

KOMFORT CIEPLNY

Prof. nzw. dr hab. inż. Tomasz Wiśniewski

Plan wystąpienia

- Definicja komfortu cieplnego,
- Czynniki mające wpływ na komfort cieplny,
- Parametry stosowane do opisu ilościowego komfortu cieplnego,
- Metody pomiaru komfortu cieplnego,
- Przykłady pogorszenia warunków komfortu cieplnego

Polskie Normy dotyczące komfortu cieplnego

PN-EN ISO 7730; kwiecień 2006 – wersje w języku polskim i angielskim

„Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów miejscowego komfortu termicznego”

PN ISO 7726; marzec 2001

„Ergonomia środowiska termicznego. Przyrządy do pomiaru wielkości fizycznych.”

KOMFORT CIEPLNY

Stan komfortu cieplnego człowieka to stan jego zrównoważonego bilansu cieplnego z otoczeniem (ilość ciepła wytwarzanego w wyniku metabolizmu jest równa ilości ciepła traconego do otoczenia), przy jednoczesnym braku dyskomfortu lokalnego (nadmiernego przegrzania lub ochłodzenia fragmentu ciała).

Na równowagę cieplną całego ciała (i tym samym na odczucie komfortu cieplnego) wpływa:

- aktywność fizyczna człowieka (wyrażana za pomocą poziomu wytwarzanej energii metabolicznej),
- opór cieplny odzieży, jaką człowiek ma na sobie,
- temperatura powietrza,
- średnia temperatura promieniowania,
- prędkość przepływu powietrza,
- wilgotność powietrza.

Wrażenia cieplne całego ciała można przewidzieć obliczając wskaźnik **PMV** (predicted mean vote) tzn. przewidywanej oceny średniej. Konieczny jest w tym celu pomiar lub oszacowanie wymienionych wyżej wielkości.

PRZEWIDYWANA OCENA ŚREDNIA (PMV)
(Przewidywana średnia ocena komfortu cieplnego)

+3	Gorąco
+2	Ciepło
+1	Lekko ciepło
0	Neutralnie
-1	Lekko chłodno
-2	Chłodno
-3	Zimno

PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) - wskaźnik PPD stanowi prognozę liczby osób odczuwających brak komfortu cieplnego.

Wskaźniki PMV i PPD

Tablica 1. Rozkład indywidualnych ocen wrażeń cieplnych (wynik dla grupy 1300 osób)

PMV	PPD	Przewidywany odsetek osób wydających ocenę		
		0	-1, 0 lub +1	-2, -1, 0, 1, 2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
-0,5	10	55	90	98
-1	25	30	75	95
-2	75	5	25	70

Wskaźnik PMV

Wskaźnik PMV służy zatem do sprawdzenia, czy określone środowisko termiczne (przy danej aktywności fizycznej i ubraniu człowieka) spełnia kryteria komfortu cieplnego.

Dla wskaźnika $PMV = 0$ otrzymuje się równanie komfortu cieplnego, pozwalające na dobranie kombinacji aktywności, odzieży i parametrów środowiska, które powinny zapewnić neutralne wrażenie cieplne.

Wskaźnik PMV

Możliwości wyznaczenia PMV:

- Obliczenie za pomocą równania (ew. za pomocą programu komputerowego; załącznik D Normy 7730),
- Wyznaczenie z załącznika E Normy 7730; podane są tablice wartości PMV dla różnych rodzajów aktywności, różnych temperatur, różnego oporu cieplnego odzieży i różnych prędkości względnych przepływu powietrza (wartości podane dla wilgotności względnej 50%),
- Pomiar z pomocą odpowiednich mierników całkujących

Wskaźnik PMV

Wskaźnik PMV jest wyrażony równaniem:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & [0,303 \exp(-0,036 M) + 0,028] \cdot \\ & \cdot \{(M-W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5773 - 6,99 \cdot (M-W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M-W) - 58,15] \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned}$$

Gdzie:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad \text{dla} \quad 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}}$$

$$h_c = 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \quad \text{dla} \quad 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \quad \text{dla} \quad I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad \text{dla} \quad I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

oznaczenia:

M - metabolizm, [W/m²] (odniesiony do 1 m² powierzchni ciała); 1 met = 58 W/m²,

W - praca zewnętrzna, [W/m²],

I_{cl} - opór cieplny odzieży, [m²·K/W]; 1 clo = 0,155 m²·K/W,

f_{cl} - stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego,

t_a - temperatura powietrza, [°C],

\bar{t}_r - średnia temperatura promieniowania, [°C],

v_{ar} - względna prędkość przepływu powietrza, [m/s],

p_a - ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa],

h_c - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję, [W/(m²·K)],

t_{cl} - temperatura powierzchni odzieży, [°C].

Powierzchnia ciała

Wzór Dubois:

$$S = 0,007184 \cdot H^{0,725} \cdot W^{0,425}$$

$$S \text{ [m}^2\text{]}, H \text{ [cm]}, W \text{ [kg]}$$

$$S = 0,202 \cdot H^{0,725} \cdot W^{0,425}$$

$$S \text{ [m}^2\text{]}, H \text{ [m]}, W \text{ [kg]}$$

Średnia temperatura promieniowania

Średnia temperatura promieniowania to jednolita temperatura pomieszczenia, w którym człowiek wymieni taką samą ilość ciepła poprzez promieniowanie, jak w rzeczywistym pomieszczeniu o niejednorodnej temperaturze.

Średnia temperatura promieniowania zależy od położenia w środowisku niejednorodnym termicznie.

- Średnia temperatura promieniowania może być mierzona za pomocą przyrządów, które umożliwiają „scałkowanie” niejednorodnego promieniowania, np. za pomocą poczernionej kuli (odwzorowanie człowieka siedzącego), lub za pomocą czujnika o kształcie elipsoidalnym (odwzorowanie człowieka siedzącego i stojącego).
- Średnia temperatura promieniowania może być obliczona na podstawie zmierzonych temperatur otaczających ścianek, ich powierzchni i usytuowania w stosunku do człowieka (obliczenie geometrycznych współczynników kształtu).
- Średnia temperatura promieniowania może być oszacowana na podstawie temperatury promieniowania płaszczyzny w sześciu przeciwnych kierunkach, ważonej przy pomocy współczynników rzutowania płaszczyzny w odniesieniu do człowieka.

Temperatura operacyjna

Temperatura operacyjna t_o definiowana jest jako jednolita temperatura pomieszczenia, w którym człowiek wymieni taką samą ilość ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję, jak w rzeczywistym pomieszczeniu o niejednorodnej temperaturze.

Wzór określający temperaturę operacyjną:

$$t_o = \frac{h_c t_a + h_r \bar{t}_r}{h_c + h_r}$$

gdzie:

t_a - temperatura powietrza,

\bar{t}_r - średnia temperatura promieniowania,

h_c - współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję,

h_r - współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie.

Temperatura operacyjna

Jeżeli względna prędkość przepływu powietrza jest niewielka (<0,2 m/s) lub jeżeli różnica między średnią temperaturą promieniowania a temperaturą powietrza jest niewielka (<4°C), temperaturę operacyjną można obliczyć jako średnią z wartości temperatury powietrza i średniej temperatury promieniowania.

W celu uzyskania większej dokładności można zastosować wzór:

$$t_o = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot \bar{t}_r$$

gdzie współczynnik A zależy od względnej prędkości przepływu powietrza:

V_{ar}	<0,2	0,2÷0,6	0,6÷1,0
A	0,5	0,6	0,7

Metabolizm

Ocena wytwarzania energii metabolicznej: załącznik B Normy 7730

Aktywność	Wytwarzanie energii metabolicznej	
	W/m ²	met
Wypoczynek w pozycji półleżącej	46	0,8
Wypoczynek w pozycji siedzącej	58	1,0
Praca w pozycji siedzącej	70	1,2
Praca lekka w pozycji stojącej	93	1,6
Praca średnia w pozycji stojącej	116	2,0
Praca ciężka w pozycji stojącej	174	3,0
Marsz po płaskim terenie	110	1,9
2 km/h	140	2,4
3 km/h	165	2,8
4 km/h	200	3,4
5 km/h		

Ocena oporu cieplnego odzieży: załącznik C Normy 7730

Opór całkowity (oporność całkowita) odzieży, jaką człowiek ma na sobie, wylicza się ze wzoru:

$$I_{cl} = 0,75 \sum I_{cli} + c$$

gdzie $c = 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0,08 \text{ clo}$

Przykłady wartości oporów cieplnych typowych części odzieży

Część odzieży	I_{cl}	
	$[\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$	$[\text{clo}]$
Skarpety lekkie	0,005	0,03
Skarpety grube	0,006	0,04
Slipy	0,029	0,19
Koszula lekka z krótkimi rękawami	0,031	0,2
Koszula lekka z długimi rękawami	0,043	0,28
Spódnica ciepła	0,034	0,22
Sukienka lekka	0,026	0,17
Sukienka gruba	0,098	0,63
Marynarka gruba	0,076	0,49
Spodnie lekkie	0,040	0,26
Spodnie grube	0,068	0,44
Obuwie lekkie	0,006	0,04

Przykłady wartości oporów cieplnych typowych zestawów odzieży

Zestaw odzieży	I_{cl}	
	[m ² ·K/W]	[clo]
Typowy zestaw odzieży tropikalnej	0,045	0,3
Lekka odzież letnia	0,03	0,5
Lekka odzież robocza	0,11	0,7
Zestaw typowej odzieży zimowej noszonej w domu	0,16	1,0
Tradycyjna odzież noszona do pracy	0,23	1,5

W umiarkowanych środowiskach ($t < 26^{\circ}\text{C}$) i umiarkowanej aktywności ($M < 2$ met) wilgotność ma umiarkowany wpływ na odczucie komfortu cieplnego.

Wzrost wilgotności względnej o 10% odczuwa się tak samo jak wzrost temperatury operacyjnej o $0,3^{\circ}\text{C}$.

Względny ruch powietrza, spowodowany ruchem ciała, uważa się za równy zero dla aktywności mniejszej od 1 met.

Dla $M > 1$ zastosowanie ma zależność: $V_{ar} = 0,3 (M-1)$.

DYSKOMFORT LOKALNY

Brak komfortu cieplnego może być spowodowany niepożądanym nagrzaniem lub nadmiernym ochłodzeniem określonej części ciała.

Może to być spowodowane:

- przez zbyt dużą prędkość przepływu powietrza (przeciąg),
- zbyt dużą różnicą temperatury powietrza pomiędzy głową a stopami (kostkami nóg),
- przez zbyt gorącą lub zimną podłogę,
- przez zbyt dużą asymetrię promieniowania

DYSKOMFORT LOKALNY

DYSKOMFORT SPOWODOWANY PRZECIĄGIEM

Dyskomfort spowodowany przeciągiem może być wyrażony poprzez odsetek ludzi odczuwających dyskomfort z powodu przeciągu:

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14)$$

gdzie:

- $t_{a,l}$ - lokalna temperatura powietrza (od 20 do 26°)
- $\bar{v}_{a,l}$ - lokalna średnia prędkość powietrza (<0,5 m/s)
- Tu - lokalna intensywność turbulencji (od 10 do 60%; należy zastosować 40, jeżeli rzeczywista wartość jest nieznana)

dla $\bar{v}_{a,l} < 0,05$ m/s zastosować $\bar{v}_{a,l} = 0,05$ m/s

POMIAR ŚREDNIEJ TEMPERATURY PROMIENIOWANIA

TERMOMETR Z POCZERNIONĄ KULĄ

Dla standardowej kuli $D = 0,15 \text{ m}$, $\epsilon_g = 0,95$ i wówczas (dla konwekcji naturalnej):

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0,4 \cdot 10^8 |t_g - t_a|^{1/4} \times (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

Przy konwekcji wymuszonej, dla standardowej kuli:

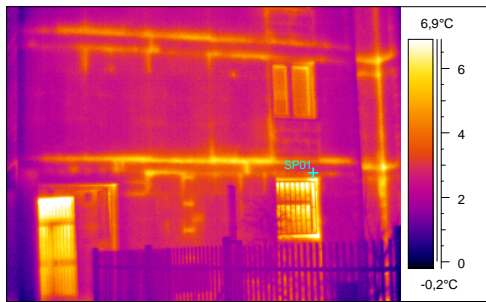
$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \times v_a^{0,6} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

t_g - temperatura poczernionej kuli

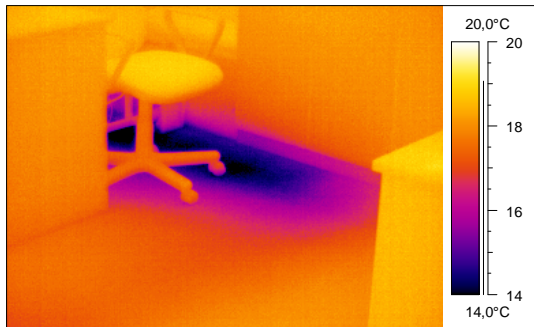
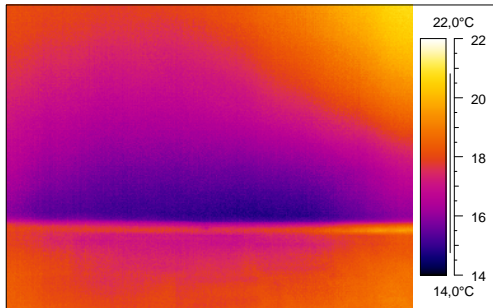
t_a - temperatura powietrza w otoczeniu

v_a - prędkość powietrza

Przykłady pogorszenia warunków komfortu cieplnego

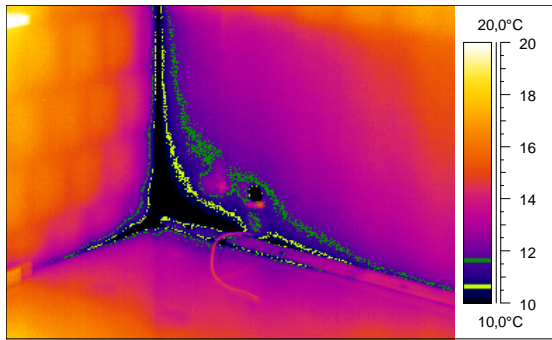


Obniżenie temperatury ściany nad żelbetowym wieńcem- izolowanym styropianem tylko na jego wysokości

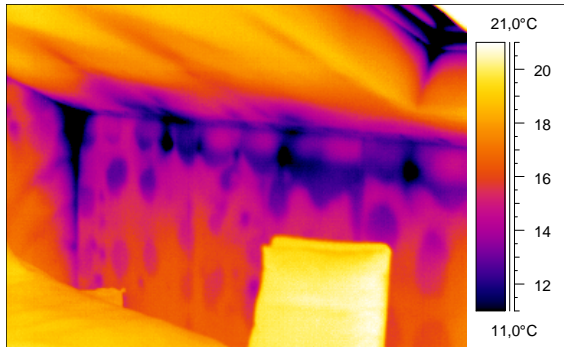


Fragmentu podłogi nad przejazdem bramowym. Widoczny mostek cieplny w miejscu przebicia izolacji cieplnej stropu konstrukcją słupa. Temperatura na zewnątrz -11°C, temperatura wewnątrz: 19°C.



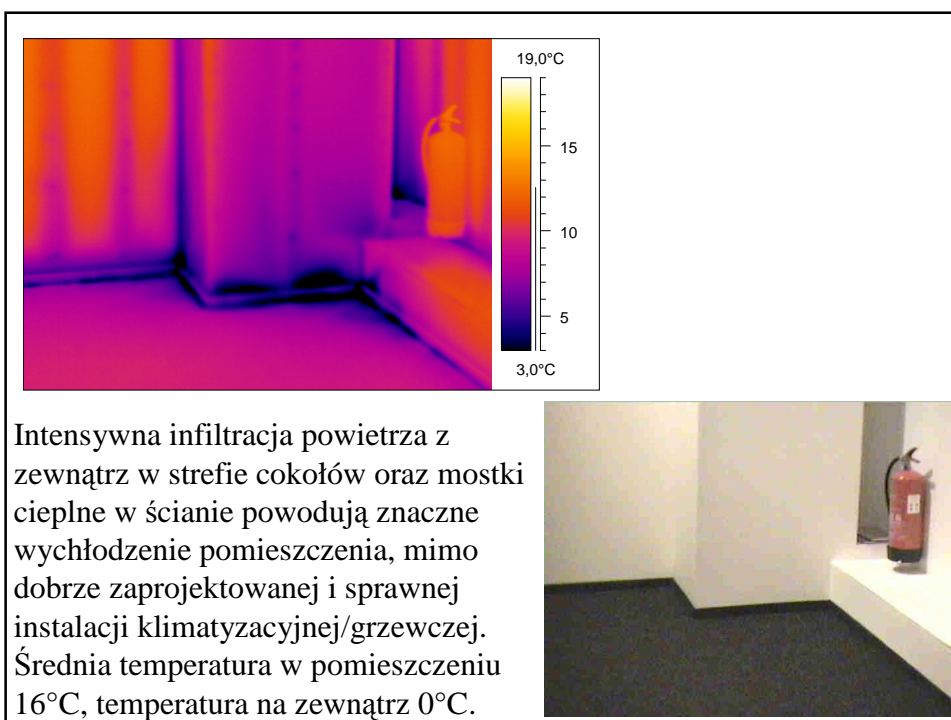
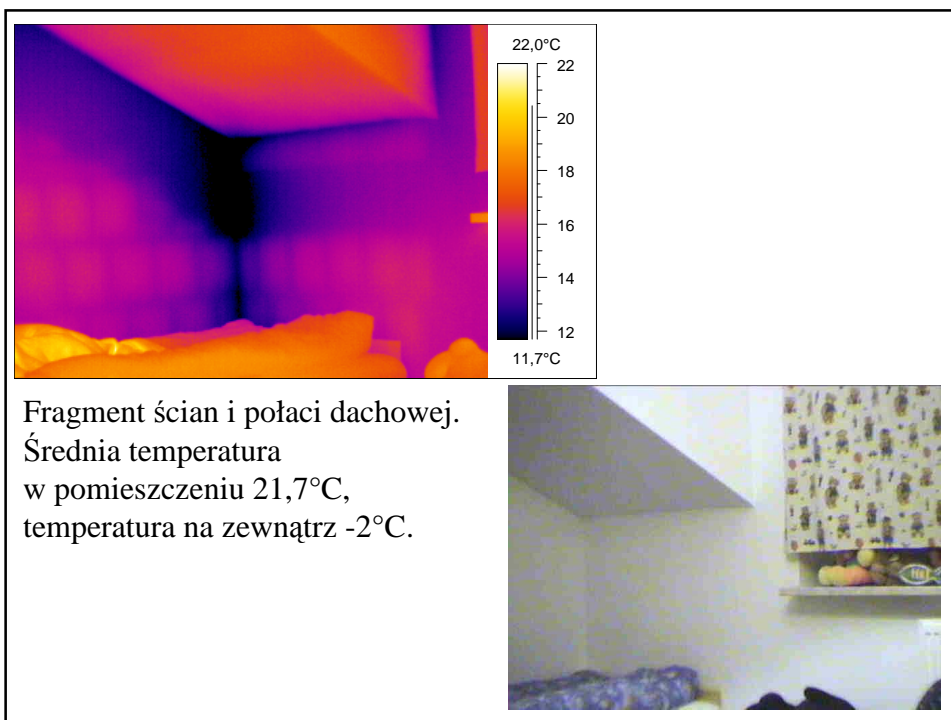


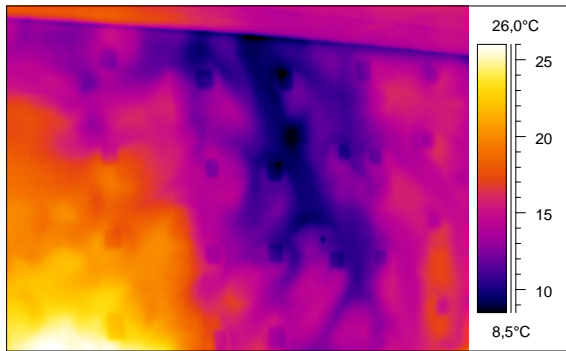
Mostek termiczny w narożniku nad niedostatecznie zaizolowanym wykuszem. Widoczne są spoiny muru o niższej izolacyjności. Średnia temperatura w pomieszczeniu 19,5°C, temperatura na zewnątrz -2°C.



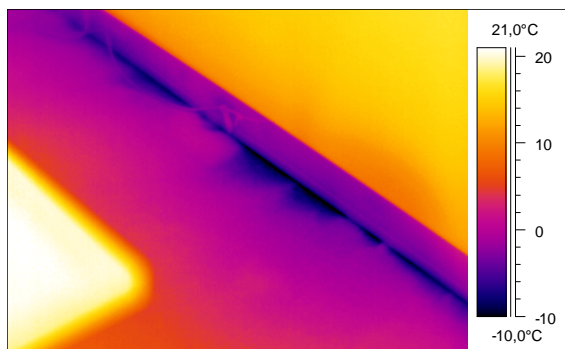
Fragment połaci dachowej i ściany kolankowej. Wadliwie wykonana izolacja cieplna, zwłaszcza ściany kolankowej. Widoczne miejsca klejenia płyt gipsowo-kartonowych. Średnia temperatura w pomieszczeniu 19°C, temperatura na zewnątrz -7°C.





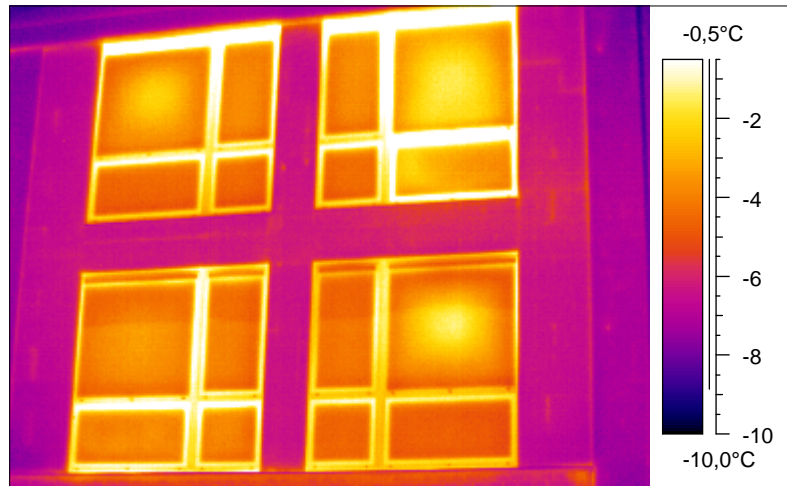


Infiltracja zimnego powietrza do szczeliny pod płytami gipsowo-kartonowymi przez nieszczelności na połączeniu stropu i ściany.
 Średnia temperatura w pomieszczeniu 21,3°C, temperatura na zewnątrz 2°C.



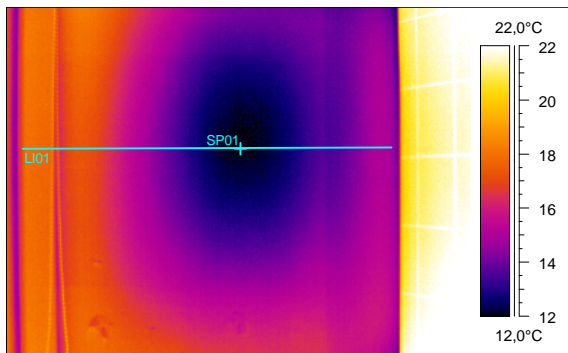
Fragment podłogi i osłony podokiennej na ścianie zewnętrznej. Widoczna intensywna infiltracja powietrza z zewnątrz, powodująca znaczne wychłodzenie podłogi. Średnia temperatura w pomieszczeniu 20°C, temperatura na zewnątrz -12°C.





Termogram okien – wykonany z zewnątrz. Obniżona izolacyjność części szyb zespolonych ze względu na niedostateczną ilość argonu. Widoczny wpływ ciepłego powietrza przez nieszczelności wokół otwieranych części okien oraz nawiewniki w górnych oknach.

Temperatura na zewnątrz: -5°C , temperatura wewnątrz: 20°C .



Badanie jakości zespołów okiennych.

Termogram okna od wewnątrz. Widoczny rezultat niedostatecznej ilości argonu w szybie zespolonej.

