

# MIERZYĆ CZY LICZYĆ STRATY CIEPŁA Z INSTALACJI?

dr hab. inż. Sławomir Zator  
Politechnika Opolska

# Agenda

- Wprowadzenie
- Obliczenia i pomiary strat ciepła
- Niepewność określania strat ciepła
- Przykładowe pomiary termowizyjne
- Korekta pomiaru termowizyjnego w oparciu o trójwymiarowy model obiektu
- Wpływ otoczenia na pomiar
- Podsumowanie

# Wyznaczanie strat ciepła

☐ Metoda obliczeniowa

$$Q_S = A q_S \quad U_p = \frac{q_S}{t_i - t_e}$$

$$q_S = q_{rad} + q_{konw}$$

Można policzyć po stronie wewnętrznej lub zewnętrznej przegrody!

$$q_{rad} = \alpha_{rad}(t_p - t_{ref}) = \varepsilon\sigma(t_p^4 - t_{ref}^4) \quad \alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(t_p + t_{ref})(t_p^2 + t_{ref}^2) \approx 4\varepsilon\sigma t_{ref}^3$$

$$q_{konw} = \alpha_{konw}(t_p - t_{ref})$$

$\alpha_{konw} = 1,42\sqrt{t_{ref} - t_p} \quad h \leq 2,9 \text{ m}$   
 $\alpha_{konw} = 1,65\sqrt{t_{ref} - t_p} \quad h > 2,9 \text{ m}$

wewn.

zewn.

opływ laminarny

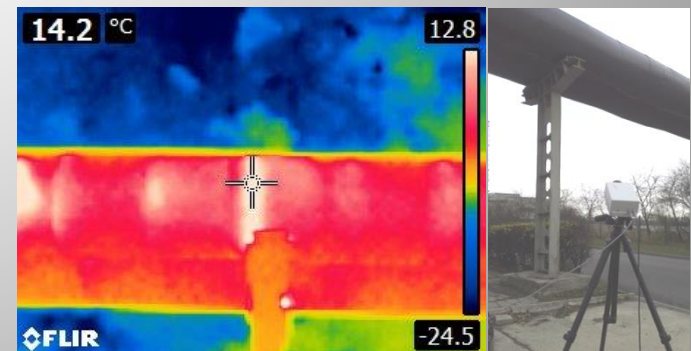
opływ turbulentny

$$\alpha_{konw} = 6,34 \frac{v_{\infty}^{4/5}}{L^{1/5}}$$

☐ Metoda pomiarowa bezpośrednia



☐ Metody pomiarowe pośrednie



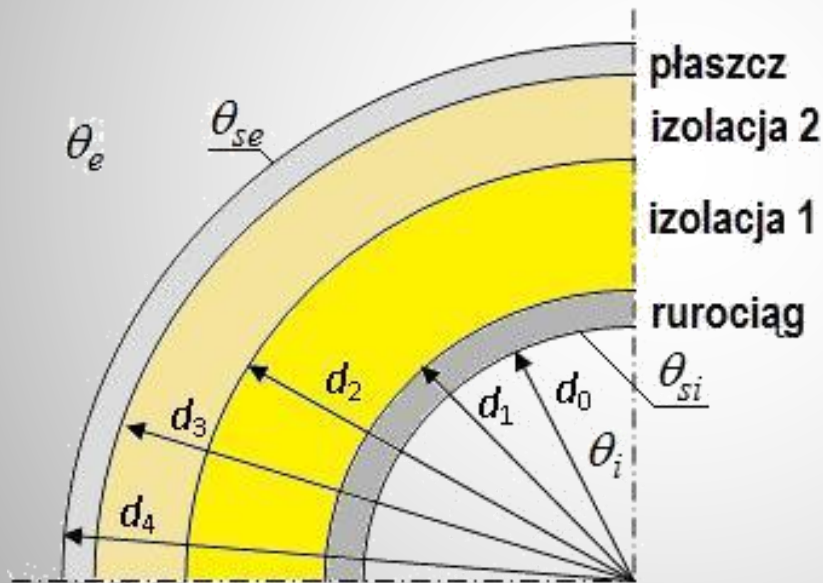
# Straty ciepła – obliczeniowo

$$Q = q A \Delta \tau$$

$$Q = q L d \tau$$

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

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



$$R_i = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^4 \left( \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{d_j}{d_{j-1}} \right)$$

$$R_{si} = \frac{1}{\pi d_0 h_{si}}$$

$$R_{se} = \frac{1}{\pi d_e h_{se}}$$

# Przejmowanie ciepła po stronie wewnętrznej rurociągu

Przykłady:

$d_0=250$  mm - gorąca woda  $v= 0,5\div 1$  m/s

$h_{si} = 250\div 10000$  W/(m<sup>2</sup>K)

$R_{si} < 0,002$  (m·K)/W



$d_0=250$  mm - para wodna  $v= 10\div 30$  m/s

$h_{si} = 10\div 250$  W/(m<sup>2</sup>K)

$R_{si} \approx 0,01$  (m·K)/W

# Przejmowanie ciepła przez konwekcję po stronie zewnętrznej rurociągu

$$R_{se} = \frac{1}{\pi d_e h_{se}} \quad h_{se} = h_{cv} + h_r$$

Rurociąg na zewnątrz budynku

$$h_{cv} = 8,9 \frac{v^{0,9}}{d_e^{0,1}}$$



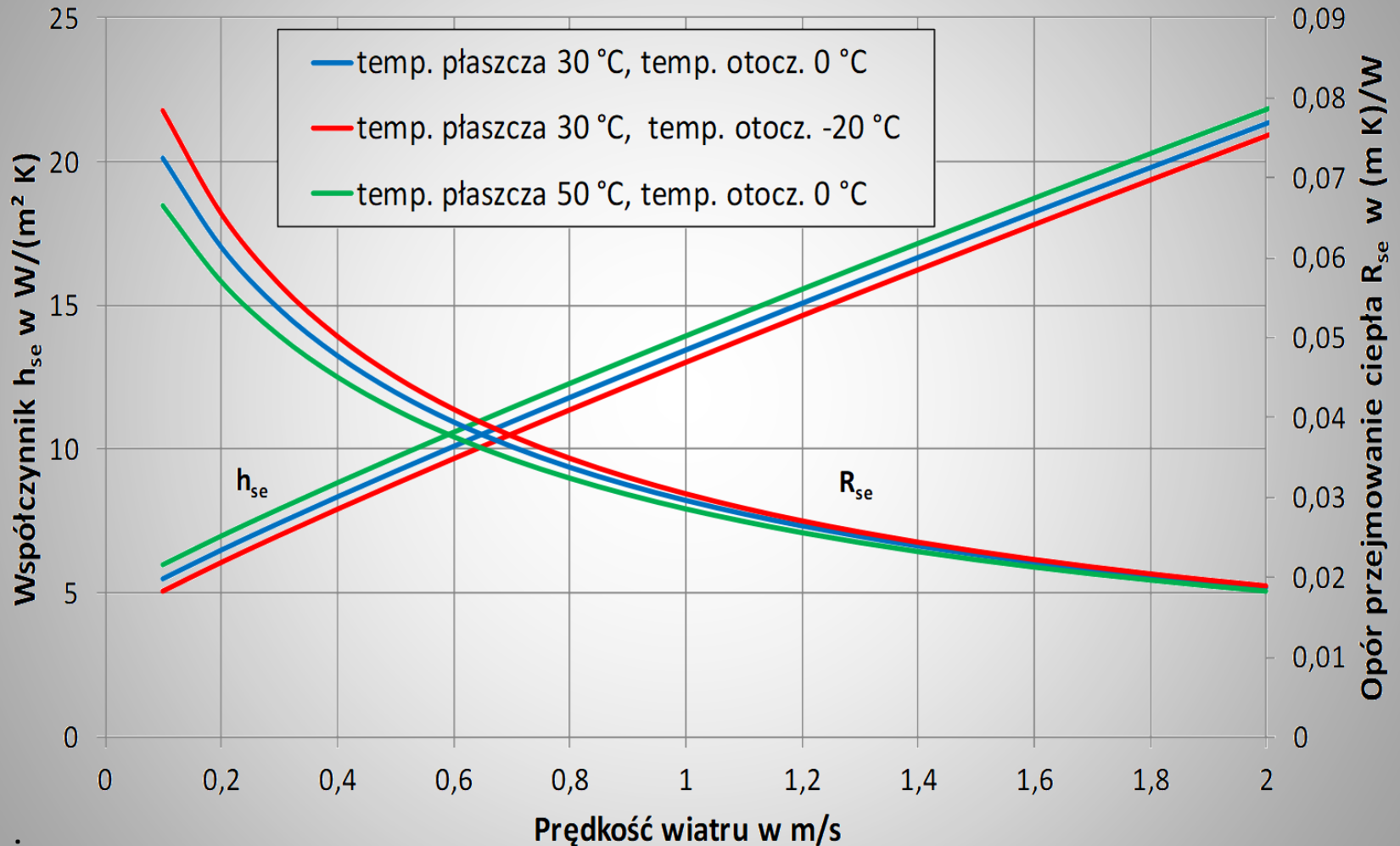
Rurociąg poziomy wewnątrz budynku,  $d_e < 30$  cm,  $\Delta\theta < 35$  °C

$$h_{cv} = 1,254 \sqrt{\frac{\Delta\theta}{d_e}}$$





# Obliczony współczynnik przejmowanie ciepła $h_{se}$ stronie zewnętrznej rurociągu



Wnioski:

Opór przejmowania ciepła po stronie zewnętrznej silnie zmienia się z prędkością wiatru  
Jest on przynajmniej o rząd większy od oporu przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej

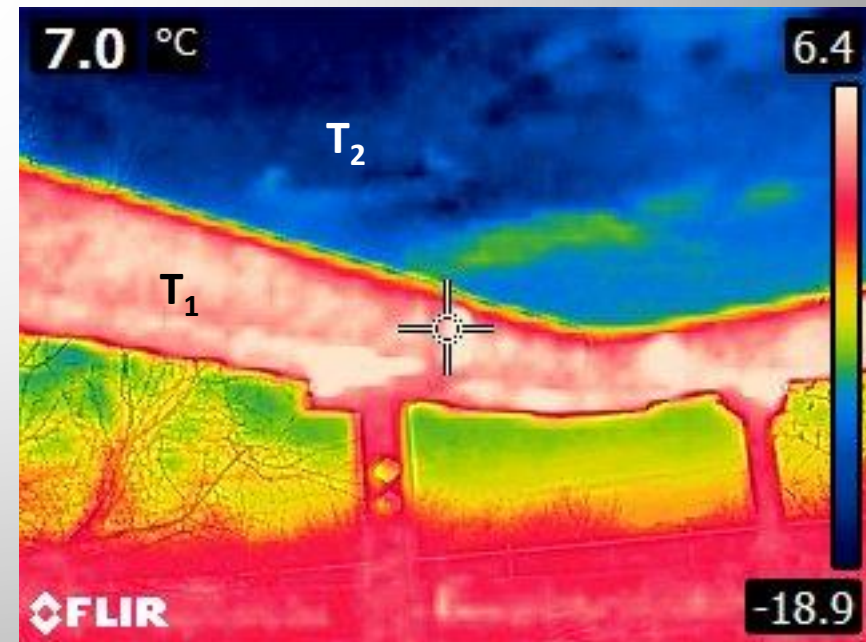
# Przejmowanie ciepła przez promieniowanie po stronie zewnętrznej rurociągu

$$R_{se} = \frac{1}{\pi d_e h_{se}}$$

$$h_{se} = h_{cv} + h_r$$

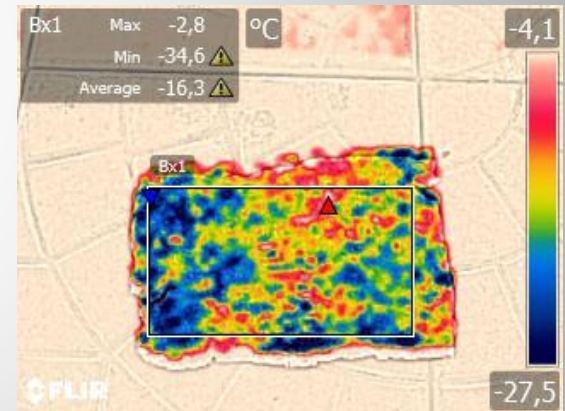
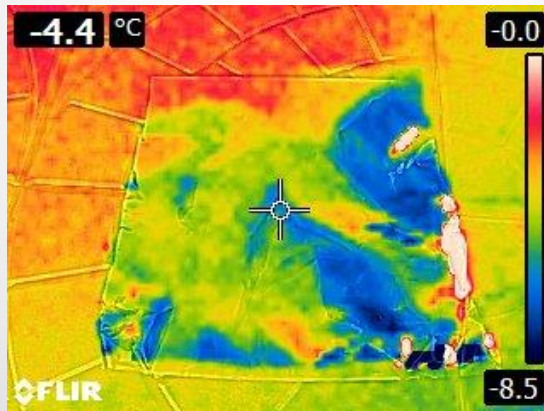
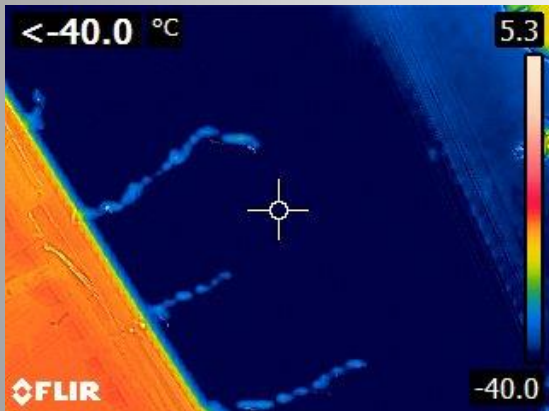
$$h_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$$

Problem oszacowania temperatury  $T_2$  !

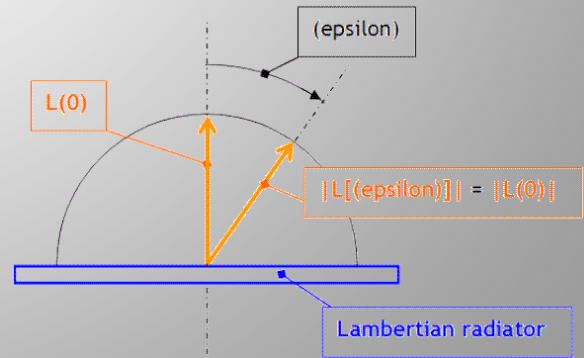




# Oszacowanie temperatury $T_2$

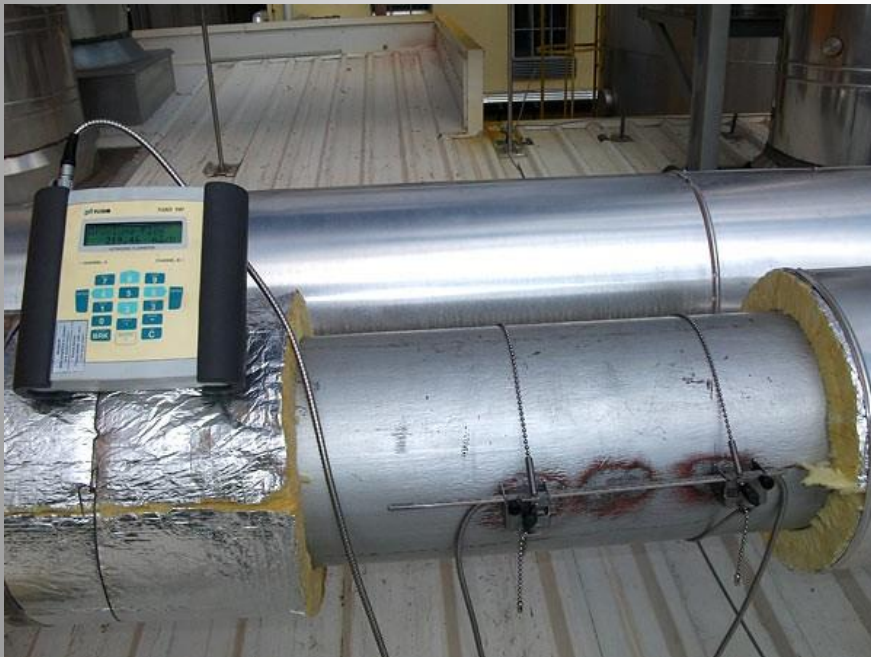


Stała Luminancja



# Pomiar bezpośredni strat ciepła w rurociągu

$$Q_S = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{m} c_w (\theta_p - \theta_k) d\tau$$



Realizacja z użyciem ciepłomierza:

- pomiar strumienia medium
- pomiar różnicy temperatur pomiędzy początkiem i końcem rurociągu

Problemy:

- odległość pomiędzy czujnikami temperatury
- stosunkowo duża niepewność pomiaru temperatury

Niepewność pomiaru strat ciepła jest rzędu 4-10%.

# Czujniki lokalnego strumienia ciepła wykorzystujące termostosy

Pomiar zgodny  
z normą  
ISO 9869-1:2014



Założenie:  $q_1 = q_2$



Czułość nominalna:  $50 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$

Zakres temperaturowy:  $-30\dots+70 \text{ }^\circ\text{C}$

Rezystancja termiczna:  $< 6.25 \cdot 10^{-3} (\text{K}\cdot\text{m}^2)/\text{W}$

Zakres:  $-2000\dots+2000 \text{ W}/\text{m}^2$

Niepewność: 5%



# Oszacowanie strat ciepła metodą pośrednią na podstawie pomiarów temperatur

Z prawa Fouriera wynika, że

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{R_{si}} = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{\sum R_i} = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{R_{se}}$$

A definicja

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

daje to możliwość szacowania współczynnika przewodzenia  $U$ ,

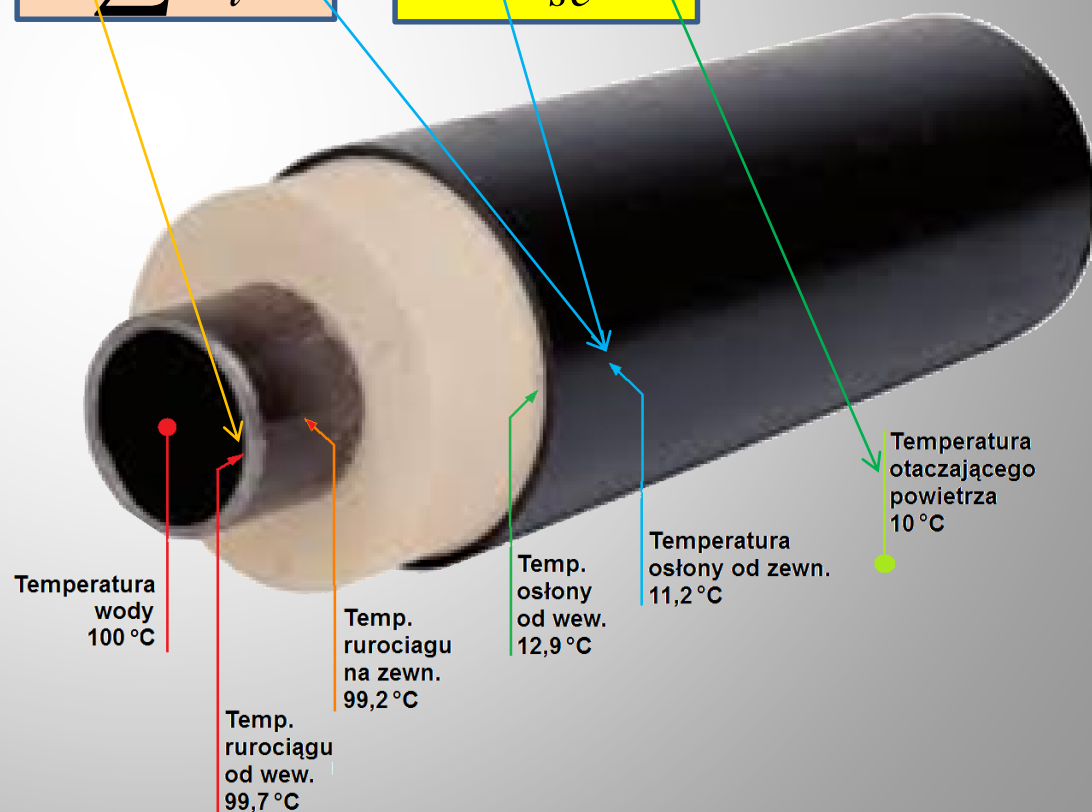
$$U = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e) R_{si}} = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e) R_{se}} = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{(\theta_i - \theta_e) \sum R_i}$$

a następnie obliczenia strat ciepła

$$Q_s = q L d\tau$$

# Oszacowanie strat ciepła metodą pośrednią na podstawie pomiarów temperatur

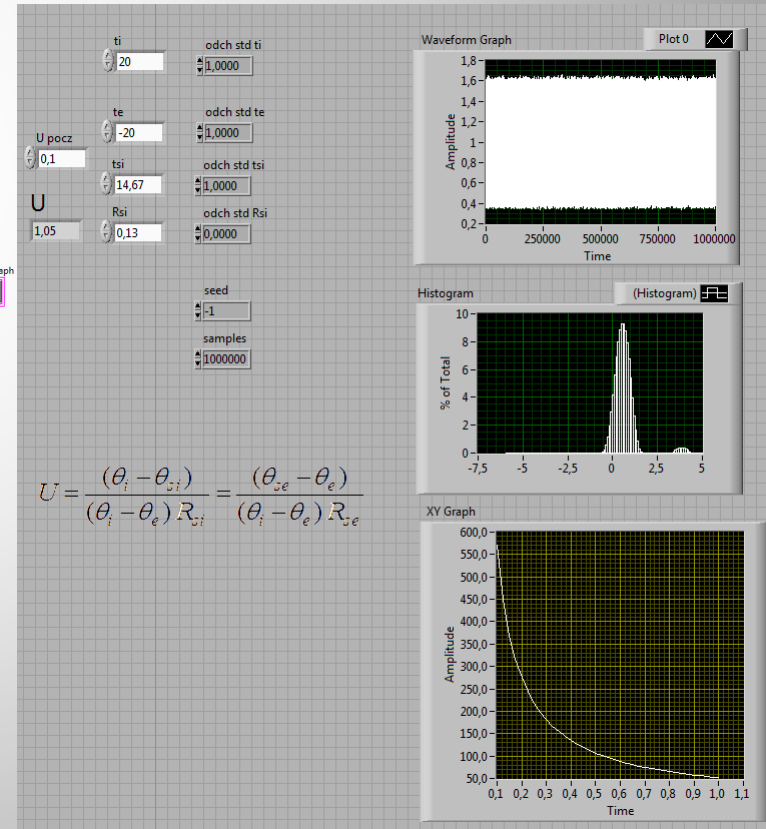
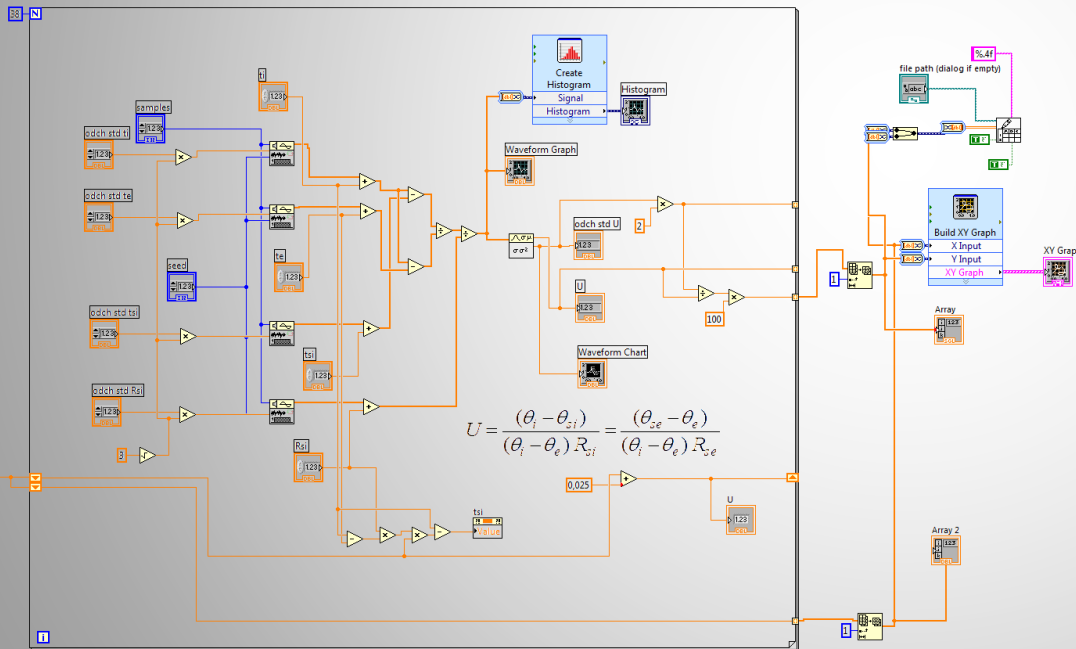
$$q = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{R_{si}} = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{\sum R_i} = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{R_{se}}$$



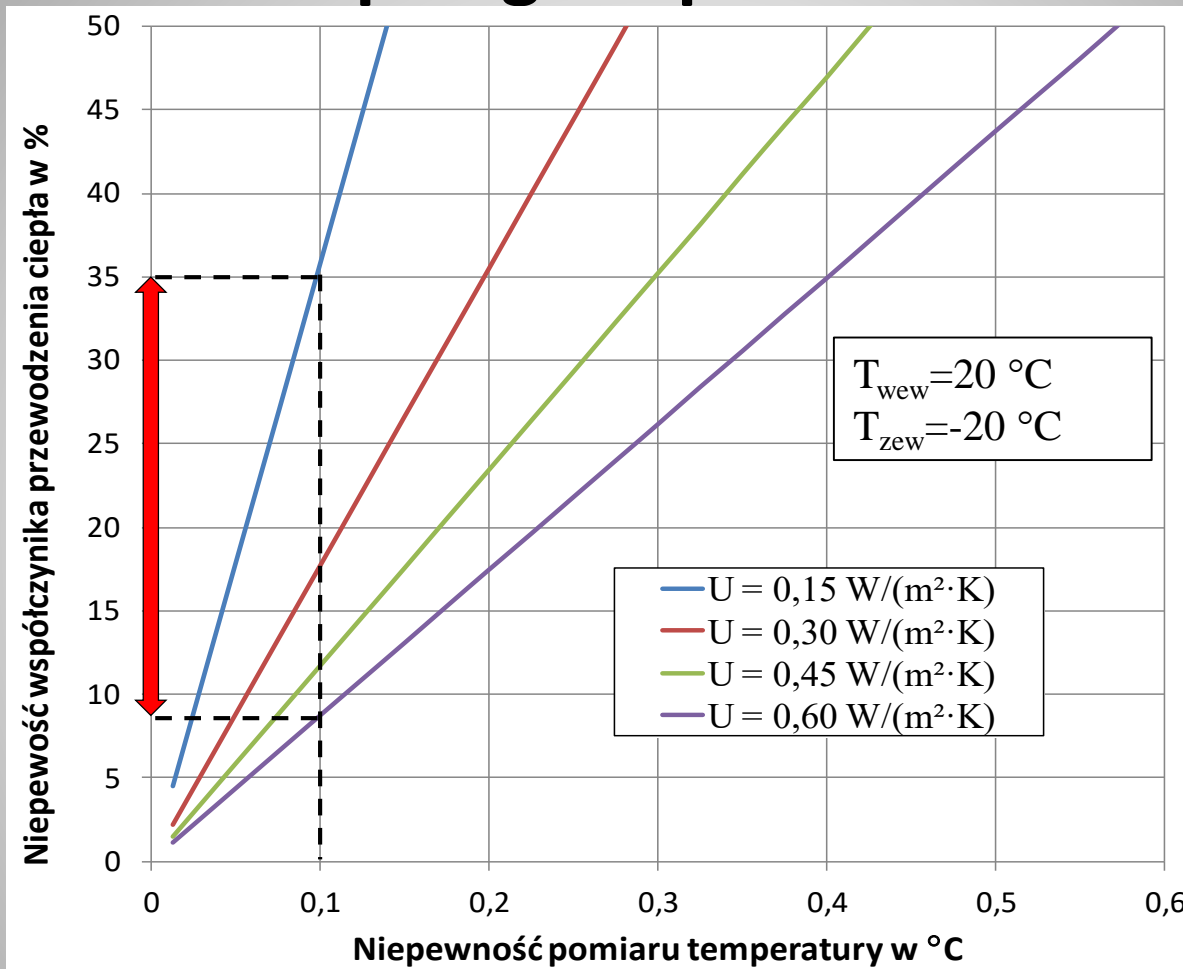


# Niepewność pomiaru współczynnika $U$

Oszacowanie niepewności wsp.  $U$  metodą Monte Carlo.  
Założono cyfrowy odczyt pomiarów – rozkład prostokątny  
Wygenerowano 1 mln realizacji pomiarów.



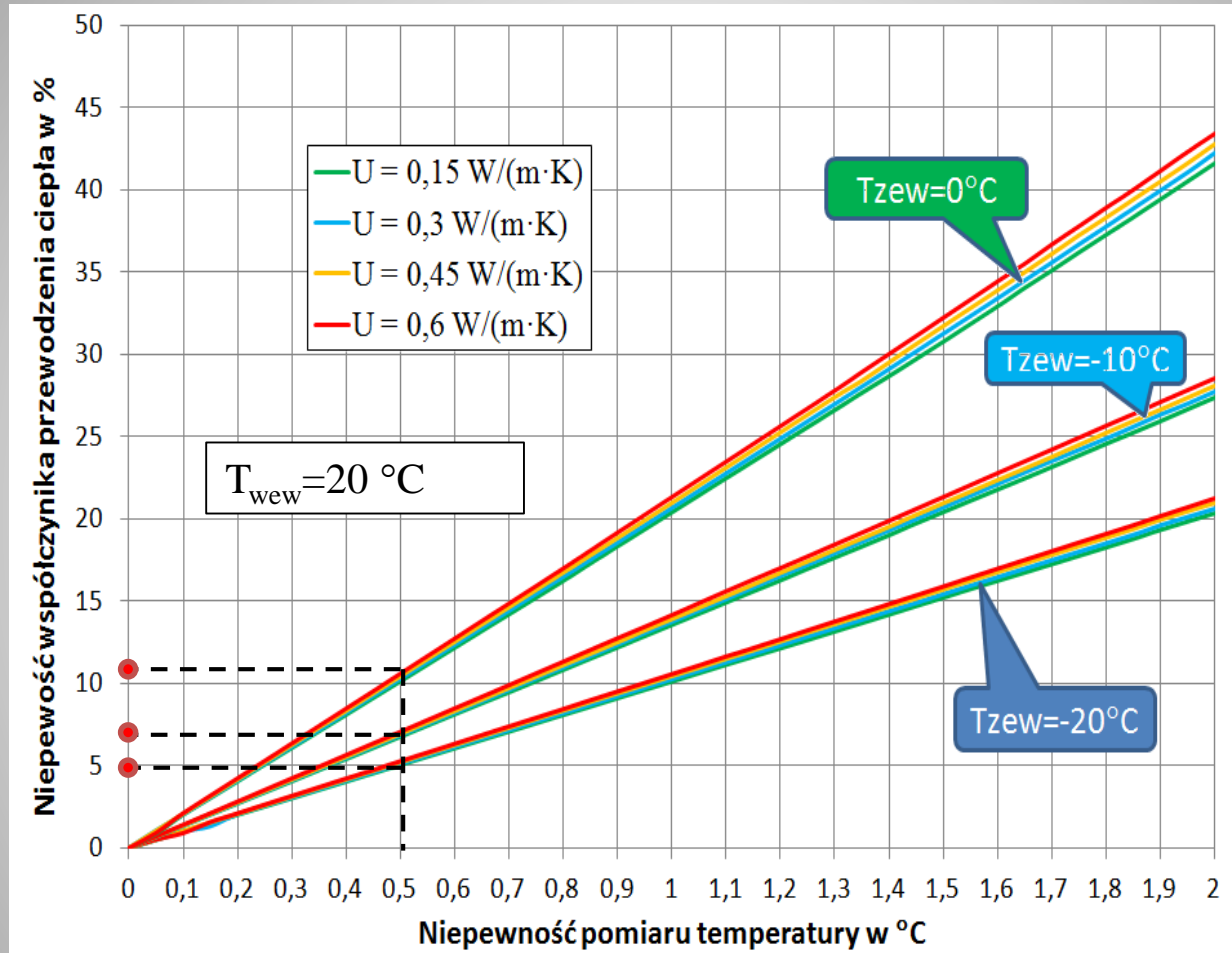
# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ przegród płaskich



U	R
0,15	6,7
0,3	3,3
0,45	2.2
0,6	1.7

Zmiana niepewności współczynnika przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur przy pomiarze temperatury przegrody od **wewnątrz**

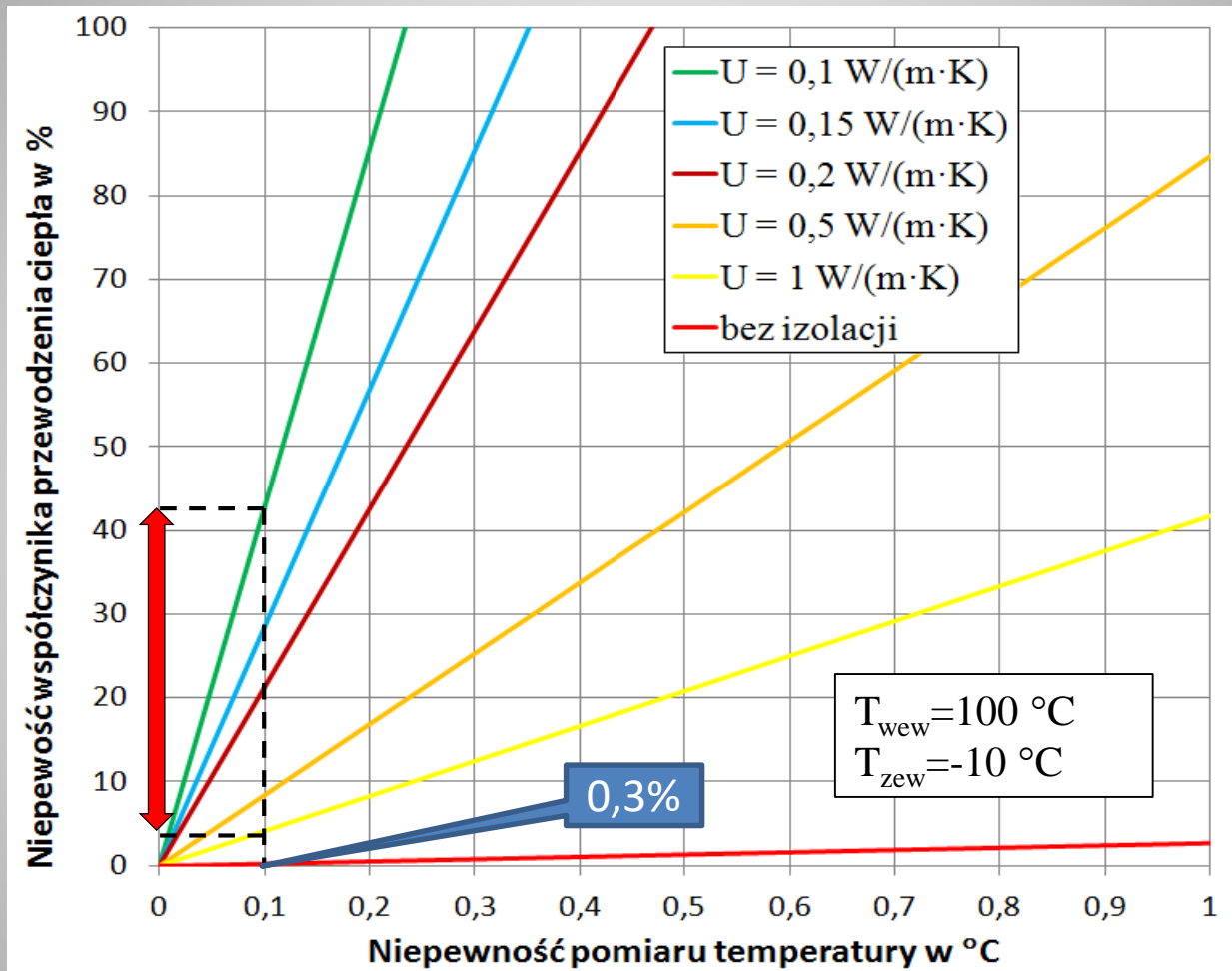
# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ przegród płaskich



U	R
0,15	6,7
0,3	3,3
0,45	2.2
0,6	1.7

Zmiana niepewności współczynnika przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur przy pomiarze temperatury przegrody od **wewnątrz, zewnątrz i strumienia ciepła**

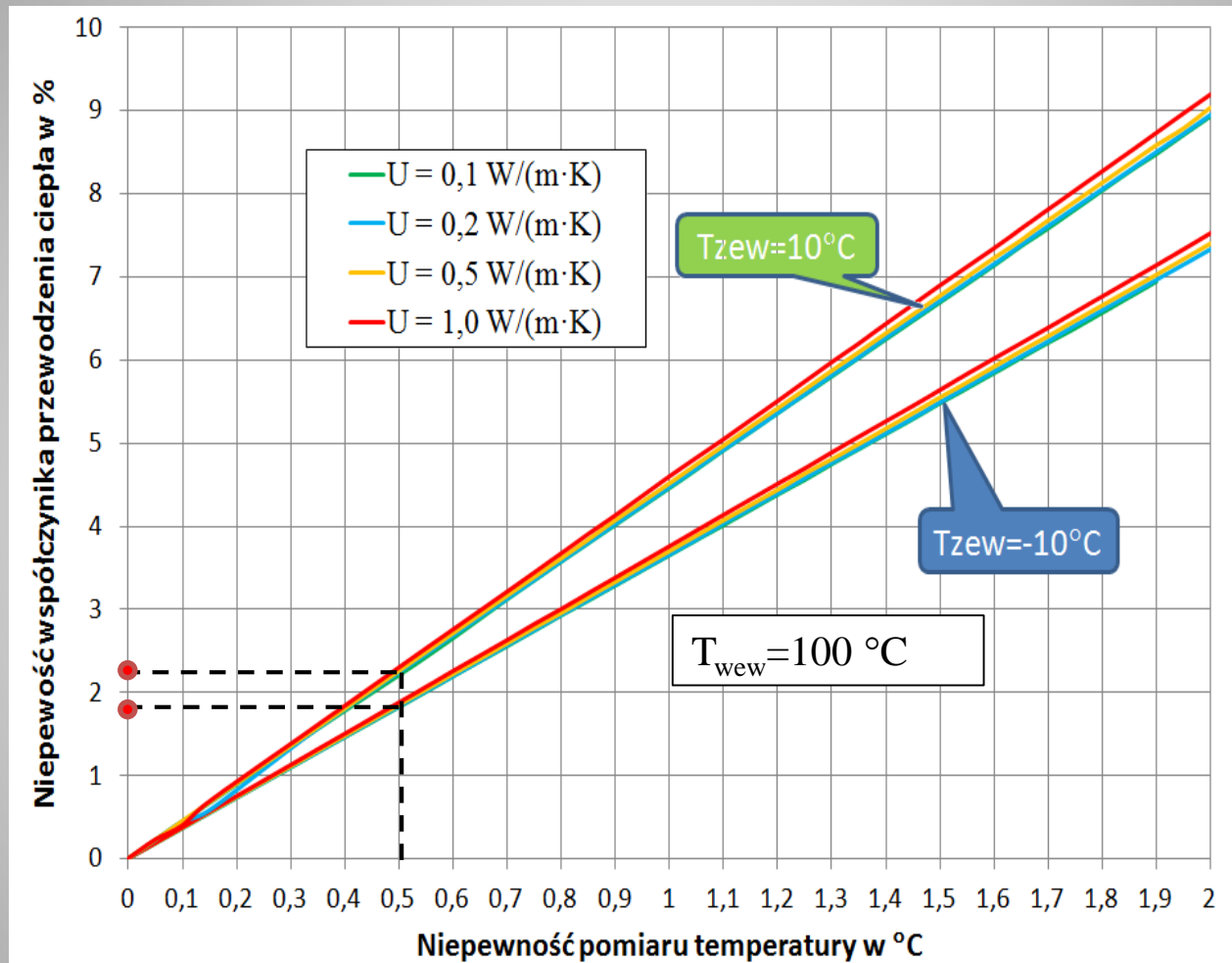
# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ izolowanego rurociągu



U	R
0,1	10
0,15	6,7
0,2	5,0
0,5	2,0
1,0	1,0
15,6	0,064

Zmiana niepewności współczynnika przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur, przy pomiarze w oparciu o temperaturę **płaszczka izolacji rurociągu**

# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ z dodatkowym pomiarem strumienia

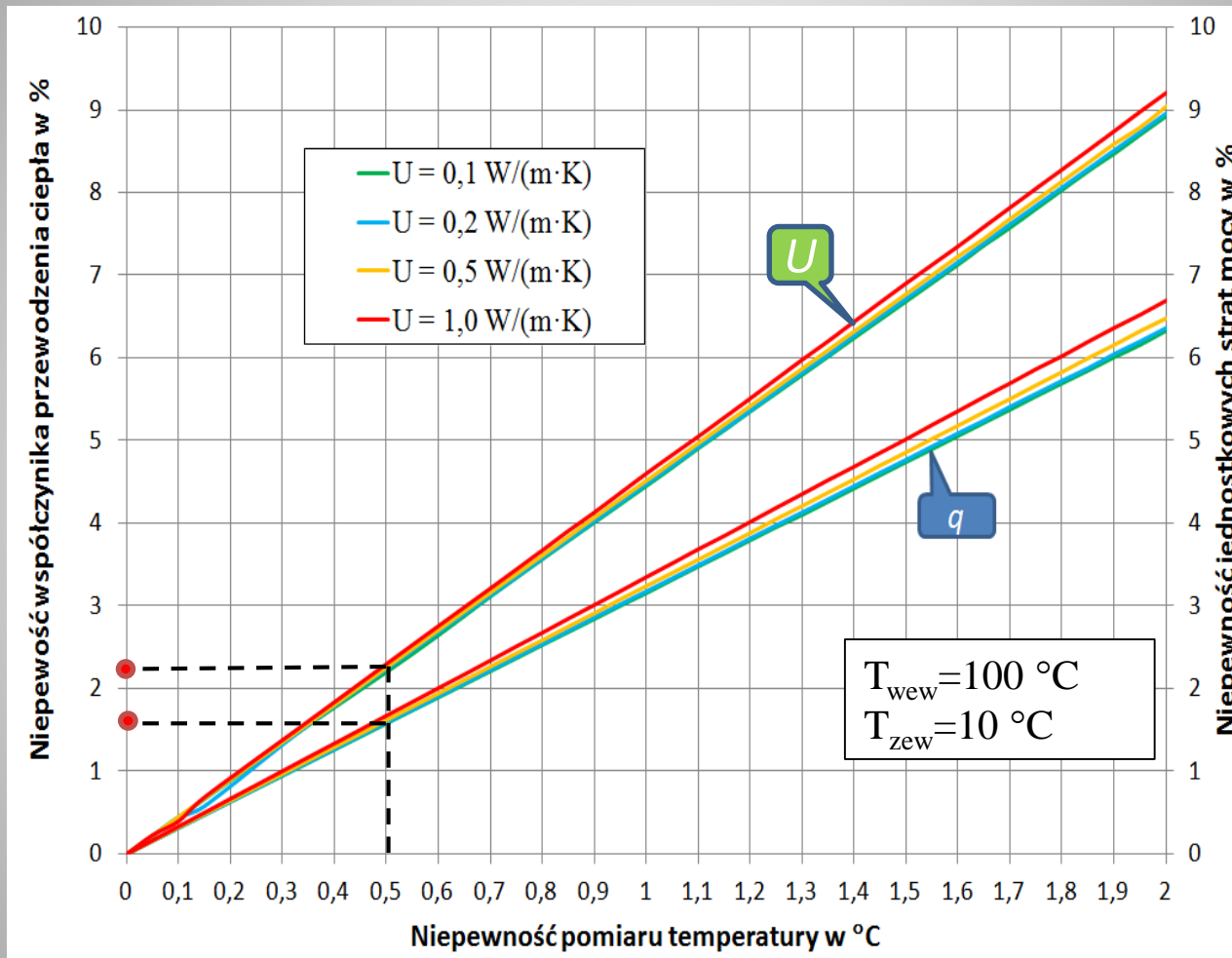


U	R
0,1	10
0,2	5,0
0,5	2,0
1	1,0

Zmiana niepewności współczynnika przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur przy pomiarze, w oparciu o temperatur **rurociągu, płaszcza z pomiarem strumienia ciepła**



# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ a niepewność pomiaru jednostkowych strat mocy $q$

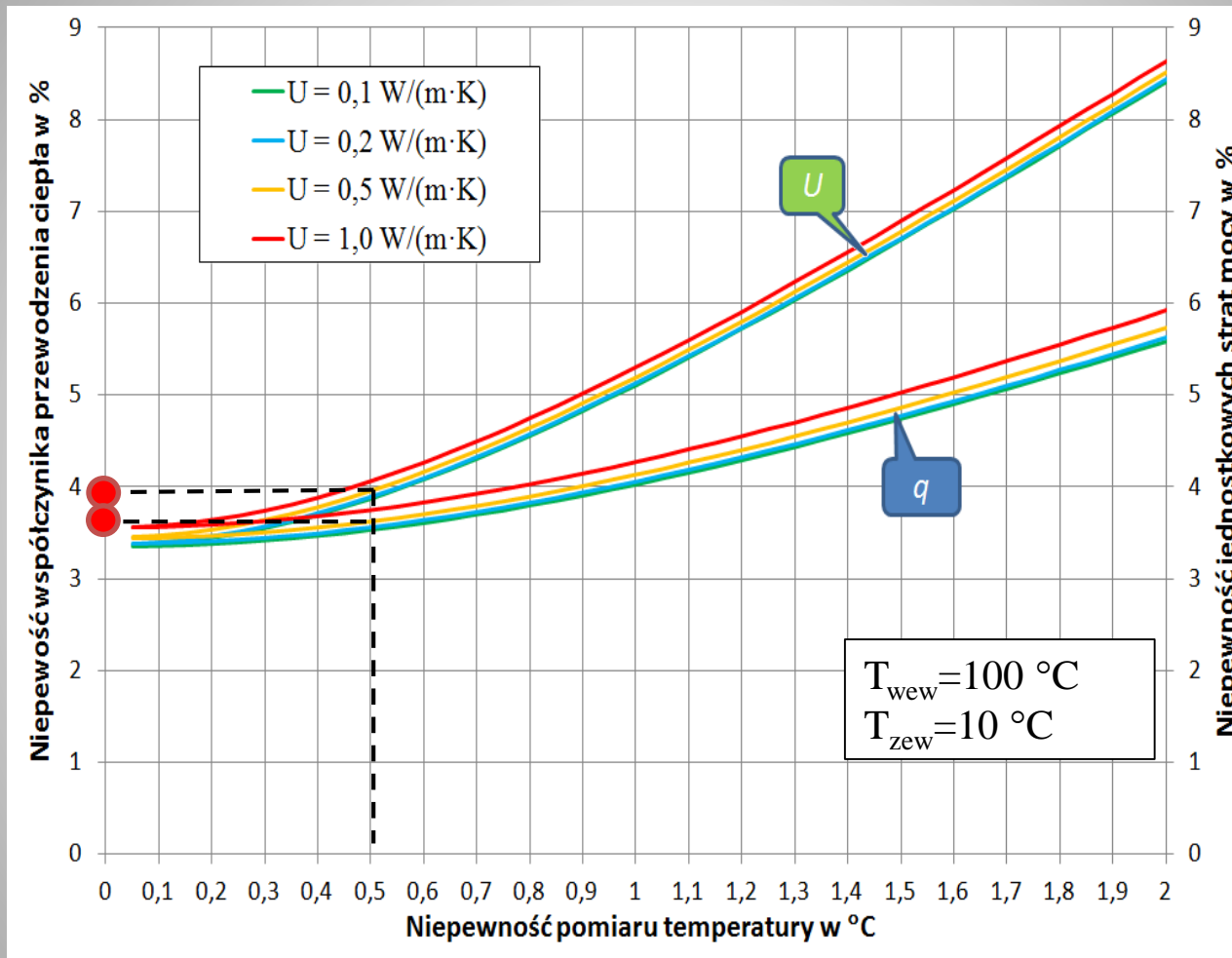


U	R
0,1	10
0,2	5,0
0,5	2,0
1	1,0

Zmiana niepewności wsp. przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur , w oparciu o pomiar temperatur **rurociągu, płaszcz z pomiarem strumienia ciepła**

**Jednakowe niepewności pomiaru temperatur !**

# Niepewność pomiaru współczynnika $U$ a niepewność pomiaru jednostkowych strat mocy $q$



U	R
0,1	10
0,2	5,0
0,5	2,0
1	1,0

Zmiana niepewności wsp. przewodzenia  $U$  w zależności od niepewności pomiaru temperatur , w oparciu o pomiar temperatur **rurociągu, płaszczu i strumienia ciepła**

**Niepewność pomiaru temp. wew. 3 °C, pozostałych temperatur jednakowe .**

**A jakie są niepewności  
mierzonych temperatur  
i co nie nie wpływa?**

# Pomiar termowizyjny wsp. $U$ i strat liniowych $q$



$$\theta_e = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{se\ 1} = 12,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{se\ 2} = 11,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{i\ 1} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{i\ 2} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_1 = 0,29 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

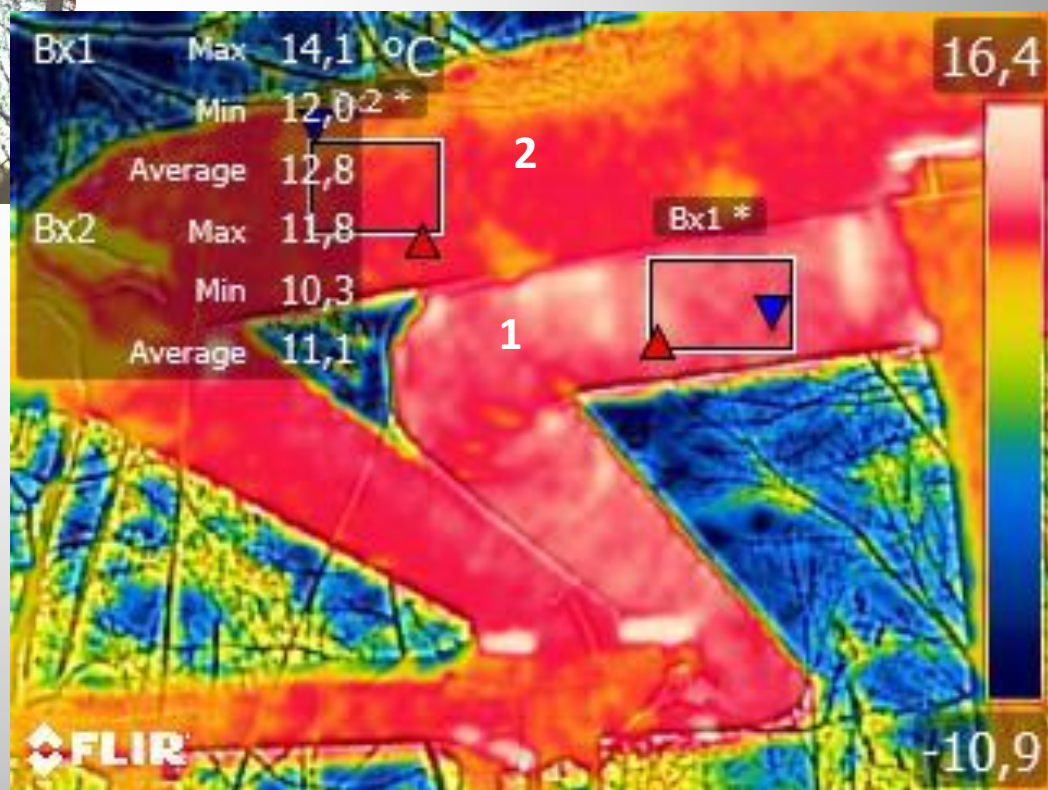
$$U_2 = 0,27 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$U_{obl} = 0,23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

$$q_1 = 32,5 \text{ W}/\text{m}$$

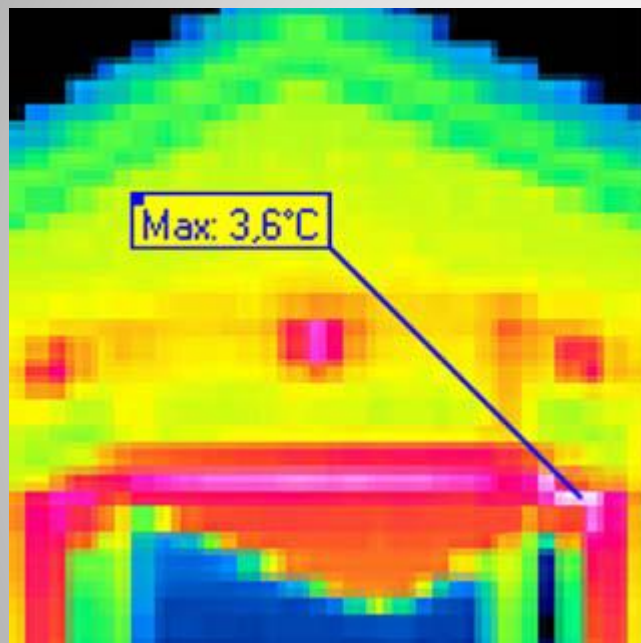
$$q_2 = 20,8 \text{ W}/\text{m}$$

$$q_{obl\ 1/2} = 25,8/17,7 \text{ W}/\text{m}$$

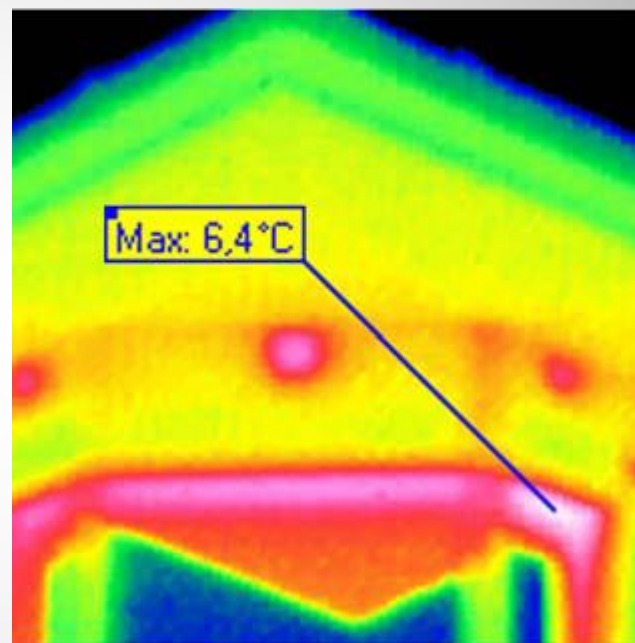




# Rozdzielczość przestrzenna a dokładność pomiaru temperatur



Obraz termowizyjny 320 x 240



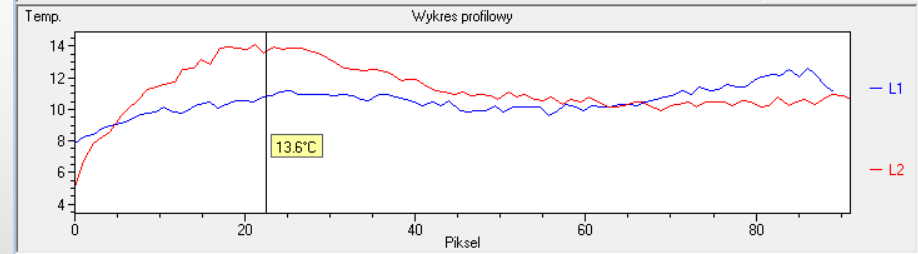
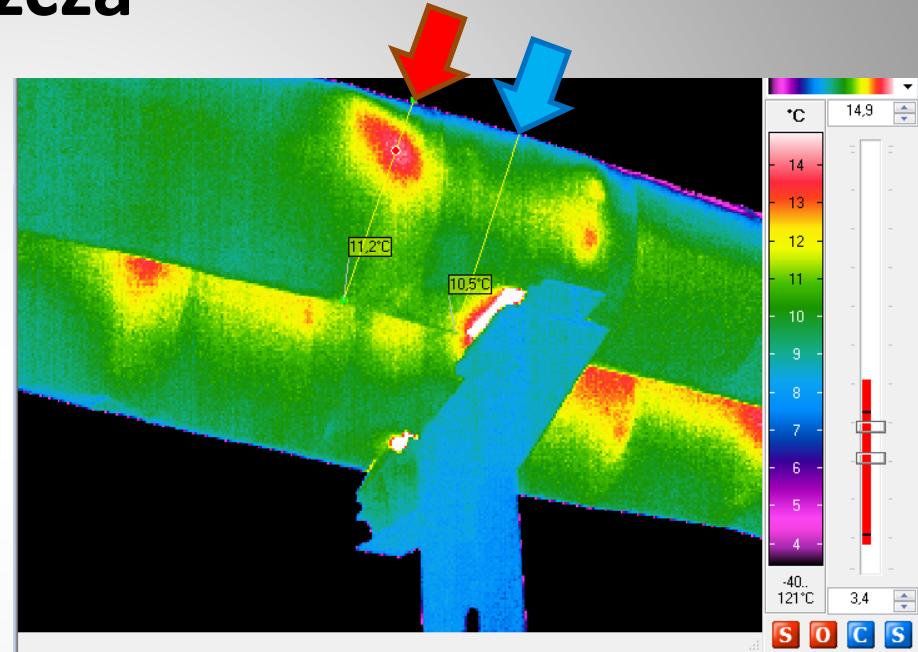
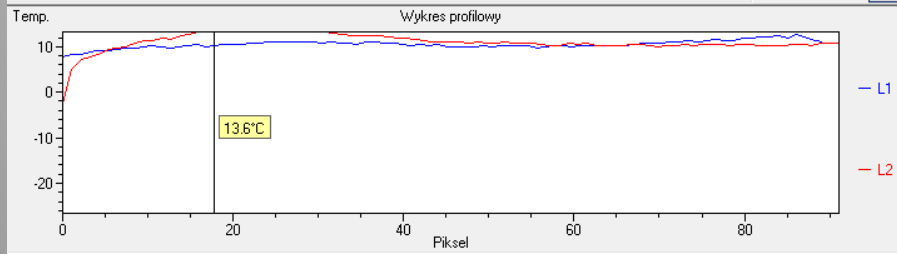
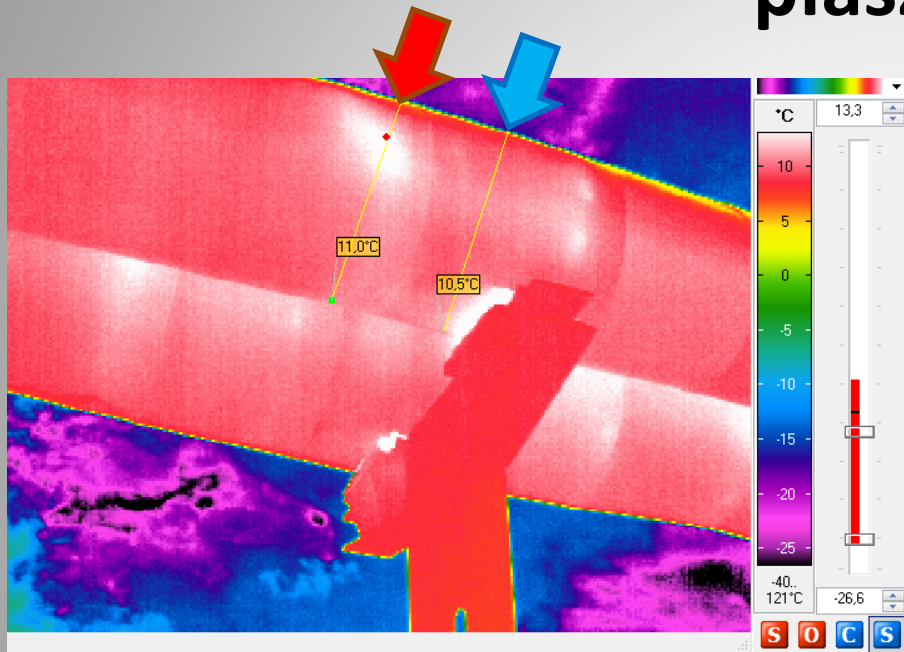
Obraz termowizyjny 1280 x 960

Błąd pomiaru  niepewność pomiaru





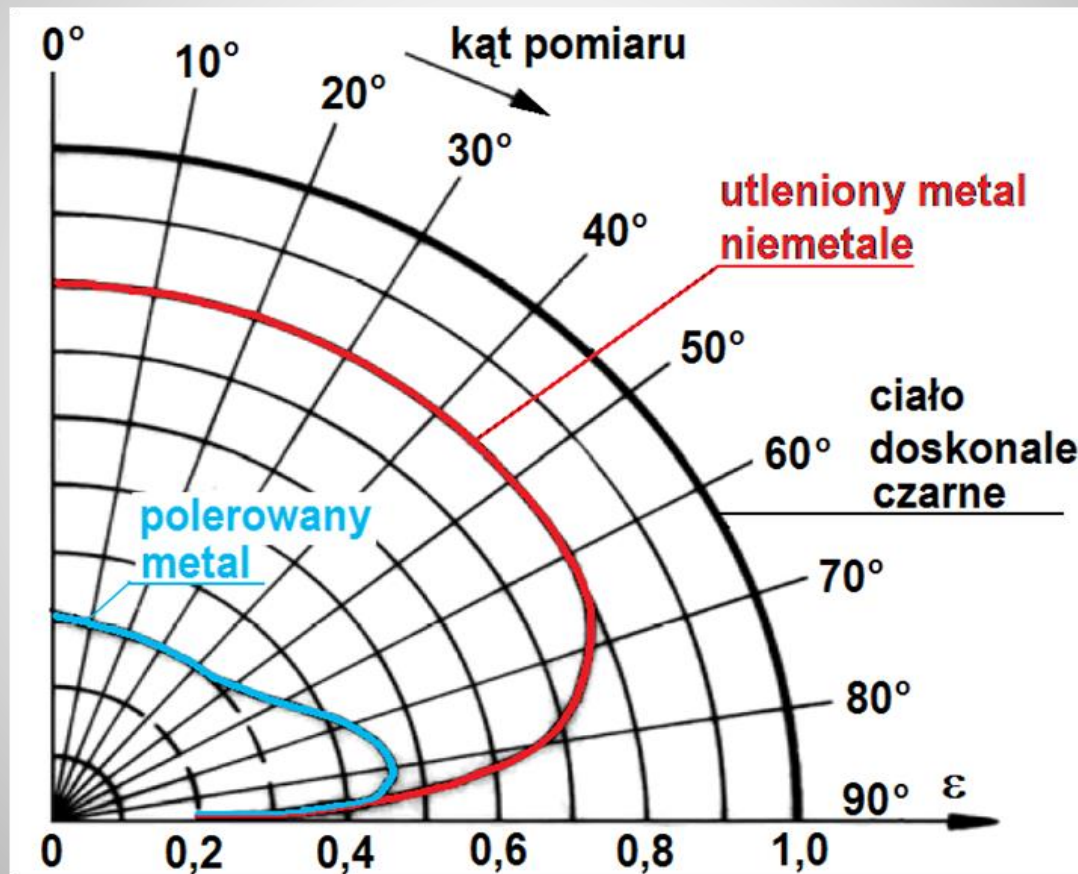
# Zdjęcie i termogram i histogramy temperatury rurociągu o wysokim współczynniku emisyjności płaszcza



$$\Delta\theta_e = 3,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

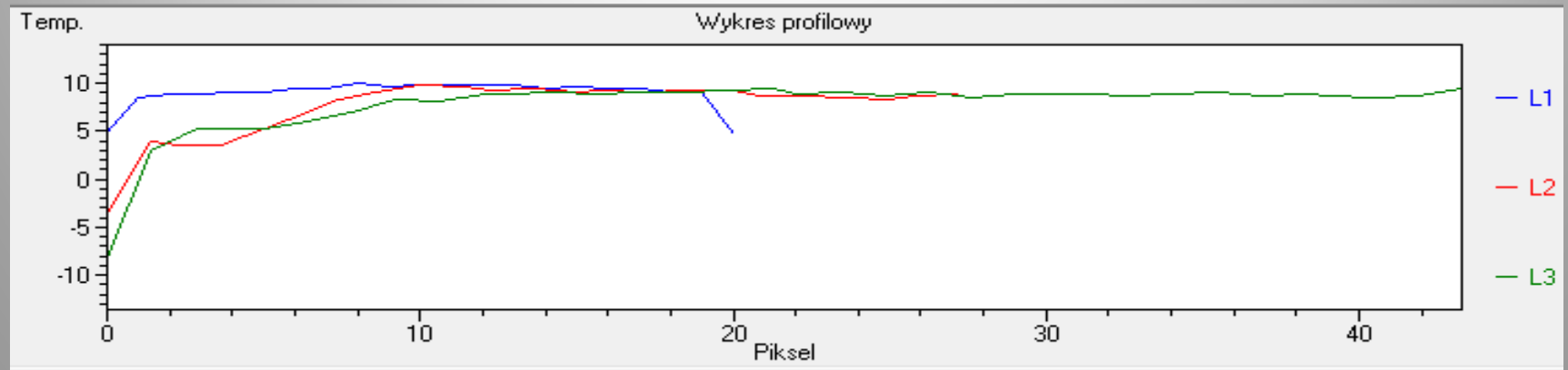
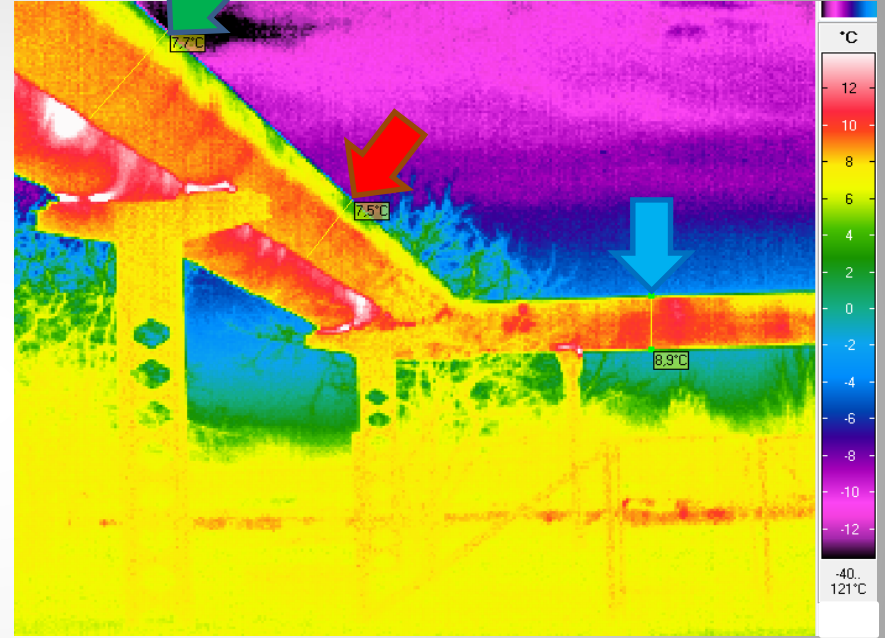
$$\Delta U = 0,31 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

# Kolejny problem: pozorna zmiana współczynnika emisyjności spowodowane zmianą kąta pomiaru – niezachowanie prawa Lamberta

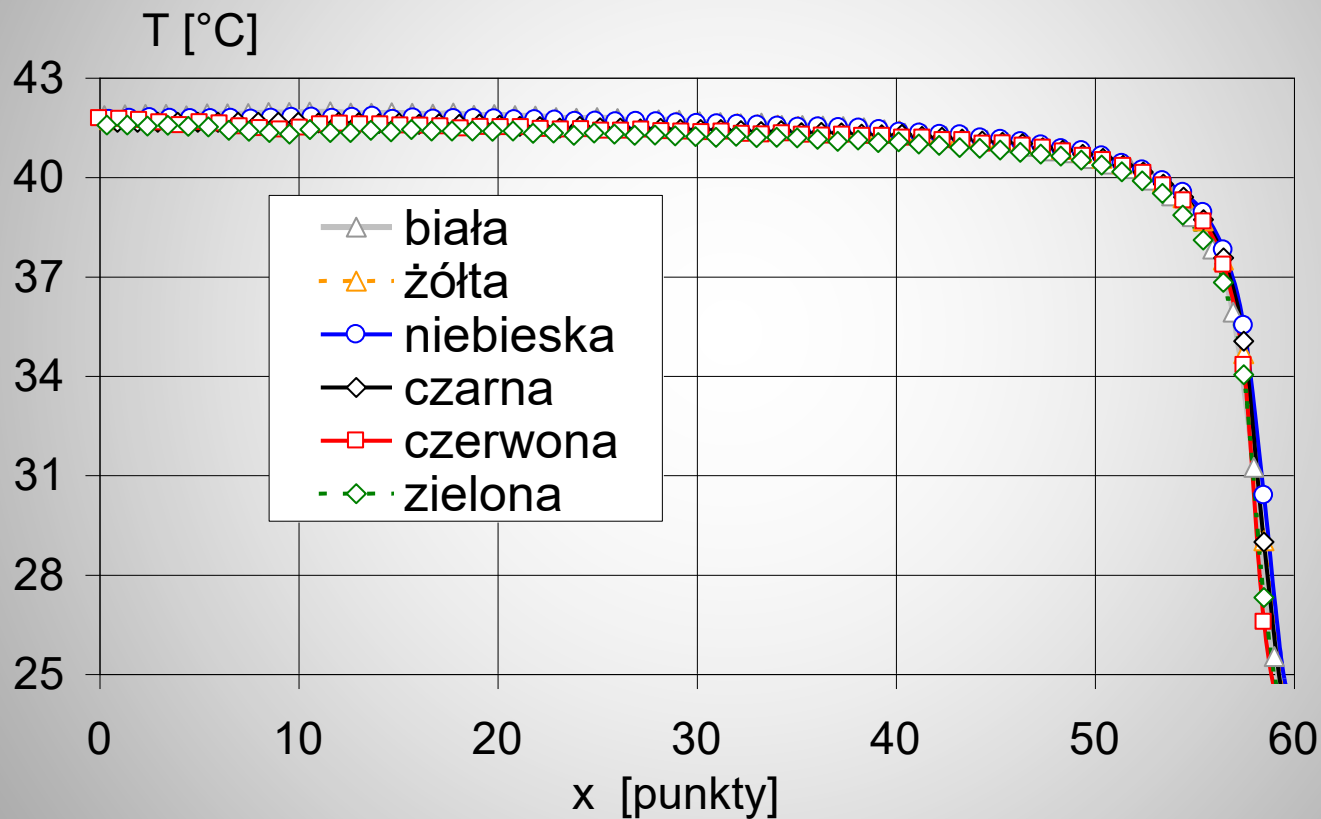




# Zdjęcie i termogram i histogramy temperatury rurociągu o wysokim współczynniku emisyjności płaszcza

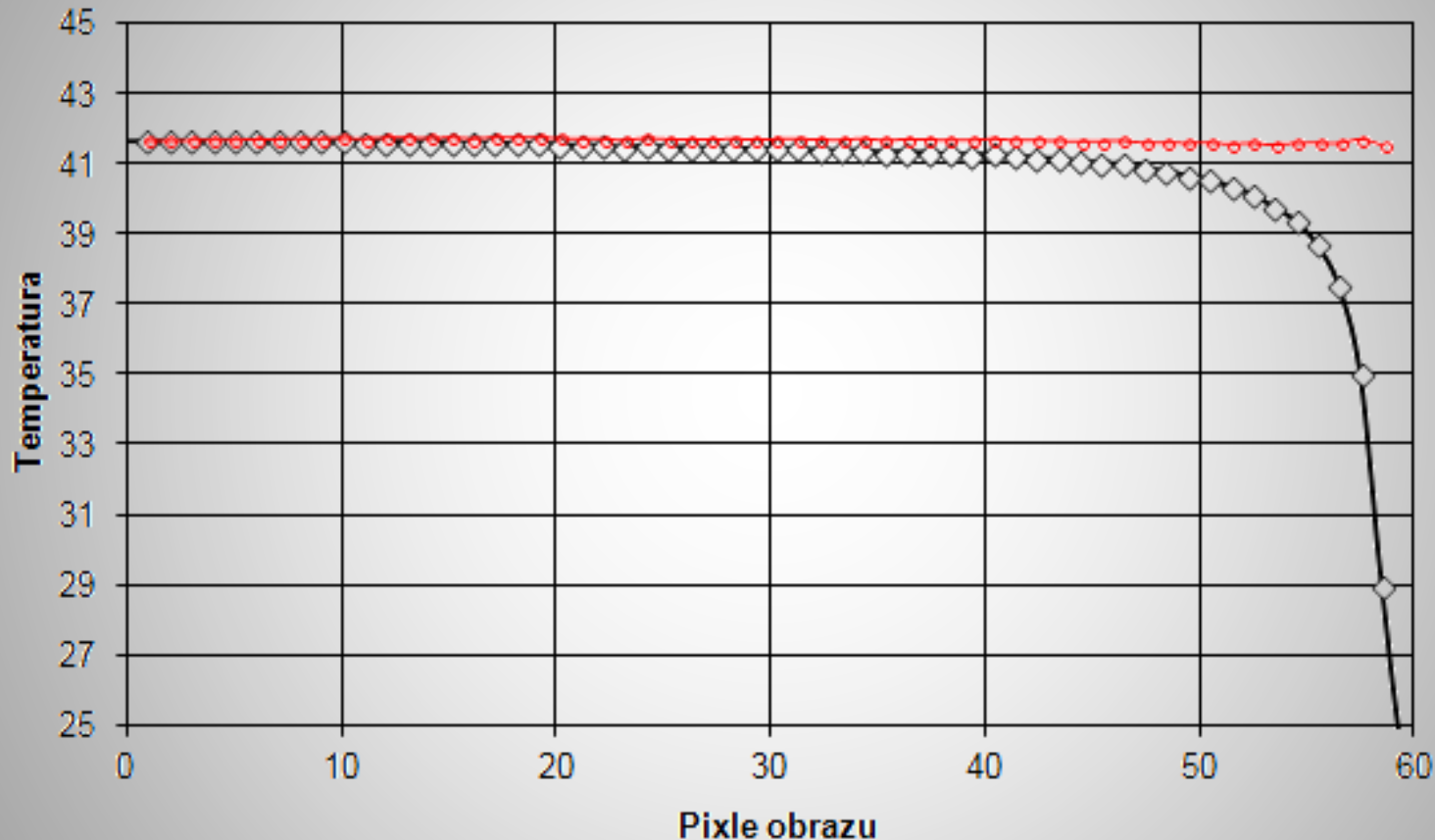


# Zmiany profili temperatury otrzymane z termogramu dla walca o jednakowej temperaturze powierzchni





# Profil temperatury powierzchni walca otrzymany z termogramu i skorygowany



Nieuwzględnienie zmiany rozkładu temperatury wprowadza dodatkowy błąd pomiaru średniej temperatury 3 °C dla walca oraz 5 °C dla kuli.

# Wpływ geometrii o otoczenia na wynik pomiaru temperatury

Termogram to rzut wyników pomiaru temperatury obiektu 3D na płaszczyznę.

Skutek:

Obliczenie strumienia ciepła przy błędnych założeniach dotyczących powierzchni i rozkładu temperatury prowadzi do błędnych wyników.

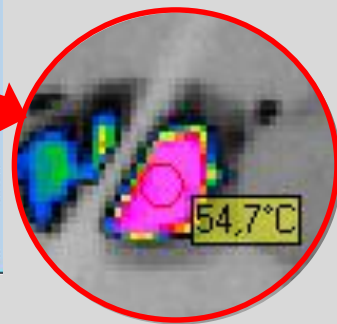
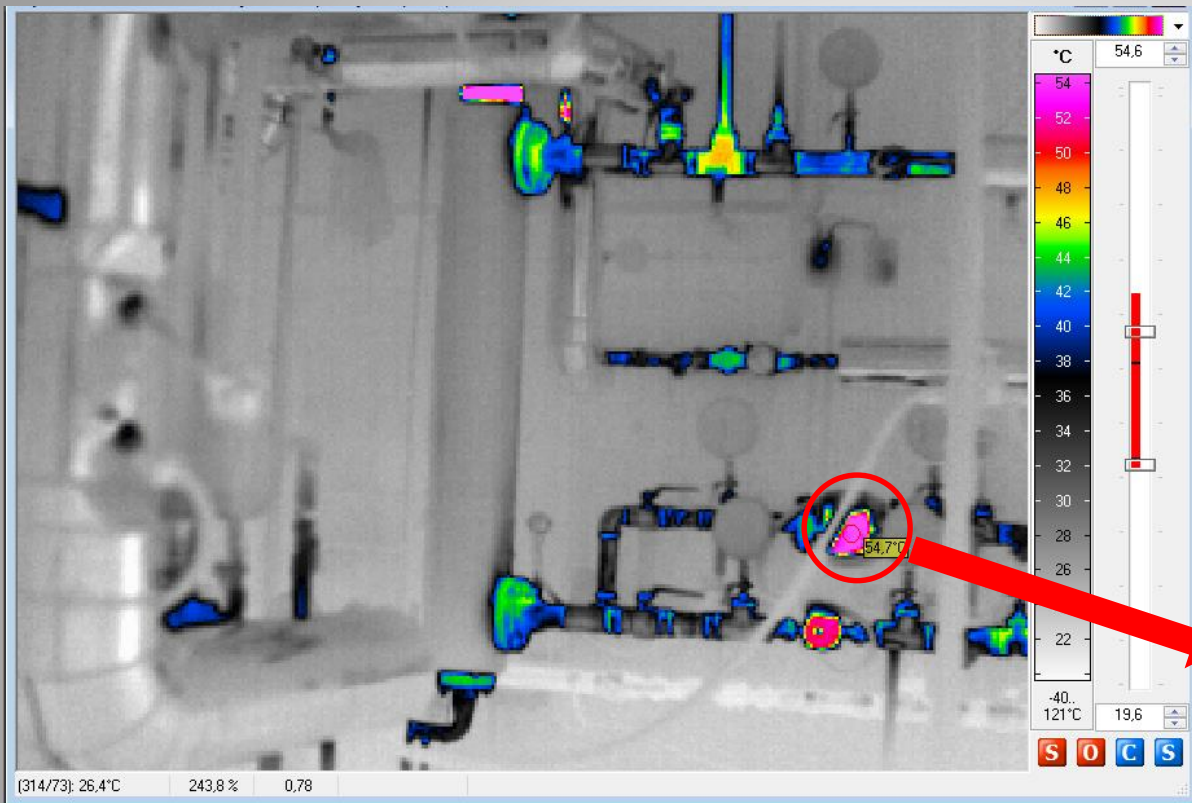
Przykład:

Przyjęcie powierzchni płaskiej zamiast walcowej prowadzi do ponad 50% błędu wyznaczania strat energii.

Dodatkowo:

Nieuwzględnienie zmiany rozkładu temperatury wprowadza dodatkowy błąd pomiaru średniej temperatury  $3^{\circ}\text{C}$  dla walca oraz  $5^{\circ}\text{C}$  dla kuli.

# Wyznaczanie współczynnika emisyjności

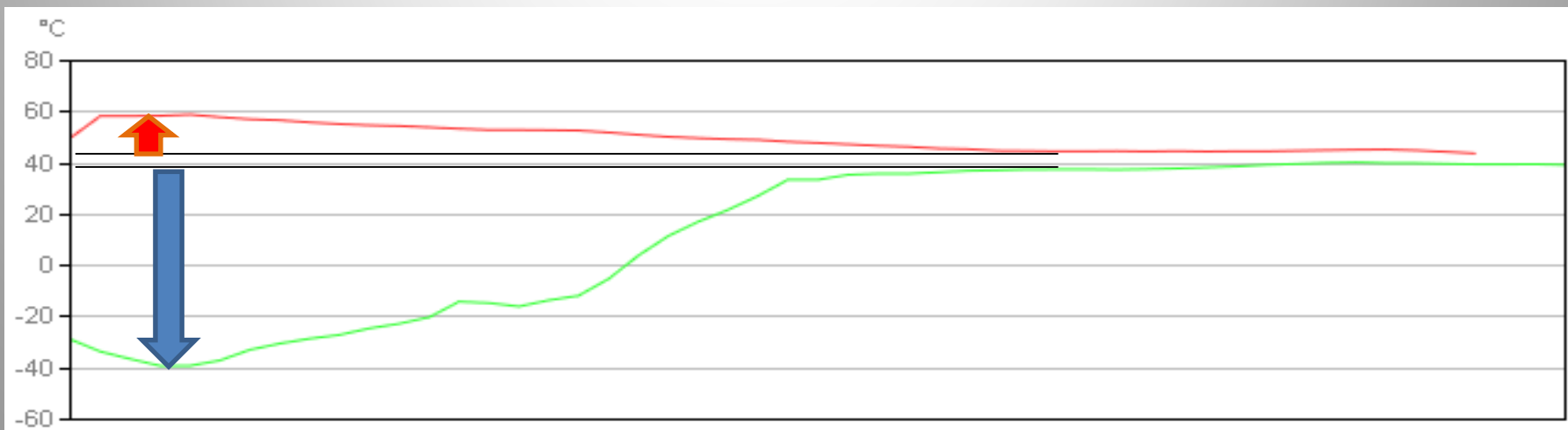
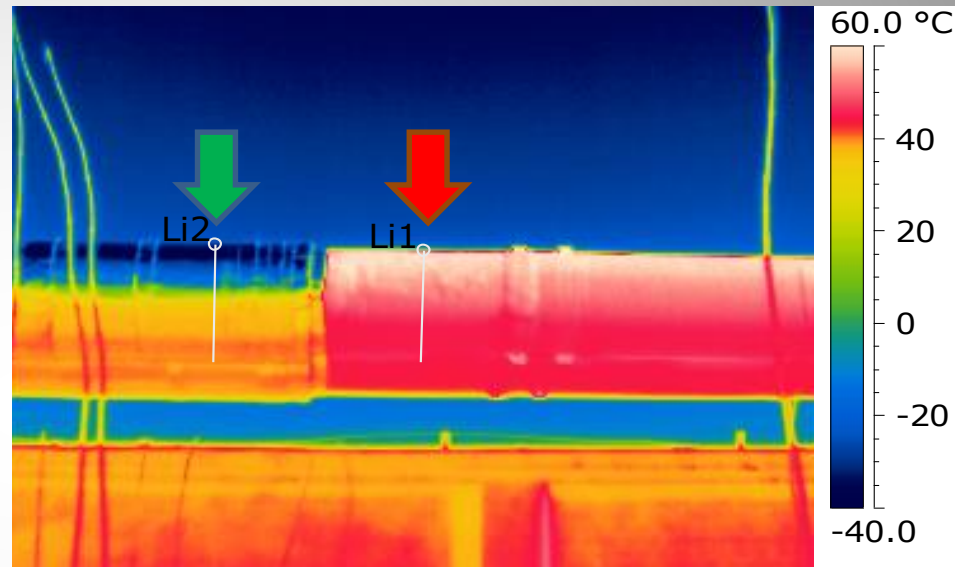
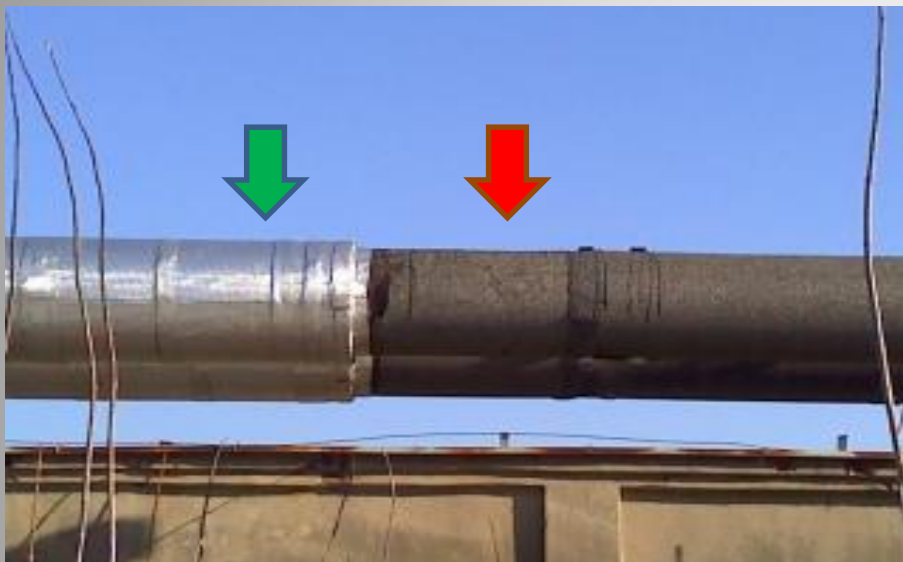


$\varepsilon = 0,87 \quad \theta_i = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \theta_{ref} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \theta_o = 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$

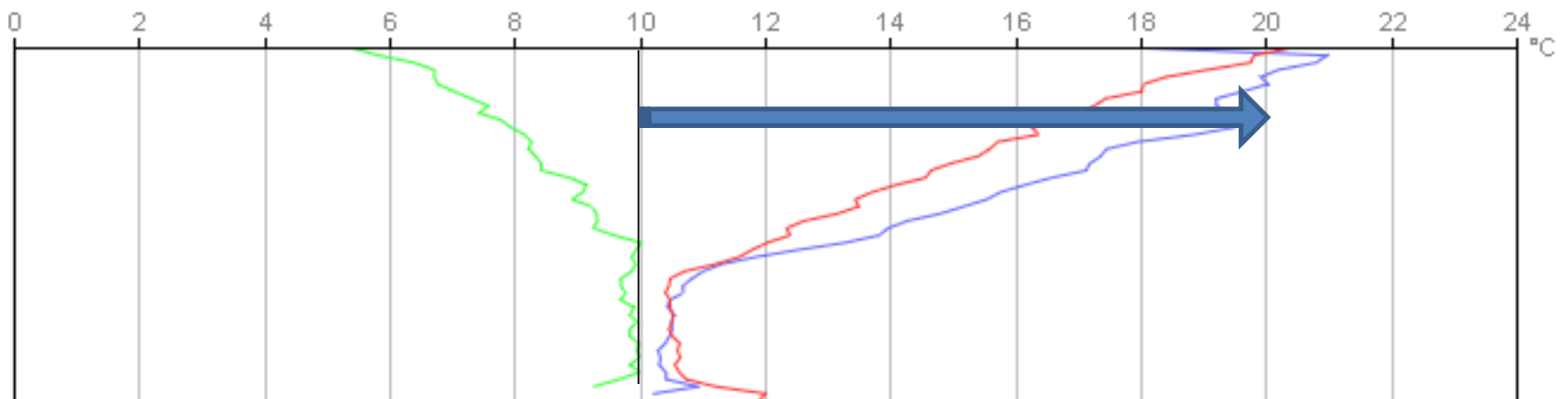
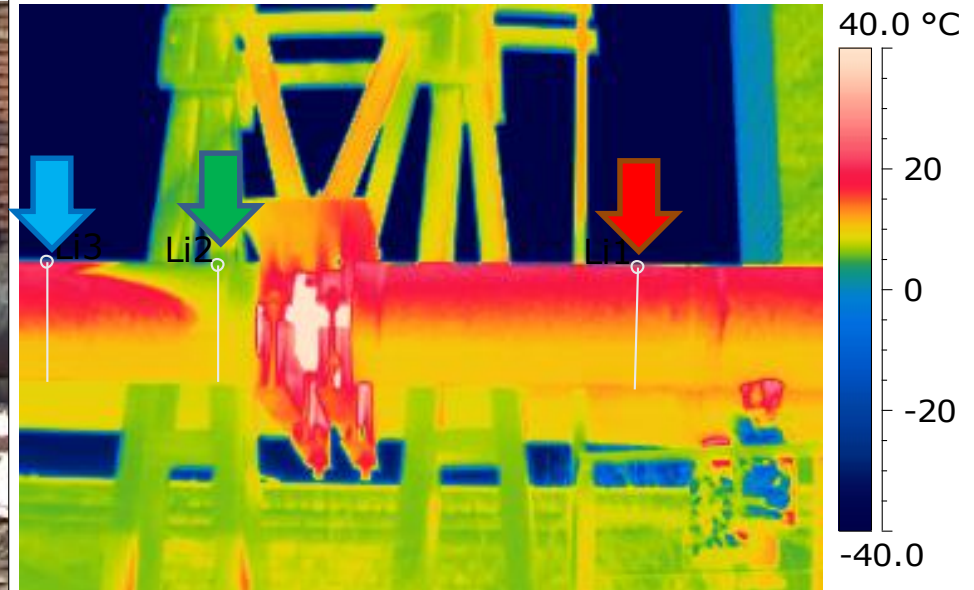
Pomiar termoparą K  
 $\theta_o = 55,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

dla  $\varepsilon = 0,95$  byłoby  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

# Dodatkowe złe uwarunkowania pomiarów. Rurociągi i różnych wsp. emisyjności

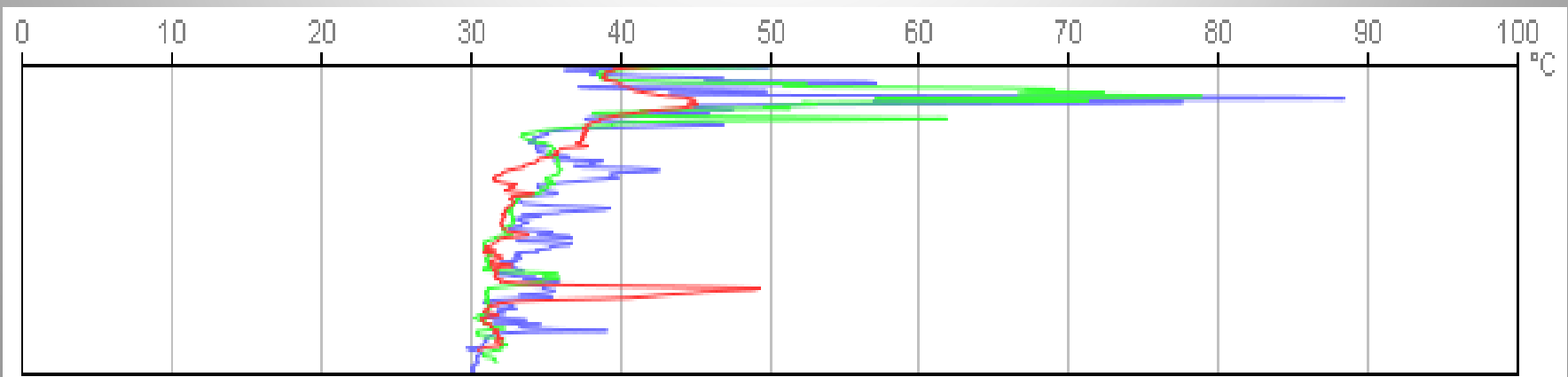
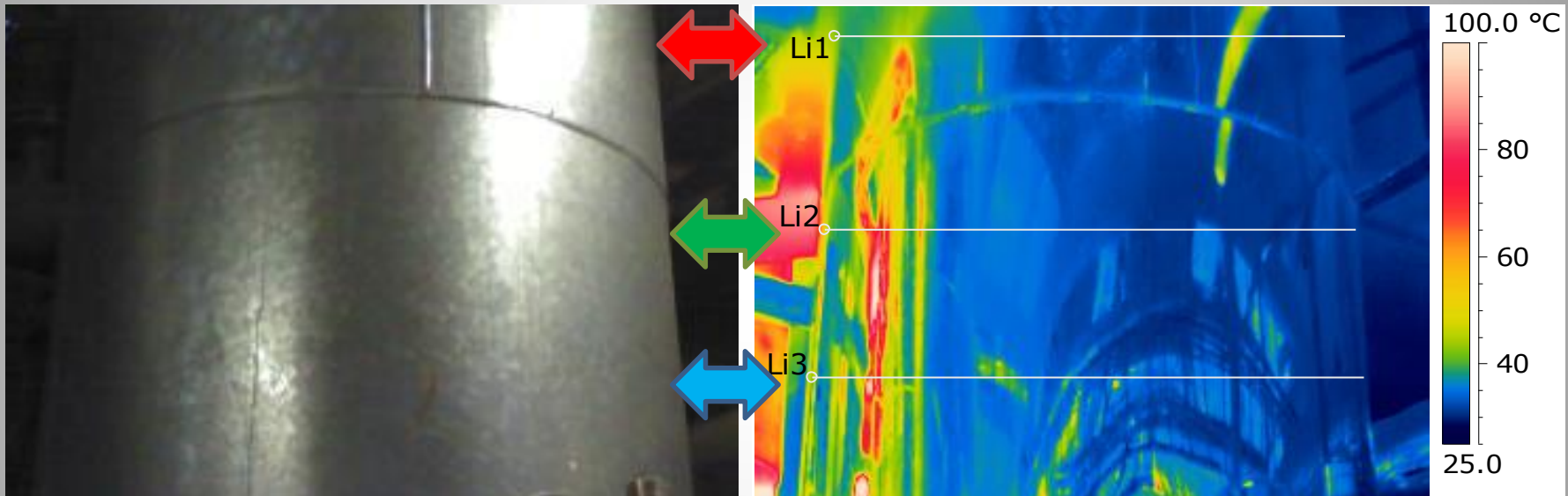


# Zdjęcie i termogram i histogramy temperatury rurociągu o wysokim współczynniku emisyjności płaszczu podczas słonecznego dnia





# Odbicie elementów wysokotemperaturowych (z lewej strony) oraz niskotemperaturowych (z prawej strony) w osłonie termicznej na termogramie



# Podsumowanie

- Gdy konieczne jest oszacowanie strat energii, czy współczynników przenikania ciepła, konieczne jest uwzględnienie wielu dodatkowych czynników, które należy zmierzyć podczas wykonywania pomiarów (temperatura i wilgotność powietrza, temperatura otaczających obiektów, prędkość powietrza).
- W obiekcie oraz jego otoczeniu powinien występować stan ustalony. Trudne do spełniania!
- Koniecznie należy zmierzyć współczynnik emisyjności obiektu!
- Obiekty, w stosunku do których nie można optymalnie ustawić kamery, mogą sprawiać dodatkowy problem z odbiciem w nich otoczenia oraz pozorną zmianą współczynnika emisyjności obiektu.

# Podsumowanie

- Wykorzystanie elementów rzutowania termogramu na model 3D obiektu może się przyczynić do poprawy dokładności pomiaru temperatury metodą termowizyjną. Jest to szczególnie istotne w diagnostyce technicznej, w sytuacjach, gdy nie ma możliwości wykonania pomiarów (ustawienia kamery) pod dogodnym kątem.
- Niepewność wyznaczania rzeczywistych strat energii metodami pośrednimi, **z użyciem kamery termowizyjnej, jest znacząco większa od metod bezpośrednich.**
- Niepewność oszacowania strat ciepła metodami obliczeniowymi nie jest wprost określona. Zależy ona od rzetelności wprowadzonych danych, w szczególności wsp.  $\lambda$  izolacji.
- Nie należy bezpośrednio porównywać wyników pomiarów i obliczeń, bez przeliczenia ich do tych samych warunków!

# **Dziękuję za uwagę**

**Materiał pochodzi z Konferencji**

**Naukowo-Technicznej Heat Not Lost**

**organizowanej przez <https://hnl.pl/>**