

### **Ćwiczenie 3:**

## **BADANIE PRZEPŁYWU CIEPŁA PRZEZ ŚCIANĘ RURY OŻEBROWANEJ**

### **1. CEL ĆWICZENIA**

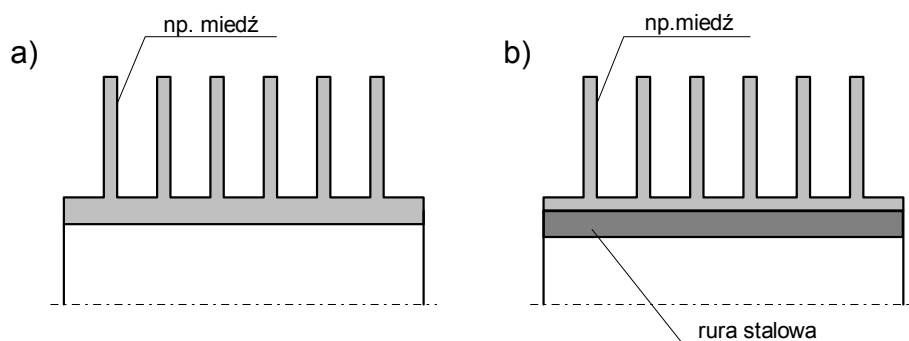
Celem ćwiczenia jest porównanie ilości ciepła oddawanego do otoczenia przez poprzecznie ożebrowaną rurę poziomą z ilością ciepła oddawaną w tych samych warunkach przez rurę gładką.

### **2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE**

Jednym ze sposobów intensyfikacji procesu przenikania ciepła jest rozwinięcie powierzchni przegrody (ściany) rozdzielającej płyny wymieniające ciepło. Rozwinięcie powierzchni realizowane jest poprzez instalowanie tzw. żeber, przy czym mogą być one wykonywane po jednej lub po obu stronach przegrody. Żebra charakteryzują się zróżnicowaną geometrią i technologią wykonania. Wyposaża się w nie zarówno powierzchnie płaskie jak i cylindryczne, przy czym ukierunkowanie żeber powinno być zgodne z kierunkiem ruchu omywającego je czynnika. Z tego względu ożebrowanie wzdłużne wykonuje się na powierzchniach płaskich, we wnętrzu rur oraz na zewnątrz rur pionowych. Użebrowanie poprzeczne stosowane powinno być natomiast w odniesieniu do zewnętrznej powierzchni rur poziomych. Dla zapewnienia poprawności działania żebra ważnym jest zapewnienie dobrego przylegania jego podstawy do powierzchni na której je wykonano. Z tego względu połączenie żebra z przegrodą, której powierzchnia ma być rozwinięta, realizowane jest zwykle na drodze spawania, obróbki plastycznej lub obróbki skrawaniem.

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem wytwarzania wysoko-sprawnych żeber poprzecznych na rurach jest obróbka plastyczna. Polega ona na walcowaniu ich powierzchni zewnętrznej na specjalnie ukształtowanych walcach. W zależności od stosowanej technologii otrzymuje się żebra obwodowe rozmieszczone z daną podziałką lub pojedyncze żebro spiralnie o określonym skoku. Materiał z którego wykonywane są żebra powinien charakteryzować się

dobrą przewodnością cieplną, a także (przy stosowaniu walcowania) być plastyczny. Wymagania te spełniają metale kolorowe (np. miedź lub aluminium) lub ich stopy. Jeżeli rurom ożebrowanym nie są stawiane wysokie wymagania co do odporności korozyjnej i wytrzymałości mechanicznej, to mogą być one wykonane w całości z jednego kawałka metalu kolorowego. Rury takie noszą nazwę monometalowych przewodów ożebrowanych, rys. 1a). Jeżeli płyn płynący wewnątrz rury jest agresywny chemicznie lub wykazuje wysoką temperaturę i ciśnienie, to przewody ożebrowane wykonuje się zwykle jako bimetalowe, rys. 1b). Technologia wykonania takich rur polega na walcowaniu materiału (z którego mają być utworzone żebra) łącznie z umieszczoną w jego wnętrzu rurą stalową o wymaganej wysokiej odporności na warunki pracy. W efekcie otrzymuje się przewód ożebrowany o dobrych właściwościach przewodzenia ciepła, przywalcowany do powierzchni rury stalowej o wysokiej odporności mechanicznej.



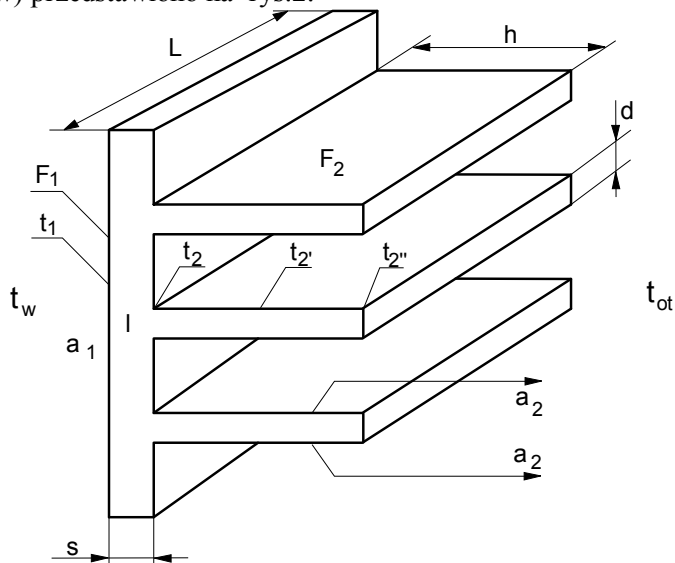
Rys. 1. Rura z ożebrowaniem obwodowym poprzecznie walcowanym  
a) monometalowa, b) bimetalowa

Wielkościami charakteryzującymi poprzeczne ożebrowanie przewodu rurowego są:

- gęstość ożebrowania - określona jako liczba żeber przypadająca na metr długości rury;
- stopień ożebrowania - określający rozwinięcie powierzchni przepływu ciepła, a wyrażający stosunek powierzchni rury ożebrowanej do powierzchni rury pozbawionej żeber.

Analityczny opis ruchu ciepła przez powierzchnię ożebrowaną opiera się na analizie przypadku przenikania ciepła przez płaską ścianę wyposażoną jednostronnie w prostokątne żebra proste. Schemat takiej przegrody (z

zaznaczeniem charakterystycznych dla opisu procesu przenikania ciepła parametrów) przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Schemat płaskiej ściany ożebrowanej

Ogólne równanie opisujące ruch ciepła przez tak ukształtowaną przegrodę można przedstawić w klasycznej postaci

$$Q = k F_2 \Delta T, \quad (1)$$

przy czym, poszczególne wielkości występujące w równaniu (1) wyznaczać należy w sposób następujący.

Strumień ciepła  $Q$  - jest przyjmowany w oparciu o bilans cieplny dla poszczególnych płynów uczestniczących w przepływie ciepła, albo też stanowi wartość wynikową - zależną od geometrii ściany, warunków wnikania ciepła po obu jej stronach i różnicy temperatury pomiędzy płynami.

Współczynnik przenikania ciepła  $k$  - obliczany wg zależności

$$\frac{1}{k} = \frac{\varphi}{\alpha_1} + \frac{\varphi s}{\lambda} + \frac{1}{\eta_z \alpha_2}, \quad (2)$$

w której:

- $\varphi$  - stopień ożebrowania przegrody, równy w przypadku ściany płaskiej stosunkowi pola powierzchni strony ożebrowanej do nieożebrowanej  $F_2/F_1$ . Wyznaczając pole powierzchni strony ożebrowanej należy

uwzględnić powierzchnię boczną i czołową żeber, a także powierzchnie ściany pomiędzy żebrami;

- $\alpha_1$  - współczynnik wnikania ciepła po nieożebrowanej stronie przegrody, zależny od przebiegu procesu wnikania,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $s$  - grubość ściany pozbawionej żeber, m;
- $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła materiału z którego wykonana jest przegroda ożebrowana,  $W/(m \cdot K)$ ;
- $\alpha_2$  - współczynnik wnikania ciepła po ożebrowanej stronie ściany, zależny od przebiegu procesu wnikania po tej stronie przegrody i liczony dla średniej temperatury żebra  $t_2'$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $\eta_z$  - sprawność żebra płaskiego, opisana równaniem

$$\eta_z = \frac{\operatorname{tgh}(m h)}{m h}, \quad (3)$$

$$\text{gdzie: } m = \sqrt{\frac{2\alpha_2}{\lambda \delta}},$$

$\delta$  - grubość żebra, m;

$h$  - wysokość żebra, m.

Żebra poprzeczne, wykonane na zewnętrznej powierzchni cylindrycznej (np. rury), oddają ciepło gorzej niż żebra płaskie, przy tej samej ich powierzchni. Dla żebra okrągłego współczynnik przenikania ciepła występujący w równaniu (1) przybiera postać

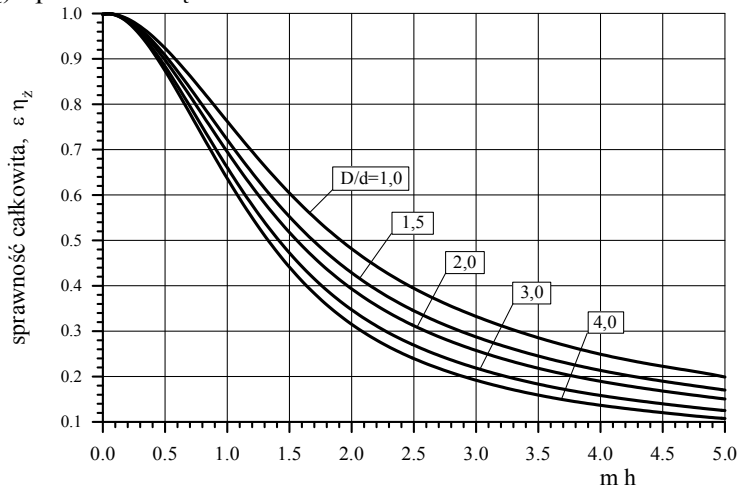
$$\frac{1}{k} = \frac{\varphi}{\alpha_1} + \frac{\varphi s}{\lambda} + \frac{1}{\varepsilon \eta_z \alpha_2}, \quad (4)$$

w której symbol  $\varepsilon$  oznacza poprawkę sprawności żebra poprzecznego. Dla żeber okrągłych poprawka  $\varepsilon$  uzależniona jest od wartości funkcji

$$\varepsilon = f\left(\frac{D}{d}; \frac{1}{\cosh(m h)}\right). \quad (5)$$

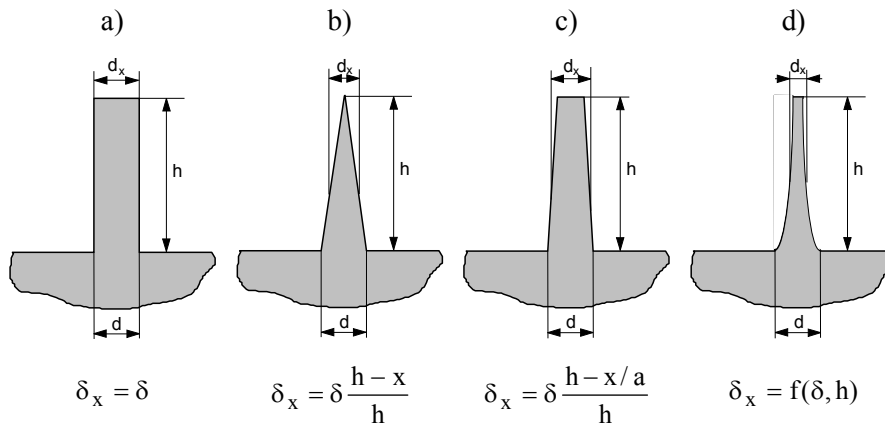
Jej wartość podaje literatura (tabelarycznie lub w formie wykresu), np. [1]. Symbole  $D$  i  $d$  oznaczają zewnętrzną i wewnętrzną średnicę żebra. Ze względu na to, że zarówno sprawność żebra jak i poprawka sprawności są związane z tymi samymi parametrami  $m$  i  $h$ , opracowano również gotowe wykresy przedstawiające całkowitą sprawność żebra o danym kształcie, np. rys. 3. Jak wynika z rys.3, sprawność żebra maleje wraz ze zwiększaniem iloczynu  $m h$  co oznacza, że zastosowanie cienkich i wysokich żeber, wykonanych z materiału o małym współczynniku przewodzenia ciepła i umieszczonych po stronie płynu dobrze odbierającego ciepło, może powodować zmniejszenie a nie zwiększenie

intensywności przepływu ciepła przez przegrodę ożebrowaną. Zasadą jest więc stosowanie żeber po tej stronie ściany, gdzie współczynnik wnikania ciepła przyjmuje małe wartości (np. przy konwekcji naturalnej w gazie), jak również zachowanie racjonalnych wymiarów żebra związanych z jego wysokością (średnicą) i powierzchnią.



Rys. 3. Sprawność całkowita prostokątnego poprzecznego żebra okrągłego

Strumień ciepła przenikającego przez powierzchnię ożebrowaną związana jest również z kształtem przekroju poprzecznego żeber, rys. 4.



Rys. 3. Kształty żeber

a) prostokątne, b) trójkątne, c) trapezowe, d) profilowane

Rozwiązaniem najbardziej korzystnym i jednocześnie technologicznie prostym do wykonania jest zebro trójkątne.

Jeżeli rozpatruje się ruch ciepła pomiędzy ożebrowaną powierzchnią cylindryczną, o znanej temperaturze podstawy żeber, a otoczeniem, to strumień przepływającego ciepła określić można wykorzystując równanie (1), w którym współczynnik  $k$  zredukuje się do postaci

$$k = \varepsilon \eta_z \alpha_{ot}, \quad (6)$$

a zatem

$$Q_z = \varepsilon \eta_z \alpha_{ot,z} F_z \Delta T_z \quad (7)$$

gdzie:  $Q_z$  - strumień przepływającego ciepła, W;

$\varepsilon$  - poprawka sprawności, -;

$\eta_z$  - sprawność zebra, -;

$\alpha_{ot,z}$  - współczynnik wnikania ciepła od powierzchni ożebrowanej dla konwekcji naturalnej w powietrzu atmosferycznym,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$F_z$  - pole powierzchni ożebrowanej. Dla okrągłych żeber o przekroju prostokątnym

$$F_z = \pi L \left( \frac{d(2t - 2\delta - d) + D(2\delta + D)}{2t} \right) \quad (8)$$

gdzie:  $d$  - średnica podstawy zebra, m;

$D$  - średnica zewnętrzna zebra, m;

$L$  - długość ożebrowanej rury, m;

$\delta$  - grubość zebra, m;

$t$  - podziałka rozmieszczenia żeber, m;

$\Delta T_z$  - różnica temperatury pomiędzy powierzchnią ożebrowaną i otoczeniem, K.

Strumień ciepła płynący do otoczenia w tych samych warunkach temperaturowych, przez tę samą powierzchnię cylindryczną pozbawioną jednak ożebrowania

$$Q_r = \alpha_{ot,r} F_r \Delta T \quad (9)$$

gdzie:  $Q_r$  - strumień przepływającego ciepła, W

$\alpha_{ot,r}$  - współczynnik wnikania ciepła dla powierzchni nieożebrowanej dla konwekcji naturalnej w powietrzu atmosferycznym,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$F_r$  - pole powierzchni nieożebrowanej. Dla rury gładkiej

$$F_r = \pi d L \quad (10)$$

gdzie:  $d$  - zewnętrzna średnica rury, m;  
 $L$  - długość rury, m.

$\Delta T_r$  - różnica temperatury pomiędzy powierzchnią nieożebrowaną i otoczeniem, K.

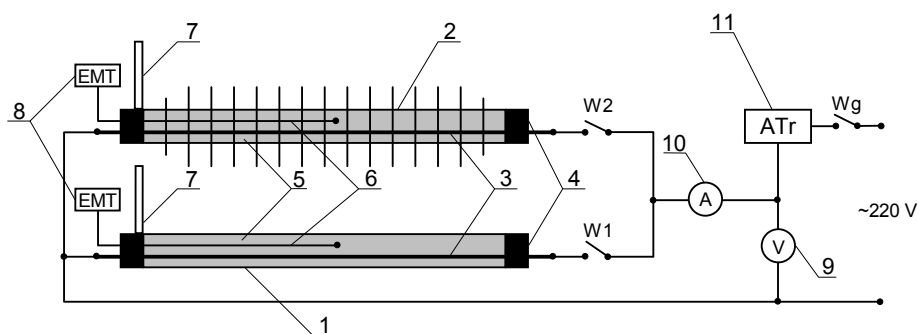
Stosunek wartości strumieni ciepła opisywanych równaniami (7) i (9) przedstawia poziom intensyfikacji przepływu ciepła poprzez stosowanie ożebrowania

$$\delta Q = \frac{Q_z}{Q_r} = \frac{\varepsilon \eta_z \alpha_{ot,z} F_z \Delta T_z}{\alpha_{ot,r} F_r \Delta T_r} \quad (11)$$

Parametrem najbardziej wpływającym na wartość stosunku  $\delta Q$  jest wartość iloczynu  $\varepsilon \eta_z$ , dlatego też w praktyce konstrukcyjnej dąży się do tego, ażeby jego wartość jak najbardziej zbliżona była do jedności.

### 3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska pomiarowego, służącego do oceny wpływu ożebrowania poprzecznego rury poziomej na strumień ciepła oddawanego przez nią do otoczenia, przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Schemat stanowiska pomiarowego

1 - miedziana rura gładka, 2 - bimetalowa rura ożebrowana, 3 - grzałki elektryczne, 4 - zaślepki tekstolitowe, 5 - olej maszynowy, 6 - termopary Ni-CrNi, 7- szklane rurki buforowe, 8 - elektroniczne mierniki temperatury, 9 - woltomierz, 10 - amperomierz, 11- autotransformator, W - wyłączniki

Głównymi jego elementami są dwie poziome rury grzewcze (1) i (2) wypełnione olejem maszynowym (5). Jedną z rur stanowi miedziana rura gładka, drugą

bimetalowa rura z zewnętrznym ożebrowaniem śrubowym. Charakterystykę konstrukcyjną obu rur podano w tabeli 1. Do wnętrza rur, poprzez tekstolitowe zaślepki (4), wprowadzone są grzałki elektryczne (3). Temperatura oleju kontrolowana jest termoparami (6). Wobec małej średnicy wewnętrznej rur i braku przepływu oleju, w warunkach ustalonych temperatura oleju wyrażać może (z wystarczającym przybliżeniem) temperaturę samych rur. Ze względu na rozszerzalność termiczną oleju, w zaślepkach tekstolitowych umieszczono szklane rurki (7) w których gromadzi się zwiększona objętość oleju.

Tabela 1

Charakterystyka wymiarów rur grzewczych

Wymiar	Rura nieożebrowana (miedź)	Rura ożebrowana (miedź + aluminium)
Długość	0,5 m	0,5m
Średnica rury	25mm	25mm
Średnica żeber	-	50mm
Podziałka rozmieszczenia żeber	-	6mm
Grubość żeber	-	3mm
Pole powierzchni przepływu ciepła	0,078m <sup>2</sup>	0,583m <sup>2</sup>

Moc grzałek (włączanych niezależnie włącznikami W1 i W2) regulowana jest autotransformatorem (11), a mierzona układem mierników woltomierz-amperomierz (9) i (10). Istota pomiaru strumienia ciepła oddawanego do otoczenia przez powierzchnie rur polega na określeniu mocy pobieranej przez każdą z grzałek dla utrzymania temperatury oleju na stałym poziomie. Wyznaczany w ten sposób strumień ciepła oddawanego do otoczenia jest równy

$$Q = P = U I \Big|_{\text{dla } T_{\text{ol}} = \text{const}}$$

(12)

gdzie: P - moc elektryczna pobierana przez daną grzałkę, W;

U - wskazanie woltomierza, V;

I - wskazanie amperomierza, A;

T<sub>ol</sub> - temperatura oleju we wnętrzu danej rury.

Dodatkowym wyposażeniem stanowiska pomiarowego jest tablica poglądowa z eksponatami rur ożebrowanych o różnej konstrukcji.

#### 4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów należy:

- a) włączyć zasilanie autotransformatora;
- b) włączyć czujniki temperatury;



- c) sprawdzić, wg oznaczeń na stanowisku, sposób podłączenia woltomierza i amperomierza, ustawić ich odpowiednie zakresy pomiarowe i włączyć indywidualne zasilanie mierników;
- d) włączyć dopływ prądu do grzałki w rurze nieożebrowanej, a wyłączyć do grzałki w rurze ożebrowanej;
- e) regulując napięcie suwakiem autotransformatora doprowadzić olej w rurze do stałej temperatury (ok. 60°C);
- f) po ustaleniu się warunków przepływu ciepła, co przy stałości temperatury oleju objawia się brakiem zmian prądu i napięcia zasilającego grzałkę, dokonać odczytu wskazań mierników;
- g) powtórzyć pomiary wg pkt. f) dla temperatury oleju 70, 80 i 90 °C;
- h) wyłączyć zasilanie grzałki w rurze nieożebrowanej, a włączyć w ożebrowanej;
- i) powtórzyć czynności wg pkt. e) ÷ g);
- j) po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie autotransformatora, mierników elektrycznych prądu napięcia i temperatury;
- k) w trakcie trwania pomiarów kontrolować poziom oleju w rurkach buforowych;
- l) wyniki pomiarów notować w tabeli.

**Uwaga: Wysoka temperatura powierzchni rur w trakcie trwania ćwiczenia grozi poparzeniem.**

<b>Efektywność przepływu ciepła przez powierzchnię ożebrowaną</b>						
Pole przepływu ciepła rury gładkiej: 0,078m <sup>2</sup>						
Pole przepływu ciepła rury ożebrowanej: 0,583 m <sup>3</sup>						
Rodzaj żeber: aluminiowe śrubowe żebra prostokątne						
Temperatura otoczenia: ..... °C						
Temp. oleju t	Rura gładka			Rura ożebrowana		
	Napięcie U	Prąd I	Moc P=U·I	Napięcie U	Prąd I	Moc P=U·I
°C	V	A	W	V	A	W
60						
70						
80						
90						

## 5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Określić wartości stosunku strumienia ciepła traconego przez powierzchnię ożebrowaną do strumienia ciepła traconego przez rurę pozbawioną żeber, przy tej samej temperaturze oleju wewnątrz rur.
2. Przedstawić wyniki obliczeń wg pkt.1. w postaci histogramu.
3. Oszacować wartość poprawki i sprawność badanego żebra okrągłego, wg zależności teoretycznych (3) i (5);
4. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

## **6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA**

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO, nr 178, Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa 1986
- [3] MADEJSKI J.: Teoria wymiany ciepła, Wydawnictwo Uczelniane PSz, Szczecin 1998

## **7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH**

1. Sposoby intensyfikacji przepływu ciepła w rekuperatorach.
2. Cel stosowania powierzchni ożebrowanych i zadanie żeber.
3. Rodzaje żeber i technologia ich wykonywania.
4. Ocena skuteczności działania żebra.
5. Zasady i wytyczne stosowania żeber.