

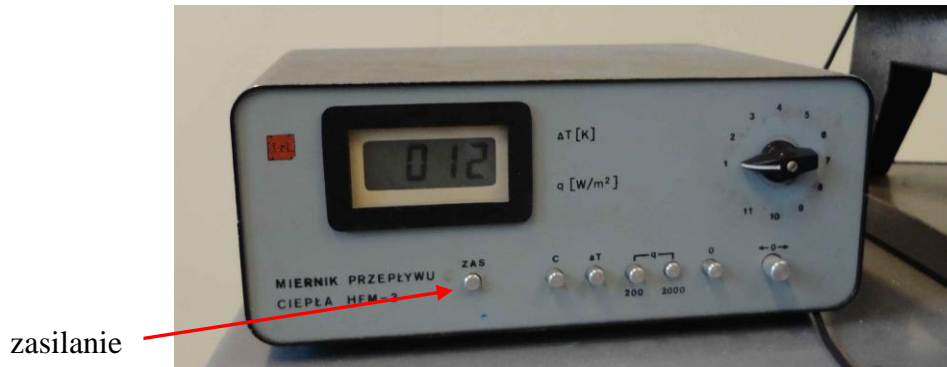
# 15

## Pomiar strumienia ciepła



## 1. Procedura uruchomienia stanowiska

- a. Grzałki elektryczne w komorze suszarki należy włączyć godzinę przed rozpoczęciem pomiarów. Moc grzałek powinna być tak wyregulowana, aby temperatura wewnątrz suszarki nie przekroczyła  $70^{\circ}\text{C}$  (temperatura odczytana z termometru, rys. 2.1).
- b. W celu wykonania pomiarów włączyć miernik gęstości strumienia ciepła (rys. 1.1).



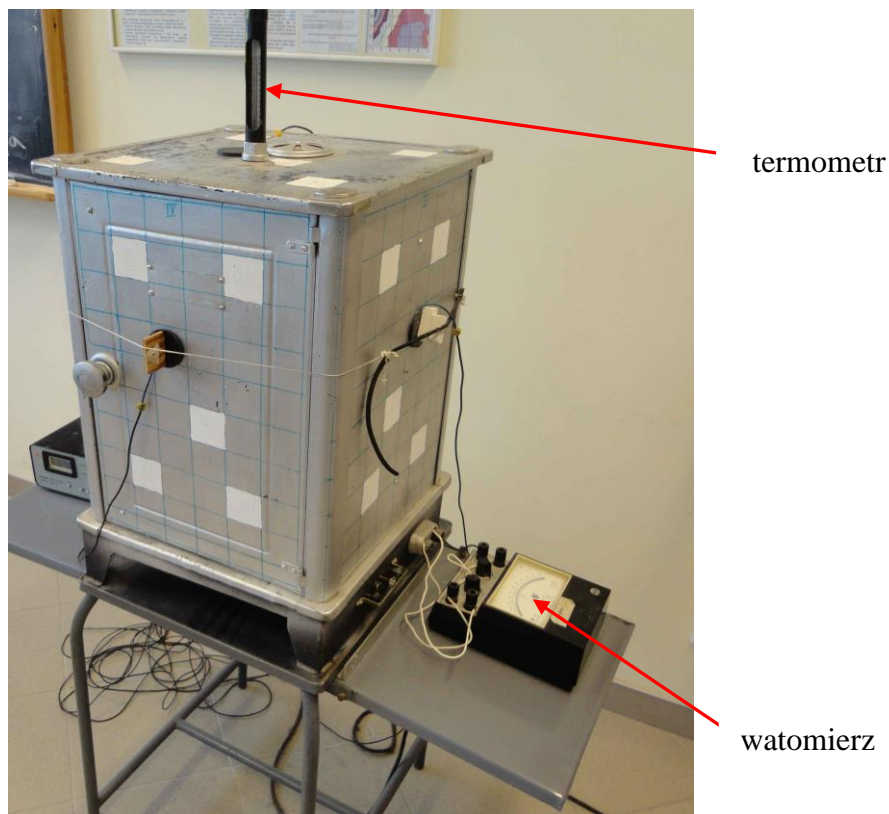
Rys. 1. 1. Miernik gęstości strumienia ciepła

## 2. Przeprowadzenie pomiarów

Ćwiczenie ma na celu bezpośredni pomiar strat ciepła od ścianek suszarki do otoczenia za pomocą miernika gęstości strumienia ciepła.

Wyniki bezpośrednich pomiarów należy porównać z pomiarem mocy elektrycznej użytej do grzania suszarki z wynikami obliczeń na podstawie równań kryterialnych stosowanych dla przejmowania ciepła na ściankach suszarki

- a) Pomiary można dokonywać w momencie, kiedy suszarka jest w stanie równowagi termodynamicznej. Aby warunek ten był spełniony temperatura wewnątrz suszarki odczytana z termometru (rys. 2.1), temperatura ścianek zewnętrznych oraz gęstość strumienia ciepła odczytana z wyświetlacza miernika gęstości strumienia ciepła (rys.1.1) dla kanałów od 1 do 5 musi być niezmienna w czasie pomiaru.



Rys. 2.1. Piecyk z watomierzem i mierniki gęstości strumienia ciepła

- b) Moc doprowadzoną do układu odczytuje się za pomocą watomierza (rys. 2.1). W tym celu należy odczytać wartość ze skali watomierza i pomnożyć ją przez mnożnik równy 10.
- c) Dokonać pomiaru gęstości strumienia ciepła. Gęstość strumienia ciepła występującą na ściankach bocznych i górnej suszarki odczytuje się z wyświetlacza miernika (rys. 2.2), przekręcając pokrętkę (rys. 2.2) na odpowiedni numer ścianki. Numery ścianek bocznych piecyka oznaczone są cyframi rzymskimi w górnej ich części (od 1 do 4). Pomiar gęstości strumienia ciepła ze ścianki górnej odczytuje się z kanału 5.



Rys. 2.2. Miernik gęstości strumienia ciepła

- d) Wyznaczyć strumień strat ciepła do otoczenia przez ścianki boczne  $\dot{Q}_b$  na podstawie zmierzonych lokalnych wartości gęstości strumienia ciepła.

$$\dot{Q}_b = \sum_{i=1}^n A_i q_i, n=4 \quad (1)$$

e) Wyznaczyć strumień strat ciepła do otoczenia przez ściankę górną

$$\dot{Q}_g = A_5 q_5 \quad (2)$$

f) Wyznaczyć strumień strat ciepła do otoczenia przez ściankę dolną

$$\dot{Q}_d = 0,5 A_5 q_5 \quad (3)$$

g) Całkowity strumień ciepła przepływający do otoczenia

$$\dot{Q} = \dot{Q}_b + \dot{Q}_g + \dot{Q}_d \quad (4)$$

h) Porównać wyniki pomiarów strumienia ciepła z pomiarem mocy elektrycznej.

i) Porównać wyniki pomiarów z obliczeniami strat ciepła do otoczenia na drodze konwekcji swobodnej.

j) Do metody obliczeniowej potrzebna jest wartość średniej temperatury dla ścianek bocznych i górnej. W tym celu należy dokonać pomiaru temperatury w pięciu miejscach dla każdej ścianki – w pobliżu narożników i na środku. Pomiaru dokonuje się ręcznym termometrem oporowym. Przystawiając część pomiarową termometru (rys. 2.3) do ścianki aż do momentu kiedy temperatura na wyświetlaczu się ustabilizuje.

element  
pomiarowy



Rys. 2.3. Termoert oporowy

Do obliczeń należy wykorzystać równania kryterialne zawarte w dodatku A.

### 3. Pomiar gęstości strumienia ciepła w praktyce

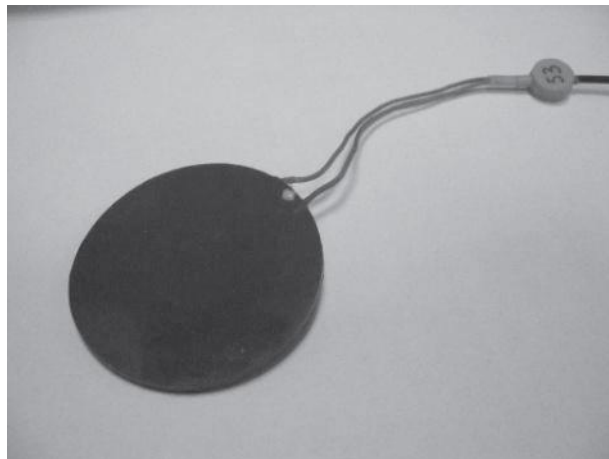
Systematyczny wzrost kosztów produkcji energii związany między innymi ze zmniejszeniem, się łatwo dostępnych zasobów surowców energetycznych zwiększa zainteresowanie efektywnym jej wykorzystaniem. Jednym z podstawowych sposobów realizacji tego celu jest stosowanie odpowiednich, efektywnych izolacji cieplnych zmniejszających straty ciepła, które stanowią znaczącą pozycję w bilansie energetycznym.

W celu identyfikacji miejsc, w których występują duże straty ciepła lub oceny efektywności zastosowanej izolacji można dokonać bezpośrednich pomiarów gęstości strumienia ciepła na wybranych powierzchniach. Do tego celu służą przyrządy zwane potocznie miernikami strumienia ciepła.

Spośród wielu typów mierników lub metod pomiarowych służących do pomiaru gęstości strumienia ciepła lub współczynnika przejmowania ciepła do najprostszych należy miernik z czujnikiem typu „ścianka pomocnicza”. Szczególnie korzystną cechą tego typu metody jest możliwość budowy przenośnych przyrządów pomiarowych.

### 4. Zasada działania miernika gęstości ciepła z czujnikiem typu „ścianka pomocnicza”

Czujnik typu „ścianka pomocnicza” wykonany jest najczęściej w postaci płytki o grubości kilku milimetrów i średnicy kilkudziesięciu milimetrów. Wewnątrz czujnika znajdują się termoelementy usytuowane w różnych odległościach od ścianki pomiarowej. Za pomocą termoelementów dokonuje się pomiaru spadku temperatury na grubości czujnika, przez który przepływa strumień ciepła. Powstająca różnica temperatur jest proporcjonalna do gęstości strumienia ciepła przepływającego przez czujnik. Ponieważ różnice temperatur są niewielkie stosuje się baterie połączonych szeregowo termoelementów składających się nawet z kilkuset spoin pomiarowych.



Rys. 4.1. Miernik gęstości strumienia ciepła typu „ścianka pomocnicza”

Zakładając, że mierzona gęstość strumienia ciepła przepływającego przez czujnik przyłożony do badanej powierzchni jest taka sama jak na powierzchni badanej, można wyznaczyć jego wartość z następującego równania

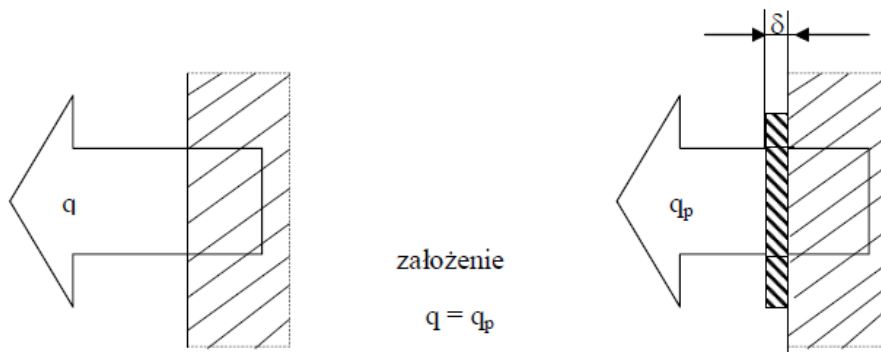
$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\delta} \quad (5)$$

gdzie:  $\delta$  – grubość ścianki pomocniczej [ m ]

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK]

$\Delta T$  – różnica temperatur [K]

Schemat ilustrujący metodę pomiaru gęstości strumienia ciepła przy wykorzystaniu ścianki pomocniczej przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Pomiar gęstości strumienia ciepła za pomocą ścianki pomocniczej – założenia

Poprawny pomiar wymaga spełnienia założenia, że przyłożony czujnik nie ma istotnego wpływu na zmianę gęstości strumienia ciepła w miejscu przyłożenia.

Warunki takie są spełnione, jeśli:

- a) opór cieplny czujnika jest znacznie mniejszy niż przegrody przez, które przenika ciepło
- b) wymiary czujnika, a szczególnie jego grubość, są małe w porównaniu z wymiarami badanej powierzchni.
- c) opór kontaktowy na styku czujnik – badana powierzchnia jest mały.

Niespełnienie warunku (a) powoduje zaniżenie zmierzonej wartości gęstości strumienia ciepła. Wpływ ten można skorygować przez oszacowanie o ile zmniejszyła się gęstość strumienia ciepła na skutek przyłożenia czujnika. Oszacowanie to przeprowadza się w oparciu o obliczenia współczynnika przenikania ciepła dla układu przegrody z czujnikiem i przegrody bez czujnika.

Spełnienia warunku (b) zapewnia podobieństwo przejmowania ciepła na badanej powierzchni przed i po przyłożeniu czujnika.

Ze względu na użycie termoelementów do pomiaru różnicy temperatur  $\Delta T$ , sygnałem pomiarowym dostarczonym przez czujnik jest siła elektromotoryczna  $E$ . W związku z tym (5) można przedstawić w postaci.

$$q_p = \frac{\lambda}{\delta} \frac{E}{e} \quad (6)$$

gdzie:  $e$  [mV/K] ich ilości jest wielkością ustaloną na podstawie charakterystyki użytych termoelementów, po uwzględnieniu ich ilości. Z uwagi na niejednorodność materiału czujnika i związane z tym trudności w określeniu  $\lambda$  i  $\delta$ , w praktyce czujniki podlegają indywidualnemu wzorcowaniu. Wzorcowanie polega na określeniu wartości stałej czujnika  $C_q$  [(W/m<sup>2</sup>)/mV] zdefiniowanej równaniem.

$$q_p = \frac{\lambda}{\delta} \frac{E}{e} = C_q E \quad (7)$$

Stała wzorcowania jest wykorzystywana bezpośrednio do wyznaczania gęstości strumienia ciepła w oparciu o równanie (7), bądź do regulacji układu elektronicznego miernika umożliwiającego bezpośredni odczyt gęstości strumienia ciepła w [W/m<sup>2</sup>].

Ustosunkować się do uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń, które należy zestawić w tabelicy 1.

Tabela 1A. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń.

Strumienie strat ciepła $Q_i$	Pomiar mocy elektrycznej [ W ]	Pomiar gęstości strumienia ciepła		Metoda obliczeniowa [ W ]
		W / m <sup>2</sup>	[ W ]	
Powierzchnie boczne $A_1 = 1.1 \text{ m}^2$	X			
Powierzchnia górna $A_2 = 0.167 \text{ m}^2$	X			
Powierzchnia dolna $A_3 = 0.167 \text{ m}^2$	X			
Całkowite straty ciepła $Q = \Sigma Q_i$		X		

**Uwaga: Dla powierzchni dolnej przyjąć 50 % wskazań z powierzchni górnej.**

## DODATEK A

### PRZEJMOWANIE CIEPŁA NA POWIERZCHNI ŚCIANKI

#### 1. Strumień ciepła

$$\dot{Q} = A\alpha(t_w - t_f) \text{ [W]} \quad (1A)$$

gdzie: A – powierzchnia [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  – średni współczynnik przejmowania ciepła [W/m<sup>2</sup>K]

$t_w$  – średnia temperatura ścianki [°C]

$t_f$  – średnia temperatura otaczającego płynu [°C]

#### 2. Średni współczynnik przejmowania ciepła na pionowej ścianie przy konwekcji swobodnej.

$$Nu = C(Gr Pr)^n \text{ [-]} \quad (2A)$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{ [-]} \text{ – liczba Nusselta} \quad (3A)$$

$$Gr = \frac{g\beta l^3}{\nu^2}(t_w - t_f) \text{ [-]} \text{ – liczba Grashoffa} \quad (4A)$$

Pr – liczba Prandtla [-]

g – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>]

l – wymiar liniowy (wysokość ścianki bocznej)[m]

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła dla płynu [W/mK]

$\beta$  – współczynnik termicznej rozszerzalności gazu (dla gazu idealnego)  $\beta = 1/T_L$  [1/K]

$\nu$  – lepkość kinematyczna płynu [m<sup>2</sup>/s]

C, n – stałe zależne od iloczynu Gr i Pr [-]

Stałe C i n przyjmują wartości w zależności od iloczynu Gr i Pr (tabela. 2).

Tabela 2A

Wartości stałych C i n w zależności od iloczynu Gr i Pr

Gr* Pr	C	n
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1.18	1 / 8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0.540	1 / 4
$2 \cdot 10^7 - 10^{12}$	0.135	1 / 3



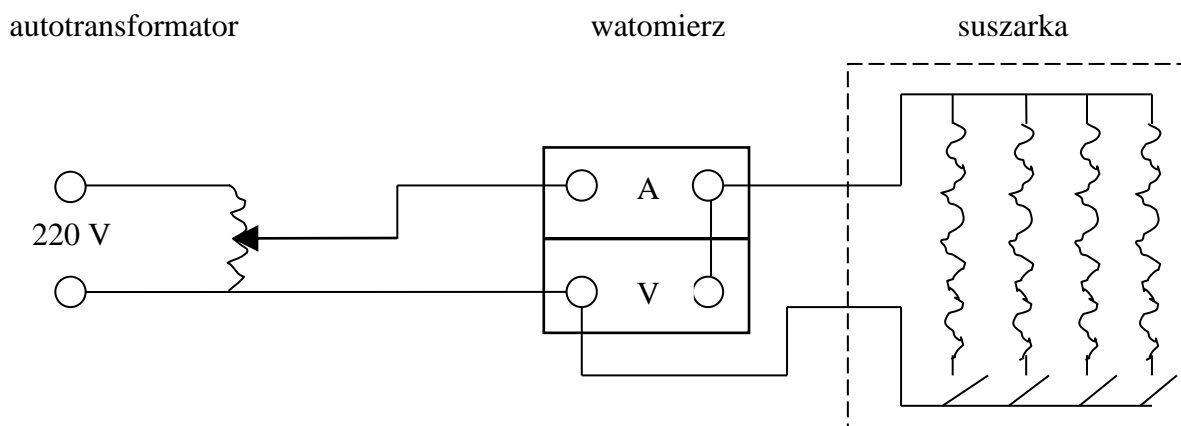
Własności płynu odczytujemy z tablic dla temperatury obliczeniowej równej

$$t_L = 0.5 (t_w + t_f) \quad (5A)$$

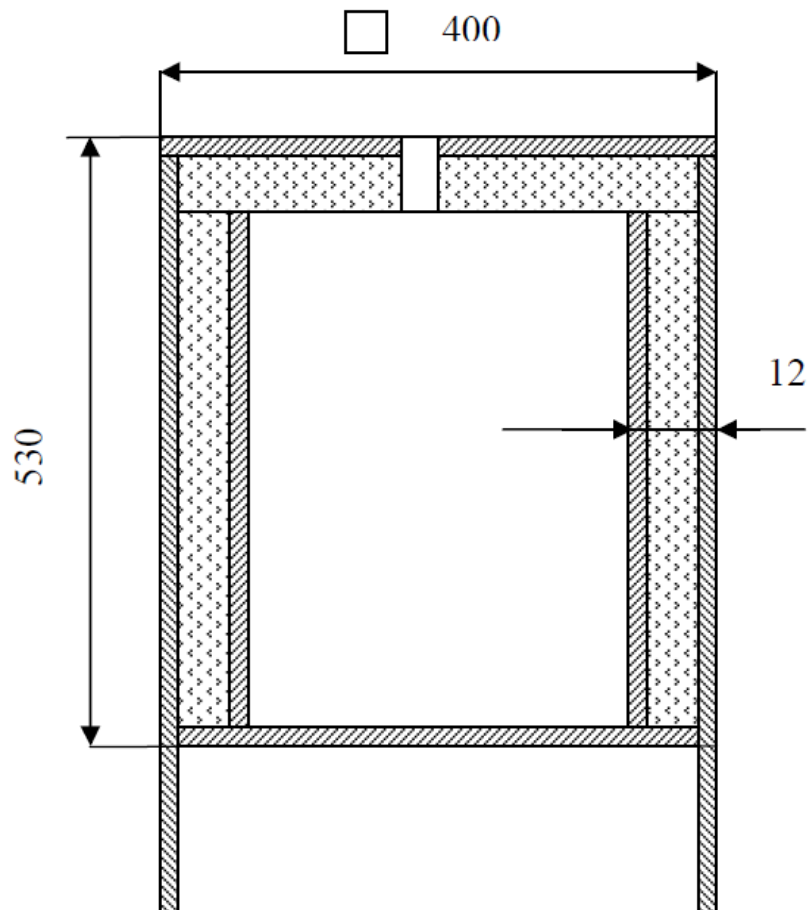
3. Średni współczynnik przejmowania ciepła na poziomej płycie przy konwekcji swobodnej. Jeżeli różnica temperatur sprzyja konwekcji to  $\alpha$  obliczamy z równania (2A) i powiększamy otrzymaną wartość o 30 %. W tym przypadku wymiarem liniowym jest mniejszy wymiar ściany bocznej suszarki.

Tabela 3A  
Właściwości cieplne powietrza suchego przy ciśnieniu  $10^5$  Pa

$t_L$ [°C]	$\nu \cdot 10^6$ [m <sup>2</sup> /s]	Pr	$\lambda$ [W/mK]
0	13,28	0,707	0,0244
10	14,16	0,705	0,0251
20	15,06	0,703	0,0259
30	16,00	0,701	0,0267
40	16,96	0,699	0,0276
50	17,95	0,698	0,0283
60	18,97	0,696	0,0290
70	20,02	0,694	0,0297
80	21,09	0,692	0,0305
90	22,10	0,690	0,0313
100	23,13	0,688	0,0321



Rys. 1A. Schemat układu zasilania suszarki energią elektryczną.



- Powierzchnia suszarki:
- boczna  $A_1 = 1.1 \text{ m}^2$
  - górna  $A_2 = 0.167 \text{ m}^2$
  - dolna  $A_3 = 0.167 \text{ m}^2$
  - całkowita  $A_0 = 1.434 \text{ m}^2$

Rys. 2A. Schemat ilustrujący izolację cieplną suszarki.

<b>POLITECHNIKA POZNAŃSKA</b> <b>Instytut Energetyki Ciepłej</b> ite.put.poznan.pl			
Laboratorium:			
<b>Temat ćwiczenia: Pomiar strumienia ciepła</b>			
Imię i nazwisko:			Semestr: Rok akademicki:
Data odrobienia ćwiczenia:	Data zaliczenia:	Ocena z ćwiczenia:	Ocena z sprawozdania:

1. Zestawienie wyników pomiarów:

Strumień ciepła $\dot{Q}_i$	Moc elektryczna [W]	Pomiar strumienia ciepła czujnikami powierzchniowymi		Metoda obliczeniowa $\dot{Q}_i$ [W]
		$q_i$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\dot{Q}_i = q_i \cdot A$ [W]	
Powierzchnie boczne A = 1.1 m <sup>2</sup>				
Powierzchnia górna A = 0.167 m <sup>2</sup>				
Powierzchnia dolna A = 0.167 m <sup>2</sup>				
SUMA				

2. Obliczenia wykonać odrębnie na oddzielnym arkuszu z rachunkiem jednostek

Tabela pomiarowo - obliczeniowa

Lp	Wielkość poszukiwana	Ściana boczna	Ściana górna
1	Temperatura otoczenia $t_{ot}$ [°C]		
2	Temperatura ściany $t_{śc}$ [°C]		
3	Temperatura średnia $t_L = (t_{ot} + t_{śc})/2$ [°C] $T_L = t_L + 273,15$		
4	Współczynnik rozszerzalności termicznej powietrza $\beta = 1/T_L$		
5	Współczynnik lepkości kinematycznej powietrza $\nu = \nu(t_L)$ [m <sup>2</sup> /s] – z tabeli 3A		

6	Liniowy wymiar charakterystyczny $l$ [m]	0,53	0,40
7	Liczba Grashofa: $Gr = \frac{g\beta l^3 (t_{sc} - t_{ot})}{\nu^2}$		
8	Liczba Prandtla $Pr = Pr(t_L)$ – z tabeli 3A		
9	Iloczyn $Gr \cdot Pr$		
10	Stałe wzoru kryterialnego - z tabeli 2A	C	
		n	
11	Liczba Nusselta: $Nu = C(GrPr)^n$		
12	Współczynnik przejmowania ciepła $\alpha = \frac{Nu\lambda}{l}$ [W/m <sup>2</sup> K]		
13	Strumień ciepła $\dot{Q}_i = \alpha A(t_{sc} - t_{ot})$ [W]		

### 3. Wnioski