubości (np., gdy są ujemne). Wartości oporu cieplnego stosowane w obliczeniach pośrednich należy obliczać z dokładnością, co najmniej do trzech cyfr znaczących, zgodnie z zapisem w normie [N2]. Końcową wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/(m^{2}K)], należy podawać z dokładności do dwóch znaczących cyfr stosując zwykłe zasady zaokrąglania.



Rys. 3.1.
Przykładowa ściana jednowarstwowa.



Rys. 3.2.
Przykładowa ściana wielowarstwowa z warstw jednorodnych.

Całkowity opór cieplny komponentu składającego się z warstw jednorodnych

Całkowity opór cieplny R_T, płaskiego komponentu budowlanego składającego się z warstw jednorodnych cieplnie w kierunku prostopadłym do strumienia ciepła należy obliczać z równania

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + ... + R_{se} \qquad (3.2)$$

gdzie:

R_{si} – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni,

$R_1, R_2, ..., R_n$ – obliczeniowy opór cieplny każdej warstwy,

R_{se} – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni.

Jeżeli oblicza się opór cieplny wewnętrznych komponentów budowlanych (ścian działowych itp.) lub komponentów między środowiskiem wewnętrznym i przestrzenią nieogrzewaną, R_{si} stosuje się dla obydwu stron. Jeśli całkowity opór cieplny podaje się jako wynik końcowy, należy go zaokrąglić do dwóch cyfr znaczących.

Całkowity opór cieplny komponentu składającego się z warstw cieplnie jednorodnych i niejednorodnych

Całkowity opór cieplny R_T komponentu składającego się z warstw cieplnie jednorodnych i niejednorodnych równoległych do powierzchni oblicza się jako średnią arytmetyczną górnego i dolnego kresu oporu cieplnego według równania:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \qquad (3.3)$$

gdzie:

R'_T – kres górny całkowitego oporu cieplnego;

R''_T – kres dolny całkowitego oporu cieplnego.

Jeśli jako wynik końcowy przedstawia się całkowity opór cieplny, należy go zaokrąglić do dwóch miejsc znaczących. Kres górny całkowitego oporu cieplnego R'_T, określa się przy założeniu jednowymiarowego strumienia ciepła prostopadłego do powierzchni komponentu. Jest on podany poniższym wyrażeniem

$$\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + ... + \frac{f_q}{R_{Tq}} \qquad (3.4)$$

gdzie:

$R_{Ta}, R_{Tb}, ..., R_{Tq}$, – całkowite opory cieplne od środowiska do środowiska każdej sekcji,

$f_a, f_b, ... f_q$ – względne pola powierzchni każdej sekcji.

Przy czym $f_a + f_b + \ldots + f_q = 1$. Kres dolny całkowitego oporu cieplnego R''_T określa się, zakładając, że wszystkie powierzchnie równoległe do powierzchni komponentu są izotermiczne i określa się go z równania:

$$R''_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \ldots + R_n + R_{se} \quad (3.5)$$

Przy czym równoważny opór cieplny R_j każdej warstwy niejednorodnej cieplnie, oblicza się, stosując równanie:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_a}{R_{ja}} + \frac{f_b}{R_{jb}} + \ldots + \frac{f_q}{R_{jq}} \quad (3.6)$$

Maksymalny błąd względny e, obliczony w procentach, z zastosowaniem tego przybliżenia wynosi

$$e = \frac{R'_T - R''_T}{2R_T} x100\% \quad (3.7)$$

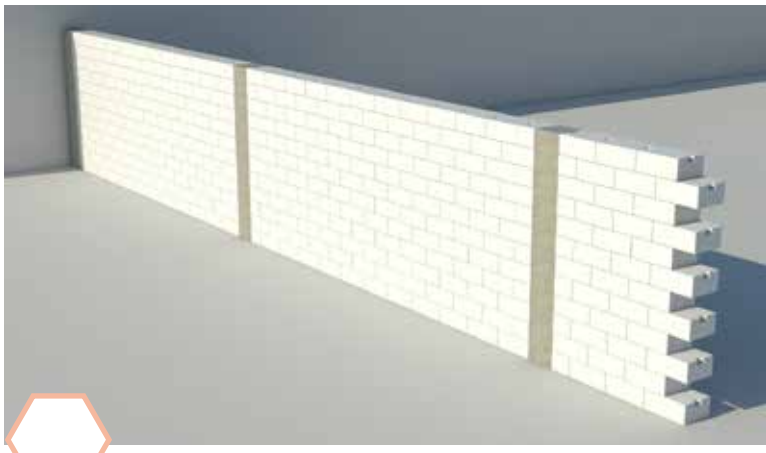
Niniejszą metodę szacowania maksymalnego błędu względnego stosuje się przede wszystkim wtedy, gdy przy obliczaniu współczynnika przenikania ciepła wymagane jest uzyskanie określonej dokładności.

Opory przejmowania ciepła

W celu obliczenia całkowitego oporu cieplnego komponentu budowlanego niezbędna jest znajomość oporów przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody R_{si} a także na jej zewnętrznej powierzchni R_{se}. Jeżeli nie ma dokładnych informacji o warunkach brzegowych, do powierzchni płaskich stosuje się wartości podane w Tablicy 3.1. W normie [N2] jest zapis, iż podane wartości są wartościami obliczeniowymi.

Tablica 3.1.
Opory przejmowania ciepła wg [N2]

Opór przejmowania ciepła [m²·K/W]	Kierunek strumienia ciepła		
	W górę	Poziomy	W dół
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04



Rys. 3.3.
Ściana z warstwami niejednorodnymi cieplnie.

W przypadku ścian warstwowych z pustką powietrzną istnieje konieczność wykonania obliczeń oporu cieplnego warstw powietrza. Tego typu warstwy powietrza, ze względu na rozwiązania projektowe mogą być niewentylowane, słabo wentylowane lub dobrze wentylowane. Niewentylowaną warstwą powietrza jest taka warstwa, w której nie ma wyraźnego zapewnienia przepływu powietrza. Warstwę powietrza bez izolacji cieplnej pomiędzy nią a środowiskiem zewnętrznym uznaje się za niewentylowaną a występujące otwory do środowiska zewnętrznego nie są przewidziane do stałego przepływu powietrza i ich pole powierzchni nie przekracza 500 mm² na metr długości pionowych warstw powietrza. Obliczeniowe wartości oporu cieplnego niewentylowanych warstw powietrza podano w normie [N2]. Wartości pośrednie, których nie ma w poniższej tablicy można otrzymać przez interpolację liniową. Wartości dotyczące kierunku poziomego stosuje się w przypadku kierunków strumienia ciepła odchylonego o ±30° od płaszczyzny poziomej. Należy dodać, że otwory drenażowe (odwadniające) w postaci otwartych spoin pionowych w zewnętrznej warstwie murów szczelinowych nie uważa się wg normy [N2] za otwory wentylacyjne. Opór cieplny niewentylowanych warstw powietrza o wysokiej emisyjności powierzchni wg [N2] wynosi maksymalnie 0,23 m²·K/W. Pod pojęciem słabo wentylowanej warstwy powietrza rozumie się taką warstwę, w której jest możliwy ograniczony przepływ powietrza ze środowiska zewnętrznego przez otwory o polu powierzchni A_V większym od 500 mm² ale nie przekraczającym 1 500 mm² na metr długości dla pionowych warstw powietrza. Efekt wentylacji zależy od rozmiaru i rozmieszczenia otworów wentylacyjnych. W przybliżeniu, całkowity opór cieplny komponentu o słabo wentylowanej warstwie powietrza można obliczać jako średnią ważoną:

$$R_T = \frac{1500 - A_v}{1000} R_{T,u} + \frac{A_v - 500}{1000} R_{T,v} \qquad (3.8)$$

gdzie:

$R_{T,u}$ – całkowity opór cieplny z niewentylowaną warstwą powietrza;

$R_{T,v}$ – całkowity opór cieplny z dobrze wentylowaną warstwą powietrza.

Z przypadkiem dobrze wentylowanej warstwy powietrza mamy do czynienia, gdy pole powierzchni otworów między nią a środowiskiem zewnętrznym jest równe lub przekracza: 1 500 mm^2 na metr długości w odniesieniu do pionowych warstw powietrza. Całkowity opór cieplny komponentu budowlanego zawierającego dobrze wentylowaną warstwę powietrza należy obliczyć, pomijając opór cieplny warstwy powietrza i wszystkich innych warstw między warstwą powietrza a środowiskiem zewnętrznym oraz dodając zewnętrzny opór przejmowania ciepła, odpowiadający powietrzu nieruchomemu. Alternatywnie może być zastosowana odpowiednia wartość R_{si}.

Gdy do budynku przylega przestrzeń nieogrzewana (np. nieogrzewany garaż), współczynnik przenikania ciepła między środowiskiem wewnętrznym i zewnętrznym można określić, uznając nieogrzewaną przestrzeń wraz z komponentami jej konstrukcji zewnętrznej za dodatkową warstwę jednorodną o oporze cieplnym R_U. Gdy wszystkie elementy między środowiskiem wewnętrznym i przestrzenią nieogrzewaną mają ten sam współczynnik przenikania ciepła, R_U jest dane równaniem:

$$R_U = \frac{A_i}{\sum (A_{e,k} U_{e,k}) + 0{,}33 x n V} \qquad (3.9)$$

gdzie:

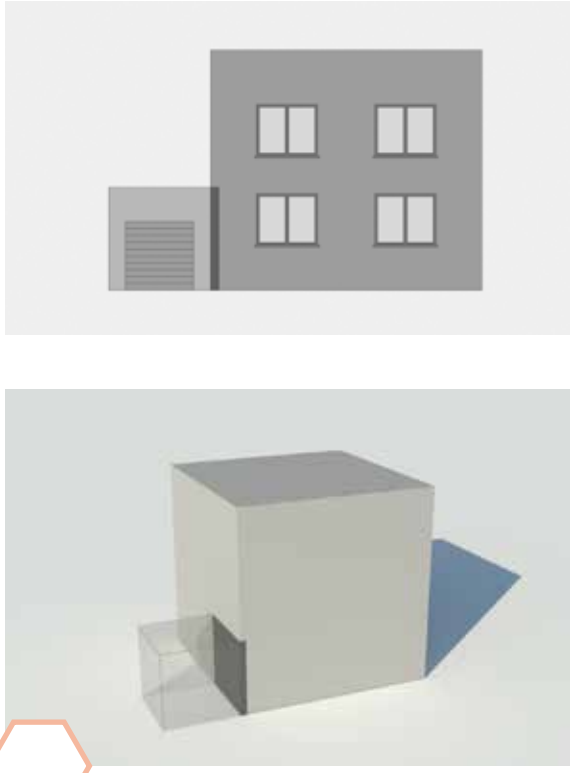
A_i – całkowite pole powierzchni wszystkich elementów między środowiskiem wewnętrznym i nieogrzewaną przestrzenią, w m^2;

$A_{e,k}$ – pole powierzchni elementu k między przestrzenią nieogrzewaną i środowiskiem zewnętrznym, w m^2;

$U_{e,k}$ – współczynnik przenikania ciepła elementu k między przestrzenią nieogrzewaną i środowiskiem zewnętrznym, w [W/(m^2·K)];

n – krotność wentylacji przestrzeni nieogrzewanej, w liczbie wymian powietrza na godzinę;

V – objętość przestrzeni nieogrzewanej, w m^3.



Rys. 3.4.
Ściana oddzielająca przestrzeń ogrzewaną od nieogrzewanej.

Gdy detale konstrukcji elementów zewnętrznych przestrzeni nieogrzewanej nie są znane, zaleca się wartości $U_{e,k}$=2 W/(m^2·K) oraz n=3 wymiany powietrza na godzinę. W przypadku, gdy między środowiskiem wewnętrznym i nieogrzewaną przestrzenią jest więcej niż jeden komponent, R_u uwzględnia się w obliczeniach współczynnika przenikania ciepła każdego takiego komponentu.

Współczynnik przenikania ciepła

Wartość współczynnika przenikania ciepła, należy zaokrąglić do dwóch cyfr znaczących. Należy pamiętać, aby zawsze podawać informację o danych wejściowych zastosowanych do obliczania. Współczynnik przenikania ciepła przegrody budowlanej wyrażony jest wzorem:

$$U = \frac{1}{R_T} \qquad (3.10)$$

gdzie:

R_T – całkowity opór cieplny (środowisko do środowiska).

Zgodnie z wymogami normy [N2] wartości współczynnika przenikania ciepła należy przedstawiać uwzględniając m.in. poprawki ze względu na

pustki powietrzne w warstwie izolacji oraz łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacyjną.

Do współczynnika przenikania ciepła obliczonego za pomocą wzoru (3.11) należy stosować poprawki z uwagi na:

- pustki powietrzne w warstwie izolacji;
- łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacyjną.

Współczynnik przenikania ciepła U_c uwzględniający poprawki uzyskuje się przez dodanie członu korekcyjnego ΔU

$$U_c = U + \Delta U \tag{3.11}$$

gdzie:
U – współczynnik przenikania ciepła,
ΔU – człon korekcyjny.

Człon korekcyjny określa równanie

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \tag{3.12}$$

gdzie:
ΔU_g – poprawka z uwagi na pustki powietrzne;
ΔU_f – poprawka z uwagi na łączniki mechaniczne;
ΔU_r – poprawka z uwagi na dach o odwróconym układzie warstw.

W przypadku obliczeń ścian zewnętrznych normatywna poprawka z uwagi na dach o odwróconym układzie warstw nie jest uwzględniana. W załączniku normy [N2] wyrażenie „pustki powietrzne" jest stosowane jako termin zasadniczy w odniesieniu do przestrzeni powietrznych w izolacji lub między izolacją i przylegającą konstrukcją, która istnieje w rzeczywistej konstrukcji, ale nie jest przedstawiona na szkicach. Mogą być one podzielone na dwie główne kategorie:

- szczeliny między arkuszami izolacyjnymi, płytami lub matami, lub między izolacją i elementami konstrukcji, w kierunku strumienia ciepła;
- wnęki w izolacji lub między izolacją i konstrukcją, prostopadłe do kierunku strumienia ciepła.

Pustki powietrzne mogą zwiększać współczynnik przenikania ciepła komponentu przez zwiększenie przenoszenia ciepła przez promieniowanie i konwekcję: wielkość zwiększenia zależy od rodzaju, orientacji i usytuowania pustek powietrznych. Poprawkę stosuje się jako dodatek do współczynnika przenikania ciepła wyrażony jako ΔU_g. Szczeliny powietrzne są spowodowane małymi zmianami wymiarów wyrobu izolacyjnego (odchyłki wymiarów), zmianami od wymaganych rozmiarów podczas cięcia i instalacji oraz wynikają z odchyłek wymiarów towarzyszących samej konstrukcji oraz jej nieregularności. Jedynie szczeliny przechodzące przez całą grubość izolacji ze strony ciepłej na zimną powodują zwiększenie przenikania tak, że poprawka jest uzasadniona i zasadniczo jest tylko poprawką średnią. Instalowanie izolacji w więcej niż jednej warstwie ze spoinami przestawionymi usuwa konieczność poprawki. Wnęki są spowodowane powierzchniami niepłaskimi w obrębie konstrukcji: izolacja jest zbyt sztywna, zbyt mało elastyczna lub zbyt mało ściśliwa, aby wypełnić ją całkowicie. Nieregularności takie jak grudki zaprawy, które działają jak przekładki tworzące przestrzenie powietrzne lub przestrzenie powietrzne między konstrukcją i izolacją, wywołują ten sam efekt. Gdy wnęki są nieciągłe (brak komunikacji z innymi wnękami, szczelinami powietrznymi lub wewnętrznym i zewnętrznym środowiskiem), stosowana jest jedynie średnia poprawka. Dla obu typów pustek powietrznych porównanie obliczenia i pomiaru pokazuje dobrą zgodność wyników. Jeżeli dwa typy pustek powietrznych występują łącznie, dodatkowe straty ciepła mogą wynikać z powodu przenoszenia masy, co wymaga zastosowania większej poprawki. W celu uproszczenia procedury poprawki, jako podstawę do poprawki stosuje się sposób instalowania izolacji.

Rozróżnia się trzy poziomy poprawek, które zestawiono w tablicy 3.2.

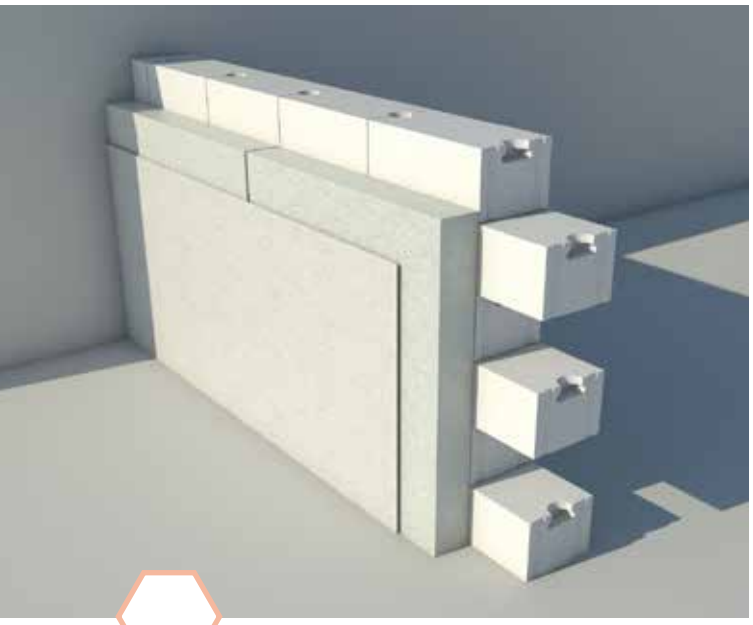
Tablica 3.2.
Poprawka z uwagi na pustki powietrzne, ΔU' wg [N2]

Poziom	Opis	$\Delta U''$ [W/(m²·K)]
0	Brak pustek powietrznych w obrębie izolacji, lub gdy występują tylko mniejsze pustki powietrzne, które nie mają znaczącego efektu na współczynnik przenikania ciepła.	0,00
1	Pustki powietrzne przechodzące od ciepłej do zimnej strony izolacji, ale niepowodujące cyrkulacji powietrza między ciepłą i zimną stroną izolacji.	0,01
2	Pustki powietrzne przechodzące od ciepłej do zimnej strony izolacji, łącznie z wnękami powodującymi swobodną cyrkulację powietrza między ciepłą i zimną stroną izolacji.	0,04

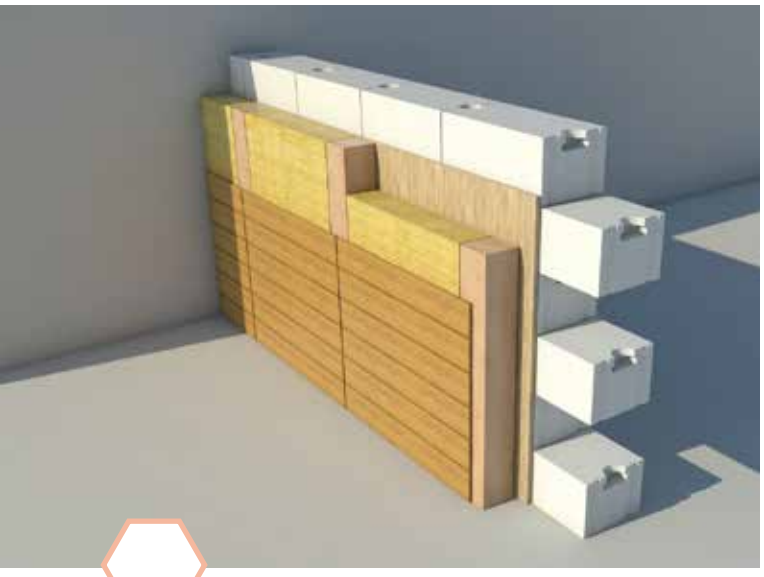
Poprawkę tę stosuje się zgodnie z równaniem:

$$\Delta U_g = \Delta U'' \left(\frac{R_1}{R_{T,h}} \right) \qquad (3.13)$$

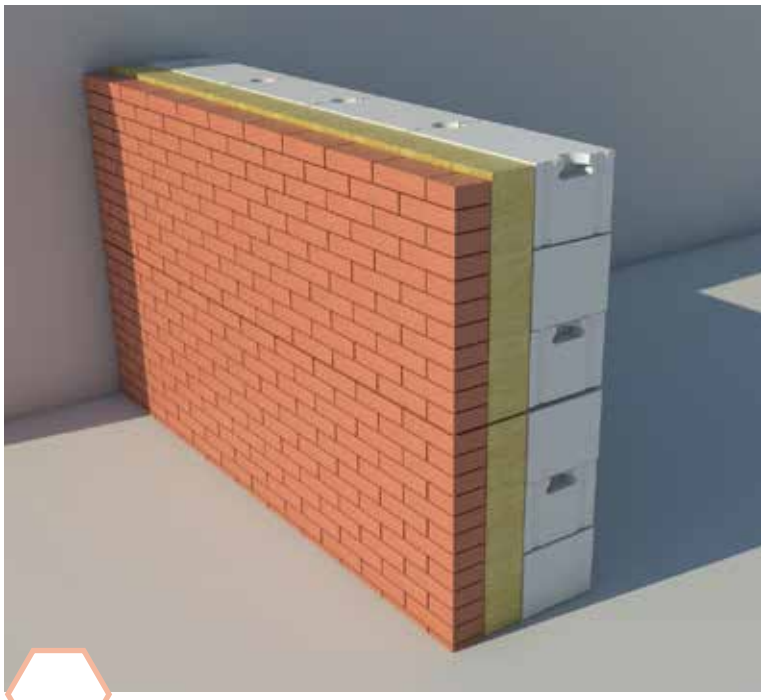
gdzie:
R_1 – opór cieplny warstwy zawierającej szczeliny;
$R_{T,h}$ – całkowity opór cieplny komponentu z pominięciem mostków cieplnych;
$\Delta U''$ – z powyższej tablicy.



Rys. 3.5.
Przykładowa ściana zewnętrzna z „0" poziomem poprawki.



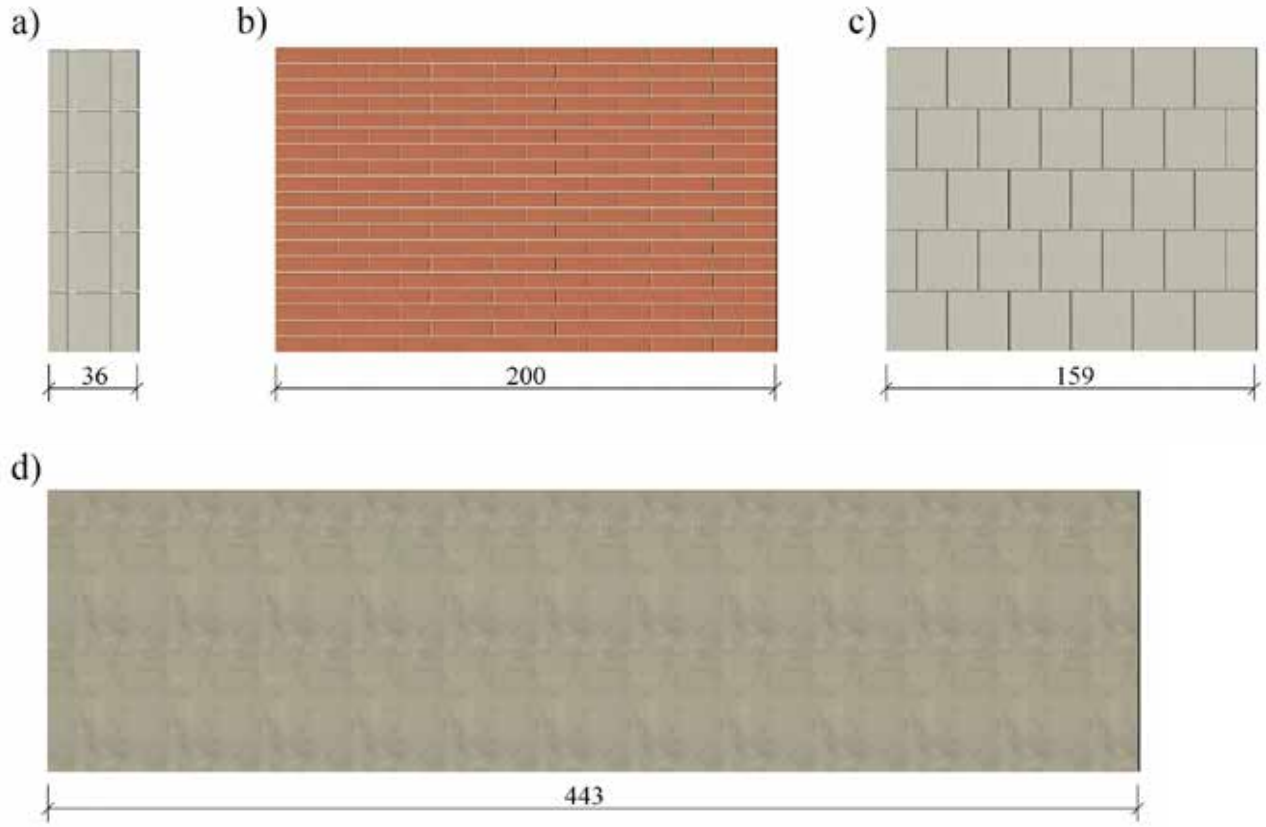
Rys. 3.6.
Przykładowa ściana zewnętrzna z „1" poziomem poprawki.



Rys. 3.7.
Przykładowa ściana zewnętrzna z „2" poziomem poprawki.

Przewodność cieplna betonu komórkowego

Współczynnik przewodzenia ciepła określa zdolność materiału do przewodzenia ciepła, czyli określa jego właściwości termoizolacyjne. Im niższa wartość współczynnika λ tym materiał budowlany charakteryzuje się lepszymi parametrami termoizolacyjnymi. Materiały wykorzystywane w budownictwie posiadają zróżnicowane współczynniki przewodzenia ciepła. Typowe materiały termoizolacyjne cechują się współczynnikami przewodzenia ciepła w granicach 0,025-0,05 W/mK. Elementy konstrukcyjne wykorzystywane do wznoszenia budynków, takie jak np. ściany zewnętrzne, mają zróżnicowaną izolacyjność termiczną. Zależy ona od grubości zastosowanego materiału i jego przewodności cieplnej. Na poniższym rysunku przedstawiono porównanie grubości ścian o identycznym oporze cieplnym wynoszącym R=2,61 m^{2}K/W. Zestawiono cztery rodzaje materiałów budowlanych o zróżnicowanych współczynnikach przewodzenia ciepła.



Rys. 3.8.
Grubości ścian zewnętrznych o jednakowym oporze cieplnym dla zróżnicowanych materiałów budowlanych.

a) beton komórkowy λ=0,14 W/mK
b) cegła ceramiczna pełna λ=0,77 W/mK
c) silikat λ=0,61 W/mK
d) beton λ=1,70 W/mK

Określone przez producenta (wyznaczone laboratoryjnie) wartości współczynnika przewodzenia ciepła różnią się od wartości obliczeniowych. W celu obliczenia współczynnika przenikania ciepła U stosuje się znormalizowane wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ lub wyniki badań laboratoryjnych podane przez producenta materiałów. Możemy mówić o następująco zdefiniowanych współczynnikach [5].

- średnia wartość **współczynnika przewodzenia ciepła** uzyskana na podstawie wyników badań odpowiednio licznej serii próbek; λ_m
- wartość deklarowana ustalona na podstawie wyników badań i poddana analizie statystycznej przy poziomie ufności 90%; wartość deklarowana powinna służyć kontroli jakości produkcji i określać wartość odpowiadającą warunkom laboratoryjnym; λ_D
- wartość służąca projektowaniu, odpowiadająca warunkom stosowania materiału; λ_{ob}

Deklarowana wartość cieplna jest oczekiwaną wartością właściwości cieplnej materiału lub wyrobu budowlanego, ocenioną na podstawie danych pomiarowych w warunkach odniesienia temperatury i wilgotności. Wartość ta jest podana dla określonej frakcji i poziomu ufności i odpowiadająca uzasadnionemu oczekiwanemu okresowi przydatności technicznej w warunkach normalnych. Poprzez pojęcie obliczeniowej wartości cieplnej rozumie się obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła lub obliczeniowy opór cieplny. Należy pamiętać, iż dany wyrób może mieć więcej niż jedną wartość obliczeniową, w zależności od różnych zastosowań materiału lub panujących warunków środowiskowych. Obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła stanowi wartość współczynnika przewodzenia ciepła materiału lub wyrobu budowlanego w określonych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych, którą można uważać za typową właściwość użytkową tego materiału lub wyrobu po wbudowaniu go w komponent budowlany. Na jej podstawie można otrzymać obliczeniowy opór cieplny, będący oporem cieplnym wyrobu budowlanego w określonych warunkach zewnętrznych i wewnętrznych, którą można uważać za typową właściwość użytkową tego wyrobu po wbudowaniu go w komponent budowlany. W normie [N5] można także spotkać definicję ekwiwalentnego współczynnika przewodzenia ciepła. Jest to wartość, którą oblicza się dzieląc grubość danego elementu murowego lub murowego złożonego przez jego opór cieplny. W przypadku obliczania współczyn-

nika przenikania ciepła istotny problem dotyczy zamiennego stosowania wartości deklarowanej λ_D i wartości obliczeniowej λ_{ob}. Zdolność materiału do przewodzenia ciepła jest zdeterminowana przez gęstość materiału, zawartości wilgoci, temperatury, czasu od wyprodukowania materiału. Dlatego na etapie projektowania projektant powinien przewidzieć warunki pracy materiału i dokonać konwersji współczynnika λ_D do wartości λ_{ob}. Metoda ta podana została podana w opracowaniu [5].

$$\lambda_{ob}' = \lambda_D \cdot F_T \cdot F_M \cdot F_a \tag{3.14}$$

gdzie:
F_T – temperaturowy czynnik konwersji,
F_M – wilgotnościowy czynnik konwersji,
F_a – czynnik konwersji zależny od czasu od wyprodukowania materiału.

Czynniki konwersji wyznacza się na podstawie wzorów [5]:

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)} \tag{3.15}$$

$$F_M = e^{f_u(u_2 - u_1)} \tag{3.16}$$

gdzie:
f_u – współczynnik konwersji ze względu na wilgotność materiału

$$F_a = e^{f_a(a_2 - a_1)} \tag{3.17}$$

gdzie:
f_a – współczynnik konwersji ze względu na zmianę parametru λ w czasie (starzenie).

Konwersja ze względu na temperaturę dotyczy głównie lekkich materiałów termoizolacyjnych (polistyren, wełna mineralna, pianka PU), natomiast z uwagi na wilgotność dotyczy przede wszystkim materiałów sorpcyjnych, jak np. beton komórkowy. W przypadku materiałów spienianych przy użyciu innych gazów niż powietrze dodatkowo rozpatruje się konwersję z uwagi na starzenie. W normie PN-EN 12524:2003 [N4] zawarto obliczeniowe właściwości cieplno-wilgotnościowe materiałów budowlanych. W większości przypadków wartości normatywne są mniej korzystne od wartości deklarowanych podawanych przez producentów i wyznaczonych na ich podstawie wartości obliczeniowych. W przypadku projektowania przegród ściennych należy korzystać z wartości obliczeniowych normatywnych lub podawanych przez producentów materiałów budowlanych. Producenci materiałów najczęściej podają deklarowaną wartość współczynnika przewodzenia ciepła. Określenie wartości obliczeniowej powinno być wykonane np. przez projektanta gdyż wymaga szczegółowej znajomości warunków, w jakich będzie wbudowany materiał. Przewidując standardowe warunki pracy materiałów budowlanych producenci w kartach katalogowych podają wartości obliczeniowe współczynników przewodzenia ciepła λ_{ob}.

3.4.
Rozkład temperatury i akumulacyjność cieplna przegrody

Temperatura na powierzchni wewnętrznej ściany zależy bezpośrednio od izolacyjności cieplnej przegrody budowlanej. Im niższa temperatura na powierzchni wewnętrznej ściany, tym łatwiej może dojść do powierzchniowej kondensacji. Ponadto należy zauważyć, lokalizacja materiałów termoizolacyjnych wpływa w sposób istotny na zmianę rozkładu temperatur w przekroju ściany. Znajomość rozkładu temperatur w przegrodzie i na jej powierzchni jest bardzo ważna z punktu widzenia projektowania budowlano-architektonicznego. W wyniku przepływu strumienia cieplnego o gęstości q, na poszczególnych warstwach jednorodnych płaskiej przegrody wielowarstwowej powstają spadki temperatury, będące iloczynem gęstości strumienia cieplnego i wartości oporów cieplnych. Spadek temperatury na powierzchni wewnętrznej wynosi $q \cdot R_{si}$, stąd temperatura powierzchni wewnętrznej obliczana jest wg wzoru:

$$\theta_{si} = \theta_i - q \cdot R_{si} = \theta_i - U(\theta_i - \theta_e) \cdot R_{si} \tag{3.18}$$

gdzie:
– temperatura powierzchni wewnętrznej,
– temperatura wewnętrzna,
θ_{si} – temperatura zewnętrzna,
θ_i – lokalna gęstość strumienia ciepła,
θ_e – opór przejmowania ciepła na
q powierzchni wewnętrznej,
R_{si} – współczynnik przenikania ciepła.

U Spadek temperatury na powierzchni wewnętrznej wynosi $q \cdot R_{si}$, stąd obliczona temperatura powierzchni wewnętrznej:

$$\vartheta_i = t_i - q \cdot R_{si} = t_i - U(t_i - t_e) \cdot R_{si} = t_i - \frac{t_i - t_e}{R_T} \cdot R_{si} \tag{3.19}$$

Całkowity opór cieplny (środowisko do środowiska) oblicza się ze wzoru:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \ldots + R_n + R_{se} \tag{3.20}$$

gdzie:
R_{se} – opór przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej
$R_1 \ldots R_n$ – opory cieplne kolejnych warstw przegrody.

Dla styku pierwszej i drugiej warstwy temperatura obliczeniowa wynosi:

$$\vartheta_1 = t_i - q \cdot (R_{si} + R_1) = t_i - U(t_i + t_e) \cdot (R_{si} + R_1) = t_i - \frac{t_i - t_e}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1) \quad (3.21)$$

Na styku drugiej i trzeciej warstwy temperatura wynosi:

$$\vartheta_2 = t_i - q \cdot (R_{si} + R_1 + R_2) = t_i - U(t_i + t_e) \cdot (R_{si} + R_1 + R_2) = t_i - \frac{t_i - t_e}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1 + R_2) \quad (3.22)$$

Różnica temperatur między powierzchniami warstw jednorodnych wynosi:

$$\Delta\vartheta_{1-2} = \frac{R_i}{R_T} \cdot (\vartheta_i + \vartheta_e) \quad (3.23)$$

Na podstawnie normy PN-EN ISO 13788 [N1] rozkład temperatur proponuje się obliczać w drugą stronę, czyli w stronę wzrostu temperatury. Wzór określający temperaturę na styku dwóch warstw *n*-tej i *n*+1 jest następujący

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R_n}{R_T}(\theta_i - \theta_e) \quad (3.24)$$

gdzie:

R_n – Suma oporów wszystkich warstw aż do warstwy *n* liczonych od zewnątrz wraz z oporem przejmowania ciepła R_{si}

R_T – całkowity opór cieplny przegrody

Pozostałe oznaczenia we wcześniejszych wzorach.

Norma PN-EN ISO 13788 podaje uproszczone metody obliczania temperatury wewnętrznej komponentu budowlanego, poniżej której, przy danej temperaturze i wilgotności powietrza wewnętrznego, prawdopodobny jest rozwój pleśni, korozja lub kondensacja pary na powierzchniach nieprzepuszczalnych (np. oknach). Ponadto podaje metody oszacowania ryzyka kondensacji wewnętrznej wskutek dyfuzji pary wodnej przez powierzchnie przepuszczalne. Metoda obliczeń przedstawiona w tej normie bazuje na uproszczonej metodzie Glasera opisującej przepływ dyfuzyjny oraz ewentualne wykraplanie i wysychanie wilgoci wewnątrz przegrody. Poza tym norma pozwala określić ryzyko wystąpienia i rozwoju pleśni na powierzchniach materiałów wrażliwych na wilgoć. Jakość cieplną elementu budynku, opisaną również w Rozporządzeniu dotyczącym warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, charakteryzuje się minimalną bezwymiarową temperaturą wewnętrznej powierzchni (zwaną czynnikiem temperaturowym), konieczną do uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i rozwoju pleśni. Powyższe zagadnienia dokładnie opisane są także w pozycji literaturowej [6]. Na rysunkach 3.9-3.13 przedstawiono rozkłady temperatur zróżnicowanych ścian zewnętrznych tj. bez warstwy izolacji termicznej, z izolacją termiczna od strony wewnętrznej i zewnętrznej a także ścian trójwarstwowych bez pustki powietrznej oraz z pustka powietrzną dobrze wentylowaną. W obliczeniach nie uwzględniano warstw tynków wewnętrznych i zewnętrznych. Poniżej przedstawiono przykładowe obliczenia rozkładu temperatury dla ściany jednowarstwowej z betonu komórkowgo o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,13 W/mK i grubości 36 cm. Temperatura wewnętrzna t_i = +20°C, temperatura zewnętrzna t_e = -20°C.

Obliczenia

Opór betonu komórkowego

$$R_1 = \frac{0,36}{0,13} = 2,77 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Całkowity opór cieplny

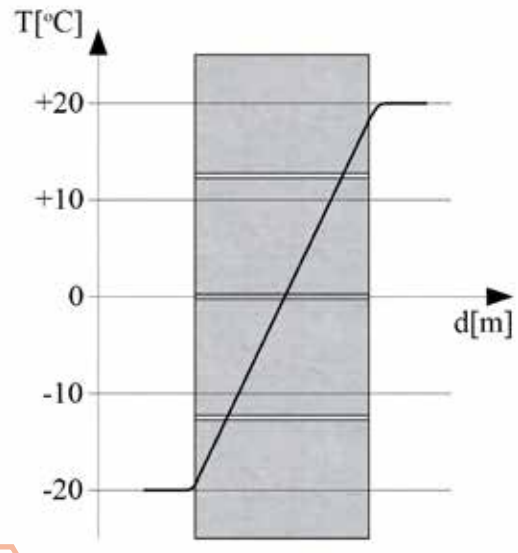
$$R_T = 0,13 + \frac{0,36}{0,13} + 0,04 = 2,94 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Temperatura na zewnętrznej powierzchni ściany

$$\theta_{se} = -20 + \frac{0,04}{2,94}(20 + 20) = -19,46 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany

$$\theta_{si} = -20 + \frac{0,04 + 2,77}{2,94}(20 + 20) = 18,23 \ ^\circ\mathrm{C}$$



Rys. 3.9.
Rozkład temperatury w przekroju ściany jednowarstwowej.

Obliczenia rozkładu temperatury dla ściany dwuwarstwowej z betonu komórkowgo o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,13 W/mK i grubości 36 cm wraz z ociepleniem od strony zewnętrznej polistyrenem EPS o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,04 W/mK i grubości 15 cm. Temperatura wewnętrzna t_i = +20°C, temperatura zewnętrzna t_e = -20°C.

Obliczenia

Opór betonu komórkowego:

$$R_1 = \frac{0,36}{0,13} = 2,77 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór polistyrenu EPS:

$$R_2 = \frac{0,15}{0,04} = 3,75 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Całkowity opór cieplny :

$$R_T = 0,13 + 3,75 + 2,77 + 0,04 = 6,69 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Temperatura na zewnętrznej powierzchni ściany:

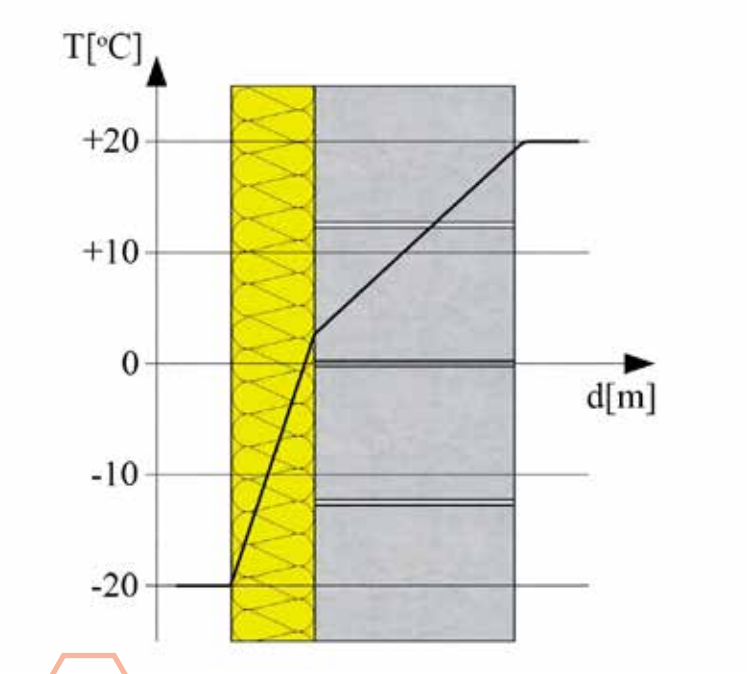
$$\theta_{se} = -20 + \frac{0,04}{6,69}(20 + 20) = -19,76 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku beton komórkowy – polistyren EPS:

$$\theta_1 = -20 + \frac{0,04 + 3,75}{6,69}(20 + 20) = 2,66 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany:

$$\theta_{si} = -20 + \frac{0,04 + 3,75 + 2,77}{6,69}(20 + 20) = 19,22 \ ^\circ\mathrm{C}$$



Rys. 3.10.
Rozkład temperatury w przekroju ściany dwuwarstwowej ocieplonej od zewnątrz.

W celu porównania z wcześniejszymi obliczeniami poniżej przedstawiono obliczenia rozkładu temperatury dla ściany dwuwarstwowej z betonu komórkowgo o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,13 W/mK i grubości 36 cm zamieniając położenie izolacji termicznej w postaci polistyrenu EPS o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,04 W/mK i grubości 15 cm. Temperatura wewnętrzna t_i = +20°C, temperatura zewnętrzna t_e = -20°C. Projektowanie tego typu rozwiązań wymaga przeprowadzenia szczegółowych analiz cieplno-wilgotnościowych!

Obliczenia

Opór betonu komórkowego:

$$R_1 = \frac{0,36}{0,13} = 2,77\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór polistyrenu EPS

$$R_2 = \frac{0,15}{0,04} = 3,75\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Całkowity opór cieplny:

$$R_T = 0,13 + 3,75 + 2,77 + 0,04 = 6,69\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Temperatura na zewnętrznej powierzchni ściany:

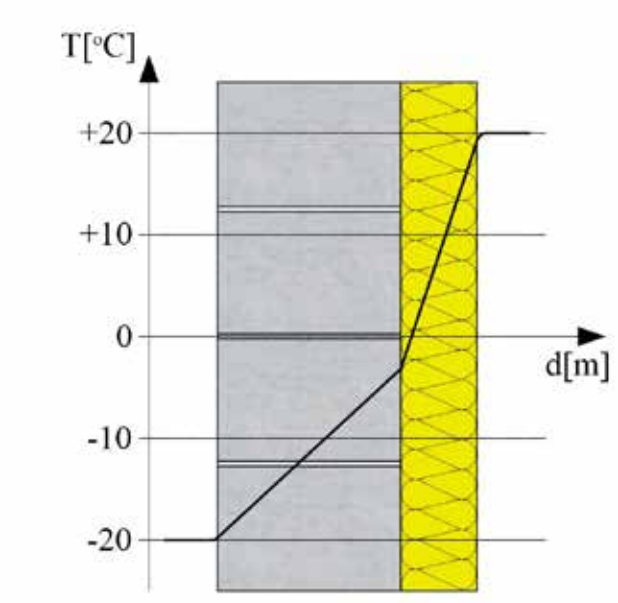
$$\theta_{se} = -20 + \frac{0,04}{6,69}(20 + 20) = -19,76\ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku polistyren EPS - beton komórkowy:

$$\theta_1 = -20 + \frac{0,04 + 2,77}{6,69}(20 + 20) = -3,20\ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany:

$$\theta_{si} = -20 + \frac{0,04 + 2,77 + 3,75}{6,69}(20 + 20) = 19,22\ ^\circ\mathrm{C}$$



Rys. 3.11.
Rozkład temperatury w przekroju ściany dwuwarstwowej ocieplonej od wewnątrz.

Obliczenia rozkładu temperatury dla ściany trójwarstwowej z betonu komórkowgo o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,13 W/mK i grubości 36 cm wraz z ociepleniem od strony zewnętrznej wełną mineralną o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,04 W/mK oraz z cegłą klinierową grubości 12 cm o współczynniku przewodzenia ciepła λ=1,05 W/mK.Temperatura wewnętrzna t_i = +20°C, temperatura zewnętrzna t_e = -20°C.

Obliczenia

Opór betonu komórkowego:

$$R_1 = \frac{0,36}{0,13} = 2,77\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór wełny mineralnej:

$$R_2 = \frac{0,15}{0,04} = 3,75\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór cieplny cegły klinkierowej:

$$R_3 = \frac{0,12}{1,05} = 0,11\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Całkowity opór cieplny:

$$R_T = 0,13 + 0,11 + 3,75 + 2,77 + 0,04 = 6,80\ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Temperatura na zewnętrznej powierzchni ściany:

$$\theta_{se} = -20 + \frac{0,04}{6,80}(20 + 20) = -19,76\ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku cegła klinkierowa – wełna mineralna:

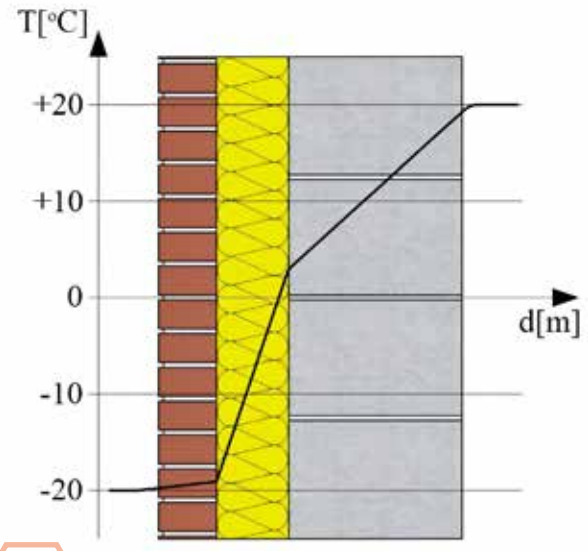
$$\theta_1 = -20 + \frac{0,04 + 0,11}{6,80}(20 + 20) = -19,09\ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku beton komórkowy – wełna mineralna:

$$\theta_2 = -20 + \frac{0,04 + 0,11 + 3,75}{6,80}(20 + 20) = +2,95\ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na wewnętrznej powierzchni ściany:

$$\theta_{si} = -20 + \frac{0,04 + 0,11 + 3,75 + 2,77}{6,80}(20 + 20) = 19,24\ ^\circ\mathrm{C}$$



Rys. 3.12.
Rozkład temperatury w przekroju ściany trójwarstwowej.

Obliczenia rozkładu temperatury dla ściany trójwarstwowej z betonu komórkowgo o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,13 W/mK i grubości 36 cm wraz z ociepleniem od strony zewnętrznej wełną mineralną o współczynniku przewodzenia ciepła λ=0,04 W/mK, pustką powietrzna dobrze wentylowaną oraz z cegłą klinierową grubości 12 cm o współczynniku przewodzenia ciepła λ=1,05 W/mK. Temperatura wewnętrzna t_i = +20°C, temperatura zewnętrzna t_e = -20°C.

Obliczenia

Opór betonu komórkowego:

$$R_1 = \frac{0,36}{0,13} = 2,77 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór wełny mineralnej:

$$R_2 = \frac{0,15}{0,04} = 3,75 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Opór cieplny cegły klinkierowej:

$$R_3 = \frac{0,12}{1,05} = 0,11 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Całkowity opór cieplny:

$$R_T = 0,13 + 2,77 + 3,75 + 0,04 = 6,69 \ \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Temperatura obliczeniowa na zewnętrznej powierzchni ściany:

$$\theta_{se} = -20 + \frac{0,04}{6,69}(20 + 20) = -19,76 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku pustki powietrznej i cegły klinkierowej:

$$\theta_1 = -20 + \frac{0,04 + 0,11}{6,69}(20 + 20) = -19,08 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Ponieważ dla dobrze wentylowanej warstwy powietrza nie określa się oporu cieplnego, to obliczenia rozkładu temperatur dla warstw betonu komórkowego i wełny obliczymy prowadząc obliczenia od strony pomieszczenia.
Temperatura na wewnętrznej powierzchni przegrody wynosi:

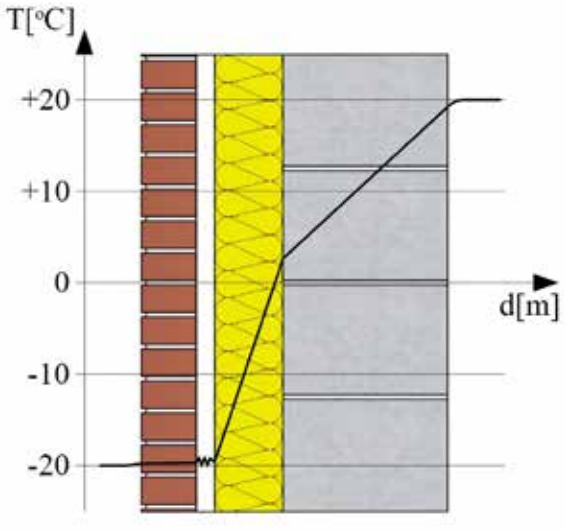
$$\theta_{si} = 20 - \frac{0,13}{6,69}(20 + 20) = 19,22 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku betonu komórkowego i wełny mineralnej wynosi:

$$\theta_3 = 20 - \frac{0,13 + 2,77}{6,69}(20 + 20) = 2,66 \ ^\circ\mathrm{C}$$

Temperatura na styku wełny mineralnej i pustki powietrznej wynosi:

$$\theta_2 = 20 - \frac{0,13 + 2,77 + 3,75}{6,69}(20 + 20) = -19,76 \ ^\circ\mathrm{C}$$



Rys. 3.13.
Rozkład temperatury w przekroju ściany trójwarstwowej z pustka dobrze wentylowaną.

Akumulacyjność cieplna ścian

Akumulacyjność ściany to jej zdolność do gromadzenia ciepła. Zależy ona przede wszystkim od masy przegrody oraz materiału, z którego jest wykonana. Od akumulacyjności przegród, ich izolacyjności oraz układu warstw zależy czas, w jakim utrzymuje się w nim stała temperatura wewnętrzna, mimo zmian warunków zewnętrznych lub mimo wyłączenia ogrzewania. Przegrody, które mają dużą pojemność cieplną możemy nazywać masywnymi termicznie. Przegroda z dużą masą termiczną potrzebuje zaabsorbować dużo energii cieplnej zanim zmieni się temperatura na jej powierzchni. Natomiast przegroda o małej masie termicznej dość szybko osiąga temperaturę otoczenia. Zatem czas, w jakim powierzchnia przegrody wyrówna temperaturę z otoczeniem można opisać za pomocą rozwiązania równania Fouriera w stanie uporządkowanym, które to podał Krischer. Rozwiązanie to jest postaci:

$$t(0,\tau) = t_0 e^{-\frac{\tau}{z}} \qquad (3.25)$$

gdzie:
τ – czas stygnięcia,
t_o – temperatura początkowa ciała,
z – wskaźnik utrzymania ciepła.

Pomijając opory przejmowania ciepła, w przypadku ściany wielowarstwowej wskaźnik utrzymania ciepła obliczymy jako:

$$z = \sum_i R_i C_i \qquad (3.26)$$

gdzie:
R_i – opór cieplny od środka warstwy i do powietrza zewnętrznego
C_i – pojemność cieplna warstwy i ściany

Pojemność cieplną możemy obliczyć za pomocą wyrażenia:

$$C_m = \sum_j \sum_i (c_{ij} \cdot \rho_{ij} \cdot d_{ij} \cdot A_{ij}) \qquad (3.27)$$

gdzie
c_{ij} – ciepło właściwe materiału warstwy i-tej w elemencie j-tym,
ρ_{ij} – gęstość materiału warstwy i-tej w elemencie j-tym,
d_{ij} – grubość warstwy i-tej w elemencie j-tym,
A_{ij} – pole powierzchni j-tego elementu w budynku,
C_m – wewnętrzna pojemność cieplna strefy budynku lub całego budynku.

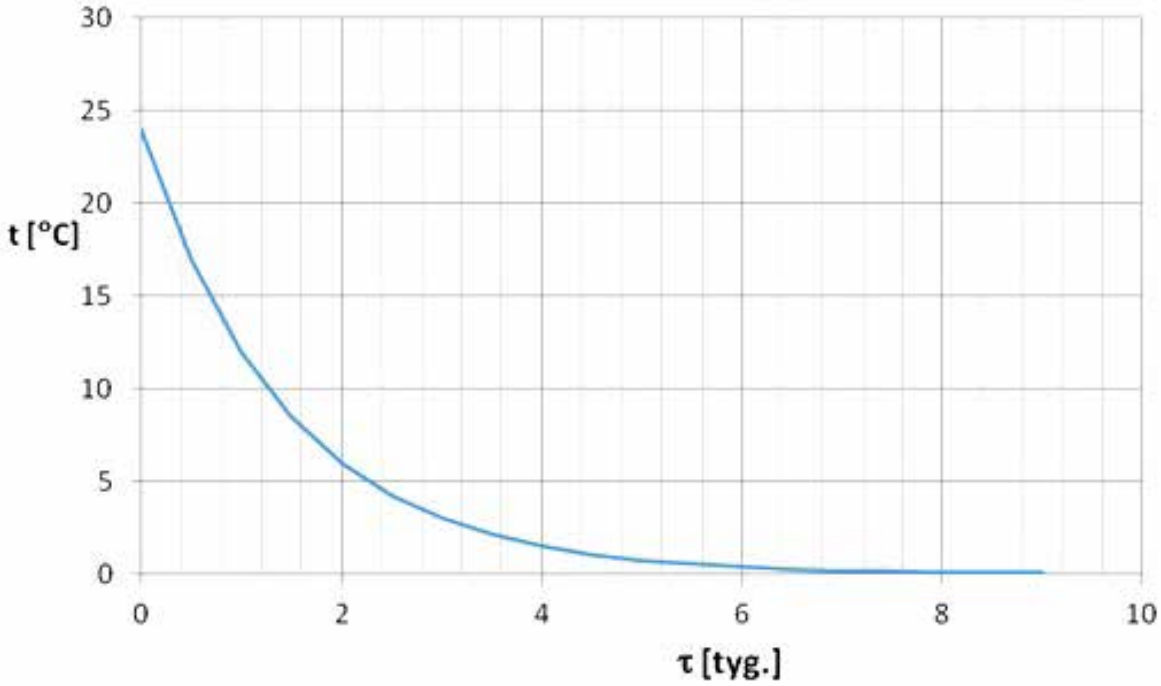
Jeżeli będziemy rozważać mur z betonu komórkowego o bardzo wysokim oporze cieplnym wynoszącym R=6,4 m^2K/W, ponadto przyjmiemy pojemność cieplną około 242 kJ/m^2K, to czas stygnięcia takiej przegrody można przedstawić za pomocą wykresu przedstawionym na rysunku 3.14. Należy zauważyć, że jest to ściana jednowarstwowa, która w rzeczywistości występuje sporadycznie. W większości przypadków projektuje się i wznosi ściany dwuwarstwowe lub trójwarstwowe z izolacją termiczną wykonywaną od strony zewnętrznej. W zależności od akumulacyjności cieplnej przegród zewnętrznych i wewnętrznych, uwzględniając izolacyjność termiczną obudowy budynku kształtuje się jego stateczność cieplna. Miarą stateczności cieplnej jest czas, w którym nie dochodzi do istotnych wahań temperatury wewnętrznej, pomimo zmieniających się warunków środowiska zewnętrznego. Ma to istotne znaczenie w okresach obniżonych temperatur zewnętrznych.

W celu zwiększenia stateczności cieplnej budynku izolacja termiczna ścian zewnętrznych powinna być wykonywana od strony środowiska zewnętrznego.

Pomimo mniejszej masy drobnowymiarowych elementów murowych budynki wykonywane z betonu komórkowego charakteryzują się w wielu przypadkach wyższą izolacyjnością termiczną w stosunku do budynków wznoszonych w technologii tradycyjnej z innych elementów drobnowymiarowych jak np. ceramika poryzowana lub silikat. Uwzględniając mniejszą masę betonu komórkowego i w większości przypadków wyższą izolacyjność termiczną ściany o analogicznej grubości, przy założeniu jednakowej grubości dodatkowej izolacji termicznej, należy stwierdzić, że przy zbliżonej akumulacyjności cieplnej ściana z betonu komórkowego będzie się charakteryzo-

wała mniejszymi stratami ciepła przez przenikanie. Zachowanie stabilnych warunków cieplnych w budynkach może być zapewnione przez zaprojektowanie ścian z izolacją cieplną od strony zewnętrznej. Z punktu widzenia akumulacyjności termicznej wykonywanie jednowarstwowych ścian zewnętrznych jest mało efektywne.

Należy podkreślić, że pojemność cieplna przegród zewnętrznych nie wywiera istotnego wpływu na warunki cieplne w budynku, podczas krótkotrwałych zmian temperatury zewnętrznej. Dodatkowo w okresach letnich mniejsza pojemność cieplna ścian z betonu komórkowego będzie powodowała szybsze wychładzanie nagrzanej ściany np. w okresie wieczornego wietrzenia budynku, poprawiając tym samym komfort użytkowania budynku.



Rys. 3.14.
Czas wyrównania temperatury pomiędzy przegrodą z przykładowego betonu komórkowego a otoczeniem, w którym jest temperatura 0°C.

3.5.
Literatura

[1] Jerzy Żurawski Wartości deklarowane i obliczeniowe parametrów izolacyjnych materiałów budowlanych. Izolacje 3/2015.
[2] Materiały techniczne www.solbet.pl
[3] Czasopismo Inżynierii lądowej, środowiska i architektury journal of civil engineering, environment and architecture jceea, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), lipiec-wrzesień 2014, s. 237-250 Marcin Kaczmarzyk *Ocena efektywności izolacyjnoakumulacyjnej przegród zewnętrznych.*
[4] Czasopismo Techniczne. Budownictwo Irena Ickiewicz *Wpływ pojemności cieplnej na bilans cieplny budynku.*
[5] Katarzyna Firkowicz-Pogorzelska. *Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych.* Prace instytutu techniki budowlanej - kwartalnik nr 3 (119) 2001.
[6] Praca zbiorowa pod kierunkiem Piotra Klemma *Budownictwo Ogólne tom 2 fizyka budowli*, Wydawnictwo ARKADY, Warszawa 2005 r.
[N1] PN-EN-ISO 13877:2007. *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej – Metody obliczania.*
[N2] PN-EN ISO 6946:2008. *Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania.*
[N3] PN-EN ISO 10456:2009. Materiały i wyroby budowlane. *Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.*
[N4] PN-EN 12524:2003, *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe.*
[N5] PN-EN 1745:2012. *Mury i wyroby murowe – Metody określania właściwości cieplnych.*
[N6] PN-EN 13165:2013-05, *Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie. Wyroby ze sztywnej pianki poliuretanowej (PUR) produkowane fabrycznie. Specyfikacja.*
[N7] PN-EN ISO 12241:2010 *Izolacja cieplna wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych -- Zasady obliczania.*

4. KSZTAŁTOWANIE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH POD WZGLĘDEM WILGOTNOŚCIOWYM

4.1. Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
$\Delta\theta$	różnica temperatur	K
Δp	nadwyżka wewnętrznego ciśnienia pary wodnej, pi-pe	Pa
δ_0	paroprzepuszczalność powietrza w odniesieniu do ciśnienia cząstkowego pary wodnej	kg/(m·s·Pa)
θ_n	temperatura w skali Celsjusza na powierzchni styku	°C
$\theta_{s,min}$	minimalnatemperatura w skali Celsjusza na powierzchni	°C
θ_i	temperatura wewnętrzna	°C
θ_e	temperatura zewnętrzna	°C
$\overline{\theta}_e$	średnia temperatura zewnętrzna	°C
$\theta_{si} - \theta_{se}$	różnica temperatur powierzchni przegrody od strony napływu i odpływu ciepła	K
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	W/(m·K)
$\Lambda\theta$	gradient temperatury	
μ	współczynnik oporu dyfuzyjnego	-
$\overline{\varphi}_e$	średnia wilgotność względna powietrza zewnętrznego	%
d	grubość	m
D_w	współczynnik transportu cieczy zależny od rodzaju materiału, oraz warunków cieplno-wilgotnościowych	m^2/s
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
$f_{Rsi,min}$	minimalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
g	gęstość strumienia pary wodnej	$kg/(m^2 \cdot s)$
g_c	gęstość strumienia pary wodnej kondesacji	$kg/(m^2 \cdot s)$
g_{c1}	gęstość strumienia pary wodnej kondesacji warstwy 1	$kg/(m^2 \cdot s)$
g_{c2}	gęstość strumienia pary wodnej kondesacji warstwy 2	$kg/(m^2 \cdot s)$
g_e	gęstość strumienia pary wodnej powietrza zewnętrznego	$kg/(m^2 \cdot s)$
g_{ev}	gęstość strumienia pary wodnej parowania	$kg/(m^2 \cdot s)$

g_{ev1}	gęstość strumienia pary wodnej parowania warstwy 1	kg/(m^2·s)
g_{ev2}	gęstość strumienia pary wodnej parowania warstwy 2	kg/(m^2·s)
p_c	ciśnienie pary wodnej kondensacji	Pa
p_{c1}	ciśnienie pary wodnej kondensacji warstwy 1	Pa
p_{c2}	ciśnienie pary wodnej kondensacji warstwy 2	Pa
p_e	ciśnienie pary wodnej zewnętrzne	Pa
$\bar{p}_e$	Średnie ciśnienie pary wodnej powietrza zewnętrznego	Pa
p_i	ciśnienie pary wodnej wewnętrzne	Pa
p_{ni}	ciśnienie stanu nasycenia	Pa
p_{sat}	ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia	Pa
q	gęstość strumienia ciepła	W/ m^2
R	obliczeniowy opór cieplny (powierzchnia do powierzchni)	m^2·K/W
R_j	opór cieplny j-tej warstwy	m^2·K/W
R_n	Suma oporów wszystkich warstw aż do warstwy *n* liczonych od zewnątrz wraz z oporem przejmowania ciepła R_{si}	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
$R_{si,min}$	minimalny opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej	m^2·K/W
R_T	całkowity opór cieplny (środowisko do środowiska)	m^2·K/W
$R_{T.min}$	jest najniższym oporem cieplnym sekcji, wydzielonej z komponentu budowlanego.	m^2·K/W
R'_T	kres górny całkowitego oporu cieplnego	m^2·K/W
R''_T	kres dolny całkowitego oporu cieplnego	m^2·K/W
sd	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza	m
$s'_{d,c}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji	m
$s'_{d,c1}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji warstwy 1	m
$s'_{d,c2}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji warstwy 2	m
$s_{d,j}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza j-tej warstwy	m
$s'_{d,n}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza na powierzchni styku	m
$s'_{d,T}$	dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza całkowita	m
t_i	temperatura wewnętrzna	°C
t_e	temperatura zewnętrzna	°C
t_s	temperatura na powierzchni	°C
U	współczynnik przenikania ciepła komponentu lub elementu	W/(m^2·K)
$\bar{v}_e$	średnia wilgotność względna powietrza na jednostkę objętości powietrza zewnętrznego	kg/m^3
v_{sat}	wilgotność względna powietrza na jednostkę objętości w stanie nasycenia	kg/m^3

4.2.
Terminy i definicje

Obliczeniowy czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej - minimalny dopuszczalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej.

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

Wewnętrzny nadmiar wilgoci - strumień wytwarzania wilgoci w przestrzeni podzielony przez krotność wymiany powietrza i objętość przestrzeni.

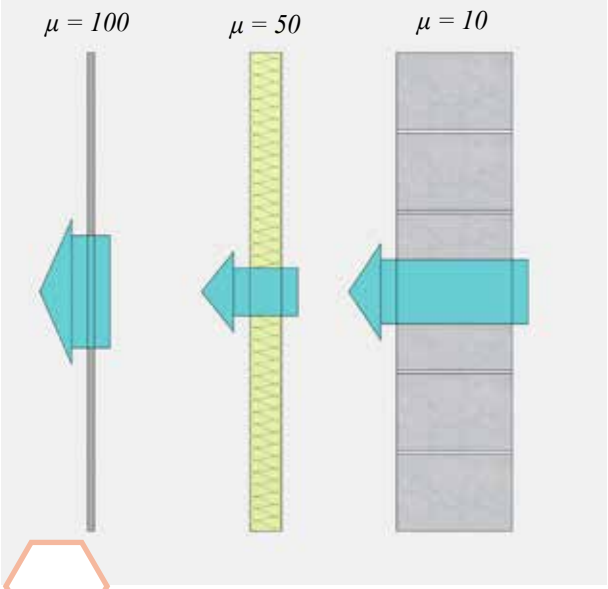
Dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza - grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym jak rozważana warstwa materiału.

Wilgotność względna - stosunek ciśnienia pary wodnej do ciśnienia pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze

Krytyczna wilgotność powierzchni - wilgotność względna przy powierzchni, prowadząca do pogorszenia powierzchni szczególnie rozwojem pleśni.

4.3.
Zawilgocenie przegród budowlanych

Większość materiałów budowlanych powinna być odporna na oddziaływanie wody lub pary wodnej. Bezpośrednie oddziaływanie wody dotyczy w większości przypadków materiałów narażonych na bezpośrednie oddziaływanie środowiska zewnętrznego (opady atmosferyczne) lub materiałów wbudowanych w tzw. pomieszczeniach mokrych budynku. Oddziaływanie pary wodnej na elementy budowlane dotyczy praktycznie wszystkich składowych materiałów przegród budowlanych. Dyfuzja pary wodnej przez ścianę zewnętrzną odbywa się w skutek występującej różnicy ciśnień po obu stronach przegrody. Jej intensywność zależy w istotnym stopniu od parametrów fizycznych zastosowanych materiałów. W odniesieniu do właściwości związanych z dyfuzją pary wodnej powszechnie stosowane jest pojęcie paroprzepuszczalności. Pojęcie to jest dość nieprecyzyjne ze względu na fakt, iż wielkość nominalna przepuszczanej pary przez badane materiały silnie zależy od warunków badania. W związku z powyższym wprowadzono współczynnik oporu dyfuzyjnego pary wodnej μ dla materiału budowlanego. Współczynnik ten podaje paroprzepuszczalność materiału w odniesieniu do warunków określonych normowo dla powietrza i określa ile razy jest on mniej przepuszczalny dla przenikania pary wodnej niż tej samej grubości warstwa powietrza.



Rys. 4.1.
Przykładowe współczynniki oporu dyfuzyjnego dla składowych ściany zewnętrznej (tynk/styropian/beton komórkowy).

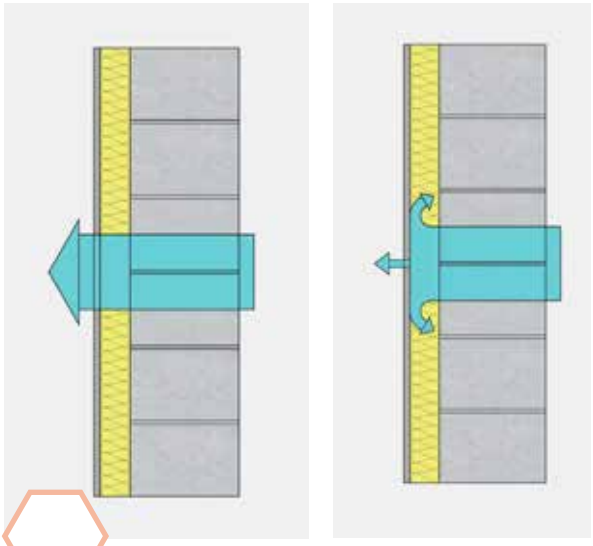
Natężenie strumienia dyfuzji pary wodnej przez przegrodę zależy od różnicy ciśnień cząstkowych pary wodnej stronach przegrody, oraz od własności fizycznych materiałów, zaś ciśnienie cząstkowe pary wodnej zależy od temperatury i wilgotności powietrza. Ze względu na fakt, iż paroprzepuszczalność materiałów zależy od ich grubości oraz właściwości fizycznych, w celu łatwiejszego ich porównywania wprowadzono pojęcie równoważnej dyfuzyjnie grubości powietrza określane jako S_d.

$$S_d = \mu \cdot d \qquad (4.1)$$

gdzie:
μ – bezwymiarowy współczynnik oporu dyfuzyjnego materiału,
d – grubość warstwy.

Wielkość ta określa paroprzepuszczalność materiału poprzez porównanie jego właściwości dyfuzyjnych do parametrów dyfuzyjnych powietrza o określanej grubości. Współczynnik ten określa właściwości dyfuzyjne materiału budowlanego o założonej grubości w porównaniu do grubości warstwy powietrza o tym samym oporze dyfuzyjnym, – dlatego wymiarem tego współczynnika jest metr. Innym pojęciem jest współczynnik oporu dyfuzyjnego. Jest to stała względna wielkość dla poszczególnych rodzajów materiałów, charakteryzująca ich opór dyfuzyjny, określająca ile razy opór dyfuzyjny warstwy materiału jest

większy od oporu identycznej warstwy powietrza występującej w tych samych warunkach. Innym pojęciem jest opór dyfuzyjny przegrody. Jest on miarą odporności przegrody na przenikanie pary wodnej. Opór ten wzrasta wraz z grubością materiałów składowych przegrody oraz ze wzrostem współczynnika oporu dyfuzyjnego materiałów. Wielkość tą określa się na podstawie stosunku różnicy ciśnień cząstkowych pary wodnej po obu stronach warstwy do gęstości strumienia pary wodnej. Na poniższych rysunkach przedstawiono schematycznie ścianę zewnętrzną z tynkiem o dużym oporze dyfuzyjnym oraz z warstwą tynku o niewielkim oporze dyfuzyjnym.



Rys. 4.2.
Ściana zewnętrzna dwuwarstwowa z tynkiem o dużym oporze dyfuzyjnym (prawa strona) i z tynkiem o niewielkim oporze dyfuzyjnym.

W przypadku projektowania ścian pod względem wilgotnościowym ważne jest, aby opór dyfuzyjny poszczególnych warstw przegrody malał w kierunku środowiska zewnętrznego (najwyższy opór dyfuzyjny od strony wewnętrznej). Nie jest to wymóg obligatoryjny, jednakże minimalizuje możliwość wystąpienia kondensacji pary wodnej wewnątrz przegrody.

4.4.
Oszacowanie ryzyka kondensacji wewnętrznej wskutek dyfuzji pary wodnej w przegrodach budowlanych

Porażenie mykologiczne przegród budowlanych jest niepożądanym zjawiskiem dla użytkowników budynków. Obok pogorszenia kwestii estetyki wpływa ono przede wszystkim negatywnie na zdrowie osób przebywających w pomieszczeniach, które uległy zagrzybieniu. Dodatkowym niepożądanym skutkiem jest możliwe zmniejszenie trwałości materiałów budowlanych, na powierzchni, których doszło do zagrzybienia. W zależności od rodzaju materiału występującego rodzaju zagrzybienia, grzybnia potrafi wrosnąć w głąb materiału ściany nawet na około 30 cm. Występujące zagrzybienie w większości przypadków stanowi tzw. „zagrzybienie ogólne". Występuje ono w przypadku wadliwego rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego budynku, destrukcji materiałowej w czasie oraz nierzadko niewłaściwej eksploatacji pomieszczeń mieszkalnych. W przypadku braku dostatecznej izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych istnieje możliwość skraplania się (kondensacji) pary wodnej, najczęściej w miejscach mostków termicznych tj. połączeń poszczególnych elementów budowlanych. Zawilgocenie na wewnętrznej powierzchni ściany powstaje wówczas, gdy temperatura tej powierzchni, lub jej fragmentu, jest niższa od temperatury punktu rosy. Dodatkowo geometria przegród zewnętrznych w budynkach (np.naroża) wpływa na wzrost intensywności oddziaływania mostków termicznych. Porażenie budynku przez czynniki biologiczne następuje przy zaistnieniu sprzyjających warunków mikroklimatu wnętrz (temperatura, wilgotność i prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu) w miejscu przegrody o obniżonym oporze cieplnym. W takich sytuacjach zdarza się, że wzrost wilgotności powietrza w pomieszczeniu do poziomu 50-55%, przy temperaturze powietrza + 20 °C powoduje wystąpienie kondensacji powierzchniowej, prowadzącej w konsekwencji do rozwoju grzybów. W większości przypadków występowanie porażenia mikologicznego jest wynikiem oddziaływania czynników budowlanych i użytkowych. Do czynników budowlanych można zaliczyć np. niedostateczną izolacyjność termiczną przegród zewnętrznych, niewłaściwie rozwiązane detale projektowe (mostki termiczne), czy też niedostateczną szczelność powietrzną obudowy budynku. Czynniki te są związane z rozwiązaniami projektowymi oraz poziomem zrealizowanego wykonawstwa robót budowlanych. Czynniki użytkowe mogą być związane z brakiem należytego odprowadzania pary wodnej wytworzonej przez użytkowników, brakiem zapewnienia dopływu powietrza wentylacyjnego oraz utrzymywaniem niewłaściwej temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniach. Zawilgocenia w okolicy mostków termicznych mogą częściowo podeschnąć w okresie letnim, jednakże kondensacja pojawi się z powrotem w okresie jesienno-zimowym, ponownie powodując korzystne warunki dla rozwoju zagrzybienia.

W celu poprawnego zaprojektowania przegród budowlanych w budynku należy przeprowadzić ocenę oszacowania ryzyka kondensacji wewnętrznej wskutek dyfuzji pary wodnej w przegrodach budowlanych a także sprawdzić możliwość występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegród budowlanych. Podstawowa metoda obliczeniowa, na bazie modelu Glasera, zawarta jest w normie PN-EN ISO 13788 [N1]. W wyżej wymienionej normie przeczytać można m.in. *„Transport wilgoci jest procesem bardzo złożonym, a znajomość mechanizmów transportu wilgoci, właściwości materiałów, warunków początkowych i brzegowych jest zwykle niewystarczająca, nieodpowiednia i podlega stale rozwojowi. Dlatego niniejsza norma ustanawia uproszczone metody obliczeń, bazujące na doświadczeniu i ogólnie przyjętej wiedzy. Standaryzacja tych metod obliczeń nie eliminuje stosowania metod bardziej zaawansowanych. Obliczenia normalnie będą prowadzić do projektów plasujących się po stronie bezpiecznej, a jeżeli konstrukcja nie spełnia określonego kryterium projektowego zgodnie z tą procedurą, można stosować dokładniejsze metody do wykazania, że projekt jest poprawny."*

Metoda uproszczona opracowana została przy założeniu jednowymiarowego przepływu pary wodnej w stanie ustalonym. Metoda zakłada, że wilgoć budowlana wyschła i nie jest brana pod uwagę w całym szeregu ważnych zjawisk fizycznych, obejmujących m.in.:

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

Pomijanie tych zjawisk w obliczeniach prowadzić może do uzyskiwania wyników nieodpowiadających rzeczywistym procesom zachodzącym w przegrodzie budowlanej.

Do obliczeń należy stosować wartości obliczeniowe charakterystyk materiałowych. Można stosować wartości deklarowane, podane w specyfikacjach materiałów i wyrobów lub tabelaryczne wartości obliczeniowe zamieszczone w normach. Współczynnik przewodzenia ciepła λ i współczynnik oporu dyfuzyjnego μ, mogą być stosowane w odniesieniu do materiałów jednorodnych, a opór cieplny R i dyfuzyjnie równoważną grubość warstwy powietrza, S_d, odnosi się przede wszystkim do wyrobów złożonych. Przyjmowane warunki zewnętrzne powinny być reprezentatywne dla lokalizacji budynku, o ile nie zostały sprecyzowane inaczej. Odpowiada to przyjęciu do obliczeń danych z najbliższej stacji klimatycznej dla miejsca lokalizacji. Przy szacowaniu ryzyka wystąpienia wewnętrznej kondensacji w konstrukcji przegrody, należy posługiwać się średnimi miesięcznymi wartościami wilgotności powietrza i temperatur. W przypadku parametrów temperatury wewnętrznej należy przyjąć wartości zależne od przeznaczenia budynku. Można stosować krajowe wartości temperatury powietrza wewnętrznego zawarte w [9].

Przy definiowaniu warunków wilgotności powietrza zewnętrznego należy posługiwać się wilgotnością objętościową v_e, lub ciśnieniem pary wodnej p_e. Średnie miesięczne wartości ciśnienia pary wodnej lub wilgotności objętościowej można obliczyć ze średniej temperatury i wilgotności względnej, stosując równanie (4.2) lub (4.3):

$$\overline{p}_e = \overline{\varphi}_e \, p_{sat}\left(\overline{\theta}_e\right) \tag{4.2}$$

gdzie:

$\overline{p}_e$ – średnia ciśnienie pary wodnej powietrza zewnętrznego

$\overline{\varphi}_e$ – średnia wilgotność względna powietrza zewnętrznego

p_{sat} – ciśnienie pary wodnej w stanie nasycenia

$\overline{\theta}_e$ – średnia temperatura w skali Celsjusza powietrza zewnętrznego

$$\overline{v}_e = \overline{\varphi}_e \, v_{sat}\left(\overline{\theta}_e\right) \tag{4.3}$$

gdzie:

$\overline{v}_e$ – średnia wilgotność względna powietrza na jednostkę objętości powietrza zewnętrznego

v_{sat} – wilgotność względna powietrza na jednostkę objętości w stanie nasycenia

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.2).

Z powodu nieliniowej zależności między temperaturą a wilgotnością w stanie nasyconym, powyższe równania stają się niedokładne w klimatach gorących. Wilgotność wewnętrzną może zostać zakwalifikowana do jednej z pięciu klas wilgotności zgodnie z normą [N1]. Poczynając od pierwszego miesiąca, w którym przewidywana jest jakakolwiek kondensacja, przyjmując średnie miesięczne warunki zewnętrzne, oblicza się wielkość kondensacji lub odparowania w każdym z dwunastu miesięcy w roku. Masa wody, powstałej w wyniku kondensacji, zakumulowana pod koniec tego miesiąca, w którym kondensacja pojawiła się, jest porównywana z całkowitym odparowaniem w ciągu pozostałej części roku. Zakłada się przypadek jednowymiarowy i warunki stanu ustalonego. Nie rozpatruje się ruchu powietrza przez ani we wnętrzu elementu budowlanego. Zakłada się, że transport wilgoci polega wyłącz-

nie na dyfuzji pary wodnej, opisanej następującym równaniem

$$g = \frac{\delta_0}{\mu}\frac{\Delta p}{\Delta x} = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d} \qquad (4.4)$$

gdzie:

g – gęstość strumienia pary wodnej

μ – współczynnik oporu dyfuzyjnego

Δp – nadwyżka wewnętrznego ciśnienia pary wodnej, p_i-p_e

Δx – wymiar w układzie współrzędnych (grubość przegrody)

s_d – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza

$\delta 0 = 2 \times 10^{-10}\,\mathrm{kg/(m \cdot s \cdot Pa)}$

Wielkość δ_0 zależy od temperatury i ciśnienia atmosferycznego, ale wpływy tych czynników jest w niniejszej normie zaniedbywany. Inne równania dotyczące transportu pary wodnej podano w załączniku normy [N1]. Gęstość strumienia ciepła dana jest wzorem

$$q = \lambda \frac{\Delta\theta}{d} = \frac{\Lambda\theta}{R} \qquad (4.5)$$

gdzie:

q – gęstość strumienia ciepła,

λ – obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła materiału obliczony zgodnie z ISO 10456 [N3], albo obliczany na podstawie wartości deklarowanych, lub podawanych w aprobatach technicznych,

$\Delta\theta$ – różnica temperatur w skali Celsjusza,

d – grubość warstwy materiału w komponencie,

$\Lambda\theta$ – gradient temperatury,

R – opór cieplny.

W powyższym modelu zakłada się, że współczynnik przewodzenia ciepła λ i opór cieplny R, są stałe, a ciepło właściwe materiału nie ma istotnego znaczenia. W przypadku jednorodnego materiału wydzielonego płaszczyznami równoległymi opór cieplny R oblicza się ze wzoru:

$$R = \frac{d}{\lambda} \qquad (4.6)$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.5)

Źródła i upusty cieplne wskutek przemian fazowych są pomijane. Istnieje kilka źródeł błędów wynikających z zakładanych w przywoływanej metodzie uproszczeń:

a) Przewodność cieplna zależy od wilgotności, a ciepło jest uwalniane/pochłaniane w procesach kondensacji/parowania. Te zjawiska zmieniają rozkład temperatury i wilgotność w stanie nasycenia i wpływają na ilość kondensacji/wysychania.
b) Stosowanie stałych właściwości materiałów jest przybliżeniem.
c) Podciąganie kapilarne i transport wilgoci w fazie ciekłej występuje w wielu materiałach i może powodować zmianę rozkładu wilgoci.
d) Ruch powietrza przez pęknięcia lub wewnątrz szczelin powietrznych może zmieniać rozkład wilgoci na skutek jej konwekcji. Deszcz lub topniejący śnieg mogą również wpływać na warunki wilgotnościowe.
e) Rzeczywiste warunki brzegowe nie są stałe w obrębie miesiąca.
f) Większość materiałów jest co najmniej w pewnym stopniu higroskopijna i może absorbować parę wodną.
g) Zakłada się jednowymiarowy transport wilgoci.
h) Zaniedbuje się zjawiska promieniowania słonecznego i długofalowego.

Z powodu wielu źródeł błędu, niniejsza metoda jest mniej odpowiednia w odniesieniu do niektórych komponentów budowlanych i warunków klimatycznych. Zaniedbanie transportu wilgoci w fazie ciekłej skutkuje zwykle przeszacowaniem niebezpieczeństwa wewnętrznej kondensacji. W odniesieniu do elementów budowlanych, przez które lub, wewnątrz których ma miejsce ruch powietrza, wyniki obliczeń mogą być bardzo niepewne i wymagają bardzo ostrożnej interpretacji.

Przed przystąpieniem do wykonywania obliczeń element budowlany należy podzielić na szereg równoległych, jednorodnych warstw i w każdej z nich zdefiniować właściwości materiału i współczynniki przejmowania. Każdą warstwę w wielowarstwowych wyrobach lub komponentach, włączając w to wyroby z okładzinami lub pokryciami, należy traktować jako oddzielną warstwę, biorąc pod uwagę odpowiednie jej właściwości związane z przewodzeniem ciepła i pary wodnej. Należy obliczyć opór cieplny R i grubość warstwy nieruchomego powietrza, która ma taki sam opór dyfuzyjny jak rozważana warstwa materiału, s_d, dla każdej oddzielnej warstwy składowej przegrody budynku. Elementy o wysokim oporze cieplnym, takie jak warstwy izolacji, należy podzielić na pewną liczbę warstw o takim samym oporze cieplnym, nieprzekraczającym $0{,}25\ \mathrm{m^2 \cdot K/W}$. Zakłada się, że we wszystkich obliczeniach ten podpodział jest traktowany jak układ oddzielnych warstw. Wybrane materiały, jak np. arkusze metalowe, skutecznie zapobiegają przenikaniu pary wodnej i dlatego charakteryzują się nieskończoną wartością μ. W obliczeniach należy przyjmować jednak dla tego typu materiałów skończoną wartość μ, równą 100 000. Może to prowadzić do przewidywania zaniedbywalnie małej kondensacji, którą należy pominąć, ze względu na niedokładność metody obliczeń. Należy obliczyć narastający opór ciepl-

ny i grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym od strony zewnętrznej do każdej powierzchni stykowej, n:

$$R_n^{'} = R_{se} + \sum_{j=1}^{n} R_j \qquad (4.7)$$

gdzie:
$R_n^{'}$ – opór cieplny na powierzchni styku,
R_{se} – opór wnikania ciepła na powierzchni na powierzchni zewnętrznej,
R_j – opór cieplny j-tej warstwy,

$$s_{d,n}^{'} = \sum_{j=1}^{n} s_{d,j} \qquad (4.8)$$

gdzie:
$s_{d,n}^{'}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza na powierzchni styku,
$s_{d,j}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza j-tej warstwy.

Całkowity opór cieplny i grubość warstwy nieruchomego powietrza o takim samym oporze dyfuzyjnym dane są równaniami (4.8) i (4.9).

$$R_T^{'} = R_{si} + \sum_{j=1}^{N} R_j + R_{se} \qquad (4.9)$$

gdzie:
$R_T^{'}$ – całkowity opór cieplny (środowisko do środowiska),
R_{si} – opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.7),

$$s_{d,T}^{'} = \sum_{j=1}^{N} s_{d,j} \qquad (4.10)$$

gdzie:
$s_{d,T}^{'}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza całkowita

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.3).

Poczynając od dowolnego miesiąca w roku (miesiąca próbnego), należy obliczyć temperaturę, ciśnienie pary nasyconej i rozkład pary w komponencie, jak określono we wcześniejszych rozważaniach. Należy ustalić, czy jakakolwiek kondensacja jest przewidywana. Jeżeli kondensacja nie jest przewidywana w miesiącu próbnym, należy powtórzyć obliczenia w odniesieniu do kolejnych następujących miesięcy aż do stanu, gdy albo:

a) nie stwierdzi się kondensacji w żadnym z dwunastu miesięcy, wtedy uznać komponent jako wolny od kondensacji; albo
b) stwierdzi się miesiąc z kondensacją, to jest miesiąc początkowy.

Jeżeli przewiduje się kondensację w miesiącu początkowym, należy powtórzyć obliczenia w odniesieniu do wcześniejszych miesięcy, aż do stanu, gdy albo:

a) przewiduje się kondensację we wszystkich dwunastu miesiącach; wówczas, poczynając od któregokolwiek miesiąca, obliczyć roczną akumulację kondensatu; albo
b) stwierdza się, że w danym miesiącu nie występuje kondensacja; wówczas przyjąć następny miesiąc jako początkowy.

Po określeniu miesiąca początkowego, należy prowadzić obliczenia określone dla każdego miesiąca w roku, poczynając od miesiąca początkowego.

Temperaturę na każdej powierzchni styku materiałów należy obliczyć zgodnie z:

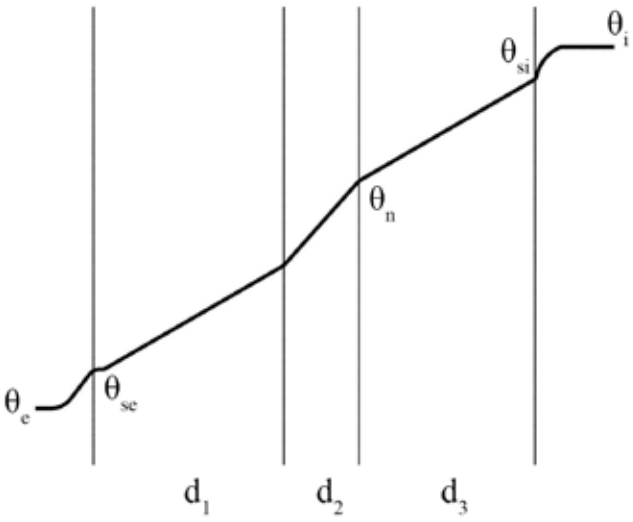
$$\theta_n = \theta_e + \frac{R_n^{'}}{R_T^{'}} \left(\theta_i - \theta_e\right) \qquad (4.11)$$

gdzie:
θ_n – temperatura w skali Celsjusza na powierzchni styku,
θ_i – temperatura w skali Celsjusza powietrza wewnętrznego,
θ_e – temperatura w skali Celsjusza powietrza zewnętrznego.

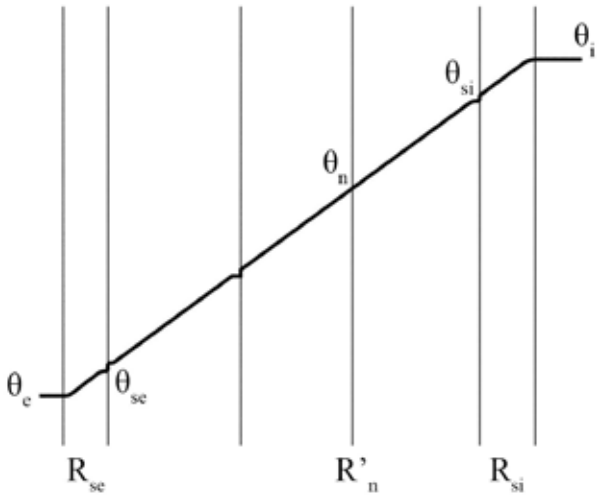
Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.2), (4.7), (4.9).

Przy założeniu warunków stanu ustalonego, rozkład temperatury w każdej warstwie jest liniowy – jak na rys. 4.3.

a)



b)



Rys. 4.3.
Rozkład temperatury w wielowarstwowym elemencie budowlanym: wykreślony w funkcji grubości poszczególnych warstw (a), wykreślony w funkcji oporu cieplnego poszczególnych warstw (b).

Mając temperaturę, należy obliczyć ciśnienie pary nasyconej na każdej powierzchni styku materiałów [N1]:

$$p_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{17{,}269 \cdot \theta_e}{237{,}3+\theta_e}} \; [Pa], \; gdy \; \theta_e \geq 0^o C \qquad (4.12)$$

$$p_{sat} = 610{,}5 \cdot e^{\frac{21{,}875 \cdot \theta_e}{265{,}5+\theta_e}} \; [Pa], \; gdy \; \theta_e < 0^o C \qquad (4.13)$$

gdzie:
θ_e – temperatura w skali Celsjusza powietrza zewnętrznego.

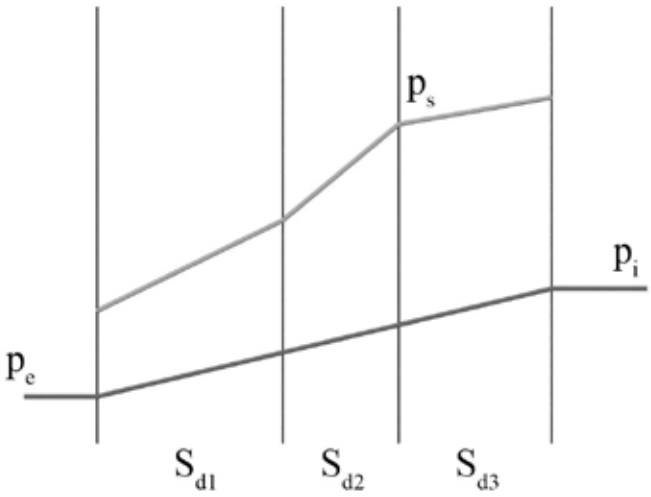
Wyrażenia te można odwrócić, aby umożliwić obliczenie temperatury odpowiadającej dowolnej wartości ciśnienia pary nasyconej.

$$\theta_{s,\min} = \frac{273{,}3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}{17{,}269 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}, \; gdy \; p_{sat} \geq 610{,}5 \; Pa \qquad (4.14)$$

$$\theta_{s,\min} = \frac{265{,}5 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}{21{,}875 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}, \; gdy \; p_{sat} < 610{,}5 \; Pa \qquad (4.15)$$

gdzie:
$\theta_{s,min}$ – minimalna temperatura w skali Celsjusza na powierzchni.
Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.2).

W przypadku określania rozkładu ciśnienia pary wodnej należy narysować przekrój elementu budowlanego z grubościami warstw równoważnymi ich dyfuzyjnie równoważnym grubościom warstwy powietrza, S_d, jak na rys. poniżej nr 4.4. Należy narysować linie proste łączące wartości ciśnienia pary nasyconej na każdej powierzchni styku materiałów. Jeżeli nie ma zakumulowanego kondensatu z poprzedniego miesiąca, należy narysować profil ciśnienia pary, jako linię prostą, łączącą wewnętrzną i zewnętrzną wartość ciśnienia pary (p_i i p_e). Jeżeli linia ta nie przekracza ciśnienia pary nasyconej na żadnej z powierzchni styku, kondensacja nie wystąpi – rys. poniżej nr 4.4., na którym ciśnienie pary wodnej w komponencie budowlanym jest niższe w każdym punkcie komponentu od ciśnienia pary nasyconej.



Rys. 4.4.
Dyfuzja pary wodnej w wielowarstwowym elemencie budowlanym w przypadku braku wewnętrznej kondensacji.

Strumień pary wodnej, przepływający przez element budowlany, można obliczyć, jako:

$$g = \delta_0 \frac{p_i - p_e}{s'_{d,T}} \qquad (4.16)$$

gdzie:

g – gęstość strumienia pary wodnej,

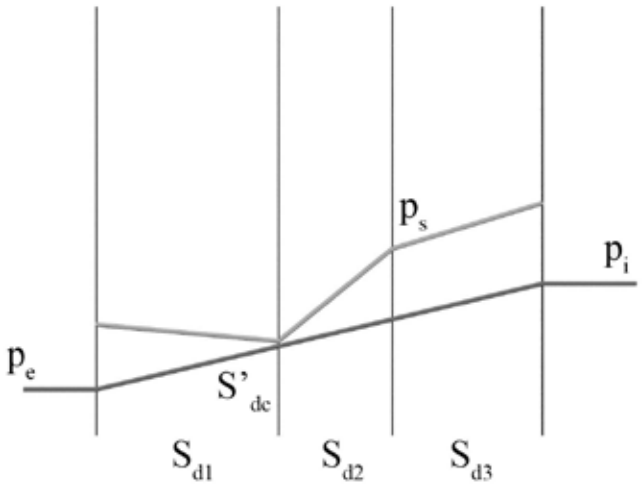
δ_0 – przepuszczalność powietrza w odniesieniu do ciśnienia cząstkowego pary wodnej,

p_i – ciśnienie pary wodnej wewnętrzne,

p_e – ciśnienie pary wodnej zewnętrzne.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.10).

Jeżeli ciśnienie pary wodnej przekracza wartość ciśnienia pary nasyconej na którejkolwiek powierzchni styku, należy wykreślić ciśnienie pary w postaci szeregu linii, które stykają się w tak wielu punktach, jak tylko możliwe, z profilem ciśnienia pary nasyconej, ale go nie przekraczają, jak pokazano na rysunku 4.5. Punkty te wskazują powierzchnie styku, na których wystąpi kondensacja.



Rys. 4.5.
Dyfuzja pary wodnej z wewnętrzną kondensacją na jednej płaszczyźnie stykowej

Strumień kondensacji jest różnicą między ilością wilgoci przenoszonej do i ilością wilgoci przenoszonej od powierzchni stykowej, na której występuje kondensacja:

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \qquad (4.17)$$

gdzie:

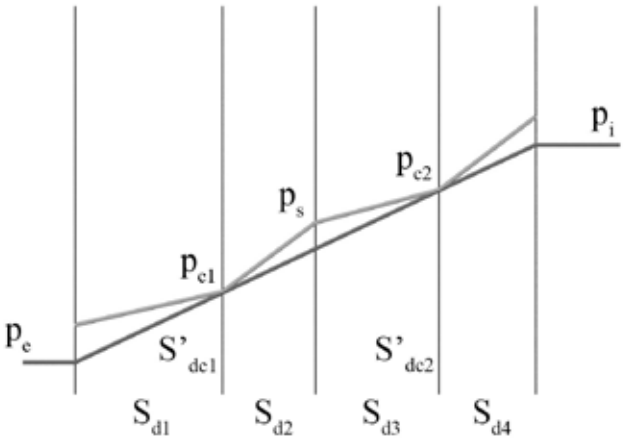
g_c – gęstość strumienia pary wodnej kondesacji,

p_c – ciśnienie pary wodnej kondensacji,

$s'_{d,c}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.10), (4.16).

W przypadku komponentu budowlanego z więcej niż jedną powierzchnią stykową (rys. 4.6), na której występuje kondensacja, należy podać ilość kondensacji na każdej powierzchni stykowej.



Rys. 4.6.
Dyfuzja pary wodnej z wewnętrzną kondensacją na dwóch płaszczyznach stykowych

Strumień kondensacji oblicza się dla każdej powierzchni stykowej, na której wystąpi kondensacja, na podstawie różnicy kątów nachylenia następujących po sobie linii prostych, tzn., w przypadku dwóch powierzchni kondensacji strumień kondensacji powierzchni stykowej *c1* oblicza się ze wzoru:

$$g_{c1} = \delta_0 \left(\frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \qquad (4.18)$$

gdzie:

g_{c1} – gęstość strumienia pary wodnej kondesacji warstwy 1,

p_{c1} – ciśnienie pary wodnej kondensacji warstwy 1,

p_{c2} – ciśnienie pary wodnej kondensacji warstwy 2,

$s'_{d,c1}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji warstwy 1,

$s'_{d,c2}$ – dyfuzyjnie równoważna grubość warstwy powietrza kondensacji warstwy 2.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16).

Strumień kondensacji powierzchni stykowej *c2* oblicza się ze wzoru:

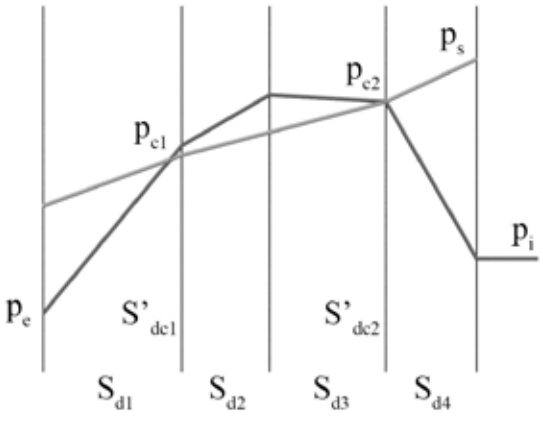
$$g_{c2} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \qquad (4.19)$$

gdzie:

g_{c2} – gęstość strumienia pary wodnej kondesacji warstwy 2.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18).

Jeżeli na jednej lub więcej powierzchni stykowych istnieje kondensat, zakumulowany w poprzednich miesiącach, ciśnienie pary wodnej powinno być równe ciśnieniu pary nasyconej a profil ciśnienia pary powinien być linia prostą, narysowaną między wartościami reprezentującymi ciśnienie pary wewnątrz, płaszczyznę kondensacji i ciśnienie pary na zewnątrz. Taki przykład zobrazowano na rys. 4.7. Jeżeli wartości ciśnienia pary są większe od ciśnienia pary nasyconej na którejkolwiek powierzchni stykowej, należy powtórnie wykreślić linie ciśnienia.



Rys. 4.7.
Kondensacja pary wodnej w komponencie budowlanym.

Strumień parowania oblicza się jako:

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \qquad (4.20)$$

gdzie:

g_{ev} – gęstość strumienia pary wodnej parowania

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18), (4.19).

Wyrażenia na strumień parowania i kondensacji są takie same. Umownie kondensacja pojawia się wtedy, gdy wyrażenie jest dodatnie, a parowanie, – gdy jest ujemne.

W komponencie budowlanym z więcej niż jedną powierzchnią kondensacji strumień parowania oblicza się oddzielnie dla każdej powierzchni stykowej. Strumienie parowania, przy dwóch powierzchniach parowania, oblicza się:

– na powierzchni stykowej *c1* wg wzoru

$$g_{ev1} = \delta_0 \left(\frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \qquad (4.21)$$

gdzie:

g_{ev1} – gęstość strumienia pary wodnej parowania warstwy 1

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18), (4.19)

– na powierzchni stykowej *c2* wg wzoru:

$$g_{ev2} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \qquad (4.22)$$

gdzie:

g_{ev2} – gęstość strumienia pary wodnej parowania warstwy 2.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18), (4.19).

Jeżeli ilość zakumulowanego kondensatu na jakiejś powierzchni stykowej, pod koniec miesiąca jest obliczona ujemna, należy przyjąć ją równą zeru. W komponencie budowlanym z więcej niż jedną powierzchnią kondensacji mogą istnieć miesiące, w których kondensacja pojawi się w jednej płaszczyźnie, a parowanie w innej. Strumień kondensacji, g_e, lub parowania, g_{ev}, oblicza się oddzielnie dla każdej powierzchni stykowej. Przykładowo strumień kondensacji między warstwami 1 i 2 oblicza się wg wzoru:

$$g_e = \delta_0 \left(\frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \qquad (4.23)$$

gdzie:

g_e – gęstość strumienia pary wodnej powietrza zewnętrznego.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18), (4.19).

Strumień parowania między warstwami 3 i 4 oblicza się wg wzoru:

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \quad (4.24)$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.16), (4.18), (4.19).

Kryteria stosowane przy ocenie konstrukcji w oparciu o przedstawioną metodologię uzależnione są od tego czy przewiduje się kondensację na powierzchniach stykowych w określonych miesiącach. Jeśli nie przewiduje się wystąpienia kondensacji na powierzchniach stykowych we wszystkich miesiącach konstrukcję ocenia się, jako wolną od wewnętrznej kondensacji. Jeżeli kondensacja występuje na jednej lub większej liczbie powierzchni stykowych, ale z każdej z nich przewiduje się wyparowanie kondensatu podczas miesięcy letnich to w takich przypadkach należy podać maksymalną ilość kondensatu występującą na każdej z powierzchni stykowych oraz miesiąc, w którym maksimum wystąpi. Należy również rozważyć ryzyko degradacji materiałów budowlanych oraz pogorszenia właściwości cieplnych w wyniku obliczonej maksymalnej ilości wilgoci, zgodnie z wymaganiami zawartymi w przepisach i wskazówkach w normach wyrobów. W przypadku, gdy występuje kondensacja na jednej lub większej liczbie powierzchni stykowych, która nie wyparowuje całkowicie podczas miesięcy letnich należy stwierdzić, że ocena konstrukcji wypadła niepomyślnie, a także ustalić maksymalną ilość wilgoci, która pojawi się na każdej z powierzchni stykowych oraz ilość wilgoci pozostałej po 12 miesiącach na każdej powierzchni stykowej.

W załączniku F normy [N1] podano informacje dotyczące bardziej zaawansowanych metod obliczania kondensacji wilgoci. Na rynku funkcjonuje pewna liczba modeli komputerowych do bardziej zaawansowanych obliczeń, od których oczekuje się znacznie lepszej dokładności niż opisano w przywołanej normie. Jednym z głównych problemów wpływających na dokładność uzyskiwanych wyników są dane wejściowe takie, jak np. właściwości materiałów a także dane klimatyczne. W wielu przypadkach dane te nie są wystarczająco dobrze znane. Jak podaje norma *„opracowane modele komputerowe są bardzo często oparte na różnicach skończonych z krokami po czasie rzędu minut lub godzin i odległością między punktami siatki rzędu centymetrów. Mogą one normalnie obejmować przenoszenie wilgoci tak w fazie ciekłej, jak i pary wodnej oraz absorpcję wilgoci w materiałach niehigroskopijnych. Większość modeli pozwala na wyrażanie właściwości materiałów, jako funkcji, na przykład, wilgotności lub temperatury. Zewnętrzne i wewnętrzne dane klimatyczne są podawane, jako wartości godzinowe lub jako funkcje matematyczne. Niektóre modele uwzględniają sprzężone efekty przenoszenia ciepła i wilgoci, inne obliczają pola temperatury i wilgotności niezależnie jedno od drugiego”.*

Jednym z bardziej zaawansowanych narzędzi obliczeniowych jest program symulacyjny WUFI 2D. Program ten jest uznanym narzędziem do oceny stanu wilgotnościowego przegród oraz rozwinięciem programu WUFI Pro do obliczeń przegród płaskich w elementach jednowymiarowych. WUFI 2D uzupełnia możliwości obliczeniowe oprogramowania WUFI Pro o dodatkowy wymiar. W związku z powyższym można wykonać obliczenia na styku dwóch elementów budowlanych np. w narożu ściennym, które nie mogą być zrealizowane przy wykorzystaniu oprogramowania z jednowymiarowym przepływem ciepła. WUFI 2D oparty jest na układzie nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych, opisujących niestacjonarny sprzężony transport ciepła i wilgoci w materiałach budowlanych. Zawilgocenie poszczególnych warstw przegród określa się uwzględniając dyfuzyjny przepływ pary wodnej, akumulację sorpcyjną wilgoci oraz ruch kapilarny. W programie WUFI 2D dyfuzje strumienia pary wodnej opisane jest zwykłym równaniem transportu w układzie współrzędnych kartezjańskich x,y w postaci [1]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{1}{\partial x}(D_w(u)\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\partial y}(D_w(u)\frac{\partial u}{\partial y}) \quad (4.25)$$

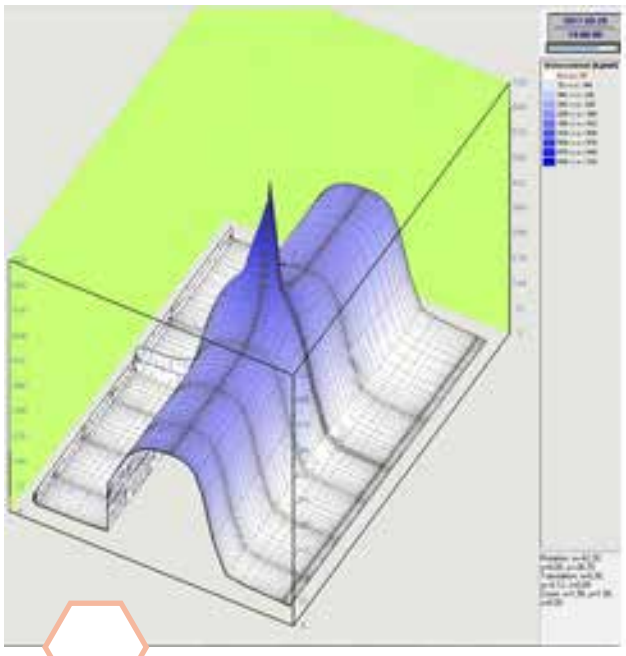
gdzie:

D_w – współczynnik transportu cieczy zależny od rodzaju materiału, oraz warunków cieplno-wilgotnościowych.

Przy analizie jednowymiarowej człon równania odpowiadający za kierunek Y jest zerowy. Takie sformułowanie zagadnienia transportu pary wodnej, wody oraz sprzężonego z nim przepływu ciepła pozwala na definiowanie dowolnych modeli dwuwymiarowych łącznie z imperfekcjami w postaci np. łączników metalowych. Jedynym ograniczeniem, co do możliwości analizy dowolnych detali architektonicznych są dane materiałowe.

W przeprowadzonej analizie wykorzystano praktycznie tylko rodzaje materiałów, które występują w bazie danych programu. Powyższe zagadnienia dokładnie opisane są także w pozycjach literaturowych [4], [5], [6], [7], [8].

Przykładowe wyniki obliczeń modelowania dwuwymiarowego w zakresie przyrostu wilgoci, uzyskane w programie WUFI 2D przedstawiono w formie graficznej w trójwymiarowym układzie współrzędnych na rys 4.8.



Rys. 4.8.
Końcowa zawartość wilgoci w modelu przegrody. [2].

Według normy PN-EN ISO 13788 [N1] ryzyko wystąpienia kondensacji pary wodnej określa obliczeniowy czynnik temperaturowy na wewnętrznej powierzchni przegrody, który oblicza się wg wzoru (4.26):

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \qquad (4.26)$$

gdzie:
f_{Rsi} – czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej.
Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.2), (4.11), (4.14).

Przegrody zewnętrzne oraz złącza budynku powinny się charakteryzować takim współczynnikiem f_{Rsi}, aby był on nie mniejszy niż wymagana wartość krytyczna $f_{Rsi,\ min}$. Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych [3] dopuszcza dwojaki sposób obliczania czynników temperaturowych. Przy temperaturze wewnętrznej t_i < 20°C zaleca obliczenia zgodnie z normą[9], zaś przy temperaturze t_i > 20°C, dopuszczono przyjmowanie wartości czynnika $f_{Rsi,\ min}$ = 0,72. Podejście do problemu w drugim przypadku wydaje się być nieuzasadnione, gdyż metoda proponowana przez normę europejską jest zdecydowanie dokładniejsza. Uproszczenie przyjęte w rozporządzeniu [3] zakładające stałą wilgotność pomieszczeń (50%) o bardzo niskiej wartości współczynnika $f_{Rsi,min}$ = 0,72, prowadzi do znacznego obniżenia wymagań co do przegród i złączy, w których mogą występować mostki termiczne. Współczynnik f_{Rsi} obliczony wg (4.26) charakteryzuje jakość cieplną komponentu budowlanego w sposób niezależny od przyjętych do obliczeń wartości temperatury powietrza wewnętrznego i temperatury powietrza zewnętrznego. Uproszczenie wyrażenia może nastąpić w przypadku przegrody jednowarstwowej lub z warstwami jednorodnymi cieplnie a także w miejscach poza wpływem mostków termicznych,

$$f_{Rsi} = (U^{-1} - R_{si}) \cdot U \qquad (4.27)$$

gdzie:
U – współczynnik przenikania ciepła komponentu lub elementu.
Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.9), (4.26).

Dla komponentu z warstwami, które nie są jednorodne cieplnie wartość f_{Rsi} oblicza się wg wzoru:

$$f_{Rsi} = 1 - \frac{R_{si,\min}}{R_{T,\min}} \qquad (4.28)$$

gdzie:
$R_{T,min}$ – jest najniższym oporem cieplnym sekcji, wydzielonej z komponentu budowlanego,
$R_{si,min}$ – minimalny opór przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej.
Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.26).

W celu obliczenia czynnika temperaturowego pierwszym krokiem jest przyjęcie temperatury środowiska zewnętrznego oraz względnej wilgotności środowiska zewnętrznego dla wybranej stacji meteorologicznej. Następnie należy obliczyć ciśnienie pary nasyconej wg wzorów 4.12 i 4.13. Ciśnienie zewnętrzne pary wodnej oblicza się wg wyrażenia:

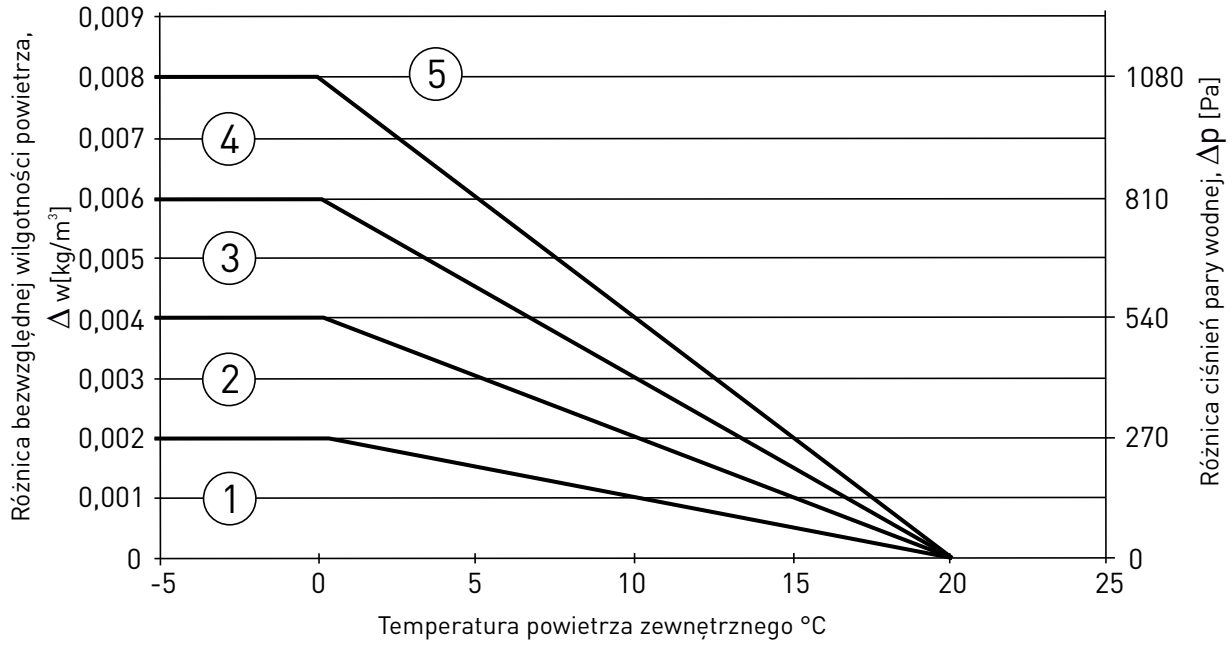
$$p_e = p_{sat}\varphi \qquad (4.29)$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.2).

Różnica ciśnień cząsteczkowych pary wodnej Δp pomiędzy środowiskiem zewnętrznym i wewnętrznym jest uzależniana od klasy wilgotności wewnętrznej, która definiuje rodzaj eksploatacji pomieszczeń. Klasy wilgotności zestawiono w tablicy 4.1.

Tablica 4.1.
Klasy wilgotności wewnętrznej [N1]

Klasa wilgotności	Budynek
1.	Powierzchnia magazynowa.
2.	Biura, sklepy.
3.	Mieszkania mało zagęszczone.
4.	Mieszkania mało zagęszczone, hale sportowe, kuchnie, stołówki; budynki ogrzewane grzejnikami gazowymi bez przewodów spalinowych.
5.	Budynki specjalne np. pralnia, browar, basen kąpielowy.



Rysunek 4.9.
Różnica wilgotności powietrza w podziale na klasy wilgotności w zależności od temperatury zewnętrznej [N1]

Ciśnienie pary wodnej p_i wewnątrz budynku oblicza się ze wzoru

$$p_i = p_e + 1{,}1\Delta p \tag{4.30}$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.2), (4.4).

Ciśnienie krytyczne pary nasyconej p_{sat}. Oblicza się według wyrażenia

$$p_{sat} = \frac{p_i}{0{,}8} \tag{4.31}$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.2).

Minimalną dopuszczalną temperaturę wewnętrznej powierzchni przegrody $\theta_{s,min}$ oblicza się w zależności od wartości ciśnienia krytycznego pary nasyconej:

$$\theta_{s,\min} = \frac{273{,}3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}{17{,}269 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}, gdy\ p_{sat} \geq 610{,}5\ Pa \tag{4.32}$$

$$\theta_{s,\min} = \frac{265{,}5 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}{21{,}875 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610{,}5}\right)}, gdy\ p_{sat} < 610{,}5\ Pa \tag{4.33}$$

Mając powyższe dane można obliczyć wartość minimalnego czynnika temperaturowego:

$$f_{Rsi,\min} = \frac{\theta_{si,\min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \tag{4.34}$$

Oznaczenia, jak we wzorze (4.2), (4.11), (4.14), (4.26).

Współczynnik $f_{Rsi,min}$ wyznacza się dla każdego miesiąca, a krytycznym miesiącem jest miesiąc z największą wartością $f_{Rsi,min}$. Krytycznym miesiącem w którym współczynnik jest największy, jest miesiąc grudzień. Należy dążyć do tego, aby wszystkie przegrody i złącza cechowały się współczynnikiem $f_{Rsi,}$ wyższym niż wartość krytyczna:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,\min} \tag{4.35}$$

gdzie:

$f_{Rsi,min}$ – minimalny czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej.

W praktyce inżynierskiej można także przeprowadzić proste obliczenia temperatury punktu rosy. Pierwszym krokiem jest wyznaczenie temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody bez mostków cieplnych liniowych ze wzoru:

$$\Theta_i = t_i - q \cdot R_{si} = t_i - U \cdot (t_i + t_e) \cdot R_{si} \tag{4.36}$$

gdzie:

t_i – temperatura wewnętrzna,

t_e – temperatura zewnętrzna.

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.4), (4.26).

Wilgotność względną powietrza wewnętrznego wyznacza się ze wzoru:

$$\varphi_i = \frac{p_i}{p_{ni}} \cdot 100\% \tag{4.37}$$

gdzie

p_{ni} – ciśnienie stanu nasycenia

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.15)

Ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu

$$p_i = \frac{\varphi_i \cdot p_{ni}}{100} \cdot 100\% \tag{4.42}$$

Pozostałe oznaczenia, jak we wzorze (4.12), (4.41).

Temperaturę punktu rosy odczytuje się z odczytany w tabeli 4.3 [N2]

Tablica 4.2.
Zależność ciśnienia pary nasyconej od temperatury powietrza [N2]

Tempe-ratura	Ciśnienie pary nasyconej, hPa									
°C	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
30	42,44	42,69	42,94	43,19	43,44	43,69	43,94	44,19	44,45	44,69
29	40,06	40,30	40,53	40,77	41,01	41,24	41,48	41,72	41,96	42,19
28	37,81	38,03	38,26	38,48	38,71	38,94	39,16	39,39	39,61	39,84
27	35,66	35,88	36,09	36,31	36,52	36,74	36,95	37,17	37,39	37,59
26	33,62	33,82	34,03	34,23	34,43	34,63	34,84	35,04	35,25	35,44
25	31,69	31,88	32,08	32,27	32,46	32,66	32,84	33,04	33,24	33,43
24	29,85	30,03	30,21	30,40	30,59	30,77	30,95	31,14	31,32	31,51
23	28,10	28,25	28,45	28,63	28,80	28,97	29,15	29,32	29,50	29,68
22	26,45	26,61	26,78	26,95	27,11	27,27	27,44	27,61	27,77	27,94
21	24,87	25,04	25,18	25,35	25,51	25,66	25,82	25,98	26,13	26,29
20	23,40	23,54	23,69	23,84	23,99	24,13	23,28	24,43	24,57	24,73
19	21,97	22,12	22,27	22,41	22,54	22,68	22,83	22,97	23,10	23,24
18	20,65	20,79	20,91	21,05	21,19	21,32	21,45	21,58	21,72	21,85
17	19,37	19,50	19,63	19,76	19,88	20,01	20,14	20,27	20,39	20,52
16	18,18	18,30	18,41	18,54	18,66	18,78	18,89	19,01	19,14	19,26
15	17,06	17,17	17,29	17,39	17,50	17,62	17,73	17,84	17,95	18,06
14	15,99	16,10	16,21	16,31	16,42	16,53	16,63	16,74	16,84	16,95
13	14,98	15,08	15,18	15,28	15,38	15,48	15,59	15,69	15,78	15,88
12	14,03	14,13	14,22	14,31	14,41	14,51	14,60	14,70	14,79	14,88
11	13,12	13,21	13,30	13,40	13,40	13,58	13,67	13,75	13,85	13,94
10	12,28	12,37	12,45	12,54	12,62	12,70	12,79	12,87	12,96	13,04
9	11,48	11,56	11,63	11,71	11,79	11,87	11,95	12,03	12,11	12,18
8	10,73	10,81	10,88	10,96	11,03	11,10	11,17	11,25	11,33	11,40
7	10,02	10,08	10,16	10,23	10,30	10,38	10,45	10,52	10,59	10,66
6	9,35	9,42	9,49	9,55	9,61	9,68	9,75	9,82	9,88	9,95
5	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,07	9,13	9,19	9,25
4	8,13	8,19	8,25	8,31	8,37	8,43	8,49	8,54	8,61	8,66
3	7,59	7,65	7,70	7,76	7,81	7,87	7,93	7,98	8,03	8,08
2	7,05	7,10	7,16	7,21	7,27	7,32	7,37	7,43	7,48	7,53
1	6,57	6,62	6,67	6,72	6,77	6,82	6,87	6,91	6,96	7,00
0	6,11	6,16	6,21	6,26	6,30	6,35	6,40	6,45	6,49	6,53
0	6,11	6,05	6,00	5,95	5,92	5,87	5,82	5,77	5,72	5,67
-1	5,62	5,57	5,52	5,47	5,43	5,38	5,34	5,31	5,27	5,22
-2	5,17	5,14	5,09	5,05	5,01	4,96	4,92	4,89	4,84	4,80
-3	4,76	4,72	4,68	4,64	4,61	4,56	4,52	4,48	4,44	4,40
-4	4,37	4,33	4,30	4,26	4,23	4,19	4,15	4,12	4,08	4,05
-5	4,01	3,98	3,95	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,75	3,72
-6	3,68	3,65	3,62	3,59	3,56	3,53	3,50	3,47	3,43	3,40
-7	3,37	3,35	3,33	3,30	3,27	3,24	3,21	3,18	3,15	3,12
-8	3,10	3,06	3,04	3,01	2,98	2,96	2,94	2,91	2,88	2,86
-9	2,84	2,81	2,79	2,76	2,74	2,72	2.69	2,67	2,64	2,62
-10	2,60	2,58	2,55	2,53	2,51	2,49	2,46	2,44	2,42	2,39
-11	2,37	2,35	2,33	2,31	2,29	2,28	2,26	2,24	2,21	2,19
-12	2,17	2,15	2,13	2,11	2,09	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00
-13	1,98	1,97	1,95	1,93	1,91	1,90	1,88	1,86	1,84	1,82
-14	1,81	1,80	1,78	1,77	1,75	1,73	1,72	1,70	1,68	1,67
-15	1,65	1,64	1,62	1,61	1,59	1,58	1,57	1,55	1,53	1,52
-16	1,50	1,49	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41	1,39	1,38
-17	1,37	1,36	1,35	1,33	1,32	1,31	1,29	1,28	1,27	1,26
-18	1,25	1,24	1,23	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,16	1,15
-19	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,07	1,06	1,05	1,04
-20	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

4.5.
Literatura

[1] Barreira E., Delgado J., Ramos N., *Freitas Hygrothermal Numerical Simulation: Application in Moisture Damage Prevention.V. Computer and Information Science.* Numerical Analysis and Scientific Computing. Numerical Simulations - Examples and Applications in Computational Fluid Dynamics 2010.

[2] Dr inż. Paweł Krause, Dr inż. Tomasz Steidl *Transport wilgoci w ścianach z betonu komórkowego z łącznikiem stalowym*, Praca niepublikowana. Gliwice 2016.

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki iich usytuowanie*. Dz. U. 2002 poz. 75 wraz z późniejszymi zmianami.

[4] Krus M., Künzel H.M. *Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Fassaden nach Hydrophobierungsmaßnahmen.* WTA-Journal 2/03.

[5] Krus M Sedlbauer K.*Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. 1 Internationales Innendaemmkongress.* Dresden 2011.

[6] Künzel H. M.: *Simultaneus Heat and Moisture Transport in Building Components. One and two dimensional calculation using simple parameters*, IRB Verlag, Stuttgart 1995.

[7] Šikulaa O., Mohaplb M. *2D Model of Capillary Transport of Water in Aerated Concrete.* Advanced Materials Research 01/2013.

[8] Praca zbiorowa pod kierunkiem Piotra Klemma *Budownictwo Ogólne tom 2 fizyka budowli,* Wydawnictwo ARKADY, Warszawa 2005 r.

[9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki ich usytuowanie.* Dz. U. 2002 poz. 75 wraz z późniejszymi zmianami.

[N1] PN-EN-ISO 13788:2001. *Cieplno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – Temperatura powierzchni wewnętrznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej – Metody obliczania.*

[N2] PN-EN ISO 6946:2008. *Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania.*

[N3] PN-EN ISO 10456:2009. *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.*

5. DIAGNOSTYKA CIEPLNA I SZCZELNOŚĆ POWIETRZNA BUDYNKÓW

5.1.
Symbole i jednostki

Symbol	Wielkość	Jednostka
ε	emisyjność	-
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	$W/(m \cdot K)$
f_{Rsi}	czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej	-
n_{50}	krotność wymiany powietrza przy różnicy ciśnienia między wnętrzem a otoczeniem budynku równej 50 Pa	h^{-1}
m_w	masa próbki zawilgoconej	g
m_s	masa próbki suchej	g
W_m	wilgotność masowa	%

5.2.
Terminy i definicje

Ciepło - sposób przekazywania energii wewnętrznej układowi termodynamicznemu.
Emisyjność - wielkość określająca zdolność danego ciała do emisji promieniowania cieplnego.
Izoterma - linia na powierzchni ciała stałego, lub w przekroju, łącząca punkty mające tę samą temperaturę w danym czasie.
Liczba wymian powietrza w warunkach ciśnienia odniesienia – strumień przecieku powietrza powstałego pod wpływem różnicy ciśnienia po obu stronach obudowy budynku równej ciśnieniu odniesienia, podzielony przez kubaturę wewnętrzną. Uwaga: zazwyczaj 50 Pa.
Kubatura wewnętrzna – podlegająca pomiarom przestrzeń wewnątrz budynku lub części budynku celowo ogrzewana, chłodzona lub wentylowana, zazwyczaj nie obejmująca przestrzeni poddasza, piwnicy i przybudówek.
Obraz cieplny – obraz wytwarzany przez system detekcji promieniowania podczerwonego przedstawiający rozkład pozornej temperatury promieniowania na powierzchni.
Obudowa budynku – granica lub przegroda oddzielająca badaną kubaturę wewnętrzną od środowiska zewnętrznego budynku lub innej części budynku.
Przepuszczalność powietrza – strumień przecieku powietrza pod wpływem różnicy ciśnienia po obu stronach obudowy budynku równej ciśnieniu odniesienia, podzielony przez pole powłoki budynku.
Strumień jednostkowy przecieku powietrza – strumień przecieku powietrza pod wpływem różnicy ciśnienia po obu stronach obudowy budynku równej ciśnieniu odniesienia, podzielony przez pole podłogi. Uwaga: najczęściej jest stosowana różnica ciśnienia 50 Pa.
Strumień przecieku powietrza – strumień przepływu powietrza przez obudowę budynku. Uwaga: zazwyczaj 50 Pa.
Termografia – metoda wskazywania i przedstawiania rozkładu temperatury powierzchni za pomocą systemu detekcji promieniowania podczerwonego, z uwzględnieniem interpretacji przypadkowych zjawisk wywołujących zniekształcenia obrazów cieplnych.
Termogram – zapisany obraz cieplny.

5.3.
Diagnostyka cieplna budynków

Diagnostyka cieplna budynków jest czynnością pracochłonną i wymagającą szerokiej wiedzy z zakresu budownictwa ogólnego, a także znajomości norm i przepisów z okresu wznoszenia obiektów. Bardzo ważna jest dodatkowo wiedza z zakresu materiałoznawstwa oraz technik i technologii wznoszenia przegród budowlanych. Całościowa ocena stanu ochrony cieplno-wilgotnościowej budynku powinna obejmować kilka wybranych etapów. Pierwszy etap dotyczy analizy przyjętych rozwiązań projektowych. Ocenę taką przeprowadza się jako weryfikację założeń zawartych w dokumentacji projektowej. Na podstawie archiwalnej dokumentacji projektowej lub inwentaryzacji architektonicznej powinno być możliwe określenie grubości wszystkich przegród zewnętrznych. Przeprowadzenie oceny przegród budowlanych, w aspekcie ich zgodności z dokumentacją techniczną jest niezbędnym elementem diagnostyki cieplnej budynków. Efektem przeprowadzonych analiz i badań powinno być jednoznaczne ustalenie danych do przeprowadzenia końcowych obliczeń cieplno-wilgotnościowych i ustalenie ich zgodności z istniejącą dokumentacją [1]. Analiza dokumentacji projektowej powinna być wykonana zarówno dla projektu budowlanego, jaki i projektu wykonawczego. Istotne jest także dokonanie kontroli projektów zamiennych oraz dokumentacji powykonawczej (w przypadku ewentualnych zmian wyniktych w trakcie prowadzenia robót budowlanych). W projekcie budowlanym sprawdzeniu powinien podlegać: opis techniczny budynku, obliczenia współczynników przenikania ciepła przegród zewnętrznych oraz przegród wewnętrznych oddzielających zróżnicowane strefy temperaturowe, obliczenie poprawek do współczynnika przenikania ciepła ze względu na nieszczelności w warstwie izolacji, łączniki mechaniczne przechodzące przez warstwę izolacyjną oraz opady na dach o odwróconym układzie warstw, obliczone zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi obliczania oporu cieplnego i współczynnika przenikania ciepła oraz przenoszenia ciepła przez grunt. Kolejnym krokiem jest analiza kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody oraz wewnątrz przegrody, a także obliczenie przyrostu kondensatu w kolejnych miesiącach, i czynnika temperaturowego f_{Rsi}. Analiza rozwiązań projektowych pozwala na określenie błędów, które powstały na etapie tworzenia dokumentacji technicznej. Prowadząc obliczenia weryfikujące izolacyjność cieplną przegród zewnętrznych należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, czy w trakcie eksploatacji nie uległy zmianie wymiary geometryczne zastosowanej izolacji termicznej. Dotyczy to przede wszystkim izolacji cieplnych z materiałów ściśliwych. Takie zmiany grubości izolacji cieplnej mają istotny wpływ na uzyskiwane wartości liczbowe współczynników przenikania ciepła całej przegrody.

5.3.1.
Badania niszczące

Badania prowadzone na budynku mogą mieć charakter badań niszczących lub nieniszczących. Badania takie można wykonywać bezpośrednio na obiekcie lub także dodatkowo na podstawie pobranych próbek, w zależności od potrzeb, w laboratorium. W przypadku badań niszczących może występować konieczność pobrania próbek fragmentów wszystkich warstw materiałów wraz z określeniem ich grubości – rys 5.1. Wykonuje się to na podstawie - odwiertów kontrolnych lub odkuć. Podstawową informacją uzyskaną w wyniku badań niszczących powinna być grubość zastosowanych materiałów budowlanych.

Na podstawie badań materiału pobranego z odkrywek istnieje możliwość określenia rzeczywistego współczynnika przewodzenia ciepła zastosowanej izolacji termicznej. Badania takie najczęściej wykonuje się jako badania polowe lub jako wstępne pomiary poprzedzające badania laboratoryjne. W przypadku materiałów termoizolacyjnych można wykonać pomiary za pomocą metody tzw. „gorącego drutu" przy użyciu zestawu pomiarowego np. THERM 2227-2 z sondą do pomiarów współczynnika λ dla materiałów izolacyjnych włóknistych i nasypowych. Urządzenie to pracuje przy pomocy ogrzewanej sondy TC, która emituje tak długo stały strumień ciepła w mierzonym materiale, aż wytworzy się równowaga między pobraną energią ogrzewania sondy a ciepłem przewodzonym przez materiał. Przewodność cieplna materiału jest podawana automatycznie po wykonaniu pomiaru w jednostkach W/mK.

Metoda niszcząca jest także wykorzystywana w celu określenia stopnia zawilgocenia przegród budowlanych. Metoda ta umożliwia określenie wilgotności masowej materiałów budowlanych w całym przekroju przegrody. Ze względu na fakt, że nie ma szczegółowych wytycznych normatywnych w tym zakresie lokalizacji i ilości pobieranych próbek, ilość i miejsca ich pobierania muszą być tak dobrane, aby uzyskane wyniki były reprezentatywne. Należy pamiętać, iż pobierając próbki powodujemy lokalne widoczne uszkodzenia przegrody, mogące mieć wpływ na dalsze jej użytkowanie, w tym np. na powstawanie lokalnych przemarzań, zawilgoceń i postępujących uszkodzeń. Należy dążyć do minimalizowania szkód w przegrodzie budowlanej, ze szczególnym uwzględnieniem szkód od strony wewnętrznej (np. możliwe przebicie na wylot, uszkodzenie ukrytych instalacji itp.).



Rys. 5.1.
Przykład badań niszczących ściany w budynku mieszkalnym

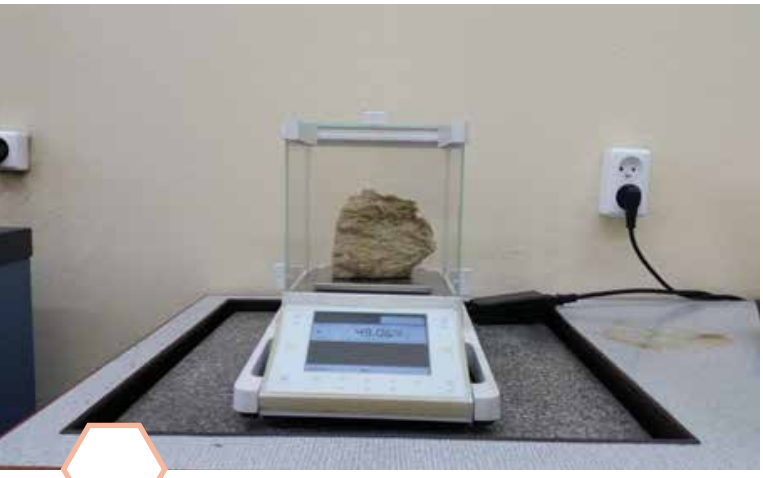
W literaturze tematu przyjmuje się następujący podział ze względu na zawilgocenie murów (najczęściej ceramicznych):

$W_m = 0\text{-}3\%$ – ściany o dopuszczalnej wilgotności,
$W_m = 3\text{-}5\%$ – ściany o podwyższonej wilgotności,
$W_m = 5\text{-}8\%$ – ściany średnio zawilgocone,
$W_m = 8\text{-}12\%$ – ściany mocno zawilgocone,
$W_m > 12\%$ – ściany mokre.

Istnieją zróżnicowane metody badań wilgotności materiału. Jedną z najczęściej stosowanych jest metoda suszarkowo-wagowa. Pobraną próbkę badanego materiału waży się, wysuszy do stałej masy w temperaturze ok 105 °C i dokonuje ponownego pomiaru wagi. Wilgotność masową wyliczamy ze wzoru:

$$U_m = W_m = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100\% \qquad (5.1)$$

m_w – masa próbki zawilgoconej,
m_s – masa próbki suchej.



Rys. 5.2.
Próbka izolacji termicznej o niewielkiej objętości w wagosuszarce

W przypadku konieczności wykonania pomiarów wilgotności masowej fragmentu ściany można wykonać pomiary przy pomocy wilgotnościomierza z sondą do pomiaru wilgotności materiałowej. W wyniku przeprowadzonych pomiarów punktowych, można dokonać tzw. oceny ilościowej w zakresie wilgotności ścian zewnętrznych. Podawany przez producenta zasięg pomiaru wynosi ok. 15-20 cm w głąb warstwy ściennej. W przypadku przegrody o większej grubości ocenie podlega tylko wierzchnia jej warstwa. Pomiary należy przeprowadzić bezpośrednio po wykonaniu odkrywek. W badanej strefie powinno się wykonać 3- 5 cząstkowych pomiarów punktowych, w zależności od stopnia zawilgocenia powierzchni ściany. Jako miarodajne wyniki powinno się przyjmować wartość średnią z min. 3 pomiarów. Wilgotność mierzona przy pomocy opisywanego zestawu pomiarowego jest wilgotnością masową.



Rys. 5.3.
Pomiary wilgotności masowej podłoża w miejscu odkrywki.

5.3.2.
Badania nieniszczące

Badania nieniszczące w analizie cieplno-wilgotnościowej dotyczą badań: rozkładu pola temperatury powierzchni badanej przegrody lub rozkładu wilgotności powierzchniowej przegrody. Rozwój zróżnicowanych technik pomiarowych umożliwia wykonanie szeregu badań przegród budowlanych, nie ingerując w ich strukturę materiałową, a co z tym związane nie uszkadzając badanych przegród budynku. Urządzenia do badań nieniszczących w zakresie oceny stanu ochrony cieplno-wilgotnościowej możemy podzielić na trzy podstawowe grupy [1]:

- urządzenia do oceny stanu ochrony cieplnej, w szczególności do badania temperatury powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej - pirometry i kamery termowizyjne;
- urządzenia do oceny zawilgocenia materiałów budowlanych - badania zawilgocenia powierzchni - wilgotnościomierze stykowe;
- pozostałe urządzenia pomiarowe - do prowadzenia badań towarzyszących jak np. badania szczelności powietrznej Blower Door.

Bardzo prostym urządzeniem pomiarowym do określenia temperatury na powierzchni przegrody jest pirometr - przyrząd pomiarowy służący do bezdotykowego pomiaru. Działa on w oparciu o pomiar i analizę promieniowania cieplnego emitowanego przez badane ciała.

W wyniku pomiaru otrzymujemy temperaturę dla jednego wybranego punktu pomiarowego. Utrudnia to ocenę rozkładu temperatury na całej powierzchni ściany. Urządzenie to rzadko stosuje się do szerszej diagnostyki cieplnej w budownictwie.

W diagnostyce cieplnej jedną z najszybszych metod pomiarowych, są badania termowizyjne (termograficzne). Termografia jest metodą badawczą, która polega na wizualizacji, rejestracji i interpretacji rozkładów temperatury powierzchni badanych przegród budowlanych. Najczęściej stosowaną metodą oceny jakości cieplnej przegrody jest termografia jakościowa. Pod tym pojęciem należy rozumieć metody, w których nie wyznacza się określonych wartości pomiarowych, przedstawiając wizualizację różnic temperatury na badanej powierzchni przegrody. Wykonanie badań termograficznych i opracowanie ich wyników pozwala na ocenę jakości cieplnej przegród budynku. Na tej podstawie można oszacować rodzaj i ilość mostków cieplnych. Badania termowizyjne dotyczące określenia niejednorodności termicznej wykonuje się najczęściej w sezonie ogrzewczym, w czasie eksploatacji budynku. W celu dokonania oceny otrzymanych termogramów (zdjęć cieplnych) potrzebna jest wiedza zarówno praktyczna jak i teoretyczna z dziedziny

termografii jak i z dziedziny budownictwa i fizyki budowli.

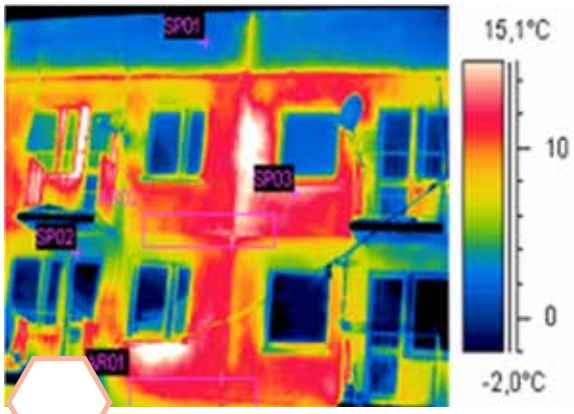
Badania termowizyjne prowadzi się z reguły od strony zewnętrznej budynku. Wartość użyteczna takich pomiarów jest znacznie mniejsza aniżeli przy badaniach od strony wewnętrznej. Badania od strony wewnętrznej są bardziej miarodajne, jednak ze względu na uciążliwości spowodowane prowadzeniem ich w eksploatowanych pomieszczeniach, mają z reguły ograniczony charakter. Aby wykonać poprawną pełną jakościową diagnostykę termoizolacyjną należy wykonać badania zarówno od wewnątrz jak i od strony środowiska zewnętrznego. Wybrane nieprawidłowości w postaci mostków cieplnych, można wykryć jedynie z jednej strony dla określonej geometrii przegród budowlanych. Przykładem może być typowe naroże ścienne. Pomiary termowizyjne wykonywane od strony zewnętrznej nie wykazują dla tego typu przegród anomalii termicznych związanych z mostkiem termicznym typu geometrycznego. Dopiero przeprowadzenie badań termowizyjnych od strony wewnętrznej umożliwia określenie różnic temperatury oraz wykrycie defektów termicznych przegrody.

Zgodnie z normą [N1] przed rozpoczęciem właściwych badań termograficznych należy zapoznać się z dokumentacją techniczną budynku, w tym z budową badanych przegród zewnętrznych. Kolejnym krokiem jest określenie emisyjność powierzchni materiałów w widmowym zakresie czułości aparatury oraz wyznaczenie przewidywanego rozkład temperatury na powietrzni przegrody np. za pomocą programów numerycznych. Istotna kwestia dotyczy oszacowania wpływu pracy wentylacji, źródeł ciepła oraz kondensacji wilgoci na powierzchni przegrody w czasie badań. Przed pomiarami należy (w niektórych przypadkach) odsunąć meble, obrazy i inne elementy mogące mieć wpływ na wyniki pomiarów. Tego typu czynności należy wykonać na co najmniej 24 h przed badaniami. Jest to istotne ze względu na ustabilizowanie się temperatury przegród budowlanych o określonej akumulacyjności cieplnej. Należy to wykonać szczególnie wtedy, gdy badania mają być przeprowadzane od strony wewnętrznej. Osoba wykonująca pomiary powinna zapisać informacje dotyczące temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, zachmurzenia, opadów atmosferycznych, wilgotności powietrza zewnętrznego i wewnętrznego, prędkości i kierunku wiatru. Temperatura powietrza zewnętrznego i wewnętrznego powinna być zmierzona z dokładnością do 1°C. Według zapisów normy [N1] trzeba określić wartość spadku ciśnienia przez przegrodę, przy czym wskazane jest, aby spadek ten wynosił przynajmniej 5 Pa. Czułość i zakres pomiarowy aparatury w zależności od zakresu temperatury występującej na powierzchni przegrody, w celu uzyskania najwyższej możliwej rozdzielczości termicznej w warunkach pomiarowych oraz wymaganej dokładności określenia temperatury na powierzchni badanej przegrody. W 24 godzinnym okresie poprzedzających badania, temperatura powietrza zewnętrznego nie powinna różnić się bardziej niż 10°C od temperatury występującej na początku badania.

Dodatkowo w 12 godzinnym okresie poprzedzającym badania przegroda nie powinna być nasłoneczniona. Jeżeli takie nasłonecznienie występowało należy ująć to w sprawozdaniu z badań i uwzględnić przy interpretacji termogramów. Po przeprowadzeniu powyżej opisywanych czynności wstępnych można przystąpić do wykonywania badań zasadniczych.

Badania zasadnicze rozpoczynamy od wykonania za pomocą kamery termowizyjnej przeglądu całego obiektu (zgodnie z zaleceniami od strony zewnętrznej i wewnętrznej), wraz z zarejestrowaniem termogramów wszystkich badanych przegród budowlanych od strony zewnętrznej i wewnętrznej. W celu porównania miejsc bez defektów z miejscami, w których występują defekty termiczne należy zarejestrować obrazy termograficzne wybranych części badanych przegród pełnych od strony zewnętrznej i wewnętrznej, wolnych od defektów i anomalii termicznych tj. miejsc o najmniejszym zróżnicowaniu pól temperatur przegrody poza obszarem mostków termicznych. Najważniejszym etapem badań jest zarejestrowanie termogramów wybranych części badanych przegród w obrębie mostków termicznych od strony zewnętrznej i wewnętrznej oraz określenie różnic między temperaturą powierzchni przegrody w obrębie mostków termicznych, w miejscach z defektami cieplnymi, gdzie defekty te występują (zarówno od strony wewnętrznej jak i zewnętrznej). Każdy termogram musi jednoznacznie umiejscawiać miejsce jego wykonywania na zdjęciu lub rysunku. Zasada diagnozowania izolacyjności przegród budowlanych polega na określeniu rzeczywistego rozkładu temperatury na badanej powierzchni przegrody i ustaleniu czy rozkład temperatury jest prawidłowy, czy też identyfikuje anomalie termiczne lub geometryczne np. w postaci naroży płaskich i przestrzennych lub anomalie związane z konstrukcją przegród np. w postaci łączników metalowych lub żelbetowych, a także zawilgoceniem wewnętrznych lub zewnętrznych fragmentów powierzchni przegrody związanych z normalną eksploatacją pomieszczeń. Prawidłowość badanych rozkładów temperatury na powierzchniach przegrody można określić na podstawie porównania termogramu uzyskanego z badań z termogramem uznanym za wzorcowy, uzyska-

nym z badań dla identycznej przegrody w podobnych warunkach badawczych, lub porównaniu termogramu z przewidywanym rozkładem temperatury uzyskanym innymi metodami np. metodami obliczeniowymi. Anomalie termiczne niedające się wytłumaczyć się na podstawie analizy geometrycznej, analizy konstrukcji przegrody lub innych czynników mogących wpłynąć na wynik pomiaru, należy traktować jako odchylenie od wymogów projektowych – defekty [1].



Rys. 5.4.
Termogram ukazujący defekty termiczne.

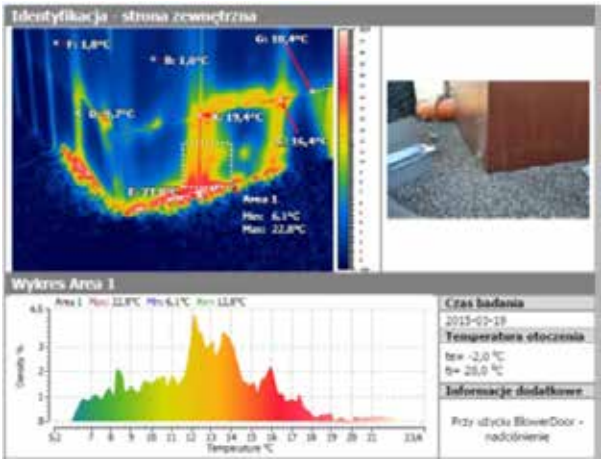
Rozkład temperatury na termogramach związany jest nie tylko z właściwościami termoizolacyjnymi przegrody, ale także z innymi czynnikami. Na pole temperatury mają wpływ wartości temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego w okresie poprzedzającym badania i w czasie ich prowadzenia, prędkość i kierunek wiatru, różnica ciśnień (zewnętrznego i wewnętrznego), wielkość promieniowania słonecznego i opadów atmosferycznych (deszcz, śnieg) występujące przed rozpoczęciem badań. Przy wykonywaniu badań od strony wewnętrznej, istotny wpływ ma także usytuowanie elementów instalacji centralnego ogrzewania oraz nieszczelności powietrzne stolarki okiennej i drzwiowej. Ilość zróżnicowanych czynników wywołujących zakłócenia i zaburzenia podczas prowadzenia badań powoduje, iż ich interpretacja przy niezachowaniu wszystkich warunków prowadzenia pomiarów, w tym dodatkowych, jest znacznie utrudniona i może prowadzić do błędów w ocenie izolacyjności cieplnej przegród. Na podstawie istniejących na termogramach skali odcieni szarości, lub skali barw, można wnioskować pośrednio o termoizolacyjności przegród. Interpretacja wyników badań zależy od miejsca pomiaru – nieco inna będzie od strony zewnętrznej i wewnętrznej przegrody [7].

Do badań nieniszczących zaliczamy także pomiary stykowe temperatury lub gęstości strumienia ciepła. Badania te wymagają zamontowania czujników pomiarowych na powierzchni badanej przegrody, po obu jej stronach oraz prowadzenia pomiarów temperatury powietrza zewnętrznego. Montaż czujników temperatury i ciepłomierza powinien być wykonany w miejscach minimalizacji wpływów użytkowników. Prowadzenie tego typu badań umożliwia wyznaczenie współczynnika przenikania ciepła przegrody, lecz jest dość skomplikowane.

5.4.
Szczelność powietrzna budynków

Wymagania prawne dotyczące szczelności obudowy budynku na przenikanie powietrza, zawarte w rozporządzeniu [3] wskazują, iż w budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego, budynku użyteczności publicznej, a także w budynku produkcyjnym przegrody zewnętrzne nieprzezroczyste, złącza między przegrodami i częściami przegród oraz połączenia okien z ościeżami należy projektować i wykonywać pod kątem osiągnięcia ich całkowitej szczelności na przenikanie powietrza. W budynku mieszkalnym, zamieszkania zbiorowego i budynku użyteczności publicznej współczynnik infiltracji powietrza dla otwieranych okien i drzwi balkonowych powinien wynosić nie więcej niż $0{,}3\ \mathrm{m^3/(m\cdot h\cdot daPa^{2/3})}$, z zastrzeżeniem § 155 ust. 3 i 4 rozporządzenia. Należy zapewnić właściwą szczelność budynku na poziomie $n_{50} \leq 1{,}0\ \mathrm{h^{-1}}$. Przed oddaniem budynku do użytkowania należy wykonać kontrolę szczelności budynku, która jednakże nie jest obligatoryjna. W celu określenia szczelności obudowy na niekontrolowaną infiltrację powietrza można wykonać pomiary przy użyciu wentylatora ciśnieniowego. Badania wykonuje się zgodnie z normą PN-EN:13829 „Właściwości cieplne budynków. Określanie przepuszczalności powietrznej budynków. Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora" [N2]. Metodę z użyciem wentylatora stosuje się do pomiaru przepływu powietrza przez obudowę budynku ze środowiska zewnętrznego, wytwarzając w budynku podciśnienie lub nadciśnienie. Badania takie wykonuje się w budynkach nowych (nieużytkowanych) oraz użytkowanych [4].

Lokalizacja nieszczelności w obrębie przegród budowlanych, związana z niekontrolowaną infiltracją powietrza może być zrealizowana za pomocą gazu znacznikowego, anemometru lub badań termowizyjnych. Szczególnie powszechne jest wykorzystanie pomiarów termowizyjnych do detekcji nieszczelności, podczas wytwarzanego podciśnienia lub nadciśnienia w badanych budynkach. Na rys. 5.5 przedstawiono termogram wykonane w warunkach wytworzonego nadciśnienia (50 Pa). Badania termowizyjne umożliwiły zlokalizowanie występujących nieszczelności. Dla przedstawionego przykładu ścian zewnętrznych zastosowano także detekcję w postaci gazu znacznikowego. Wyniki zobrazowano na rys 5.6.



Rys. 5.5.
Termogram wykonany w warunkach nadciśnienia [1].

Rys. 5.6.
Lokalizacja niekontrolowanej infiltracji powietrza przy pomocy gazu znacznikowego [1].



W celu zapewnienia wymaganej szczelności przegród budowlanych, należy odpowiednio zaprojektować ich rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne, a także poprawnie rozwiązać połączenia pomiędzy przegrodami i składowymi przegród. Wyłącznie zastosowanie materiałów o odpowiednio wysokim oporze dyfuzyjnym nie gwarantuje wystarczającej szczelności całej konstrukcji np. ściany. Istotne jest by połączenia wszystkich warstw odpowiadających za szczelność obudowy budynku były odpowiednio zaprojektowane i wykonane. Jako typowe materiały uszczelniające można zastosować różnego rodzaju taśmy (elastomery, bitumy, PE) oraz folie (PVC). Każdy z materiałów wymaga zastosowania odpowiedniej technologii uszczelniania miejsc szczególnych (przebicia instalacyjne lub technologiczne).

W celu zapewnienia maksymalnej szczelności powietrznej budynku ze ścianami wykonanymi z betonu komórkowego konieczne jest wykonanie uszczelnienia obudowy budynku, ze szczególnym uwzględnieniem następujących elementów lub ich połączeń:

- konstrukcji murowych – szczelność zapewnia wykonanie poprawne tynków wewnętrznych;
- połączenie okno-ściana lub drzwi-ściana (dotyczy ścian zewnętrznych lub ścian wewnętrznych oddzielających strefy ogrzewane od nieogrzewanych) - zastosowanie od strony wewnętrznej izolacji paroszczelnych,
- strop-ściana – zalecane zastosowanie taśmy uszczelniającej typu airstop w miejscach połączeń zróżnicowanych materiałów;



Rys. 5.7.
Lokalizacja niekontrolowanej infiltracji powietrza przy pomocy termoanemometru [5].

- podłoga na gruncie - ściana – zalecane zastosowanie taśmy uszczelniającej typu airstop w miejscach połączeń zróżnicowanych materiałów;
- przebicia lub przejścia instalacyjne przez ścianę – konieczne wykonanie uszczelnień punktowych lub obwodowych za pomocą taśmy typu airstop lub zastosowanie specjalistycznych kołnierzy uszczelniających.

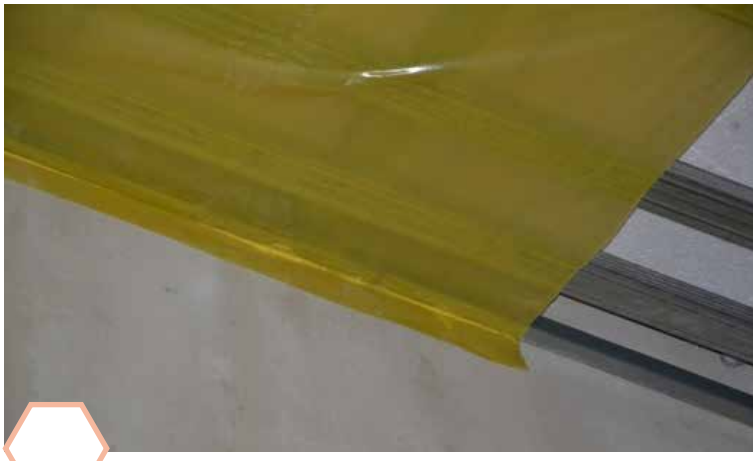
Na rysunkach 5.8, 5.9 i 5.10 pokazano poprawne rozwiązanie uszczelnień w miejscach przebicia przez ścianę elementów instalacji (5.8), w miejscu połączenia ściany zewnętrznej z posadzką (5.9), a także na stryku ściany zewnętrznej i paroizolacji sufitu podwieszanego (5.10).

Rys. 5.8.
Poprawne rozwiązanie uszczelnień w miejscach przebicia przez ścianę elementów instalacji [5].





Rys. 5.9.
Poprawne rozwiązanie uszczelnień w miejscach połączenia ściany i podłogi [5].



Rys. 5.10.
Poprawne rozwiązanie uszczelnień w miejscach połączenia ściany i paroizolacji sufitu podwieszanego [5].

5.5.

Literatura

[1] Krause P., Steidl T. *Uszkodzenia i naprawa przegród budowlanych w aspekcie izolacyjności termicznej.* Maszynopis. Praca niepublikowana. Gliwice 2016.
[2] Krause P., Nowoświat A., Steidl T. *Jakościowa analiza obrazu cieplnego w diagnostyce izolacyjności termicznej zewnętrznej przegrody budowlanej. Konferencja „kompleksowa diagnostyka cieplna in situ budynków* Gliwice Listopad 2012.
[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki iich usytuowanie.* Dz. U. 2002 poz. 75 wraz z późniejszymi zmianami.
[4] Krause P., *Szczelność obudowy a ochrona cieplna budynku.* Konferencja Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. 2007 t. 2.
[5] STEKRA - materiały własne 2001-2014
[6] Trispel A. *Luftdichtheitsmessung & Thermografie zwei wichtige Hilfsmittel zur Schwachstellenanalyse und Qualitätssicherung am Bau.* Ing. -Büro Trispel. Plauen.
[7] Henryk Nowak *Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie* Oficyna Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej 2012 r.
[N1] PN-EN ISO 13187:2001. *Właściwości cieplne budynków – Jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku - Metoda podczerwieni.*
[N2] PN-EN ISO 13829:2002. *Właściwości cieplne budynków – Określanie przepuszczalności powietrznej budynków - Metoda pomiaru ciśnieniowego z użyciem wentylatora.*

6. ROZWIĄZANIA MATERIAŁOWE ŚCIAN Z BETONU KOMÓRKOWEGO

Bloczki ścienne z autoklawizowanego betonu komórkowego to materiały stosowane w elementach nośnych i nienośnych budynków, które mogą stanowić zarówno przegrody zewnętrzne, oddzielające pomieszczenia w budynku od środowiska zewnętrznego, jak i wewnętrzne, oddzielające poszczególne pomieszczenia w budynku. Zarówno ściany zewnętrzne, a także ściany oddzielające pomieszczenia o regulowanej temperaturze (np. pomieszczenia mieszkalne) od pomieszczeń nieogrzewanych, powinny być odpowiednio projektowane uwzględniając specyfikę budynków oraz wymagania zawarte w odrębnych przepisach. Producenci betonu komórkowego wytwarzają szereg drobnowymiarowych elementów w postaci bloczków, charakteryzujących się zróżnicowanymi wymiarami. Jest to uzależnione od specyfiki danego systemodawcy. W odróżnieniu od np. ceramiki poryzowanej bloczki z betonu komórkowego są elementami pełnymi bez występujących drążeń lub pustek powietrznych (nie licząc pustek wynikających z porowatej struktury materiału).

Profilowanie powierzchni czołowych bloczków na pióra i wpusty, wpływa w niewielkim stopniu na izolacyjność termiczną całej przegrody ściennej, w stosunku do rozwiązań wypełnianych zaprawą murarską. Brak wypełnienia zaprawą spoin pionowych powoduje konieczność prowadzenia robót wykończeniowych, w sposób zapewniający odpowiednią szczelność na niekontrolowaną infiltrację powietrza. Łączenie elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego może odbywać się za pomocą cienkiej spoiny lub zwykłej zaprawy. Wykonanie cienkich spoin o grubości 1-3 mm minimalizuje występowanie liniowych mostków termicznych związanych z tym, iż współczynnik przewodzenia ciepła spoiny jest kilkukrotnie wyższy od współczynnika przewodzenia ciepła bloczków.

W przypadku wykonywania ścian, jako przegród jednowarstwowych istotnym jest maksymalne ograniczenie tego typu mostków cieplnych. Obok spoin cienkowarstwowych można stosować zwykłe zaprawy w postaci np. zapraw cementowo-wapiennych. Spoiny wykonywane za pomocą takich zapraw mieszczą się standardowo w grubościach od 8 do 15 mm.

6.1. Gęstość bloczków

Beton komórkowy wytwarzany jest w zróżnicowanych gęstościach. Najczęściej produkowane bloczki z betonu komórkowego charakteryzują się średnią gęstością wynosząca od 300 do 700 kg/m^3, deklarowaną przez producenta. Wartość ta odnosi się do materiału w stanie suchym. Gęstość materiału istotnie wpływa na parametry fizyczne betonu komórkowego, takie jak np. współczynnik przewodzenia ciepła, przepuszczalność pary wodnej czy pojemność cieplną. Wraz ze wzrostem gęstości rośnie współczynnik przewodzenia ciepła, wpływając na obniżenie oporu cieplnego przegrody ściennej. Wzrost gęstości wpływa dodatkowo na zwiększenie akumulacyjności cieplnej ścian z betonu komórkowego, która obok gęstości zależy także od grubości przegrody i pojemności cieplnej materiału.

6.2. Wymiary

Wymiary bloczków z betonu komórkowego są zróżnicowane. Z tego względu istnieje możliwość wznoszenia zarówno ścian nośnych jak i działowych. W przypadku wykonywania ścian zewnętrznych wymiary i właściwości cieplne bloczków umożliwiają wznoszenie ścian jednowarstwowych i wielowarstwowych. Ściany jednowarstwowe można wznosić z bloczków zapewniających wymaganą izolacyjność termiczną, o czym była mowa w rozdziale 2 niniejszej publikacji. Należy pamiętać, że wznoszenie ścian jednowarstwowych nie jest najlepszym rozwiązaniem z punktu widzenia stanu ochrony cieplnej budynku.

W przypadku tego typu ścian istnieje znaczne utrudnienie związane z minimalizowaniem mostków termicznych (w szczególności liniowych), które powstają na styku połączeń poszczególnych przegród i elementów budowlanych (ściana-strop, ściana-nadproże itp.). Fizyka cieplna budowli zaleca zwyczajowo stosowanie w budownictwie mieszkaniowym i użyteczności publicznej rozwiązania ścian z postaci przegród wielowarstwowych.

W przypadku, gdy zależy nam na zwiększonej akumulacyjności przegrody i użytkowanie budynku jest prowadzone w sposób ciągły (nie jest to np. budynek letniskowy), optymalnym rozwiązaniem jest wznoszenie ścian dwu lub trójwarstwowych. W takiej sytuacji zalecanym rozwiązaniem jest stosowanie bloczków z betonu komórkowego o mniejszych szerokościach. Ze względu na bardzo dobre parametry cieplne betonu komórkowego grubość dodatkowo stosowanej izolacji termicznej jest w wielu przypadkach ograniczona

w porównaniu ze ścianami wznoszonymi w oparciu o inne elementy ścienne (ceramika, silikat itp.).

W zależności od obliczeń konstrukcyjno-wytrzymałościowych można stosować bloczki o szerokości np. 20, 24, 30, 36 cm z warstwą dodatkowej izolacji termicznej jako tzw. ściana dwuwarstwowa lub jako rozwiązanie ściany trójwarstwowej. Rozwiązanie ścian trójwarstwowych może być realizowane np. w postaci przegrody z pustką powietrzną (szczeliną wentylowaną). Tego typu szczelina powietrzna może być zaprojektowana, jako szczelina niewentylowana, słabo wentylowana lub dobrze wentylowana. Grubość takiej szczeliny dobiera projektant na etapie obliczeń cieplno-wilgotnościowych. Obok różnych grubości bloczki z betonu komórkowego mogą charakteryzować się zróżnicowaną wysokością. Z punktu widzenia zagadnień fizyki budowli ta kwestia nie ma tak istotnego znaczenia jak grubość projektowanych i wykonywanych ścian. Przykładowe rysunki bloczków zostały przedstawione w zeszycie 2 cz. 1 Projektowania konstrukcyjnego ścian z betonu komórkowego.

6.3.
Współczynnik przewodzenia ciepła betonu komórkowego

Zagadnienia dotyczące współczynnika przewodzenia ciepła zostały szerzej omówione w rozdziale 3. W przypadku obliczania współczynnika przenikania ciepła ścian projektanci chętnie sięgają po dane uzyskiwane od producentów materiałów budowlanych. Analiza danych dostępnych na stronach internetowych producentów jak i w ich materiałach technicznych wskazuje na brak jednoznacznie podawanych parametrów w zakresie współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego. Nieprawidłowo przyjmowane parametry mają wpływ na dokładność wykonywanych obliczeń współczynnika przenikania ciepła, wpływając na błędne wyliczenie strat ciepła przez przenikanie obliczanego budynku. Dodatkowo utrudnia to rzetelne porównywanie wartości przewodności cieplnej poszczególnych producentów betonu komórkowego. Współczynnik przewodzenia ciepła elementów murowych można przyjmować z tablic wg normy EN 1745 [N2] (S1) lub z pomiarów (S2, S3). Projektanci bardzo często sięgają także do archiwalnej normy [N1] Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe Tabelaryczne wartości obliczeniowe - PN-EN ISO 12524 (norma wycofana). W większości przypadków wartości współczynnika przewodzenia ciepła odczytywane z tej normy są wyższe niż wartości podawane przez producentów. W przypadku danych pomiarowych podawanych przez producentów istotne rozbieżności przy deklarowaniu współczynnika przewodzenia ciepła mogą być związane z nieprawidłową metodologią badania materiału. Na wyniki badań duży wpływ mają wykorzystane urządzenia pomiarowe. Istotnym zagadnieniem jest także oraz sposób przygotowania próbek. Wielokrotnie przeprowadzone próby świadczą o tym, że wybór aparatury pomiarowej może mieć znaczący wpływ na uzyskane wyniki. W przypadku pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła zauważalne są duże różnice w zależności od metody pomiarowej. W przypadku dokładnej, lecz długotrwałej metody stacjonarnej, w której strumień ciepła przepływający przez próbkę jest stały co do wartości, a temperatura powierzchni ustalona, przewodność cieplną wyznacza się mierząc gęstość strumienia cieplnego i różnicę temperatur. Dla szybszych metod niestacjonarnych pomiary wykonuje się przy zmiennym strumieniu cieplnym, jednakże kosztem dokładności metody. Jak wynika z prac [1] i [2] różnice w uzyskanych wynikach obiema metodami, przy badaniu tych samych próbek mogą wynosić nawet 30%. Nieodpowiedni sposób zaokrąglania wyznaczanych wartości współczynnika przewodzenia ciepła λ, oraz nieprawidłowa konwersja współczynnika deklarowanego na współczynnik obliczeniowy mogą prowadzić do uzyskiwanych wyników współczynnika przenikania ciepła betonu komórkowego różniących się między sobą nawet o 25 % [1]. Reasumując należy stwierdzić, że projektanci dobierając wartości współczynnika przewodzenia ciepła powinni w sposób skrupulatny porównywać wartości otrzymywane od poszczególnych producentów. Zestawienie wartości współczynników przewodzenia ciepła wybranych producentów materiałów budowlanych przedstawiono w tabeli 6.1.

Tablica 6.1.
Współczynniki przewodzenia ciepła betonu komórkowego na podstawie danych wybranych producentów.

Producent	Odmiany betonu komórkowego	Gęstość [kg/m³]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/mK]	Oznaczenie podawane w materiałach producentów
H+H Polska Sp. z o. o	Standard H+H GOLD + 300		0,085	λ [7] lub $\lambda_{10,dry,}$S2 [6]
	350		0,095	
	400		0,110	
	500		0,130	
	550		0,140	
	600		0,155	
	700		0,185	
P.P.H. Prefabet Bielsko-Biała Sp. z o. o		450	0,100	Deklarowana przewodność cieplna [8], [9], [10], [11]
		550	0,125	
		600	0,130	
Prefabet - Osława Dąbrowa S.A	BK 500/2,5 TLMA	500	0,145	$\lambda_{10,dry,unit}$ [12], [13], [14], [15] $\lambda_{10,dry,unit}$ (S1) [16], [17], [18], [19]
	OD-ABK 520-2,5	520	0,145	
	BK 550/2,5 TLMA	550	0,155	
	BK 550/3,0 TLMA	550	0,155	
	OD-ABK 580-3,0	580	0,170	
	BK 600/3,0 TLMA	600	0,175	
	OD-ABK 720-4,0	720	0,195	
Przedsiębiorstwo PREFABET-ŁAGISZA Sp. z o. o		500	0,105	λ_{D10} [20]
		550	0,125	
		600	0,135	
		650	0,135	
Przedsiębiorstwo Produkcji Betonów PREFBET Sp. z o. o	BK 450/2,5 TLMA	450	0,130	$\lambda_{10,dry,unit}$ S1 [21]
SOLBET KOLBUSZOWA S.A.		350	0,079	λ [22]
		400	0,100	
		500		
		600		
		700		
SOLBET LUBARTÓW S.A	LL-ABK 2,0/400	375±25	0,105	$\lambda_{10,dry,unit}$S2 [23], [24], [25], [26]
	LL-ABK 2,5/500	475±25	0,130	
	LL-ABK 3,0/600	575±25	0,160	
	LL-ABK 4,0/700	675±25	0,180	
SOLBET Sp. z o. o		Współczynnik charakterystyczny $\lambda_{10,dry}$ [28]		Współczynnik obliczeniowy wynikający z badań materiałów SOLBET [28]
		400	0,100	0,110
		500	0,130	0,140
		600	0,160	0,170
		700	0,180	0,190
SOLBET STALOWA WOLA S.A	400	400 ± 30	0,112	$\lambda_{10,dry}$ [27]
	500	500 ± 30	0,127	
	540	540 ± 30	0,134	
	600	600 ± 30	0,149	
	680	680 ± 30	0,167	

6.4.
Współczynnik oporu dyfuzyjnego

Materiały budowlane cechujące się współczynnikiem oporu dyfuzyjnego nie większym niż μ = 10, posiadają bardzo dobre właściwości dyfuzyjne dla przenikania pary wodnej.

Na stronach producentów betonu komórkowego można znaleźć informację dotyczące wartości współczynnika oporu dyfuzyjnego dla betonu komórkowego wahające się od μ = 5 do μ = 10 (wartość bezwymiarowa). Takie też są najczęściej podawane wartości deklarowane.

Na podstawie danych Zakładu Fizyki Cieplnej ITB w artykule [5] przedstawiono wartości obliczeniowe muru z betonu komórkowego o zróżnicowanej gęstości, w zależności od zastosowanej zaprawy. Podany współczynnik oporu dyfuzyjnego nie ulega zmianie w zależności od stanu (suchy/mokry).

W normie PN-EN ISO 12524 [N1] beton komórkowy o gęstości od 300-1000 kg/m^3 cechuje się współczynnikiem oporu dyfuzyjnego wynoszącym w stanie wilgotnym (mokrym) μ = 10.

W stanie suchym podano wartość μ = 6. W niemieckiej normie DIN 4108-4:2013-02

Wärme - und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte [N3] zawarto wartości współczynnika oporu dyfuzyjnego betonu komórkowego od μ = 5 do μ = 10.

W publikacji Porenbeton Handbuch [3] podano wartość współczynnika oporu dyfuzyjnego betonu komórkowego od μ = 6.

Tablica 6.2.
Wartości obliczeniowe właściwości fizycznych materiałów (wg danych Zakładu Fizyki Cieplnej ITB).

Grupa materiałowa lub zastosowanie	Gęstość w stanie suchym ρ [kg/m^3]	Obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]	Ciepło właściwe C_p [J/(kg·K)]	Współczynnik oporu dyfuzyjnego μ	
				suchy	mokry
Mur z betonu komórkowego na cienkowarstwowej zaprawie klejącej lub zaprawie ciepłochronnej	800 700 600 500 400	0,30 0,25 0,22 0,18 0,15	1000 1000 1000 1000 1000	10 8 7 6 5	10 8 7 6 5
Mur z betonu komórkowego na zaprawie cementowo-wapiennej, ze spoinami grubości większej niż 1,5 cm	800 700 600 500	0,38 0,35 0,30 0,25	1000 1000 1000 1000	10 8 7 6	10 8 7 6

6.5.

Literatura

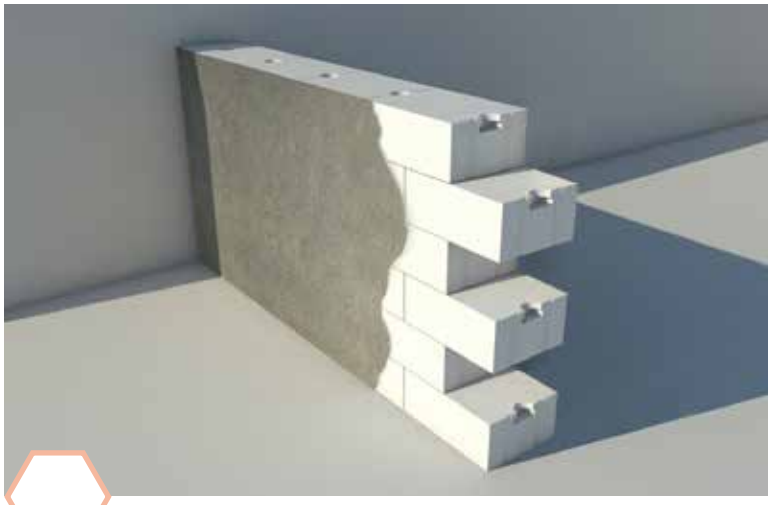
[1] Katarzyna Łaskawiec Parametry cieplne ścian z ABK oraz metodologia ich wyznaczania. Materiały budowlane 6.2014.
[2] Tomasz Rybarczyk. *Parametry cieplne ścian z autoklawizowanego betonu komórkowego, metodologia wyznaczania parametrów oraz obliczania współczynnika U dla przegrody. Wskazanie popełnianych błędów*. Praca niepublikowana.
[3] Weber H, Hullmann H. *Porenbeton Handbuch*. Bundesverband Porenbeton 1998.
[4] Homan M. *Porenbeton Handbuch*. Bundesverband Porenbeton 2008
[5] Jerzy Andrzej Pogorzelski *Fizyka budowli – część X Wartości obliczeniowe właściwości fizycznych.* Materiały budowlane 3 2005.
[6] Katalog produktów Systemu Budowy H+H *„Buduj z łatwością"* kwiecień 2016 r.
[7] *„Beton komórkowy H+H – izolacyjność termiczna ścian zewnętrznych"* Luty 2013 r.
[8] Deklaracja właściwości użytkowych 6/2015 Nr PBB-ABK/550/2014 31.12.2015 r.
[9] Deklaracja właściwości użytkowych 5/2015 Nr PBB-ABK/450/2014 31.12.2015 r.
[10] Deklaracja właściwości użytkowych 8/2015 Nr PBB-ABK/600/2014 31.12.2015 r.
[11] Deklaracja właściwości użytkowych 7/2015 Nr PBB-ABK/550U/2014 31.12.2015 r.
[12] Deklaracja właściwości użytkowych Nr 2-2014/ABK/500/2,5 13.02.2014 r.
[13] Deklaracja właściwości użytkowych Nr 3-2014/ABK/550/2,5 13.02.2014 r.
[14] Deklaracja właściwości użytkowych Nr 4-2014/ABK/600/3,0 13.02.2014 r.
[15] Deklaracja właściwości użytkowych Nr 5-2014/ABK/550/3,0 13.02.2014 r.
[16] Deklaracja właściwości użytkowych Nr OD-ABK/520/2,5/1/2013 29.06.2013 r.
[17] Deklaracja właściwości użytkowych Nr OD-ABK/580/3,0/2,1/2013 4.10.2013 r.
[18] Deklaracja właściwości użytkowych Nr OD-ABK/580/3,0/2/2013 29.06.2013 r.
[19] Deklaracja właściwości użytkowych Nr OD-ABK/720/4,0/3/2013 19.07.2013 r.
[20] Tabela udostępniona na stronie internetowej producenta www.prefabet-lagisza.pl/stona/parametry.html
[21] Deklaracja właściwości użytkowych Nr Nr 1-2014/ABK/450/2,5 13.02.2014 r.
[22] www.solbet-kolbuszowa.com.pl/wlasciwosci.php
[23] Deklaracja właściwości użytkowych Nr LL-ABK 2,0/400/1/3/2016 09.02.2016 r.
[24] Deklaracja właściwości użytkowych Nr LL-ABK 2,5/500/2/2015-1 09.05.2015 r.
[25] Deklaracja właściwości użytkowych Nr LL-ABK 3,0/600/3/2015-1 09.05.2015 r.
[26] Deklaracja właściwości użytkowych Nr LL-ABK 4,0/700/4/2015-1 10.07.2015 r.
[27] http://www.solbet-stw.pl/
[28] *Beton komórkowy SOLBET Podstawowe informacje techniczne*
[29] Bobociński A. *Wpływ wilgotności ponadsorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komórkowych.* Prace Instytutu Techniki Budowlanej - Kwartalnik nr 4 (132). Warszawa 2004.
[30] Bobociński A., Pogorzelski J.A. *Analiza procesu wysychania ścian z zewnętrznym systemem izolacji cieplnej.* Prace Instytutu Techniki Budowlanej - Kwartalnik nr 2 (118). Warszawa 2001.
[N1] PN-EN 12524:2003, *Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe.*
[N2] PN-EN 1745:2004, *Mury i wyroby murowe. Metody określania obliczeniowych wartości cieplnych.*
[N3] DIN 4108-4:2013-02 *Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte*

7. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH

Warunki brzegowe i początkowe przyjęte do wszystkich obliczeń:
Warunki brzegowe wewnętrzne:
temperatura powietrza stała: $t_i = +20^oC$,
wilgotność powietrza wewnętrznego stała $\varphi_i = 50\%$.
Warunki brzegowe zewnętrzne:
temperatura powietrza stała: $t_e = -20^oC$,
wilgotność stała $\varphi_e = 80\%$.
Uwagi do uzyskanych wyników.

Przyrost wilgotności względnej (ilość kondensatu w przegrodzie) podawany jest w kg/m^2. Wydawać by się mogło, że zawartość wilgoci teoretycznie winna być podawana w kg/m^3. Jeśli traktujemy przegrodę jako zbiór niezależnych warstw o skrajnie różnych gęstościach np. beton o gęstości 2300 kg/m^3 i styropian gęstości 15 kg/m^3 to dla każdej warstwy zawartość wody powinna być podawana masowo. Jeśli jednak przegrodę traktujemy jako całość, to podanie ilości wody w kg/m^3 dla całości przegrody nie stanowi przydatnej informacji o całej przegrodzie. Zawartość 10% wilgotności masowej dla ściany z betonu o grubości 10 cm i powierzchni 1 m^2, to 23 litry, a dla styropianu o tej samej grubości to 0,15 l. W takim przypadku przydatną informacją jest podanie zawartości wody jak dla powierzchni w kg/m^2.

7.1.
Ściana jednowarstwowa



Rys. 7.1.
Budowa ściany jednowarstwowej

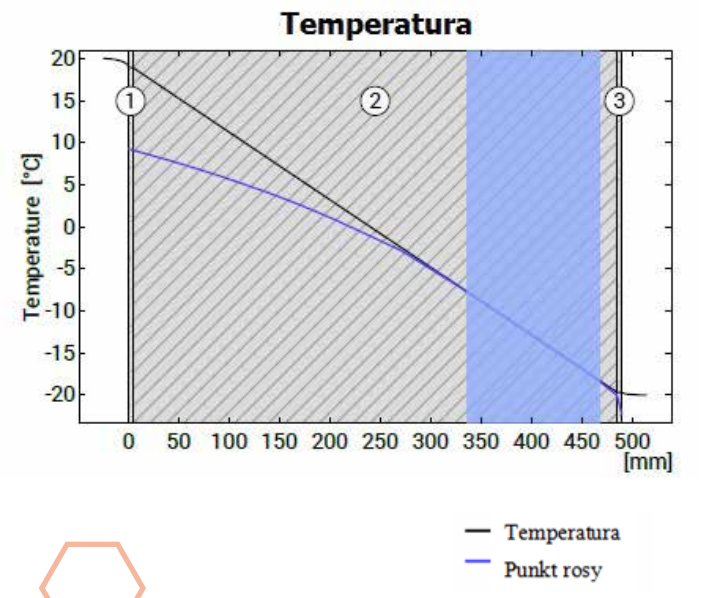
Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.1.

Tablica 7.1.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m^2·K/W]	Temperatura minimalna [^{o}C]	Temperatura maksymalna [^{o}C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,0	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	18,9	19,0
2	48,0	Beton komórkowy	0,095	5,053	-19,7	18,9
3	0,5	Tynk silikatowy	1,070	0,005	-19,7	-19,7
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,7
	Σ = 49,0			Σ R= 5,242		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,191 [W/m^2·K].

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.2.
Wykres temperatury i punktu rosy ściany jednowarstwowej

Analiza wykresu:

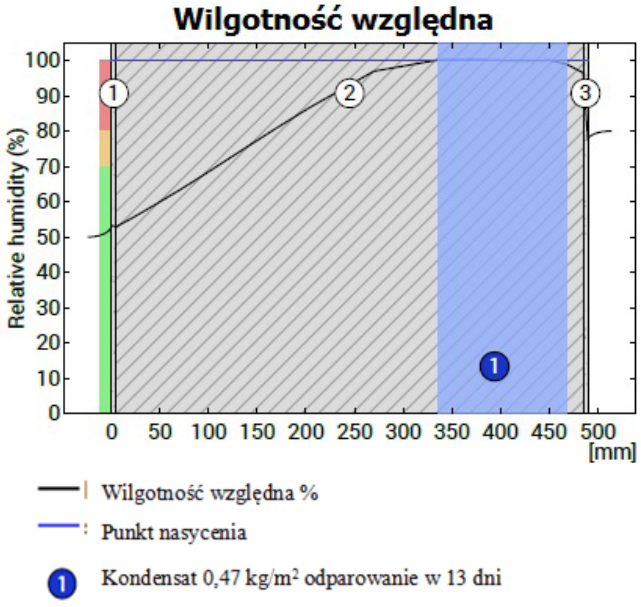
Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie. W strefie ograniczonej tą płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.2.

Tablica 7.2.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	48,0	Beton komórkowy	2,40	0,47
3	0,5	Tynk silikatowy	0,10	-

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

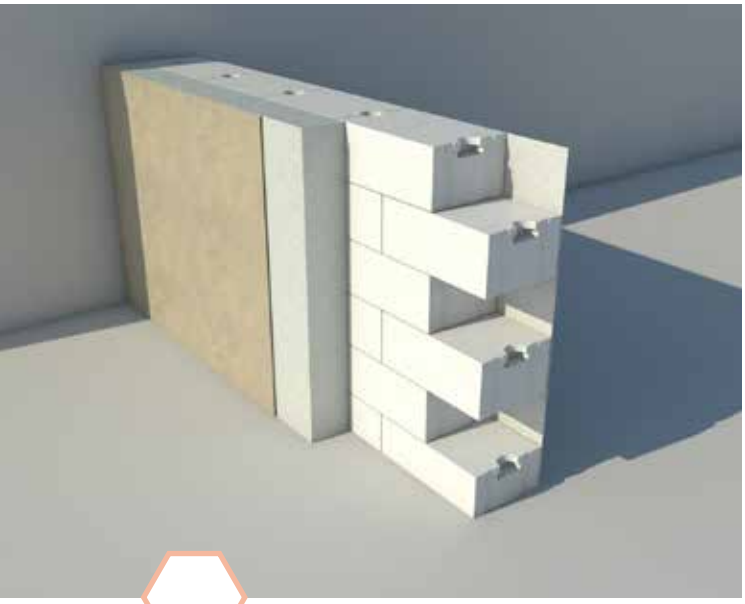


Rys. 7.3.
Wykres wilgotności względnej ściany jednowarstwowej

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefie wynosi 100%.

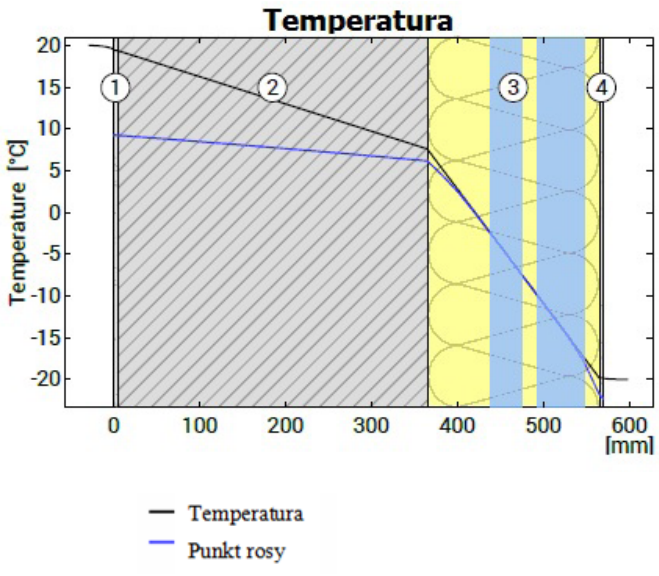
7.2.
Ściana dwuwarstwowa



Rys. 7.4.
Budowa ściany dwuwarstwowej.

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.3.

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.5.
Wykres temperatury i punktu rosy ściany dwuwarstwowej

Tablica 7.3.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,4	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	19,4	19,4
2	36,0	Beton komórkowy	0,130	2,769	7,6	19,4
3	20,0	Styropian EPS 031 Fasada	0,031	6,452	-19,8	7,6
4	0,5	Tynk silikatowy	1,070	0,005	-19,8	-19,8
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 57,0			Σ R= 9,411		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,106 [W/m²·K]

Analiza wykresu:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w dwóch płaszczyznach.

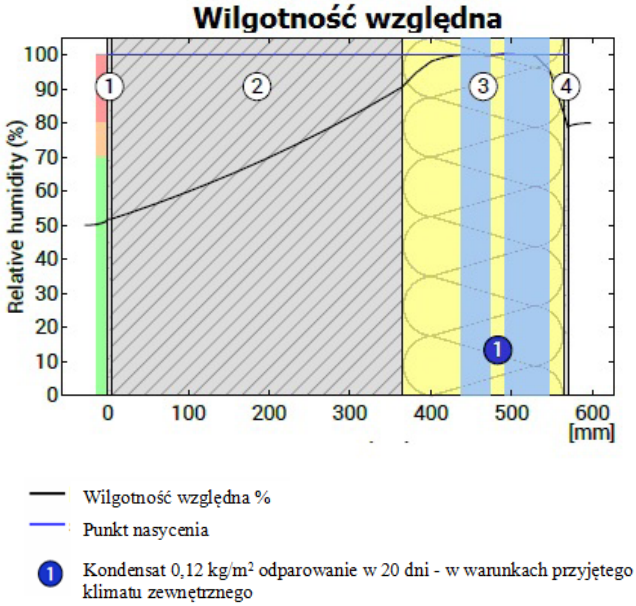
W strefach ograniczonych tymi płaszczyznami może wystąpić kondensacja pary wodnej.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.4.

Tablica 7.4.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m^2]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	42,0	Beton komórkowy	1,80	-
3	20,0	Styropian EPS 031 Fasada	10,0	0,12
4	0,5	Tynk silikatowy	0,10	-

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

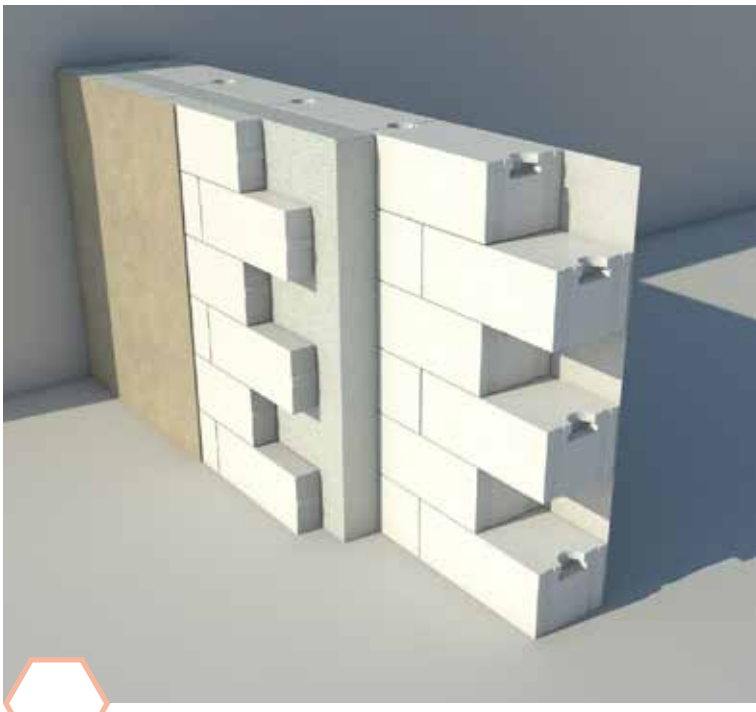


Rys. 7.6.
Wykres wilgotności względnej ściany dwuwarstwowej

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w dwóch strefach wynosi 100%.

7.3.
Ściana trójwarstwowa



Rys. 7.7.
Budowa ściany trójwarstwowej

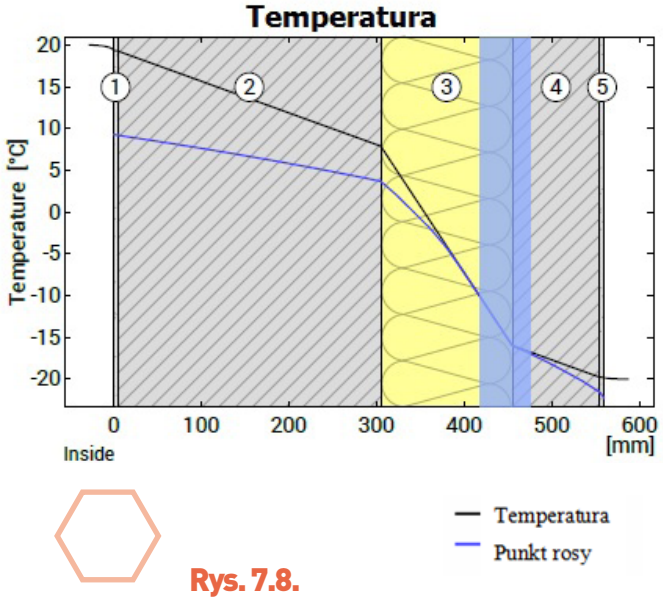
Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.5

Tablica 7.5.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,4	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	19,3	19,4
2	30,0	Beton komórkowy	0,130	2,308	7,9	19,3
3	15,0	Styropian EPS 031 Fasada	0,031	4,839	-16,0	7,9
4	10,0	Beton komórkowy	0,130	0,769	-19,8	-16,0
5	0,5	Tynk silikatowy	1,070	0,005	-19,8	-19,8
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 56,0			Σ R= 8,105		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,123 [W/m²·K]

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.8.
Wykres temperatury i punktu rosy ściany trójwarstwowej

Analiza wykresu:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie.

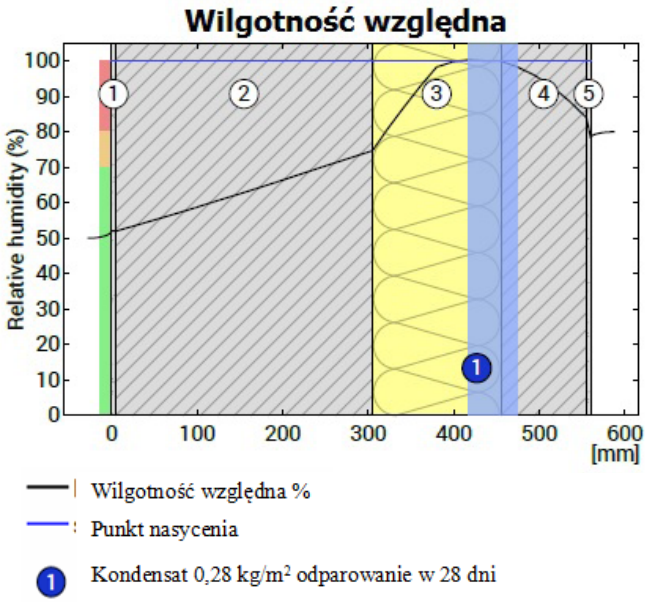
W strefie ograniczonej tę płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefie kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.6.

Tablica 7.6.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m^2]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	30,0	Beton komórkowy	1,50	-
3	15,0	Styropian EPS 031 Fasada	3,0	0,28
4	10,0	Beton komórkowy	1,0	0,10
5	0,5	Tynk silikatowy	0,10	-

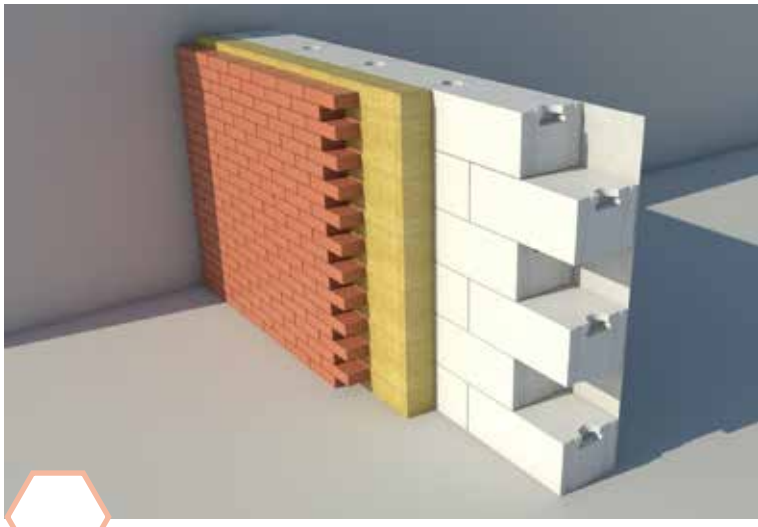
Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody



Rys. 7.9.
Wykres wilgotności względnej ściany trójwarstwowej

Analiza wykresu:
W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefie wynosi 100%.

7.4.
Ściana trójwarstwowa z pustką niewentylowaną



Rys. 7.10.
Budowa trójwarstwowej ściany z pustką niewentylowaną

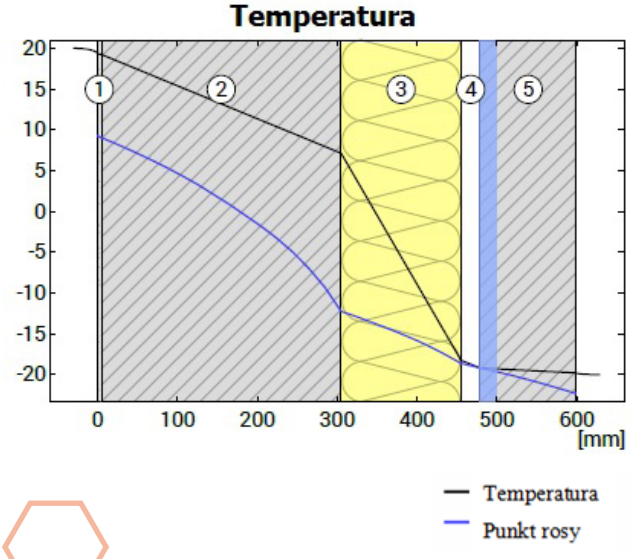
Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.7.

Tablica 7.7.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,3	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	19,2	19,3
2	30,0	Beton komórkowy	0,130	2,308	7,1	19,2
3	15,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,031	4,839	-18,3	7,1
4	2,4	Pustka niewentylowana		0,180	-19,2	-18,3
5	12,0	Cegła klinkierowa	1,050	0,114	-19,8	-19,2
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 59,9			Σ R= 7,624		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,131 [W/m²·K]

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.11.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany z pustką niewentylowaną

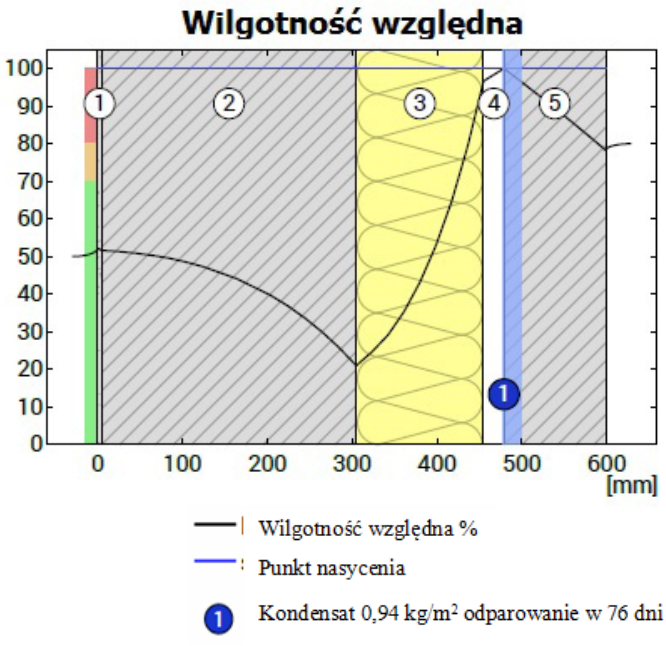
Analiza wykresu:
Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie.
W strefie ograniczonej tę płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefie kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.8.

Tablica 7.8.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	30,0	Beton komórkowy	1,50	-
3	15,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,15	-
4	2,4	Pustka niewentylowana	0,01	0,94
5	12,0	Cegła klinkierowa	1,20	0,94

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

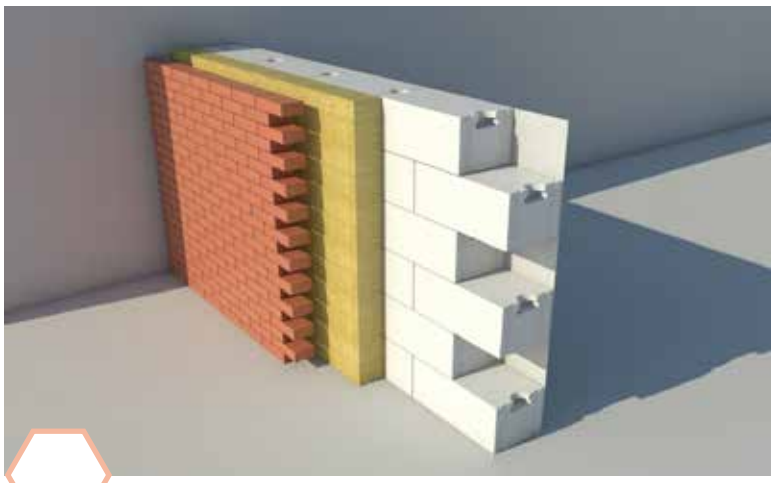


Rys. 7.12.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany z pustką niewentylowaną

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefie wynosi 100%.

7.5.
Ściana trójwarstwowa z pustką słabo wentylowaną



Rys. 7.13.
Budowa trójwarstwowej ściany z pustką słabo wentylowaną

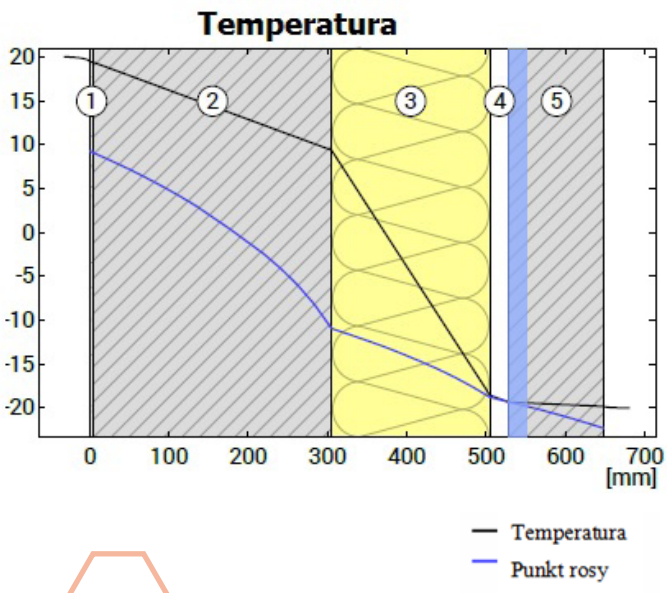
Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.9.

Tablica 7.9.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,4	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	19,4	19,4
2	30,0	Beton komórkowy	0,130	2,308	9,4	19,4
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,031	6,452	-18,6	9,4
4	2,4	Pustka słabo wentylowana		0,150	-19,3	-18,6
5	12,0	Cegła klinkierowa	1,050	0,114	-19,8	-19,3
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 64,9			Σ R= 8,937		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,112 [W/m²·K]

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.14.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany z pustką słabo wentylowaną

Analiza wykresu:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie.

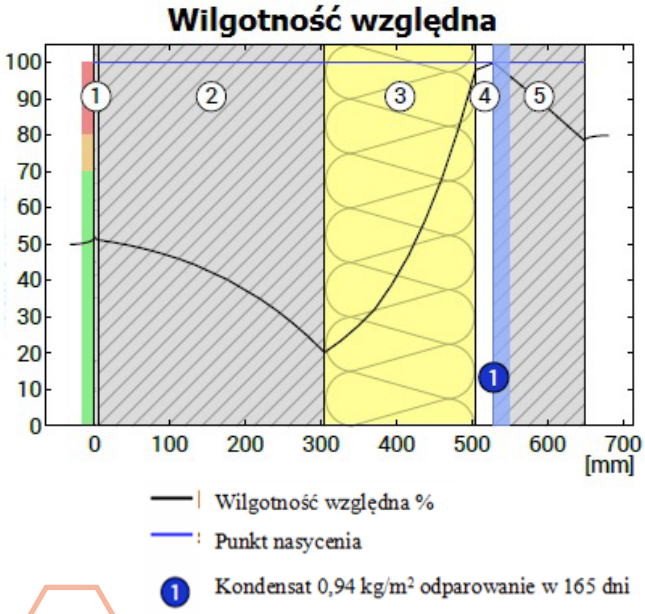
W strefie ograniczonej tę płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefie kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.10.

Tablica 7.10.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m^2]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	30,0	Beton komórkowy	1,50	-
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,20	-
4	2,4	Pustka słabo wentylowana	0,01	0,94
5	12,0	Cegła klinkierowa	12,0	0,94

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

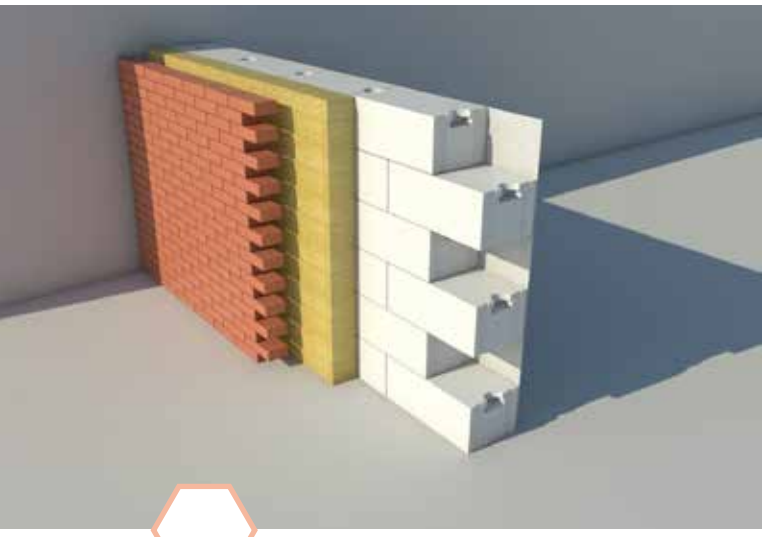


Rys. 7.15.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany z pustką słabo wentylowaną

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefie wynosi 100%.

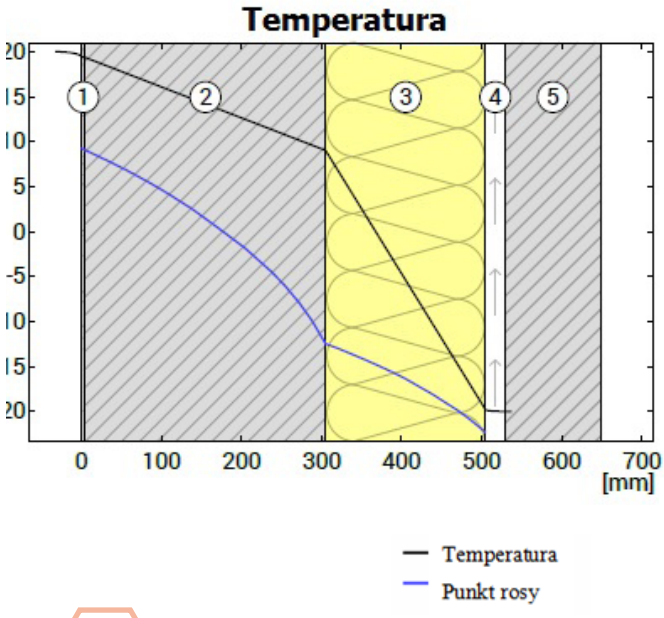
7.6.
Ściana trójwarstwowa z pustką wentylowaną



Rys. 7.16.
Budowa trójwarstwowej ściany z pustką wentylowaną

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.11.

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.



Rys. 7.17.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany z pustką wentylowaną

Tablica 7.11.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	19,4	20,0
1	0,5	Tynk cementowy	0,340	0,015	19,4	19,4
2	30,0	Beton komórkowy	0,130	2,308	9,0	19,4
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,031	6,452	-19,8	9,0
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,130	-20,0	-19,8
4	2,4	Pustka wentylowana			-20,0	-20,0
5	12,0	Cegła klinkierowa			-20,0	-20,0
	Σ = 64,9			Σ R= 9,034		

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,111 [W/m²·K]

Analiza wykresu:

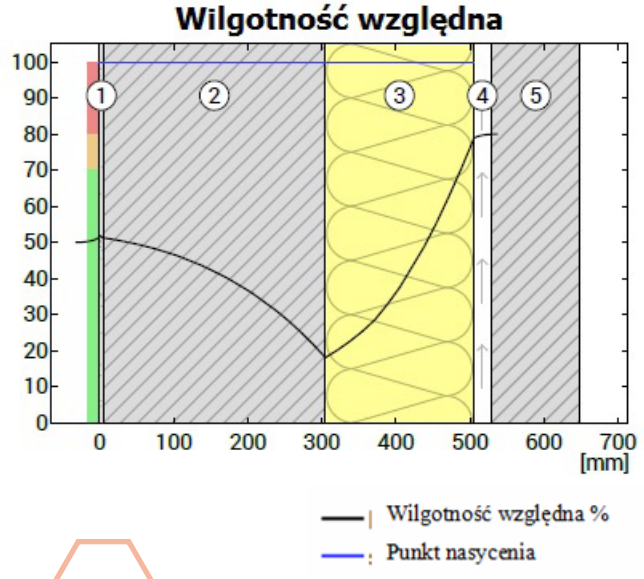
Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy nie stykają się.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefie kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.12.

Tablica 7.12.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

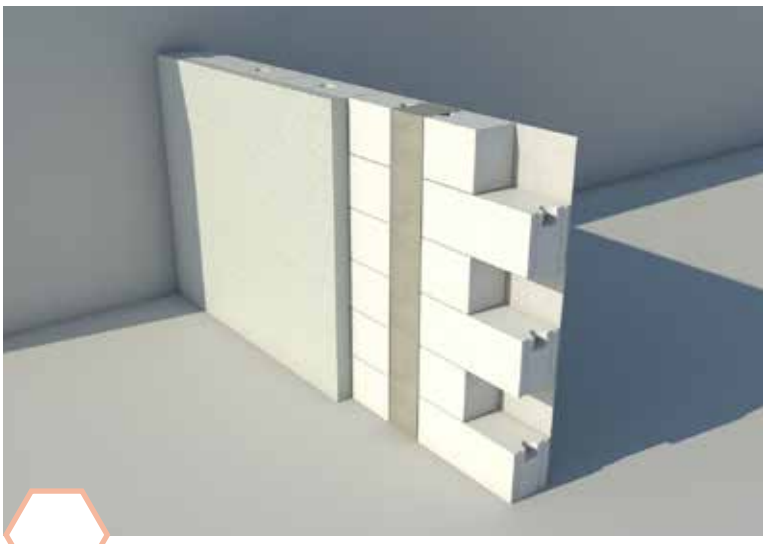
Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	0,5	Tynk cementowy	0,03	-
2	30,0	Beton komórkowy	1,50	-
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,20	-

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody



Rys. 7.18.
W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność wynosi <100%.

7.7.
Ściana niejednorodna dwuwarstwowa



Rys. 7.19.
Budowa niejednorodnej ściany dwuwarstwowej

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.13.

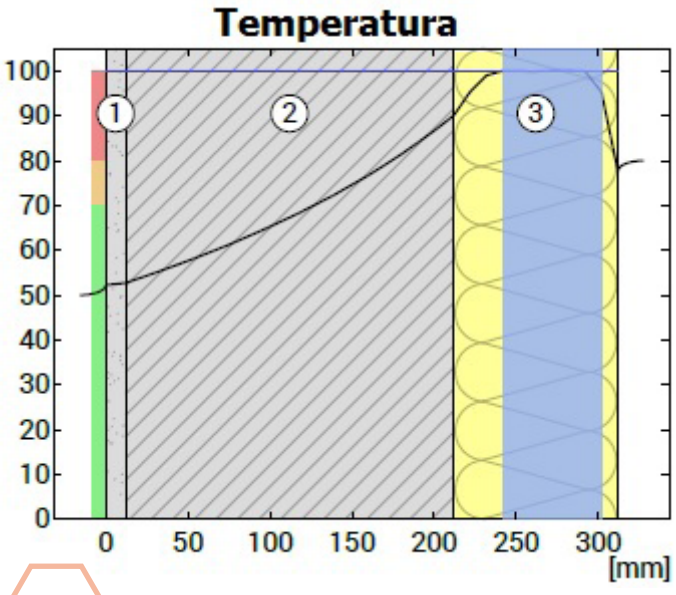
Tablica 7.13.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	18,3	20,0
1	1,2	Tynk cementowy	0,340	0,035	17,9	19,4
2	20,0	Beton komórkowy	0,130	1,538	9,8	19,2
	20,0	Słup żelbetowy	2,500	0,080	16,6	18,0
3	10,0	Elewacyjna płyta warstwowa z pianki PUR	0,023	4,348	-19,7	16,8
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,7
	Σ = 31,2					

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,186 [W/m²·K]

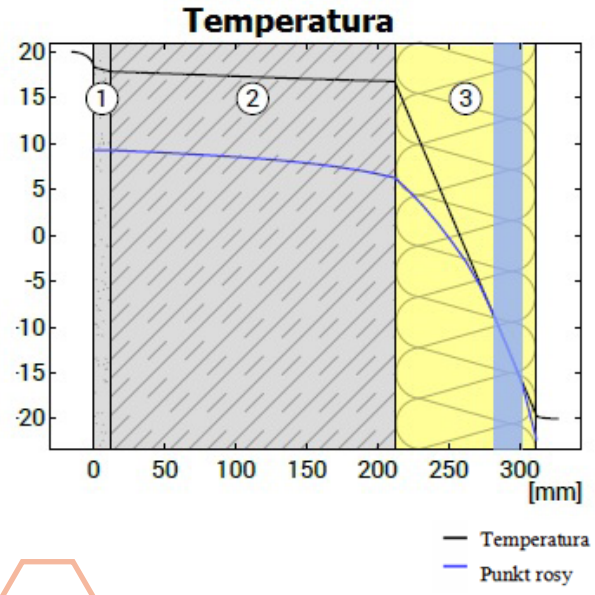
Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy.

Dla bloczka z betonu komórkowego:



Rys. 7.20.
Wykres temperatury i punktu rosy niejednorodnej ściany dwuwarstwowej w miejscu bloczka komórkowego

Dla słupa żelbetowego:



Rys. 7.21.
Wykres temperatury i punktu rosy niejednorodnej ściany dwuwarstwowej w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresów:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie.

W strefie ograniczonej tą płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

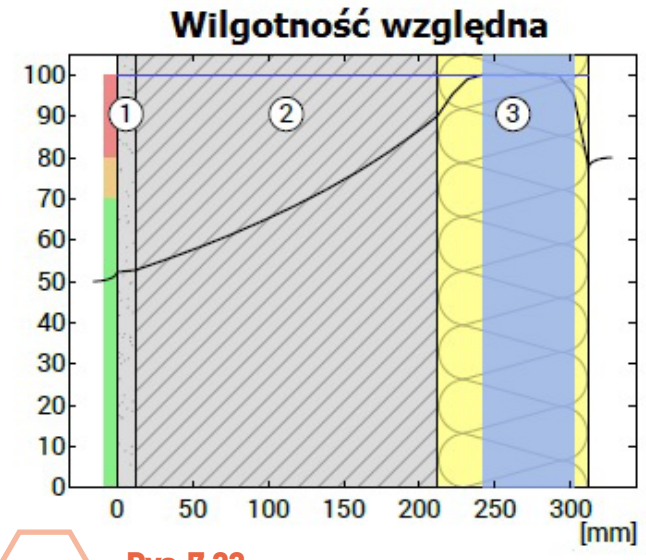
Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.14.

Tablica 7.14.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	1,2	Tynk cementowy	0,07	-
2	20,0	Beton komórkowy	1,00	-
	20,0	Słup żelbetowy	16,0	-
3	10,0	Elewacyjna płyta warstwowa z pianki PUR	30,0	0,039

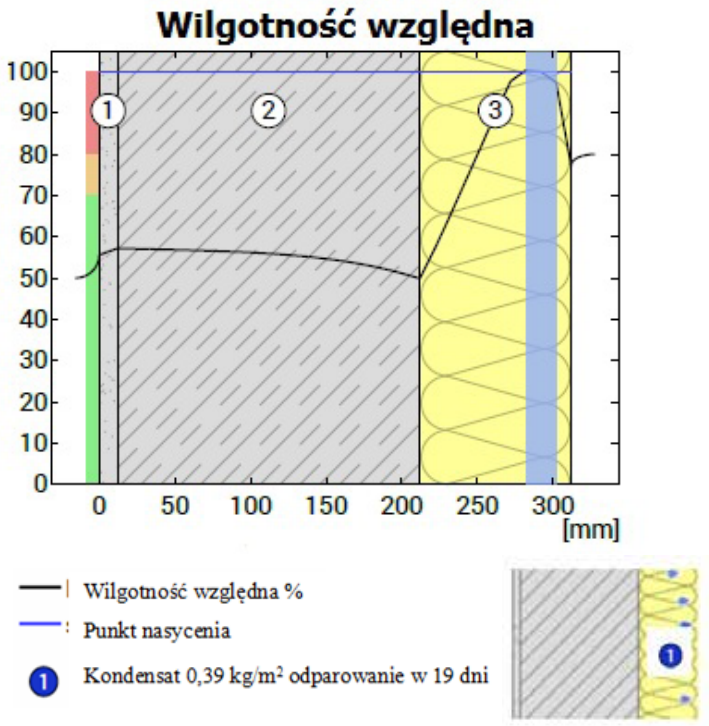
Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

Dla bloczka z betonu komórkowego:



Rys. 7.22.
Wykres wilgotności względnej niejednorodnej ściany dwuwarstwowej w miejscu bloczka komórkowego

Dla słupa żelbetowego:

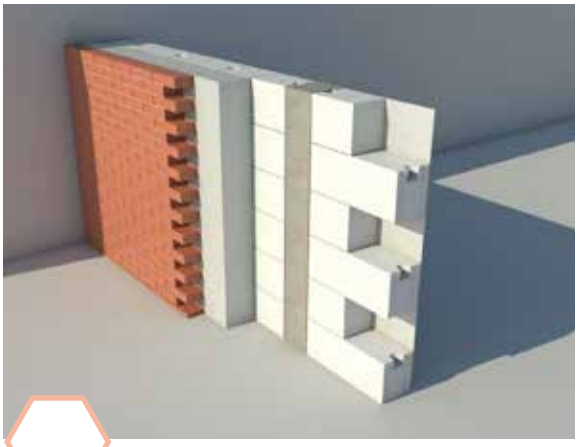


Rys. 7.23.
Wykres wilgotności względnej niejednorodnej ściany dwuwarstwowej w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefie wynosi 100%.

7.8.
Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką niewentylowaną



Rys. 7.24.
Budowa niejednorodnej ściany trójwarstwowej z pustką niewentylowaną

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.15.

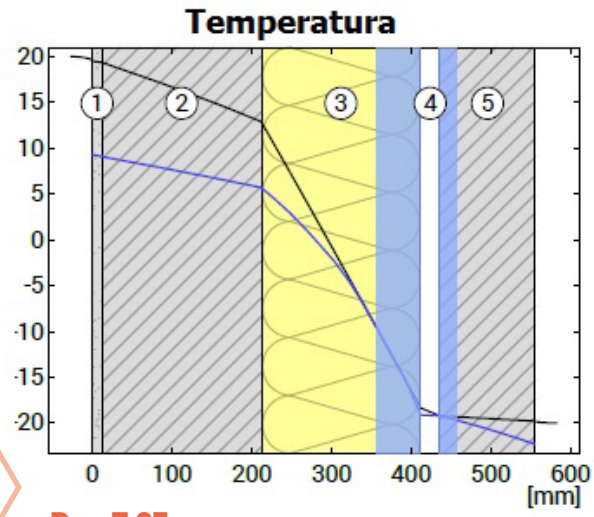
Tablica 7.15.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	18,8	20,0
1	1,2	Tynk cementowy	0,340	0,035	18,5	19,6
2	20,0	Beton komórkowy	0,130	1,538	12,9	19,4
	20,0	Słup żelbetowy	2,500	0,080	17,6	18,6
3	20,0	Styropian EPS 031 Fasada	0,031	6,452	-18,4	17,8
4	2,4	Pustka niewentylowana		0,180	-19,2	-18,2
5	12,0	Cegła klinkierowa	1,050	0,114	-19,8	-19,2
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 55,6					

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,129 [W/m²·K]

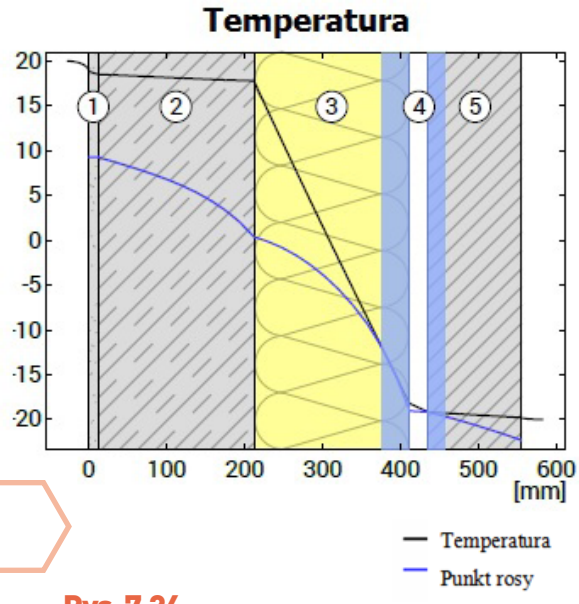
Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy

Dla bloczka z betonu komórkowego:



Rys. 7.25.
Wykres temperatury i punktu rosy niejednorodnej ściany trójwarstwowej z pustką niewentylowaną w miejscu bloczka komórkowego

Dla słupa żelbetowego:



Rys. 7.26.
Wykres temperatury i punktu rosy niejednorodnej ściany trójwarstwowej z pustką niewentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresów:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w dwóch płaszczyźnie.

W strefie ograniczonej tymi płaszczyznami może wystąpić kondensacja pary wodnej.

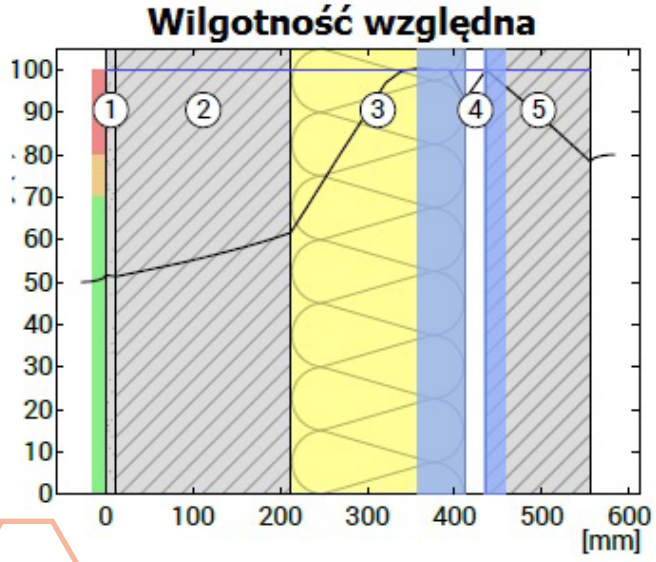
Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.16.

Tablica 7.16.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	1,2	Tynk cementowy	0,07	-
2	20,0	Beton komórkowy	1,00	-
	20,0	Słup żelbetowy	16,0	-
3	20,0	Styropian EPS 031 Fasada	4,0	0,10
4	2,4	Pustka niewentylowana	0,01	0,20
5	12,0	Cegła klinkierowa	12,00	0,20

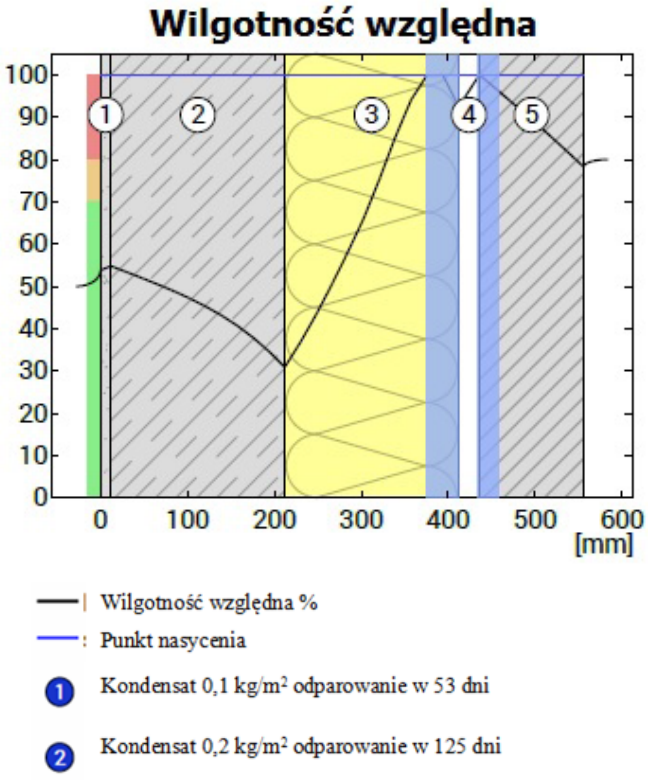
Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

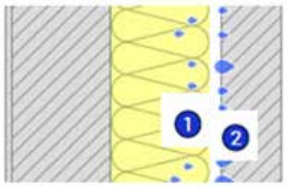
Dla bloczka z betonu komórkowego:



Rys. 7.26.
Wykres wilgotności względnej niejednorodnej ściany trójwarstwowej z pustką niewentylowaną w miejscu bloczka komórkowego

Dla słupa żelbetowego:



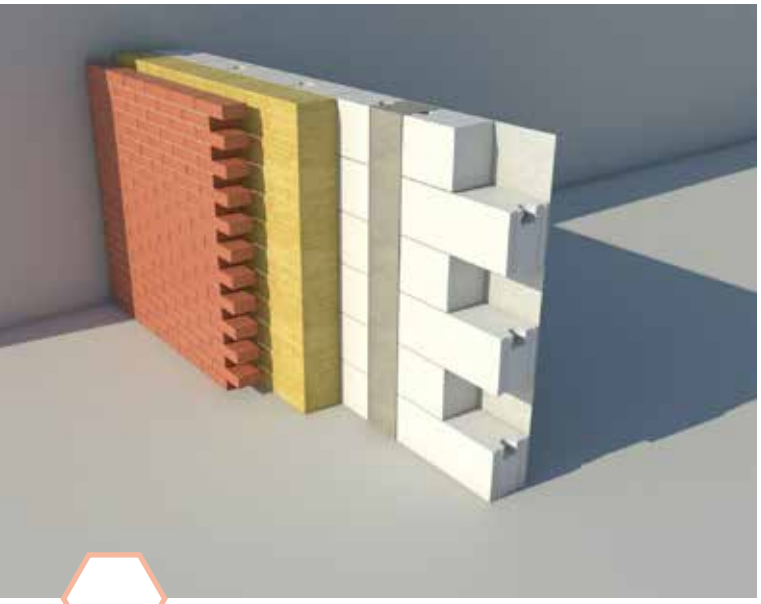


Rys. 7.28.
Wykres wilgotności względnej niejednorodnej ściany trójwarstwowej z pustką niewentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w dwóch strefach wynosi 100%.

7.9.
Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką słabo wentylowaną

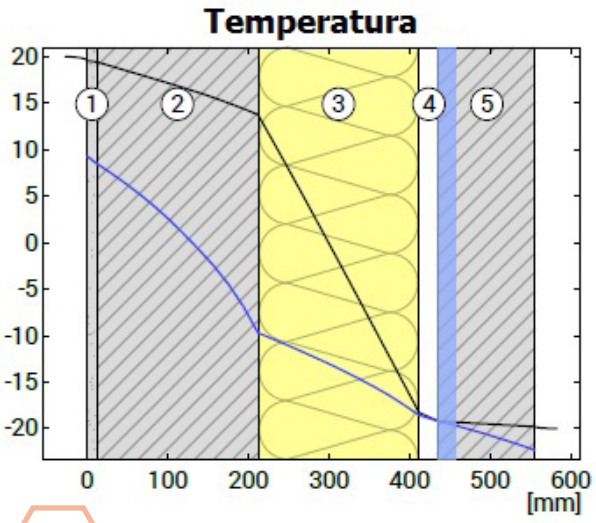


Rys. 7.29.
Budowa trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką słabo wentylowaną

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.17.

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy

Dla bloczka z betonu komórkowego:



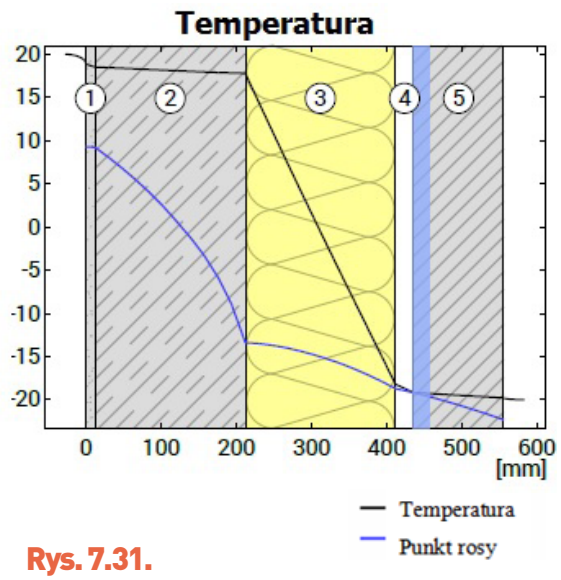
Rys. 7.30.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką słabo wentylowaną w miejscu bloczka z betonu komórkowego

Tablica 7.17.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	18,8	20,0
1	1,2	Tynk cementowy	0,340	0,035	18,5	19,6
2	20,0	Beton komórkowy	0,130	1,538	12,9	19,4
	20,0	Słup żelbetowy	2,500	0,080	17,6	18,6
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,031	6,452	-18,4	17,8
4	2,4	Pustka słabo wentylowana		0,150	-19,2	-18,2
5	12,0	Cegła klinkierowa	1,050	0,114	-19,8	-19,2
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,040	-20,0	-19,8
	Σ = 55,6					

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,129 [W/m²·K]

Dla słupa żelbetowego:



Rys. 7.31.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką słabo wentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresów:

Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy stykają się w jednej płaszczyźnie.

W strefie ograniczonej tą płaszczyzną może wystąpić kondensacja pary wodnej.

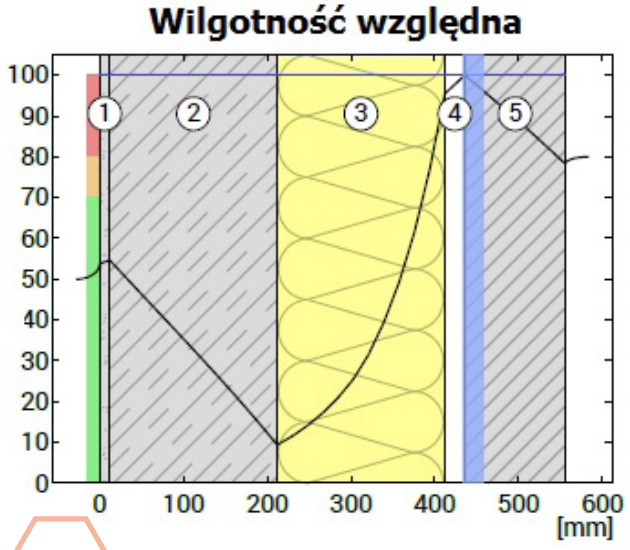
Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.18.

Tablica 7.18.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	1,2	Tynk cementowy	0,07	-
2	20,0	Beton komórkowy	1,00	-
	20,0	Słup żelbetowy	16,0	-
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,20	-
4	2,4	Pustka słabo wentylowana	0,01	1,0
5	12,0	Cegła klinkierowa	12,00	1,0

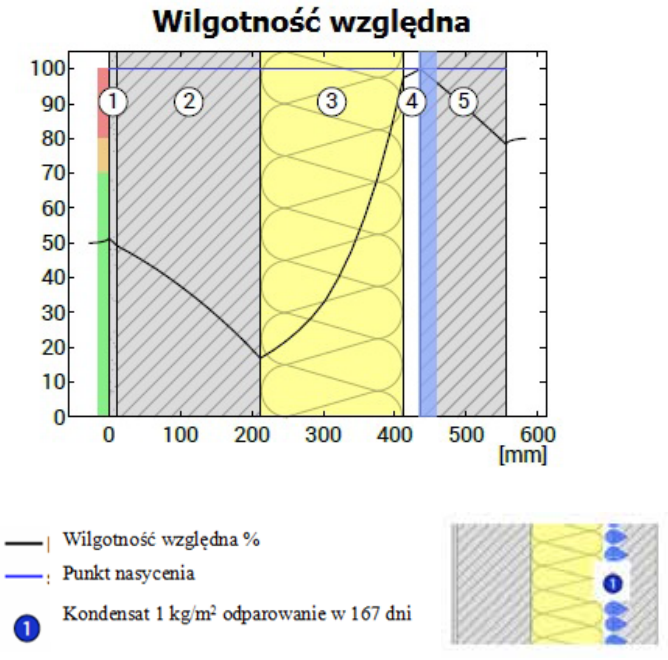
Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody

Dla bloczka z betonu komórkowego:



Rys. 7.32.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką słabo wentylowaną w miejscu bloczka z betonu komórkowego

Dla słupa żelbetowego:

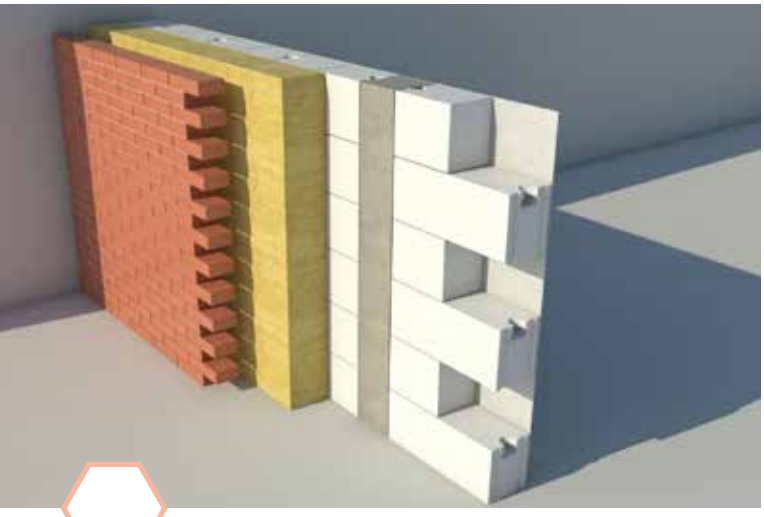


Rys. 7.33.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką słabo wentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność w jednej strefach wynosi 100%.

7.10.
Ściana niejednorodna trójwarstwowa z pustką wentylowaną

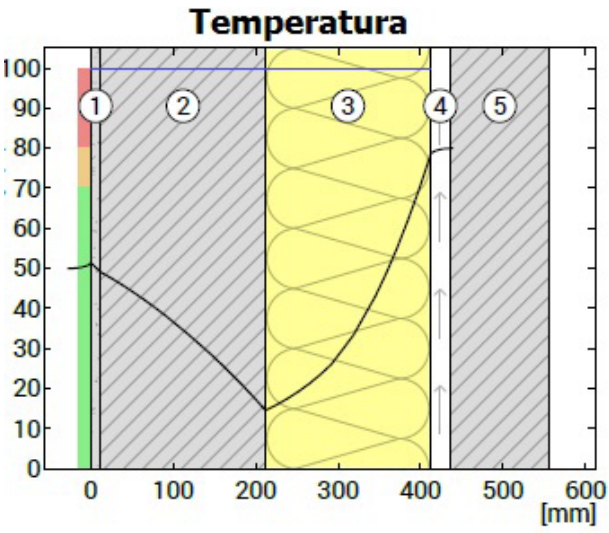


Rys. 7.34.
Budowa trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką wentylowaną

Charakterystyki warstw przegrody wraz z obliczonym oporem cieplnym przedstawiono w tablicy 7.19.

Wykres temperatury w przekroju przegrody jak dla przyjętych warunków brzegowych i początkowych, wraz z wykresem temperatury punktu rosy

Dla bloczka z betonu komórkowego:



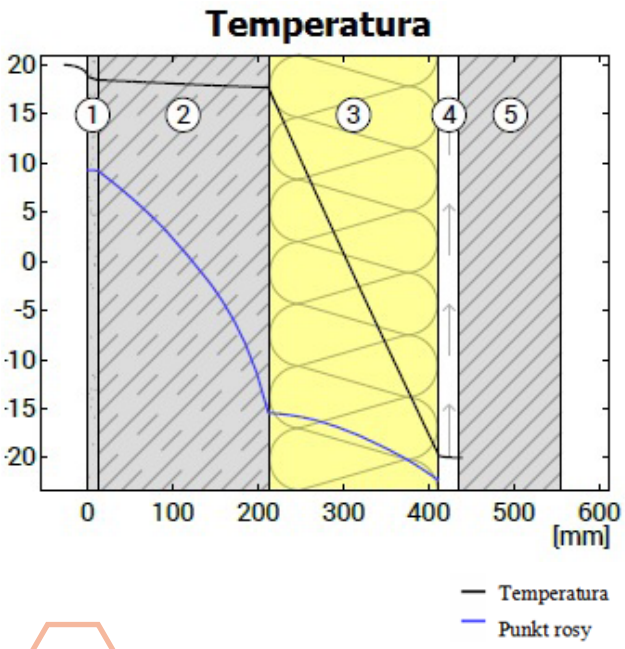
Rys. 7.35.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką wentylowaną w miejscu bloczka z betonu komórkowego

Tablica 7.19.
Charakterystyki materiałowe wraz z oporem cieplnym warstwy.

Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Współczynnik przenikania ciepła λ [W/mK]	Opór R [m²·K/W]	Temperatura minimalna [°C]	Temperatura maksymalna [°C]
		Wewnętrzna strona przegrody	-	0,130	18,8	20,0
1	1,2	Tynk cementowy	0,340	0,035	18,5	19,5
2	20,0	Beton komórkowy	0,130	1,538	12,6	19,4
	20,0	Słup żelbetowy	2,500	0,080	17,5	18,6
3	20,0	Wełna mineralna 031 Fasada	0,031	6,452	-19,8	17,7
		Zewnętrzna strona przegrody	-	0,130	-20,0	-19,8
4	2,4	Pustka wentylowana			-20,0	-20,0
5	12,0	Cegła klinkierowa			-20,0	-20,0
	Σ = 55,6					

Współczynnik przenikania ciepła U = 0,132 [W/m²·K]

Dla słupa żelbetowego:



Rys. 7.36.
Wykres temperatury i punktu rosy trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką wentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresów:

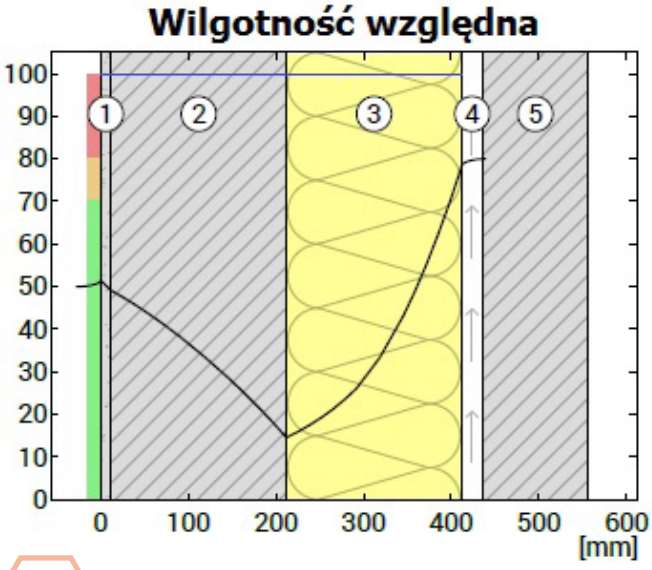
Linia temperatury i linia temperatury punktu rosy nie stykają się.

Dla przyjętych warunków obliczono zgodnie z PN EN ISO 13788, ilość kondensatu, jaki może gromadzić się w strefach kondesacji. Wyniki obliczeń dla poszczególnych warstw przedstawiono w tabeli 7.18.

Tablica 7.20.
Wyniki obliczeń ilości kondensatu w strefie kondensacji.

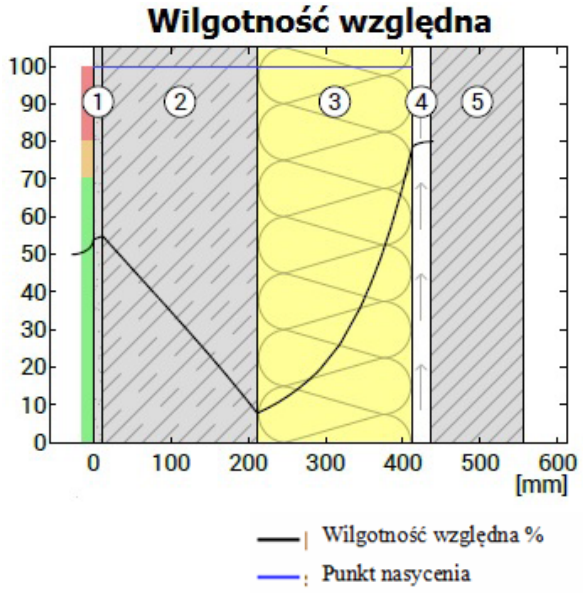
Lp.	Grubość [cm]	Materiał	Sd [m]	Kondensat [kg/m²]
1	1,2	Tynk cementowy	0,07	-
2	20,0	Beton komórkowy	1,00	-
	20,0	Słup żelbetowy	16,0	-
3	20,0	Wełnamineralna 031 Fasada	0,20	-

Wykres wilgotności względnej poszczególnych warstw przegrody



Rys. 7.37.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką wentylowaną w miejscu bloczka z betonu komórkowego

Dla słupa żelbetowego:



Rys. 7.38.
Wykres wilgotności względnej trójwarstwowej ściany niejednorodnej z pustką wentylowaną w miejscu słupa żelbetowego

Analiza wykresu:

W zadanych warunkach w materiale termoizolacyjnym wilgotność wynosi <100%.



SBPB

SOLBET ROK ZAŁOŻENIA 1951

H+H Beton komórkowy

BRUK-BET

PRZEDSIĘBIORSTWO PREFABET - ŁAGISZA SPÓŁKA Z O.O. PREFABET ŁAGISZA

Prefabet Osława Dąbrowa SA

PREFBET ŚNIADOWO

SOLBET KOLBUSZOWA

SOLBET LUBARTÓW

SOLBET STALOWA WOLA Spółka Akcyjna

ZP-H-B Wysokaw



Z recenzji Prof. dr hab. inż. Adama Podhoreckiego:

„W recenzowanej pracy uzasadnia się potrzebę oszczędności energii w budownictwie. Autorzy pracy przedstawili w sposób przystępny i praktyczny projektowanie przegród budowlanych ze względu na wymogi cieplno-wilgotnościowe. To bardzo ważna i aktualna problematyka naukowo-techniczna, ponieważ m.in.:

- Z ostatnio znowelizowanej Dyrektywy UE z 9 czerwca 2010 roku dotyczącej charakterystyki energetycznej budynków wynika, że wszystkie nowo powstałe budynki będą musiały spełniać od początku 2021 roku podwyższone wymogi w zakresie energooszczędności i charakteryzować się niemal zerowym zużyciem energii.
- Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, Regionalne Programy Operacyjne i inne programy przewidziane do realizacji w latach 2014-2020 są mocno nakierowane na budownictwo energooszczędne. Można więc powiedzieć, że budownictwo energooszczędne będzie budownictwem XXI wieku.

Recenzowana praca ma charakter praktyczny, techniczny, jest adresowana głównie do projektantów budynków. Będzie też pożyteczną pomocą m.in. dla studentów budownictwa oraz architektury”.

Prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki

Z recenzji Dr hab. inż. Łukasza Drobca:

„Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca jest opracowana na dobrym poziomie merytorycznym i będzie bardzo przydatna pracownikom naukowym, dydaktycznym, studentom, a także architektom i inżynierom budownictwa, pełniącym rolę projektanta, kierownika budowy i inspektora nadzoru inwestorskiego oraz pozostałym służbom technicznym związanym z zarządzaniem i eksploatacją obiektów budowlanych.”

Dr hab. inż. Łukasz Drobiec

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

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