

Ćwiczenie 2:

WYZNACZANIE STRAT CIEPŁA PRZEWODÓW IZOLOWANYCH

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest porównanie wartości strat ciepła niez izolowanego przewodu rurowego ze stratami ciepła przewodu pokrytego warstwą izolacji ciepłochronnej.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Wysoka temperatura powierzchni niektórych aparatów i rurociągów, może być powodem dużych strat ciepła do otoczenia. Na wartość tych strat można wpływać stosując izolację ciepłochronną. Zadanie izolacji polega na wytworzeniu odpowiedniego oporu cieplnego dla przepływu ciepła przez izolowaną ścianę. Wykorzystuje się w tym przypadku złą przewodność cieplną materiałów izolacyjnych, wynikającą przeważnie z ich dużej porowatości. Na ogół, izolowanie powierzchni zmniejsza stratę ciepła do otoczenia o (80÷90%) w stosunku do powierzchni niez izolowanych. Oczywiście nie izoluje się takich elementów powierzchni, gdzie zmniejszenie strumienia ciepła nie daje dodatnich skutków ekonomicznych; np. rurociąg kierujący gorący płyn do atmosfery itp., chyba, że decydują o takiej potrzebie inne powody. Izolacja ma również znaczenie dla ochrony obsługi przed nadmierną temperaturą pomieszczeń w okresie letnim oraz przed bezpośrednim oparzeniem. Duże znaczenie ma izolacja cieplna urządzeń technologicznych. Może ona decydować o prawidłowości przebiegu procesu technologicznego, o jakości i ilości produkcji oraz o ekonomii procesów produkcyjnych. Poza tym izolacja zapobiega korozji i zagęszczaniu, a nawet zamarzaniu cieczy w rurociągach w okresie zimowym. W niektórych urządzeniach (np. kulowych młynach węglowych) izolacja cieplna poprawia warunki izolacji akustycznej.

W przemyśle najczęściej izoluje się rurociągi przesyłowe cieczy, pary lub gazów oraz urządzenia do przepływu ciepła takie jak: aparaty wyparne, zagrzewacze, niektóre reaktory, itp. Efekty wynikające z zastosowania izolacji

cieplnej zależą od rodzaju użytych na nią materiałów, jakości wykonania izolacji oraz prawidłowej jej eksploatacji.

Właściwości materiałów izolacyjnych szeroko podaje literatura, np. [1]. Od materiałów izolacyjnych wymaga się następujących cech:

- małego współczynnika przewodzenia ciepła, który zależy nie tylko od rodzaju materiału lub konstrukcji izolacji, lecz także od stopnia ubicia, wysuszenia izolatora cieplnego, itp.;
- dużej temperatury zapłonu. W miarę zwiększania temperatury nie tylko zwiększa się współczynnik przewodzenia ciepła izolacji, ale przekroczenie pewnej dopuszczalnej temperatury, może grozić jej zapaleniem się;
- lekkości, ponieważ duża gęstość materiału izolacyjnego może spowodować nadmierne obciążenie rurociągów, ich zawieszonych oraz konstrukcji nośnej, a przy rurociągach pionowych duży ciężar własny może wywierać nadmierny nacisk na dolne warstwy izolacji, wobec czego może być przekroczona dopuszczalna wytrzymałość materiału na ściskanie;
- dużej wytrzymałości mechanicznej;
- małej nasiąkliwości, bowiem zawilgocenie izolacji wpływa na zwiększenie jej przewodności cieplnej, a także może spowodować zniszczenie samej izolacji, rurociągu i podpór;
- niskiej ceny materiału oraz niskiego kosztu wykonania i eksploatacji (konserwacji) izolacji.

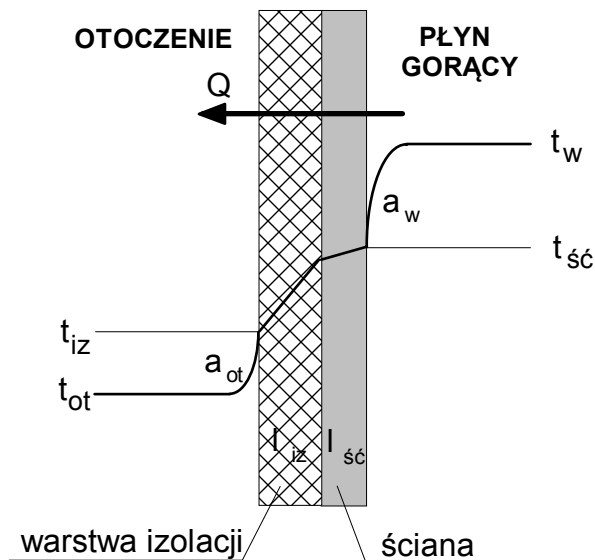
Materiały izolacyjne znajdują zastosowanie w następujących postaciach:

- izolacja segmentowa w postaci kształtek;
- luźny materiał do napełniania w postaci proszku, waty, itp.,;
- izolacja opaskowa lub nawojowa;
- izolacja plastyczna zalewana lub natryskowa;
- izolacja ekranowa.

Grubość warstwy izolacyjnej powinna być tak dobrana, ażeby odpowiadała wielu warunkom, do których między innymi należą:

- największa dopuszczalna wartość strat cieplnych przypadająca na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Warunek ten może być sformułowany również nieco inaczej. Można określić dopuszczalne maksymalne obniżenie temperatury płynu grzejącego dla danej długości przewodu albo dopuszczalną ilość pary ulegającej skropleniu podczas przepływu przez dany przewód. W tym przypadku wyznaczenie wymaganej grubości izolacji poprzedzają obliczenia dopuszczalnych strat ciepła, (bilans ciepła);
- dopuszczalna temperatura powierzchni przewodu izolowanego oraz zewnętrznej powierzchni izolacji;
- zabezpieczenie cieczy przepływającej przewodem przed zamarznięciem.

Obliczanie wymaganej dla uzyskania założonych strat ciepła grubości izolacji związane jest z analizą zjawiska przenikania ciepła przez przegrodę dwu- lub wielowarstwową (jeżeli stosowane ma być kilka warstw izolacji z różnych materiałów). Rozkład temperatury dla przenikania ciepła przez płaską przegrodę dwuwarstwową przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Rozkład temperatury przy przenikaniu ciepła przez płaską zaizolowaną powierzchnię

Równania opisujące zjawisko przenikania ciepła przez przegrodę płaską wielowarstwową można zapisać w następującej postaci:

$$\frac{Q}{F} = q = \alpha_w (t_w - t_{\acute{s}c}), \quad (1)$$

$$\frac{Q}{F} = q = \frac{t_w - t_{iz}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

$$\frac{Q}{F} = q = \alpha_{ot} (t_{iz} - t_o), \quad (3)$$

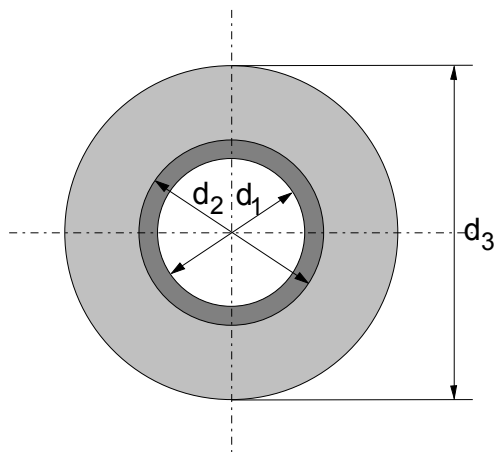
w których: Q - strumień ciepła przenikającego (założony lub wyznaczony z bilansu cieplnego płynu gorącego), W;
 F - pole powierzchni izolowanej, m^2 ;
 q - gęstość strumienia ciepła traconego, W/m^2 ;

- α_w - współczynnik wnikania ciepła po stronie płynu gorącego (zwykle konwekcja wymuszona), $W/(m^2 \cdot K)$;
 α_{ot} - współczynnik wnikania ciepła po stronie zewnętrznej przegrody (zwykle konwekcja naturalna), $W/(m^2 \cdot K)$;
 $t_w, t_{ot}, t_{iz}, t_{śc}$ - temperatura wg oznaczeń na rys. 1.

Analityczne wyznaczenie wymaganej grubości warstwy izolacji na podstawie powyższych równań jest kłopotliwe ze względu na ścisły związek pomiędzy temperaturą zewnętrzną powierzchni izolacji t_{iz} a poszukiwaną grubością tej warstwy. Poza tym, od temperatury powierzchni zewnętrznej izolacji (przy konwekcji naturalnej), jest zależny współczynnik wnikania ciepła α_{ot} . W praktyce, tok obliczeń s_{iz} ma charakter iteracyjny i polega na zakładaniu, a następnie sprawdzeniu, przyjętej temperatury powierzchni zewnętrznej. Szczegółowy tok postępowania można znaleźć w literaturze, np. praca [2].

Nakładanie grubych warstw izolacji zmniejsza w sposób istotny straty ciepła, obniżając koszt jednostkowy zapotrzebowania na ciepło, a więc koszt zużycia paliw stałych i energii; równocześnie zwiększanie grubości izolacji zwiększa koszty inwestycyjne. Grubość izolacji cieplnej danego elementu powinno się tak dobrać, ażeby osiągnąć minimum sumarycznych kosztów ciepła i inwestycji.

Dla przewodów rurowych, pokrytych warstwą izolacji, straty ciepłne nie zmniejszają się proporcjonalnie do jej grubości. Na rys. 2 oznaczono przez d_1 wewnętrzną średnicę przewodu izolowanego, przez d_2 średnicę zewnętrzną tego przewodu, a tym samym wewnętrzną średnicę izolacji, a przez d_3 zewnętrzną średnicę izolacji.



Rys. 2. Charakterystyczne wymiary zaizolowanego przewodu rurowego

Opór cieplny cylindrycznej warstwy izolacji może być ujęty zależnością

$$R_{iz} = \frac{1}{2\pi\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2}, \quad \text{m}\cdot\text{K}/\text{W} \quad (4)$$

Stratę ciepła przypadającą na jednostkę długości rurociągu w jednostce czasu można wyrazić równaniem

$$\frac{dQ}{dL} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_w d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\acute{s}c}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{ot} d_3}} (t_w - t_{ot}). \quad (5)$$

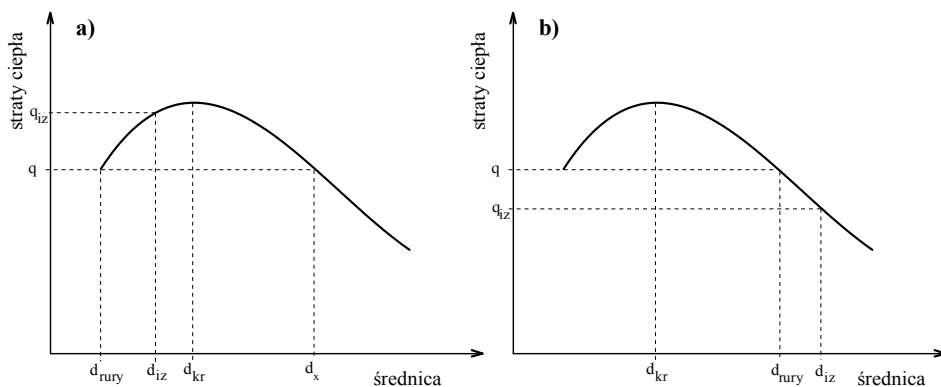
Zwiększenie grubości warstwy izolacji (wzrost d_3), jest związane ze zwiększeniem d_3/d_2 oraz ze zmniejszaniem wyrazu $1/(\alpha_{ot} d_3)$. Można stąd wysunąć przypuszczenie, że funkcja (5) ma tzw. krytyczną (ekstremalną) wartość d_{kr} , przy której straty ciepła są największe. Pochodna mianownika w równaniu (5) względem średnicy d_3 jest

$$\frac{d\left(\frac{1}{\alpha_w d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\acute{s}c}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{ot} d_3}\right)}{d(d_3)} = 0, \quad (6)$$

a stąd krytyczna (ekstremalna) średnica izolacji

$$d_3 = d_{kr} = \frac{2\lambda_{iz}}{\alpha_{ot}}. \quad (7)$$

Straty ciepłe rurociągu w zależności od średnicy zewnętrznej warstwy izolacji przedstawiono na rys. 3.

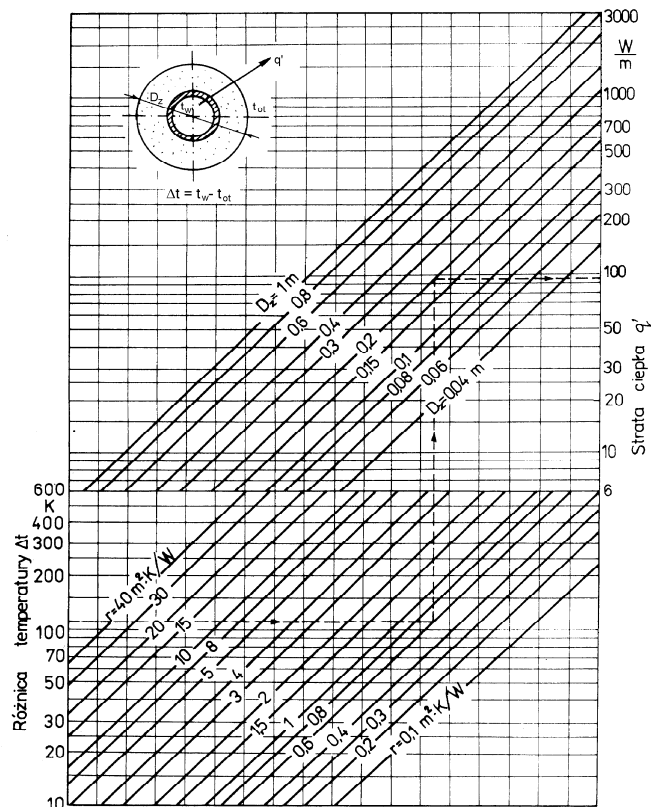


Rys. 3. Straty ciepła w zależności od średnicy izolowanej rury
a) poniżej średnicy krytycznej, b) powyżej średnicy krytycznej

Przebieg krzywej wskazuje, że początkowo straty ciepłe zwiększają się ze zwiększaniem d_3 i osiągają maksimum dla wartości d_{kr} . W przypadku gdy średnica rury jest mniejsza od krytycznej (rys.3.a), stosowanie izolacji powoduje zwiększenie strat ciepła a nie ich zmniejszenie. Zmniejszenie strat ciepła w stosunku do rury nieizolowanej, można w tym przypadku osiągnąć dopiero dla bardzo dużej grubości warstwy izolacyjnej; średnica większa od d_x . Jak wynika z postaci równania (7) duża średnica krytyczna izolacji może jednak pojawić się głównie w przypadku stosowania materiałów izolacyjnych o dużym współczynniku przewodzenia ciepła (np. zawilgoconych), stosowanych w otoczeniu o słabych warunkach przejmowania ciepła.

Jeżeli natomiast średnica rury jest większa od krytycznej, (rys. 3.b)), stosowanie izolacji zawsze wpływa na zmniejszenie strat ciepła.

W praktyce, do wyznaczania strat ciepła powierzchni izolowanych wykorzystywane są specjalne, podawane w literaturze nomogramy, np. rys. 4.



$$r = D_z \left[\frac{1}{\alpha_w D_1} + \frac{1}{2 \lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \dots + \frac{1}{2 \lambda_n} \ln \frac{D_z}{D_n} \right]$$

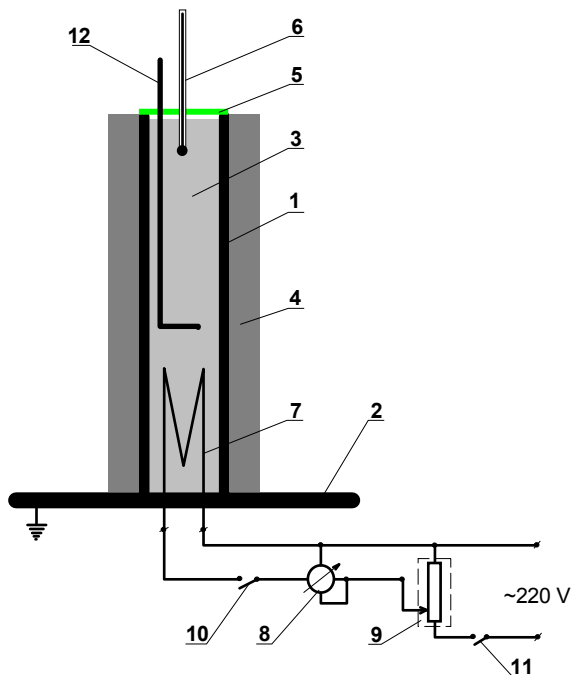
Rys. 3. Nomogram do wyznaczania strat ciepła izolowanych przewodów rurowych

Na rys. 4 przedstawiono nomogram służący do wyznaczania strat ciepła zaizolowanego przewodu rurowego. Do jego wykorzystania potrzebna jest znajomość różnicy temperatury ΔT pomiędzy płynem w przewodzie i otoczeniem, opór cieplny przegrody r (także wielowarstwowej) oraz zewnętrzna średnica warstwy izolacji. Aczkolwiek, nomogram przedstawiony na rys. 4, służy do określania wielkości strat ciepła przewodów pokrytych już warstwą izolacji o założonej grubości, to jednak kilkakrotne założenie średnicy zewnętrznej izolacji pozwolić może na wyznaczenie wymaganej jej grubości dla uzyskania założonych (na podstawie bilansu cieplnego płynu płynącego wewnątrz rury) dopuszczalnych strat ciepła.

W literaturze, np. [1,2], znaleźć można również nomogramy dotyczące nieizolowanych i izolowanych powierzchni o innym kształcie, w tym elementów armatury: zaworów, kołnierzy, króćców itp.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Schemat stanowiska do wyznaczania strat ciepła przewodów rurowych przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Stanowisko do badania strat ciepła

1 - rura stalowa $\phi 57 \times 2$ mm, 2 - płyta nośna, 3 - olej, 4 - warstwa izolacji cieplochronnej, 5 - pokrywa, 6 - termometr, 7 - grzałka, 8 - watomierz, 9 - autotransformator, 10,11 - wyłączniki zasilania, 12 - mieszadło.

Głównym elementem jest stalowa rura (1) o średnicy zewnętrznej 57 mm i długości 0,5 m, zamontowana pionowo na płycie (2). Rura wypełniona jest olejem maszynowym (3) i zamknięta od góry pokrywą z tworzywa sztucznego (5) w której zamontowano termometr (6) i mieszadło (12). W trakcie prowadzenia pomiarów strat ciepła, na rurę nakładane są różne warstwy izolacji cieplnej. Ich wykaz przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Charakterystyka warstw izolacji cieplnych wykorzystywanych w ćwiczeniu

Rodzaj izolacji	Średnica wewnętrzna	Średnica zewnętrzna	Współczynnik przewodzenia ciepła
Gips + tkanina bawełniana	57 mm	62 mm	0,396 W/(m·K)
	57 mm	74 mm	
	57 mm	78 mm	
	57 mm	85 mm	
	57 mm	100 mm	
Pianka poliuretanowa	57 mm	76 mm	0,027 W/(m·K)
	57 mm	105 mm	

We wnętrzu rury umieszczono grzałkę elektryczną (7) ogrzewającą olej. Moc grzałki regulowana jest (poprzez zmianę napięcia zasilania) autotransformatorem (9), a mierzona watomierzem (8). Istota pomiaru strat ciepła przewodzenia rurowego polega na podgrzaniu zawartego w rurze oleju do założonej temperatury t_x i takim dalszym sterowaniu mocą grzałki aby temperatura oleju nie ulegała zmianie. Wartość mocy odczytana na watomierzu odpowiada mocy cieplnej traconej przez olej do otoczenia. Wykorzystanie izolacji o różnej średnicy zewnętrznej pozwala na wyznaczenie zależności pomiędzy stratami ciepła a grubością materiału izolacyjnego.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów strat ciepła przewodzenia rurowego, należy wykonać następujące czynności:

- a) włączyć zasilanie i regulując autotransformatorem moc grzałki podgrzać olej w nieizolowanej cieplnie rurze do temperatury 90°C. W celu wyrównania

- temperatury oleju w całej jego objętości, co pewien czas mieszać olej mieszadłem;
- odczekać ok. 15 min (w celu stabilizacji termicznej układu), kontrolując jednocześnie stałość temperatury oleju i dokonując ewentualnych jej korekt poprzez regulację mocy grzania;
 - odczytać na watomierzu i zanotować w tabeli moc cieplną traconą przez niezaizolowaną rurę;
 - nałożyć na rurę warstwę izolacji i powtórzyć pomiar mocy traconej, przy niezminionej wartości temperatury oleju. Wyniki zanotować w tabeli;
 - pomiary powtórzyć dla warstw izolacji o różnej grubości; każdorazowo przy tej samej, stałej temperaturze oleju;

Uwaga ! W trakcie pomiarów zwrócić szczególną uwagę na wysoką temperaturę powierzchni rury, która grozi poparzeniem.

- po zakończeniu pomiarów wyłączyć zasilanie grzałki.

Wyznaczanie strat ciepła przewodzenia rurowego			
Temperatura otoczenia: °C			
Temperatura oleju: °C			
Współczynnik przewodzenia ciepła izolacji gipsowej: 0,396 W/ (m · K)			
Współczynnik przewodzenia ciepła izolacji poliuretanowej: 0,027 W/ (m · K)			
Współczynnik przewodzenia ciepła ścianki przewodzenia rurowego: 45 W/ (m · K)			
Rodzaj izolacji	Średnica zewnętrzna	Grubość	Zmierzone straty ciepła
-	mm	mm	W
Rura niezaizolowana	57	2	
Izolacja gipsowa	62	2,5	
	74	8,5	
	78	10,5	
	85	14	
Izolacja poliuretanowa	100	21,5	
	76	9,5	
	105	24	

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW POMIARÓW

- Dla rury niezaizolowanej - określić gęstość strumienia ciepła traconego do otoczenia przez jednostkę długości rury.

2. Dla izolacji gipsowych - wykreślić zależność pomiędzy zmierzonymi wartościami strat ciepła a grubością izolacji.
3. Dla izolacji poliuretanowych - określić, na podstawie uzyskanych pomiarów, skuteczność ograniczania strat ciepła w stosunku do powierzchni niezaizolowanej.
4. Dla wszystkich uzyskanych wyników pomiarów - porównać wartości zmierzonych strat ciepła z wartościami wyznaczonymi na podstawie nomogramu z rys. 4.
5. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa, 1986
- [3] SERWIŃSKI M.: Zasady inżynierii chemicznej, WNT W-wa, 1982

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Przenikanie ciepła przez przegrodę wielowarstwową.
2. Izolacja cieplna oraz cele jej stosowania.
3. Wymagania stawiane materiałom ciepło- i zimnochronnym.
4. Krytyczna średnica izolacji cieplnej przewodu rurowego.
5. Warunki konieczne dla poprawnego działania izolacji cieplnej.