

Ćwiczenie 4:

BADANIA CIEPLNE REKUPERATORA

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie bilansu cieplnego oraz średniego współczynnika przenikania ciepła w jednodrogowym rekuperatorze płaszczowo-rurowym ze stałymi dnami sitowymi.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Badanie rekuperatora to głównie określenie jego mocy cieplnej przy danych strumieniach masy płynów przekazujących ciepło i istniejących w tych warunkach rozkładów temperatury pomiędzy ośrodkami, które ciepło to przekazują. Na podstawie wyników pomiarów można uzyskać również dodatkowe informacje dotyczące:

- prędkości i oporów przepływu płynów przekazujących ciepło,
- współczynnika przenikania ciepła i różnicy temperatury na wlocie i wylocie z aparatu,
- współczynników wydajności cieplnej.

Ze względu na sposób przepływu ciepła pomiędzy płynami w wymiennikach, aparaty te można podzielić na trzy grupy.

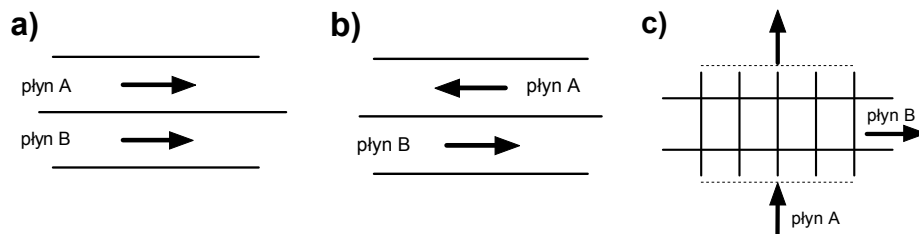
Pierwsza grupa obejmuje tzw. regeneratory ciepła, pracujące zwykle w sposób okresowy, w których sam ruch ciepła ma charakter niestabilny. W aparatach tego typu ciepło przekazywane jest za pośrednictwem, okresowo nagrzewanego przez płyn grzejny i ochładzanego przez płyn ogrzewany, wsadu, stanowiącego wypełnienie wewnętrzne aparatu.

Druąa grupa to tzw. bezprzeponowe wymienniki ciepła w których ruch ciepła odbywa się na zasadzie bezpośredniego kontaktu płynu oddającego i pobierającego ciepło.

Trzecia grupa, najbardziej rozpowszechniona w praktyce, to grupa aparatów do przepływu ciepła określana mianem tzw. rekuperatorów, w których substancje przekazujące ciepło są oddzielone przegrodą (ścianą) i dzięki temu nie stykają się bezpośrednio z sobą i nie mieszają się. Przepływ ciepła w tego typu aparacie

odbywa się na drodze przenikania. Taki właśnie rodzaj wymiennika ciepła jest przedmiotem badań w niniejszym ćwiczeniu.

Klasyfikując rekuperatory pod względem kierunków przepływu płynów przekazujących ciepło, można wyróżnić trzy główne układy przedstawione schematycznie na rys. 1.



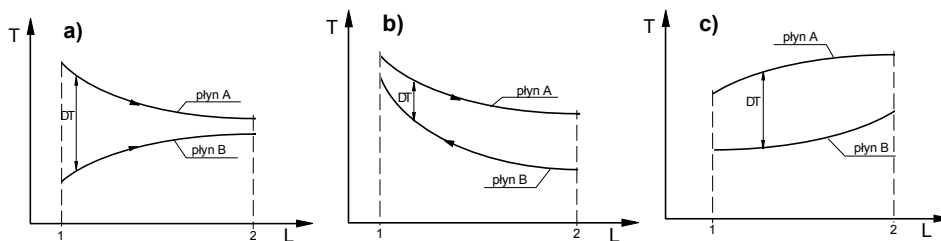
Rys. 1. Przepływ płynów w rekuperatorach.

a) współprądowy, b) przeciwproudowy, c) krzyżowy (mieszany).

Powierzchnia przegrody za pośrednictwem której przekazywane jest ciepło pomiędzy płynami może mieć kształt cylindryczny lub płaski. W odniesieniu do rekuperatorów o cylindrycznej przegrodzie rozdzielającej płyny, najczęściej stosowane są w praktyce tzw. wymienniki płaszczowo-rurowe. Rekuperatory o przegrodach płaskich, najczęściej wykonywane są natomiast jako tzw. wymienniki płytowe.

Płynami przekazującymi ciepło mogą być: dwie cieczy, ciecz i gaz, dwa gazy, czynnik zmieniający stan skupienia i gaz, płyn zmieniający stan skupienia i ciecz.

Przedstawionym na rys. 1, charakterystycznym układom przepływów, towarzyszą odpowiednie rozkłady temperatur wzdłuż przegrody oddzielającej przepływające substancje. Rozkłady te, dla typowych przypadków przepływu, przedstawiono na rys. 2. Zwrot krzywizn linii temperatur związana jest z pojemnością cieplną płynów wymieniających ciepło.



Rys. 2. Rozkłady temperatury w rekuperatorach o przepływie płynów:

a) współprądowym, b) przeciwproudowym, c) mieszanym.

T - temperatura, L - długość przepływu płynu

Jak wynika ze schematów przedstawionych na rys. 2, różnica temperatury pomiędzy płynami, decydująca o intensywności przepływu ciepła, zmienia się na długości rekuperatora. Przy założeniu liniowych zmian różnicy temperatury pomiędzy płynami w zależności od zmian temperatury jednego z płynów, średnią wartość różnicy temperatury pod wpływem której zachodzi przepływ ciepła w aparacie współ- lub przeciwprądowym, można wyznaczyć przy wykorzystaniu średniej logarytmicznej

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (1)$$

gdzie: ΔT_1 - różnica temperatury pomiędzy płynami w przekroju 1;

ΔT_2 - różnica temperatury pomiędzy płynami w przekroju 2; rys. 2.

W przypadku rekuperatorów o przepływie mieszanym, należy dodatkowo uwzględnić poprawkę ε

$$\Delta T_m = \varepsilon \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (2)$$

W literaturze, np. [1], podawane są tablice lub wykresy służące do wyznaczania wartości poprawek ε dla rekuperatorów o określonej konfiguracji przepływu płynów.

Przy stosunku $\Delta T_1/\Delta T_2 < 2$ średnią wartość różnicy temperatury pomiędzy płynami w rekuperatorze można obliczać z zależności

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}. \quad (3)$$

Podstawowym mechanizmem przepływu ciepła w rekuperatorach jest jego przenikanie, składające się z wnikania ciepła do i od powierzchni przegrody, jak również przewodzenia ciepła przez przegrodę oraz warstwy wydzielonych na jej powierzchni zanieczyszczeń. Równanie ruchu ciepła w tym przypadku można zapisać jako

$$Q = k F \Delta T_m, \quad (4)$$

gdzie: k - współczynnik przenikania ciepła, W/(m²·K);

F - powierzchnia przenikania ciepła, m²;

ΔT_m - średnia różnica temperatury pomiędzy czynnikami, K.

Zależność na współczynnik przenikania ciepła ma postać

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_w} + \frac{s}{\lambda_{\dot{s}\dot{c}}} + \frac{1}{\alpha_z} + \sum \frac{1}{\alpha_o}, \quad (5)$$

gdzie: α_w - współczynnik wnikania ciepła po stronie wewnętrznej, $W/(m^2 \cdot K)$;
 s - grubość przegrody, m;
 $\lambda_{\dot{s}\dot{c}}$ - współczynnik przewodzenia ciepła ściany, $W/(m \cdot K)$;
 α_z - współczynnik wnikania ciepła po stronie zewnętrznej, $W/(m^2 \cdot K)$;
 $\sum \frac{1}{\alpha_o}$ - opór przewodzenia ciepła zanieczyszczeń (osadów) powstających na powierzchni przegrody w trakcie eksploatacji aparatu, $(m^2 \cdot K)/W$.

W literaturze, np. [2,3] znaleźć można wiele równań opisujących proces wnikania ciepła w rekuperatorach.

Przykładowo, dla rekuperatorów jednodrogowych bez przegród, dla przepływu wymuszonego, można polecić zależności:

- dla przepływu laminarnego, $Re < 2100$

$$\text{gdymy: } Re \ Pr \left(\frac{d}{L} \right) > 13 \quad \rightarrow \quad Nu = 1,86 \left(\frac{\eta}{\eta_{\dot{s}\dot{c}}} \right)^{0,14} \left(Re \ Pr \ \frac{d}{L} \right)^{1/3}; \quad (6)$$

$$\text{gdymy: } Re \ Pr \left(\frac{d}{L} \right) < 13 \quad \rightarrow \quad Nu = 0,5 \ Re \ Pr \ \frac{d}{L}. \quad (7)$$

- dla przepływu burzliwego, $Re > 10000$

$$Nu = 0,023 \ Re^{0,8} \ Pr^{0,4}, \quad (8)$$

- dla przepływu przejściowego, $2100 < Re < 10000$. Jedną z wielu propozycji wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w tym zakresie jest równanie

$$\alpha = \psi \ \alpha_{\text{burzliwy}}. \quad (9)$$

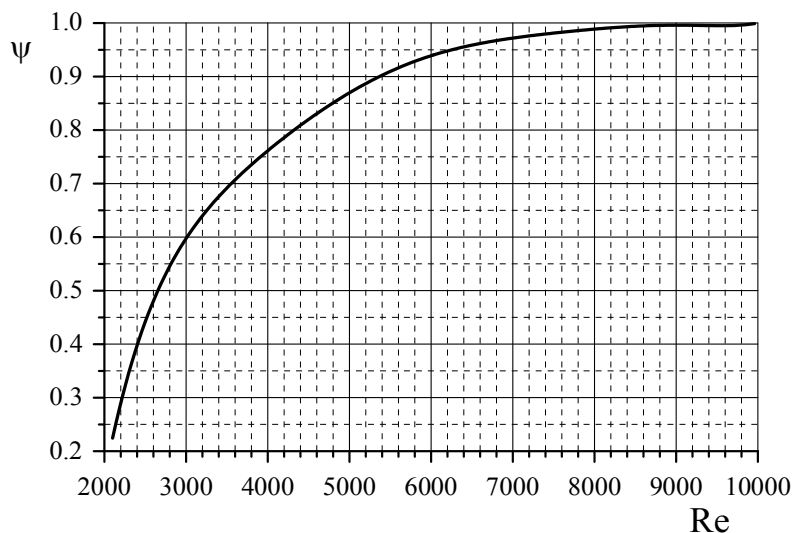
Wykorzystane w równaniach (6) ÷ (9) wielkości to:

$$\text{- liczba Nusselta dla płynu - } \quad Nu = \frac{\alpha \ d}{\lambda}; \quad (10)$$

$$\text{- liczba Reynoldsa dla płynu - } \quad Re = \frac{w \ d \ \rho}{\eta}; \quad (11)$$

$$\text{- liczba Prandtla dla płynu - } \quad Pr = \frac{c_p \ \eta}{\lambda}; \quad (12)$$

- ψ - poprawka dla przepływu przejściowego, wyznaczana na podstawie wykresu z rys. 3;
- α_{burzliwy} - współczynnik wnikania ciepła wyznaczony na podstawie równania (8).



Rys. 3. Wartości poprawki ψ w równaniu (9)

Bilans cieplny rekuperatora można zapisać w ogólnej postaci jako

$$Q = Q_A = Q_B + Q_{\text{str}}, \quad (13)$$

gdzie: Q - moc cieplna aparatu, W;

Q_A - strumień ciepła oddawany przez płyn gorący, W;

Q_B - strumień ciepła przyjmowanego przez płyn zimny, W;

Q_{str} - strumień ciepła traconego przez płaszcz rekuperatora do otoczenia, W.

Wykorzystanie wyników pomiarów temperatury na wlocie i wylocie obydwu płynów przekazujących ciepło, przy znajomości ich ciepła właściwego oraz odpowiednich strumieni przepływu, umożliwia bardziej szczegółowy zapis bilansu

$$G_A c_{pA}(T_{1A} - T_{2A}) - G_B c_{pB}(T_{1B} - T_{2B}) - Q_{\text{str}} = 0, \quad (14)$$

w którym poszczególne wielkości dotyczące płynu gorącego i zimnego oznaczają:

G - strumień masowy, kg/s;

c_p - średnie ciepło właściwe dla danego przedziału temperatur, J/(kg·K);

T - temperatura, K;

A, B - odpowiednio płyn gorący i zimny;

1, 2 - odpowiednio przekrój wlotowy i wylotowy z aparatu, rys. 2.

Przy znajomości pola powierzchni przepływu ciepła, wyznaczyć można gęstość strumienia ciepła przenikającego przez przegrodę (ścianę)

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (15)$$

natomiast współczynnik przenikania ciepła (średni dla całego aparatu) określić należy na podstawie równania (5) przekształconego do postaci

$$k = \frac{Q}{F \Delta T_m} = \frac{q}{\Delta T_m}. \quad (16)$$

Strumień ciepła Q występujący w równaniach (15) i (16) może być wyznaczony na podstawie bilansu cieplnego, przy czym:

- w przypadku gdy płyn gorący przepływa wewnątrz rur $Q = Q_A$;
- w przypadku gdy płyn zimny przepływa wewnątrz rur $Q = Q_B$.

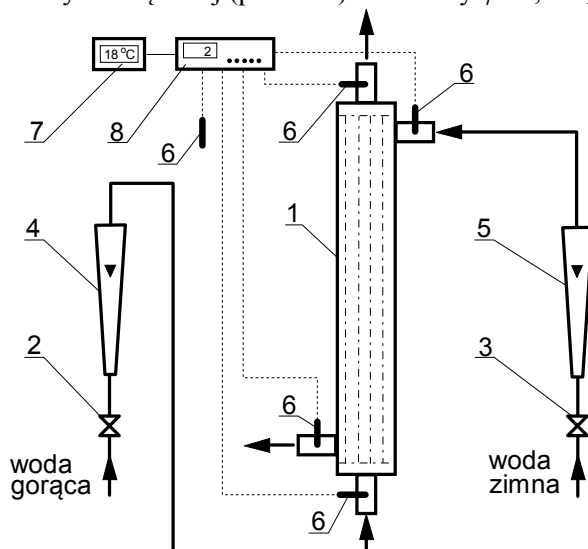
Rozwiązanie konstrukcyjne rekuperatora, zapewniające przepływ płynu gorącego wewnątrz rur, a płynu zimnego w przestrzeni międzyrurowej pomiędzy płaszczem i pęczkiem rur, wpływa między innymi na zmniejszenie strat ciepła od zewnętrznej powierzchni płaszcza do otoczenia. Wartość tych strat można również ograniczyć poprzez stosowanie zewnętrznej izolacji cieplochronnej.

Szczegółowe badania pracy rekuperatorów, oprócz pomiarów cieplnych, mogą obejmować również pomiary hydrauliki przepływu płynów przez obie przestrzenie aparatu; rurową i międzyrurową. Na podstawie tych pomiarów ustala się tzw. charakterystyki hydrauliczne rekuperatora, pozwalające na ocenę wartości oporów przepływu płynów przez rekuperator, a tym samym na określenie zapotrzebowania na energię zużywaną do ich tłoczenia. Znajomość charakterystyk cieplnych i hydraulicznych rekuperatora pozwala na ustalenie wskaźników pracy aparatu niezbędnych dla ekonomicznej oceny ich pracy. Jednym z tych wskaźników jest stosunek mocy cieplnej rekuperatora do zapotrzebowania mocy pomp zasilających aparat. Duża wartość tego wskaźnika wskazuje na efektywną pracę rekuperatora.

Prowadzenie badań rekuperatora od strony hydrauliki przepływu płynów nie jest jednak przedmiotem niniejszego ćwiczenia i dlatego ich przebieg nie zostanie szczegółowo opisany.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Głównym elementem stanowiska jest jednodrogowy płaszczowo-rurowy rekuperator (1). Aparat ten wykonano z kompozytu wiązkowo-rurowego składającego się z rury zewnętrznej (płaszcz) o średnicy $\phi 38,5 \times 2,5$ mm oraz



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego.

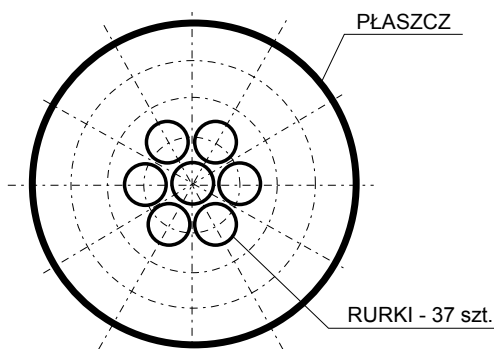
1 - rekuperator, 2,3 - zawory regulacyjne, 4, 5 - rotametry,
6 - termopary, 7 - wyświetlacz cyfrowy, 8 - multiplexer,

zawalcowanej w tej rurze wiązki 37 rur o wymiarze $\phi 4 \times 1$ mm każda. W celu zapewnienia odstępu pomiędzy zawalcowanymi rurami, owinięte są one stalowym drutem dystansowym o odpowiedniej średnicy. Powierzchnia przepływu ciepła wynosi $0,122 \text{ m}^2$, pole przekroju poprzecznego przestrzeni rurowej $0,116 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, a międzyrurowej $0,469 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Płyn grzejny, który stanowi gorąca woda, przepływa wewnątrz układu rur, ogrzewając zimną wodę płynącą równoległe do osi rekuperatora w przestrzeni międzyrurowej. Strumienie przepływających w przeciwnym kierunku płynów regulowane są zaworami (2) i (3), a mierzone rotametrami (4) i (5). Na króćcach wlotowych i wylotowych wody grzejnej i ogrzewanej zamontowano termopary (6) do pomiaru temperatury wody. Termopary te współpracują z wyświetlaczem cyfrowym (7), do którego podłączone są za pośrednictwem multiplexera (8). Zadaniem multiplexera jest automatyczna zmiana punktów pomiaru temperatury wskazywanej przez wyświetlacz (7). Z 32 wejść multiplexera wykorzystane zostało jedynie 5 o numerach $0 \div 4$, przy czym poszczególne wejścia przyrządu odpowiadają

następującym punktom pomiaru temperatury:

- nr 0 - temperatura otoczenia,
- nr 1 - temperatura wody grzejnej na wlocie do aparatu,
- nr 2 - temperatura wody grzejnej na wylocie z aparatu,
- nr 3 - temperatura wody ogrzewanej na wlocie do aparatu,
- nr 4 - temperatura wody ogrzewanej na wylocie z aparatu.

Oba płyny po przejściu przez rekuperator odprowadzane są do kanalizacji. Współśrodkowe rozmieszczenie rur wewnątrz płaszcza pokazano w przekroju na rys. 5.



Rys. 5. Rozmieszczenie rur wewnątrz płaszcza badanego rekuperatora

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia badań cieplnych rekuperatora należy:

- a) włączyć zasilanie wymiennika wodą grzejną i ogrzewaną;
- b) włączyć multiplekser i cyfrowy wyświetlacz temperatury;
- c) w razie potrzeby dokonać korekty wyboru aktywnych kanałów multipleksera (od 0 do 4);
- d) obserwując wskazania rotametu wody ogrzewanej, ustawić zaworem regulacyjnym jej strumień w połowie zakresu pomiarowego;
- e) kontrolując rotametrem wartość strumienia wody grzejnej, ustawić go na początku zakresu pomiarowego;
- f) po ustabilizowaniu się warunków temperaturowych w rekuperatorze, co sygnalizowane jest stałością temperatury wody na wypływie z aparatu, dokonać odczytu temperatury oraz strumieni wody grzejnej i ogrzewanej;
- g) utrzymując strumień wody ogrzewanej na stałym poziomie (w połowie zakresu pomiarowego rotametu), zwiększać strumień wody gorącej wg przyjętego kroku, dokonując każdorazowo odczytu wskazań przyrządów pomiarowych, po ustabilizowaniu się temperatury wody na wypływie;

- h) wyniki każdorazowo notować w tabeli;
 i) po wyczerpaniu się możliwości zmian strumienia wody grzejnej, ustawić jego wartość w połowie zakresu pomiarowego rotametrów i powtórzyć czynności wg pkt. e)÷h) w odniesieniu do wody ogrzewanej;
 j) po zakończeniu pomiarów zamknąć dopływ wody do rekuperatora oraz wyłączyć zasilanie układu do pomiaru temperatury.

Badanie cieplne rekuperatora płaszczowo-rurowego					
Płyny robocze: grzejny - woda, ogrzewany - woda					
Średnica płaszcza: ϕ 38,5x2,5 mm					
Liczba i średnica rur: 37 szt. , ϕ 4x1 mm.					
Temperatura otoczenia: nr 0 °C					
Powierzchnia przepływu ciepła: 0,122 m ²					
Pole przekroju wewnętrznego wiązki rur: $116,2 \cdot 10^{-6}$ m ²					
Pole przekroju przestrzeni międzyrurowej: $416,4 \cdot 10^{-6}$ m ²					
Strumień wody grzejnej	Strumień wody ogrzewanej	Temperatura			
		Woda grzejna, A		Woda ogrzewana, B	
		Wlot - nr 1	Wylot - nr 2	Wlot - nr 3	Wylot - nr 4
l/h	l/h	°C	°C	°C	°C
50	125				
100	125				
....				

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

- Na podstawie równań (13) i (14) wyznaczyć zmierzoną moc cieplną rekuperatora dla różnych strumieni płynów przekazujących ciepło.
- Wyniki obliczeń uzyskanych w pkt.1 przedstawić w formie wykresów $Q=f(V_A)$ przy $V_B = \text{const}$ oraz $Q=f(V_B)$ przy $V_A = \text{const}$.
- Wykorzystując zależność (16), wyznaczyć wartości zmierzonego współczynnika przenikania ciepła dla różnych strumieni płynów.
- Wyniki obliczeń uzyskanych w pkt. 3 przedstawić na wykresach $k=f(V_A)$ przy $V_B = \text{const}$ oraz $k=f(V_B)$ przy $V_A = \text{const}$.
- Na podstawie równań (6÷12), obliczyć w sposób analityczny średnią wartości współczynnika przenikania ciepła dla poszczególnych punktów pomiarowych oraz porównać otrzymane wartości w wynikami eksperymentalnymi otrzymanymi w pkt. 4. Opór cieplny osadu zaczerpnąć z literatury, np. [1].
- Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 186 Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa 1986
- [3] Praca zbiorowa, Pomiary cieplne, Cz. II, WNT W-wa 1993

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Rodzaje aparatów do przekazywania ciepła.
2. Mechanizm przenikania ciepła przez przegrodę (ścianę).
3. Sposoby prowadzenia płynów w rekuperatorach i odpowiadający im rozkład temperatury.
4. Bilans cieplny rekuperatora.
5. Średnie i lokalne wartości współczynnika przenikania ciepła oraz średnie i lokalne różnice temperatury pomiędzy płynami przekazującymi ciepło w rekuperatorze.