

**LABORATORIUM TERMODYNAMIKI
INSTYTUTU TECHNIKI CIEPLNEJ I MECHANIKI PŁYNÓW
WYDZIAŁ MECHANICZNO-ENERGETYCZNY
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

INSTRUKCJA LABORATORYJNA

Temat ćwiczenia 33

**BADANIE WSPÓŁPRĄDOWEGO I PRZECIWPŁĄDOWEGO
WYMIENNIKA CIEPŁA**

WROCŁAW 2010r

1. Wprowadzenie

Celem konstruowania wszelkiego rodzaju wymienników jest możliwość przekazywania , odzyskiwania ciepła, wykorzystywanego następnie w różnego typu procesach przemysłowych i komunalnych.

Urządzenia wymiany ciepła, można podzielić ze względu na sposób działania na trzy grupy: rekuperatory albo wymienniki ciepła przeponowe, regeneratory oraz wymienniki ciepła bezprzeponowe mokre.

Rekuperator i wymiennik ciepła przeponowy.

W zasadzie najczęściej spotykany i wykorzystywany do celów praktycznych typ wymiennika ciepła. Urządzenia charakteryzują się tym , że posiadają błonę - membranę rozdzielającą dwa czynniki. Przyjmuje się , że membrana może mieć geometrię ścianki płaskiej w kształcie prostokąta lub ścianki cylindrycznej tzw. wymiennik typu „rura w rurze” Jeden z nich oddaje ciepło na rzecz drugiego czynnika. Czynnikami roboczymi może być zarówno ciecze jak i gazy. Obliczenia i model matematyczny procesów zachodzących w urządzeniu jest stosunkowo prosty , ze względu na ustalony charakter przepływu. Sformułowanie powyżej oznacza , że temperatury czynników roboczych , przepony itp. w danym miejscu wymiennika są stałe, strumienie przepływu również nie zmieniają się w czasie. Najczęściej spotykane rekuperatory to rekuperatory współprądowe i przeciwprądowe.

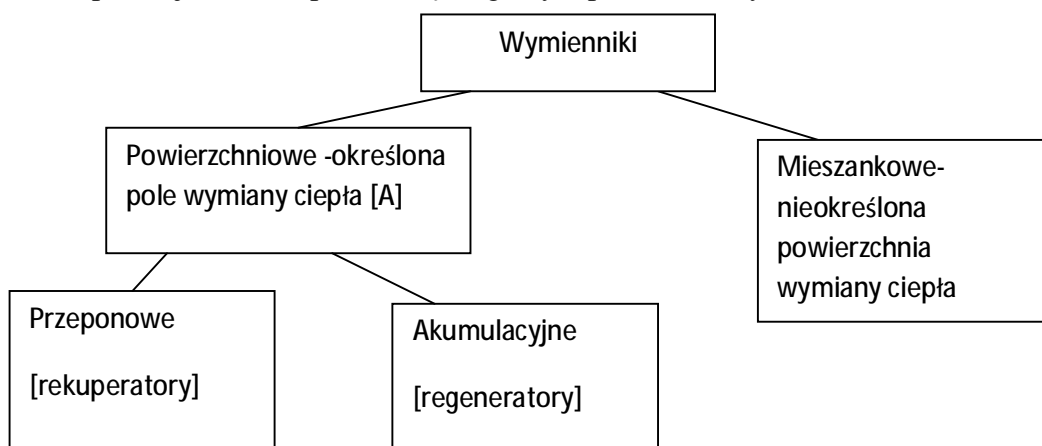
Regenerator.

W urządzeniach tych występuje tzw. niestabilna akumulacja ciepła. Nie mają przepony. Posiadają natomiast wkłady akumulacyjny: kamienie, cegły, blachy, które są nagrzewane / w trakcie przepuszczania powietrza gorącego/ lub chłodzone / gdy ciepło jest oddawane do gazu chłodniejszego. Tak działają podgrzewacze np. Ljungstroma. Urządzenia te muszą być przełączane okresowo.

Wymiennik ciepła bezprzeponowy, o działaniu bezpośrednim, mieszkankowy.

W urządzeniu tym wymiana ciepła odbywa się między jednym czynnikiem będącym w postaci gazowej, a drugim w postaci ciekłej. Nie mają w związku z tym przepony. W urządzeniach występuje równoczesna wymiana ciepła i masy. Klasycznym przykładem takiego urządzenia jest chłodnia kominowa.

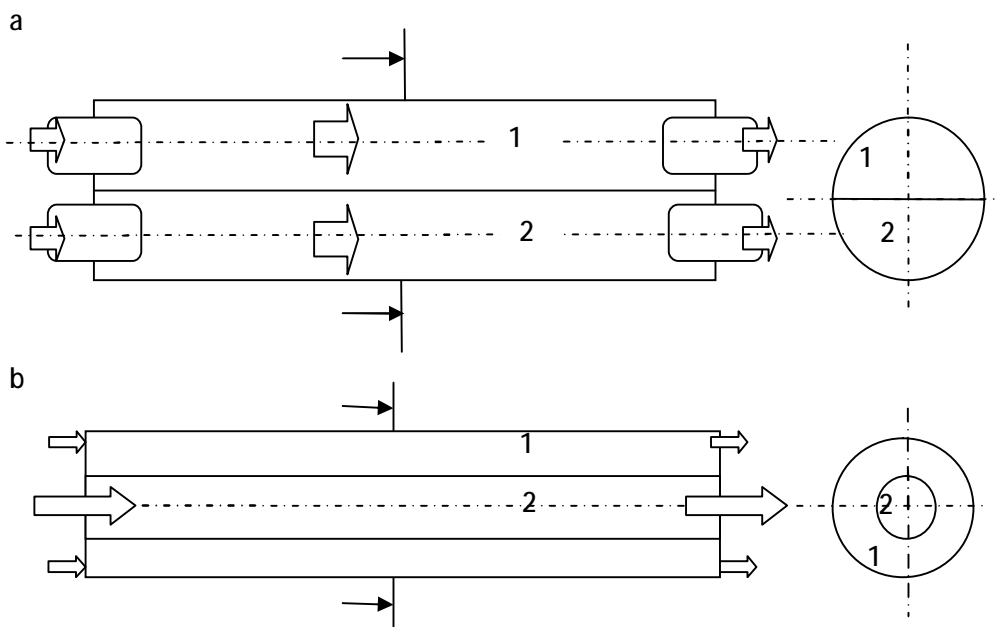
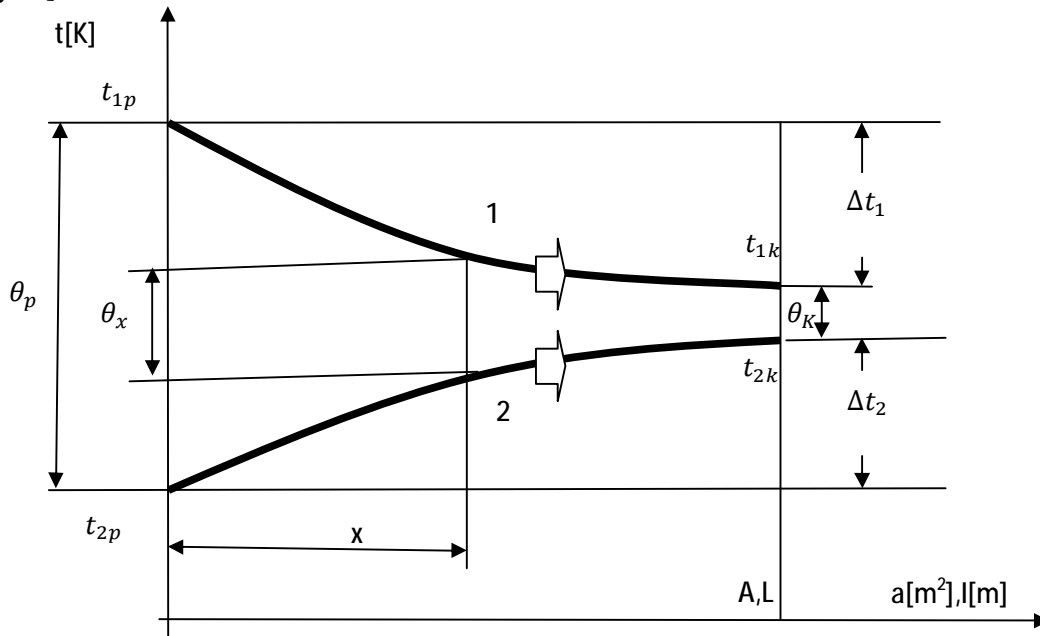
Na schemacie poniżej można zapoznać się z ogólnym podziałem wymienników.



Rys.1 Ogólna klasyfikacja wymienników

1.1 Współprądowy i przeciwrządowy wymiennik ciepła

Najważniejszym elementem w analitycznym „rozwiązaniu” wymienników jest sporządzenie tzw. siatki temperaturowej urządzenia, (rys.2), pracującego w stanach ustalonych [pamiętajmy o tym!].



Rys.2 Wymiennik współprądowy

1,2-czynniki robocze

t_{1p}, t_{1k} , - temperatura początkowa i końcowa czynnika grzejącego / o wyższej średniej temperaturze/

t_{2p}, t_{2k} - temperatura początkowa i końcowa czynnika pobierającego ciepło/ o niższej średniej temperaturze/

θ_p, θ_k - różnica temperatur czynników odpowiednio na początku układów współrzędnych i na końcu wymiennika

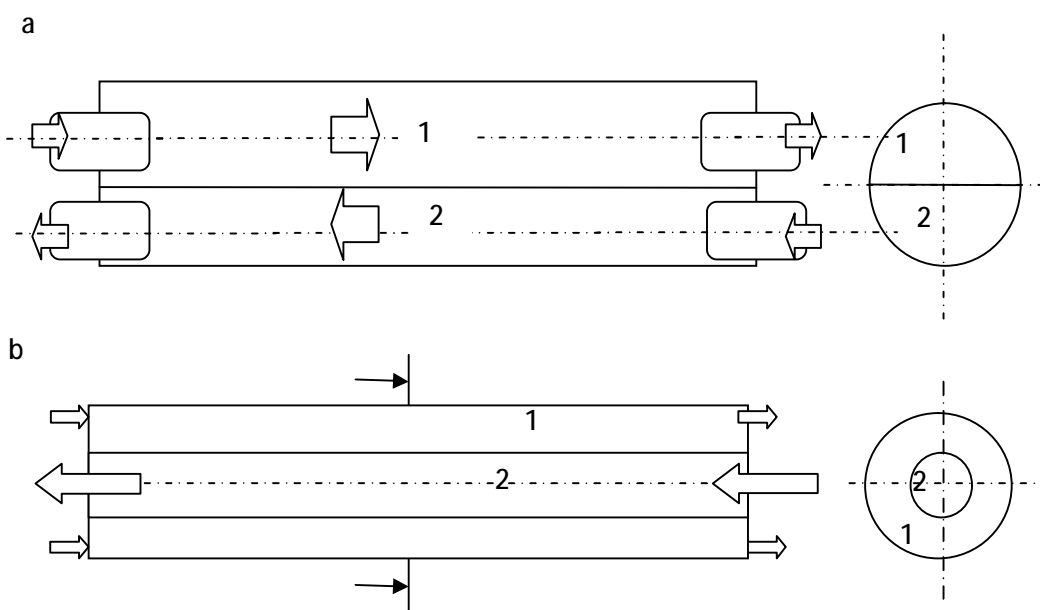
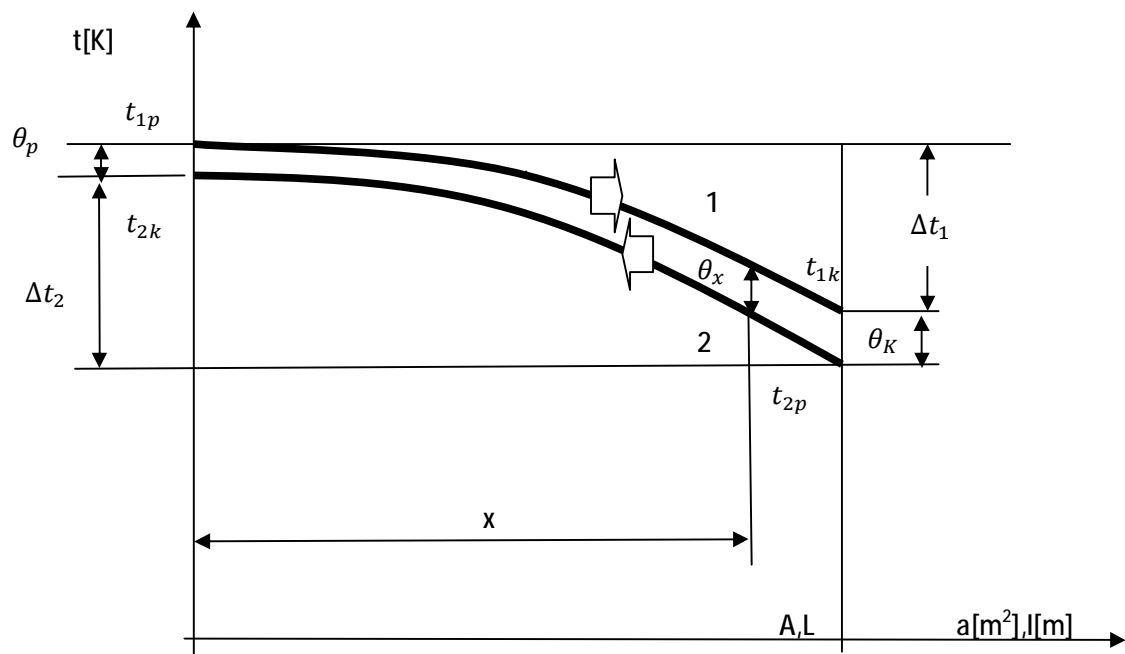
θ_x -różnica temperatur czynników w miejscu x oddalonym od wlotów na początku prostokątnego układu współrzędnych

Uwaga do rys 2!

W podpunkcie a/ schematycznie przedstawiono wymiennik powierzchniowy. Powierzchnią wymiany /przeponą/ ciepła jest prostokąt o powierzchni A. W związku z tym sposób opisu wymiany ciepła jest taki jak dla ścianki płaskiej.

W podpunkcie b/ przedstawiono schematycznie wymiennik typu „rura w rurze”. Powierzchnią wymiany /przeponą/ ciepła jest powierzchnia cylindryczna o długości L. W związku z tym sposób opisu wymiany ciepła jest taki jak dla ścianki w kształcie cylindra, aczkolwiek w pierwszym uproszczeniu powierzchnię cylindryczną rozwinięciu można potraktować jak prostokąt o powierzchni $\pi d_{sr} L$. Wtedy można zastosować wzór Pecleta i Hudlera taki jak dla ścianki płaskiej.

Jest to wykres temperatur obu czynników roboczych wymiennika [pobierającego i oddającego ciepło] w zależności od odległości od wlotów-wylotów ciepłego i zimnego medium roboczego mierzonego bądź powierzchnią omywaną[rekuperatory z płaską przeponą], bądź długością wymiennika [rekuperatory z przeponą w kształcie rury]. Kwestią umowną jest określanie powierzchni lub długości od króćców z lewej strony wymiennika w prostokątnym układzie współrzędnych. Wynika to z przyjętego sposobu modelowania matematycznego rekuperatorów. W zasadzie tylko na podstawie sporządzonej charakterystyki temperaturowej można zapisać podstawowe równania bilansu cieplnego wymiennika i określić w przybliżeniu względne straty ciepła jednego czynnika roboczego względem drugiego. To z kolei informuje o lepszej lub gorszej miejscowej izolacyjności urządzenia.



Rys.3 Wymiennik przeciwprądowy

1,2-czynniki robocze

t_{1p}, t_{1k} - temperatura początkowa i końcowa czynnika grzejącego / o wyższej średniej temperaturze/

t_{2p}, t_{2k} - temperatura początkowa i końcowa czynnika pobierającego ciepło/ o niższej średniej temperaturze/

θ_p, θ_k - różnica temperatur czynników odpowiednio na początku układów współrzędnych i na końcu wymiennika
 θ_x - różnica temperatur czynników w miejscu x oddalonym od wlotów na początku prostokątnego układu współrzędnych

A, L - odpowiednio pole powierzchni całego wymiennika, długość wymiennika

Uwaga do rys 3!

W podpunkcie a/ schematycznie przedstawiono wymiennik powierzchniowy. Powierzchnią wymiany /przeponą/ ciepła jest prostokąt o powierzchni A . W związku z tym sposób opisu wymiany ciepła jest taki jak dla ścianki płaskiej.

W podpunkcie b/ przedstawiono schematycznie wymiennik typu „rura w rurze”. Powierzchnią wymiany /przeponą/ ciepła jest powierzchnia cylindryczna o długości L . W związku z tym sposób opisu wymiany ciepła jest taki jak dla ścianki w kształcie cylindra, aczkolwiek w pierwszym uproszczeniu powierzchnię cylindryczną rozwinięciu można potraktować jak prostokąt o powierzchni $\pi d_{sr} L$. Wtedy można zastosować wzór Pecleta i Hudlera taki jak dla ścianki płaskiej.

1.2 Opis matematyczny rekuperatorów współ i przeciwpływowych

Poniższe równania zostały wyprowadzone przy założeniu:

- braku strat do otoczenia, czyli idealnej izolacji wymiennika
- ciepło jest wymieniane między czynnikami roboczymi wyłącznie przez przeponę i to wyłącznie w kierunku prostopadłym do niej
- stałości wszystkich współczynników związanych z wymianą ciepła jak również pozostałych stałych materiałowych

Podstawowymi równaniami matematycznymi w stanach ustalonych, służącymi do opisu matematycznego procesów zachodzących w rekuperatorach są dla wymienników współprądowych (skrót WW), w których w ogólnym przypadku nie realizowana jest przemiana fazowa (skraplanie, wrzenie czynnika):

Równanie bilansowe bazujące na fakcie równości ciepła oddanego przez przeponę i ciepła przez nią pobranego, przy czym strumień ciepła wymieniany przez przeponę nazywany jest często wydajnością wymiennika:

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 c_{p1} (t_{1p} - t_{1k}) = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{2k} - t_{2p}) \quad (1)$$

\dot{m}_i - strumień masy danego czynnika roboczego

Jeśli wprowadzimy dodatkowe zmienne w celu uproszczeń mnemotechnicznych takich jak pojemność cieplna czynników roboczych :

$$\dot{C}_i = \dot{m}_i c_{pi} \quad (2)$$

$$\text{wprowadzimy dla współprądu: } m = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \quad (3)$$

oraz przyjmujemy wartości bezwzględne różnic temperatury o którą zmaleje czynnik pierwszy i drugi odpowiednio to:

$$t_{1p} - t_{1k} = \Delta t_1 \quad \text{oraz} \quad t_{2k} - t_{2p} = \Delta t_2 \quad (4)$$

Wtedy równanie bazowe dla **WW**:
$$\dot{Q} = \dot{C}_1 \Delta t_1 = \dot{C}_2 \Delta t_2 \quad (5)$$

Równanie Pecleta w ogólnej postaci określa wydajność wymiennika w zależności od powierzchni wymiany ciepła A.

$$\dot{Q} = kA\theta_m \quad (6)$$

Gdzie człon $\theta_m = \frac{\theta_p - \theta_k}{\ln \frac{\theta_p}{\theta_k}}$ nazywany jest średnią logarytmiczną różnicą temperatur.

Wzór Pecleta dla wymienników powierzchniowych [przepona w kształcie prostokąta] jest nieco inny niż dla wymienników typu „rura w rurze”, co wynika z konstrukcji stałej Pecleta.

Dla wymienników powierzchniowych mamy:

$$\dot{Q} = kA\theta_m \quad \text{oraz} \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7)$$

δ, λ, A – **odpowiednio** : grubość, współczynnik przewodzenia ciepła materiału przepony, pole wymiany ciepła

Dla wymienników rurowych mamy:

$$\dot{Q} = k_L \pi L \theta_m \quad \text{oraz} \quad k_L = \frac{1}{\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\lambda} + \frac{1}{d_2 \alpha_2}} \quad (8)$$

Przy czym średnice d_2 **oraz** d_1 są odpowiednio średnicą zewnętrzną i wewnętrzną przepony, która jest w kształcie powierzchni cylindrycznej i rozdziela czynniki robocze 1,2.

Wzór Hudlera określający różnicę temperatur między czynnikami roboczymi w przekroju oddalonym o x od osi współrzędnych umieszczonej na początku wymiennika, w miejscu pierwotnego zetknięcia się obu czynników, w którym powierzchnia (długość powierzchni) wymienianego ciepła jest równa „zero”:

$$\theta_x = \theta_p e^{-mka} \quad \text{dla wymiennika powierzchniowego} \quad (9)$$

$$\theta_x = \theta_p e^{-\pi m k_L l} \quad \text{dla wymiennika rurowego} \quad (10)$$

Podstawowymi równaniami matematycznymi w stanach ustalonych, służącymi do opisu matematycznego procesów zachodzących w rekuperatorach są dla wymienników przeciwprądowych (skrót PW) w którym w ogólnym przypadku nie realizowana jest przemiana fazowa (skraplanie, wrzenie czynnika):

$$\dot{Q} = \dot{m}_1 c_{p1} (t_{1p} - t_{1k}) = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{2k} - t_{2p}) \quad (11)$$

$$m = \frac{1}{\dot{c}_1} - \frac{1}{\dot{c}_2} \quad (12)$$

$$t_{1p} - t_{1k} = \Delta t_1 \quad \text{oraz} \quad t_{2k} - t_{2p} = \Delta t_2 \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \dot{C}_1 \Delta t_1 = \dot{C}_2 \Delta t_2 \quad (14)$$

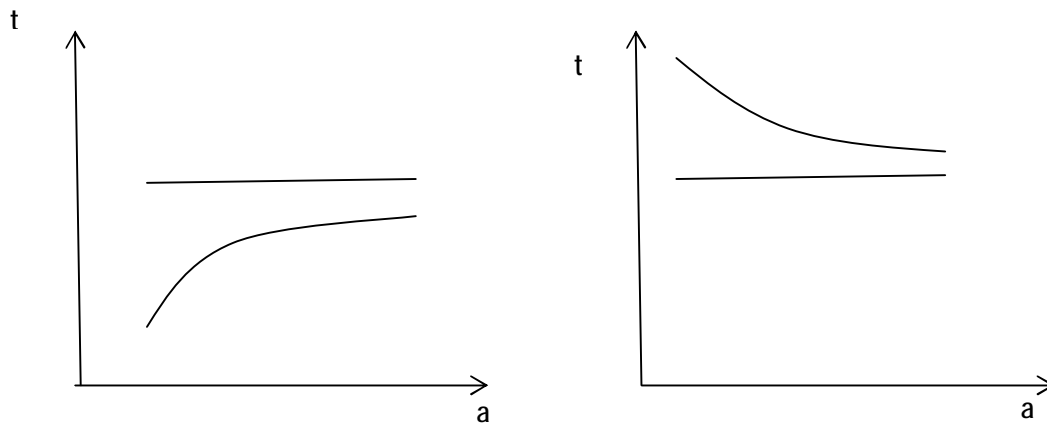
Wzór Pecleta i Huddera bez zmian dla wymienników powierzchniowych i rurowych.

Uwaga!

\dot{m}_i oraz m - to nie jest to samo !

1.3 Skraplacz i parowacz czyli wymienniki w których zachodzi przemiana fazowa

Przemiany fazowe są realizowane w wymiennikach stosunkowo często. Są to zjawiska zachodzące np. w kotłach. Szkic siatki temperaturowej wygląda jak na rys.3. Charakterystycznym zjawiskiem na siatce jest stałość temperatury czynnika przechodzącego przemianę fazową. Przy obliczeniu ciepła pobranego wzory(5),(14) są kompletnie bezużyteczne, ponieważ przemiany fazowe zachodzą w stałej temperaturze. Jedynym sposobem obliczenia strumienia ciepła przekazanego przez czynnik jest obliczenie różnicy entalpii początkowej i końcowej $\dot{Q} = \dot{m}(i_p - i_k)$ [jak wygląda zastosowanie tego wzoru dla pary nasyconej, a jak dla pary przegrzanej?].

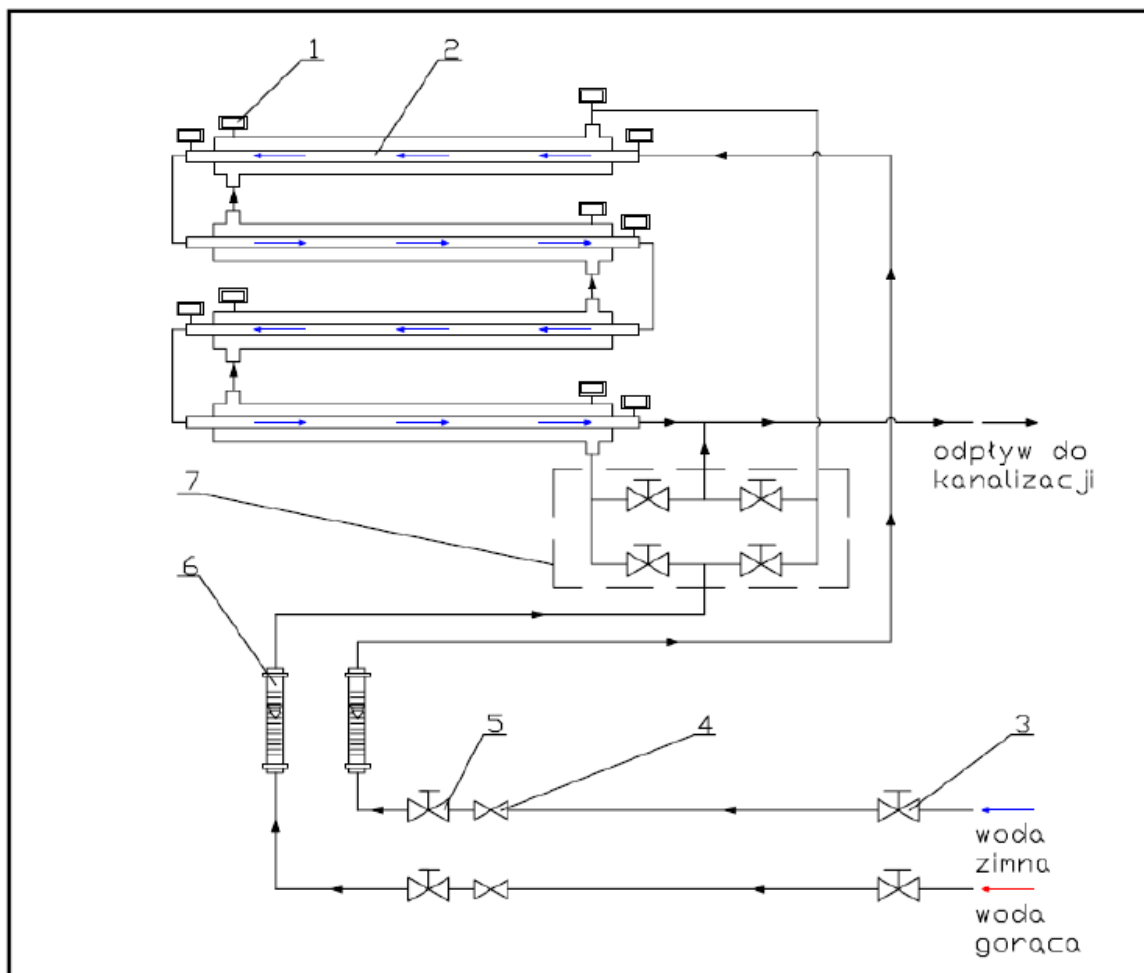


Rys.4 Siatka temperaturowa- od lewej: skraplacz, parowacz

2. Opis doświadczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania wymienników przeponowych oraz poznanie różnic w budowy , zasad działania i wielkości charakteryzujących pracę wymienników współ- i przeciwnieprądowych.

Stanowisko doświadczalne pozwala na tego typu porównanie. Dzięki wbudowanym czujnikom temperatury i przepływomierzom możemy określać temperaturę obu czynników w wybranych miejscach jak również określić stosowne strumienie mas rys.5.



Rys. 5 Schemat stanowiska badawczego. 1 - miernik temperatury, 2 – wymiennik ciepła, 3 – zawory kulowe do otwarcia przepływu wody, 4 – zawory zwrotne, 5 – zawory regulujące strumień wody, 6 – rotametry, 7 – zespół zaworów kierunkowych [1]

2.1 Sposób wykonania ćwiczenia

- prowadzący włącza zasilanie układu wody wymiennika,
- określa nastawy strumienia przepływu na rotametrach wody ciepłej i zimnej dla wymiennika współ i przeciwrządowego.
- studenci ustawiają natężenie przepływu wody zaworem kulowym i regulują dokładność kluczem na zaworze zwrotnym,
- okres oczekiwania na ustabilizowanie się układu to minimum 5 min,
- po tym okresie należy odczytać temperatury i wartość strumieni V_i objętości wody ciepłej i zimnej oraz przeliczamy je na strumienie masowe mi obu czynników.
- takich pomiarów przy różnych nastawach należy wykonać 5 dla jednego i tych samych nastawach dla drugiego wymiennika.
- wymiary wymiennika rura wewnętrzna $d_z/d_w = 15/13$, rura zewnętrzna $d_z/d_w = 22/20$ w mm, długość wymiennika $L = 6$ m.

Wymiennik jest podzielony na 4 części i każdą część możemy traktować jako osobny wymiennik.

Tablica 1.1. Własności cieplne wody przy ciśnieniu nasycenia

temperatura	gęstość	ciepło właściwe	współczynnik przewodzenia ciepła	lepkość kinematyczna	liczba Prandtl'a
t	ρ	c_p	λ	$\nu \times 10^6$	Pr
°C	kg/m ³	kJ/(kg·K)	W/(m·K)	m·s ⁻²	—
0	999,9	4,226	0,558	1,789	13,7
5	1000,0	4,206	0,568	1,535	11,4
10	999,7	4,195	0,577	1,300	9,50
15	999,1	4,187	0,587	1,146	8,10
20	998,2	4,182	0,597	1,006	7,00
25	997,1	4,178	0,606	0,884	6,10
30	996,7	4,176	0,615	0,805	5,40
35	994,1	4,175	0,624	0,725	4,80
40	992,2	4,175	0,633	0,658	4,30

45	990,2	4,176	0,640	0,661	3,90
50	988,1	4,178	0,647	0,556	3,55
55	985,7	4,179	0,652	0,517	3,27
60	983,2	4,181	0,658	0,478	3,00
65	980,6	4,184	0,663	0,444	2,76
70	977,8	4,187	0,668	0,415	2,55
75	974,9	4,190	0,671	0,366	2,23
80	971,8	4,194	0,673	0,364	2,25
85	968,7	4,198	0,676	0,339	2,04
90	965,3	4,202	0,678	0,326	1,95
95	961,9	4,206	0,680	0,310	1,84

Protokół pomiarów[1]

Imię i nazwisko:

Data doświadczenia:

1.

2.

3.

Tabela. 1.2. Protokół pomiarów wykonanych podczas badania warunków pracy wymiennika ciepła „rura w rurze”

Przepływ przeciwnyprądowy						
Rura	V̇ l/h	Temperatura °C				
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
Przepływ współprądowy						
Rura	V̇ l/h	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	T ₄ °C	T ₅ °C
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						
wewnętrzna (woda zimna)						
zewewnętrzna (woda gorąca)						

Tabela 1.3. Fizyczne właściwości czynników [1]

Lp.	Wielkość	Symbol	Wymiar	Woda gorąca		Woda zimna	
				przeciwprądowy		współprądowy	
				1	2	1	2
1.	Średnia temperatura	$t_{sr.}$	$^{\circ}C$				
2.	Gęstość	ρ	kg/m^3				
3.	Lepkość kinematyczna	ν	m^2/s				
4.	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ	$W/m \cdot K$				
5.	Ciepło właściwe	c_p	$J/kg \cdot K$				
6.	Liczba Prandtla	Pr	-				

Tabela 1.4. Wyniki obliczeń [1]

L. p.	Wielkość	Symbol	Jednostka	Przeciwprąd	Współprąd
1	Strumień objętości czynników	\dot{V}_A	m ³ /s		
		\dot{V}_B	m ³ /s		
2	Temperatury średnie	$t_{sr.A}$	K		
		$t_{sr.B}$	K		
3	Ciepła pobrane lub oddane	Q_A	W		
		Q_B	W		
4	Średnia logarytmiczna różnica temp.	Δt_{log}	K		
5	Współczynnik przenikania ciepła (dośw.)	k	W/(m ² ·K)		
6	Prędkość przepływu	w_A	m/s		
		w_B	m/s		
7	Liczba Reynoldsa	Re_A	-		
		Re_B	-		
8	Liczba Nusselta	Nu_A	-		
		Nu_B	-		
9	Współczynnik przejmowania ciepła	α_A	W/(m ² ·K)		
		α_B	W/(m ² ·K)		
10	Współczynnik przenikania ciepła (teoret.)	k	W/(m ² ·K)		
11	Strumień ciepła	\dot{Q}	W		

2.2 Zadania do wykonania

1. Wykonać charakterystykę temperaturową wymiennika WW WP w zależności od czasu , wielkości strumienia masy czynników roboczych [$t_i = f(t), t_i = f(\dot{m}_{1,2}), i=1, \dots, 8$]
2. Na podstawie charakterystyk temperaturowych WW i WP określić zależność wydajności wymiennika w zależności od strumienia masy $\dot{Q}_{WW,WP} = f(\dot{m}_{1,2})$ w zakresach podanych przez prowadzącego.
3. Określić współczynnik Pecleta jako $k = f(\dot{m}_{1,2}), \frac{\dot{Q}_{WP}}{\dot{Q}_{WW}} = f\left(\frac{\theta_{lm WP}}{\theta_{m WW}}\right)$, odpowiedzieć na pytanie dlaczego $k_{WW} \cong k_{WP}$
4. Oszacować straty wymiennika do otoczenia wiedząc , że $\dot{Q}_2 = \dot{Q}_1 + \text{straty}$.
5. Wydajność jakiego wymiennika jest większa i dlaczego.

Uwaga!

Zadania dotyczą stanów nieustalony i ustalonych. Obowiązujący zestaw ćwiczeń określi prowadzący.

3 Pytania :

1. Czym różnią się w budowie i opisie matematycznym wymienniki powierzchniowe , rurowe , WW i WP.
2. Dlaczego WP w porównaniu z WW mają mniejszą powierzchnie wymiany ciepła przy tych samych parametrach czynników roboczych i konstrukcyjnych wymiennika.
3. Podaj główne założenia wyprowadzenia wzorów 1-14.
4. Scharakteryzuj WW w budowie i opisie matematycznym.
5. Scharakteryzuj WP w budowie i opisie matematycznym.
6. Dlaczego równanie Pecleta dla wymiennika powierzchniowego i typu „rura w rurze” różnią się , jaki wymiar ma stała Pecleta dla ścianki płaskiej a jaki dla ścianki cylindrycznej.

Bibliografia:

- [1] Tomasz Kierepka, Budowa stanowiska dydaktycznego z wymiennikiem ciepła w układzie ciecz-ciecz eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk wymiennika, praca magisterska, Wrocław 2010