

Wymiana ciepła podczas skraplania (kondensacji)

1. Wstęp

Do skraplania dochodzi wtedy, gdy para zostaje ochłodzona do temperatury niższej od temperatury nasycenia (skraplania, wrzenia). Ma to najczęściej miejsce, gdy para styka się z powierzchnią o temperaturze niższej od temperatury nasycenia.

Ze skraplaniem (kondensacją) mamy do czynienia m.in.: w skraplaczach siłowni turboparowych, w skraplaczach chłodziarek parowych, w parowych podgrzewaczach cieczy i gazów oraz w wielu procesach technologicznych, np. w przemyśle chemicznym.

Współczynnik wnikania ciepła podczas skraplania może być nawet 1000 razy większy niż podczas wnikania ciepła na granicy płynu jednofazowego i ścianki.

Występują dwa zasadnicze rodzaje skraplania: skraplanie kropłowe oraz skraplanie błonkowe.

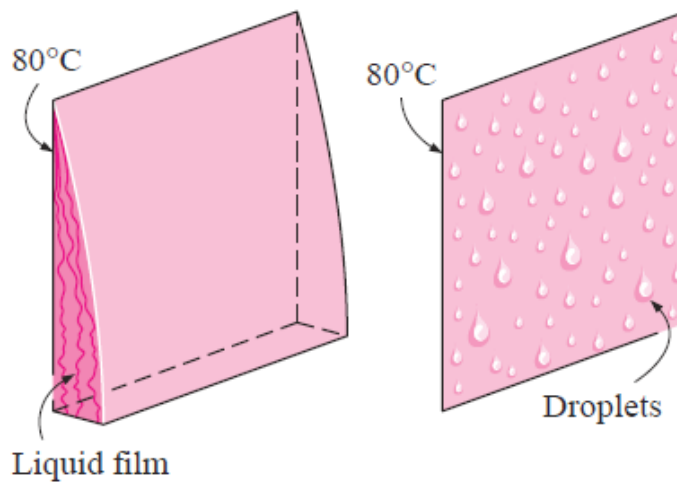
Skraplanie kropłowe występuje wtedy, gdy skropliny osadzające się na powierzchni chłodzącej jej nie zwilżają.



Rys. 1-1. Skraplanie kropłowe na pionowej powierzchni.

Gdy skropliny zwilżają tę powierzchnię, mamy do czynienia ze skraplaniem błonkowym. Skraplanie błonkowe występuje

znacznie częściej niż skraplanie kroplowe. Podczas skraplania błonkowego powierzchnia chłodząca pokryta jest ciągłą warstwą cieczy, która stanowi główny opór cieplny w procesie skraplania. Współczynnik wnikania ciepła podczas skraplania kroplowego jest znacznie większy niż podczas skraplania błonkowego.



Rys. 1-2. Porównanie skraplania błonkowego (lewa strona) i kroplowego (prawa strona).

2. Wymiana ciepła podczas skraplania błonkowego

Współczynnik wnikania ciepła podczas skraplania błonowego silnie zależy od rodzaju przepływu skroplin (laminarny, burzliwy). Kryterium rodzaju przepływu jest liczba *Reynoldsa*, którą można obliczyć z zależności

$$Re = \frac{wD_h}{\nu_l} \quad (2.1)$$

gdzie:

w - średnia prędkość skroplin, m/s

$D_h = \frac{4A_c}{\Omega}$ - średnica hydrauliczna przepływającego kondensatu,

m

ν - współczynnik lepkości kinematycznej skroplin dla ich średniej temperatury T_m , m^2/s

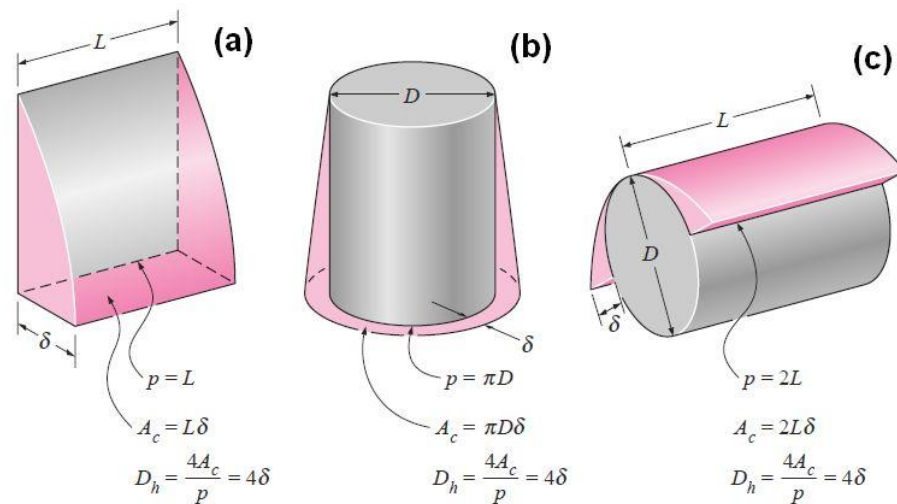
Podczas obliczania współczynnika wnikania ciepła, większość wzorów obliczeniowych wymaga podstawienia właściwości fizycznych skroplin wyznaczonych dla średniej temperatury skroplin

$$T_m = \frac{T_w + T_s}{2} \quad (2.2)$$

gdzie:

T_w - temperatura ścianki,

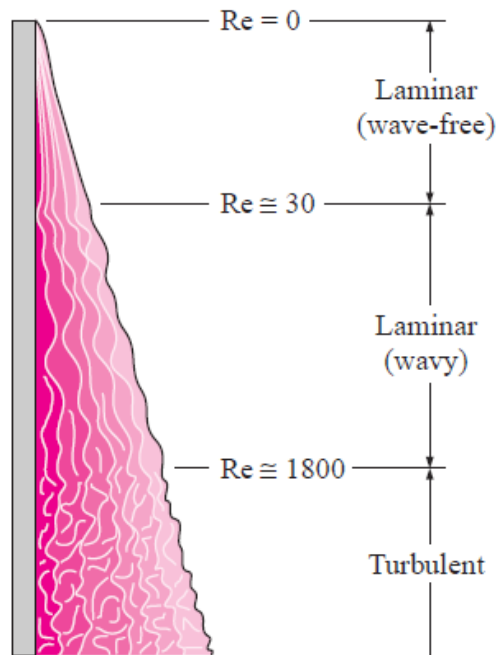
T_s - temperatura nasycenia (skraplania).



Rys. 2-1. Obwód zwilżony p , przekrój poprzeczny kondensatu A_c oraz średnica hydrauliczna D_h . (a) płyta pionowa, (b) pionowy walec, (c) poziomy walec. ($p = \Omega$)

Podczas kondensacji błonkowej na pionowej płycie lub rurze, grubość błonki skroplin wzrasta w kierunku przepływu, a tym samym wzrasta wartość liczby *Reynoldsa* (D_h jest proporcjonalne do grubości błonki). Dla liczb *Reynoldsa* poniżej 30 przepływ skroplin jest laminarny, a w poruszających się warstwach skroplin nie występują zafalowania. Dla $450 < Re < 1800$

występuje zafalowanie skroplin i ich ruch jest nazywany falowo-laminarnym. Gdy $Re > 1800$, ruch skroplin jest burzliwy.



Rys. 2-2. Zakresy rodzajów ruchu skroplin podczas kondensacji błonkowej na pionowej płycie.

Podczas skraplania często dochodzi do przechłodzenia skroplin, tzn. do obniżenia ich temperatury poniżej temperatury skraplania. W związku z tym, ciepło oddawane przez jednostkę ilości skraplającej się pary jest większe od ciepła skraplania (parowania). Uwzględniane jest to w obliczeniach przez wprowadzenie równoważnego ciepła skraplania

$$r_e = r + 0,68c_{pl}(T_s - T_w) \quad [J/kg] \quad (2.3)$$

gdzie c_{pl} jest ciepłem właściwym cieczy dla średniej temperatury skroplin, T_m (wzór (2.2)).

Jeżeli dodatkowo para dopływająca do skraplacza jest przegrzana, to równoważne ciepło skraplania jest równe

$$r_e = r + 0,68c_{pl}(T_s - T_w) + c_{pv}(T_p - T_s) \quad (2.4)$$

gdzie:

T_p - temperatura pary przegrzanej,
 c_{pv} - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu pary dla temperatury średniej $(T_p + T_s)/2$.

Kondensacja błonkowa na pionowej płycie przy laminarnym przepływie skroplin

Teoretyczną zależność na średni współczynnik wnikania ciepła dla kondensacji błonkowej ($Re < 30$) na pionowej płycie, w zakresie ruchu laminarnego, wyprowadził *Nusselt* (1916 r.)

$$\alpha = 0,943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) r \lambda_l^3}{\mu_l (T_s - T_w) L} \right]^{1/4} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.5)$$

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

ρ_l - gęstość cieczy, kg/m^3

ρ_v - gęstość pary nasyconej suchej, kg/m^3

r – ciepło parowania dla temperatury T_s , J/kg

λ_l - współczynnik przewodzenia ciepła dla cieczy, $W/(m \cdot K)$

μ_l - współczynnik lepkości dynamicznej cieczy, $kg/(m \cdot s)$

T_s - temperatura nasycenia (skraplania),

T_w - temperatura ścianki,

L – wysokość płyty, m

Nusselt przyjął następujące założenia podczas wyprowadzania równania (2.5):

- Powierzchnia płyty oraz skraplająca się para mają stałą temperaturę, odpowiednio T_w oraz T_s .
- Temperatura w błonce kondensatu zmienia się liniowo w kierunku prostopadłym do ścianki.
- Transport ciepła przez błonkę kondensatu odbywa się na drodze czystego przewodzenia.

- Prędkość pary jest tak niewielka (bliska zero), że ruch pary nie powoduje powstanie naprężeń stycznych na granicy pary i cieczy.
- Spływ kondensatu po ścianie jest laminarny i właściwości kondensatu są stałe.
- Przyspieszenie błonki kondensatu jest pomijalnie małe.

Równanie (2.5) nie uwzględnia schładzania kondensatu poniżej temperatury nasycenia oraz nieliniowości zmian temperatury w warstwie kondensatu. Te dwa czynniki uwzględnia poniższe równanie, w którym r jest zastąpione przez r_e zdefiniowane przez równanie (2.3).

$$\alpha = 0,943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) r_e \lambda_l^3}{\mu_l (T_s - T_w) L} \right]^{1/4} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.6)$$

W równaniach (2.5) oraz (2.6) właściwości cieczy należy wyznaczyć dla średniej temperatury błonki skroplin (wzór (2.2)). Ciepło parowania, r , oraz gęstość pary, ρ_v , należy wyznaczyć dla temperatury nasycenia T_s .

Kondensacja błonkowa na pionowej płycie przy falowo-laminarnym przepływie skroplin

Ruch falowo-laminarny występuje, gdy $450 < Re < 1800$. Dla ruchu falowo-laminarnego, przy $\rho_v \ll \rho_l$, współczynnik wnikania ciepła można obliczyć z równań Kutateladze (1963 r.)

$$\alpha_{wlam} = \frac{Re \lambda_l}{1,08 Re^{1,22} - 5,2} \left(\frac{g}{v_l^2} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

lub

$$\alpha_{wlam} = 0,8 Re^{0,11} \alpha_{lam} \quad (2.8)$$

W równaniach (2.7) oraz (2.8) właściwości cieczy należy wyznaczyć dla średniej temperatury błonki skroplin (wzór (2.2)).

Kondensacja błonkowa na pionowej płycie przy burzliwym przepływie kroplin

W tym przypadku można wykorzystać korelację *Labuntsova* (1957 r.)

$$\alpha = \frac{\text{Re} \lambda_l}{8750 + 58 \text{Pr}^{-0.5} (\text{Re}^{0.75} - 253)} \left(\frac{g}{v_l^2} \right)^{1/3} \quad (2.9)$$

Wzór (2.9) jest ważny dla:

$$\text{Re} > 1800$$

$$\rho_v \ll \rho_l$$

We wzorze (2.9) właściwości cieczy należy wyznaczyć dla średniej temperatury błonki kroplin (wzór (2.2)).

Kondensacja błonkowa na pionowej rurze przy laminarnym przepływie kroplin

Zależność (2.6) może być wykorzystywana także w przypadku skraplania na zewnętrznej powierzchni rur pionowych, pod warunkiem, że średnica rury jest znacznie większa od grubości warstwy kondensatu.

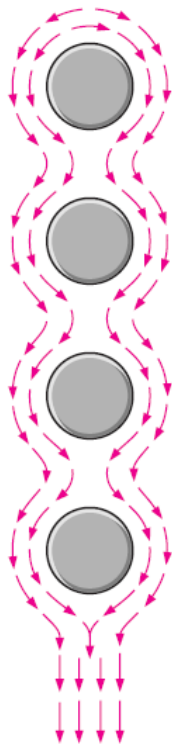
Kondensacja błonkowa na zewnętrznej powierzchni rur poziomych

Dla pojedynczej rury

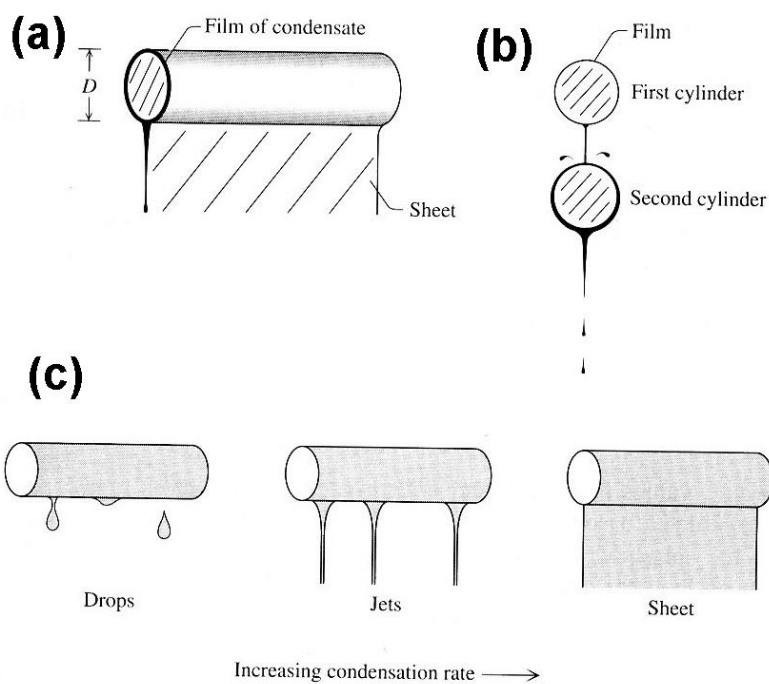
$$\alpha_1 = 0,729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) r_e \lambda_l^3}{\mu_l (T_s - T_w) D} \right]^{1/4} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.10)$$

Dla n rzędów rur w układzie szeregowym

$$\alpha_n = n^{-1/4} \alpha_1 \quad (2.11)$$



Rys. 2-3. Skraplanie na czterech rzędach rurek ułożonych szeregowo.



Rys. 2-4. Skraplanie błonkowe: (a) na pojedynczym poziomym walcu; (b) na dwóch poziomych walcach ułożonych jeden nad drugim; (c) wpływ szybkości skraplania na intensywność oddziaływania na walce umieszczone poniżej.

Zależności (2.10) oraz (2.11) są oparte na wnioskach z analizy *Nusselta* dotyczącej skraplania na powierzchni pionowej płyty. Wzór (2.10) jest modyfikacją wzoru (2.6). W przypadku rur poziomych problem burzliwego przepływu warstwy skroplin praktycznie nie występuje.

Wpływ prędkości pary na współczynnik wnikania ciepła

Wpływ prędkości pary na współczynnik wnikania ciepła może być pomijany, gdy prędkość pary jest niewielka. Gdy prędkość pary jest znaczna, to przepływająca para wpływa na ruch skroplin. Na styku pary i skroplin prędkość pary i skroplin jest jednakowa. Jeżeli para płynie z góry na dół, tzn. w takim samym kierunku jak skropliny, to ruch pary wpływa na zmniejszenie grubości błonki skroplin i tym samym na zmniejszenie oporu cieplnego warstwy skroplin. Ruch pary w kierunku przeciwnym do ruchu skroplin powoduje wzrost grubości oraz oporu cieplnego warstwy skroplin.

Wpływ obecności nieskrapającego się gazu w skraplaczu na proces skraplania pary

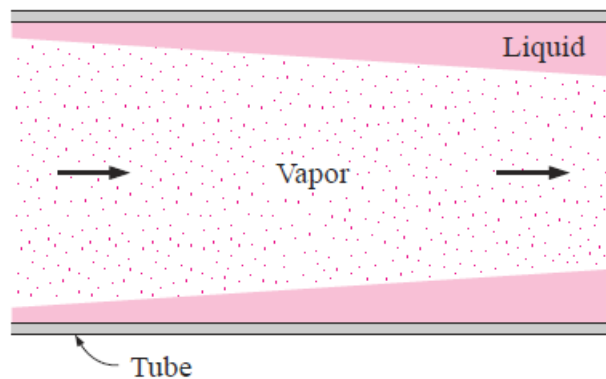
Obecność nawet niewielkich ilości nieskrapającego się gazu (np. powietrza) obok skraplającej się pary powoduje znaczne obniżenie współczynnika wnikania ciepła. Na przykład, udział kilogramowy równy 0,01 powietrza w parze wodnej może obniżyć współczynnik wnikania ciepła podczas skraplania o ponad połowę.

Zjawisko to można wyjaśnić następująco. Podczas wykraplania się cieczy z pary, w pobliżu powierzchni wymiany ciepła zalega praktycznie sam gaz nieskrapający się. Warstwa gazu stanowi barierę dla pary, utrudnia jej dopływ do powierzchni wymiany ciepła oraz izoluje termicznie powierzchnię wymiany ciepła. Duża prędkość pary zmniejsza negatywny wpływ obecności gazu nieskrapającego się obok pary. Duża prędkość pary

powoduje zmniejszenie grubości warstwy gazu, a nawet może doprowadzić do jego usunięcia z powierzchni wymiany ciepła.

Skraplanie błonkowe wewnątrz poziomej rurki

Skraplanie wewnątrz rurek jest procesem bardziej skomplikowanym niż skraplanie na ich zewnętrznej powierzchni. Współczynnik wnikania ciepła silnie zależy od prędkości pary oraz od tempa osadzania się kondensatu na ściankach rurek.



Rys. 2-5. Przepływ skraplającej się pary oraz kondensatu wewnątrz poziomej rurki.

Dla niskich prędkości pary *Chato* zaleca stosowanie następującej zależności

$$\alpha = 0,555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) \lambda_l^3}{\mu_l (T_s - T_w) D} \left(r + \frac{3}{8} c_{pl} (T_s - T_w) \right) \right]^{1/4} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.12)$$

dla

$$\text{Re}_v = \frac{w_v D}{\nu_v} < 35000$$

We wzorze (2.12) właściwości cieczy należy wyznaczyć dla średniej temperatury błonki skroplin (wzór (2.2)).

3. Wymiana ciepła podczas skraplania kropłowego

Skraplanie kroplowe należy do najbardziej efektywnych mechanizmów przekazywania ciepła. Współczynniki wnikania ciepła są w tym przypadku nawet 10 razy większe od tych występujących podczas skraplania błonkowego.

Skraplanie kroplowe można uzyskać:

- dodając odpowiednie środki chemiczne do pary,
- obrabiając chemiczne powierzchnię wymiany ciepła,
- pokrywając powierzchnię wymiany ciepła polimerami, np. teflonem, lub metalami szlachetnymi takimi jak: złoto, srebro, rod, pallad, platyna.

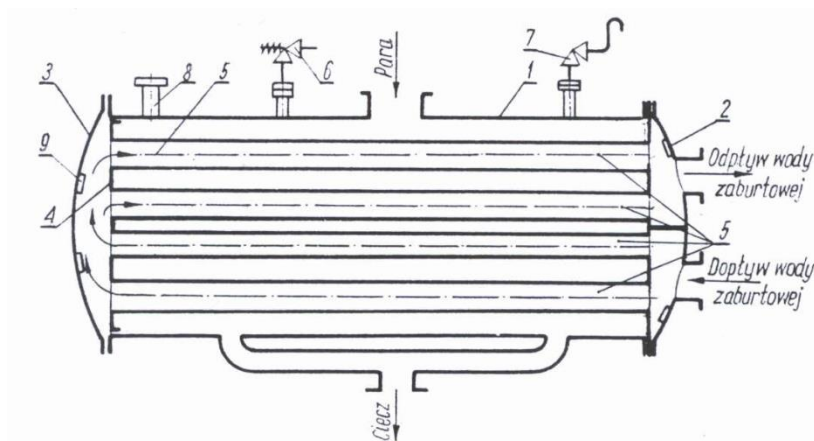
Podczas eksploatacji skraplaczy ze specjalnie przygotowaną powierzchnią wymiany ciepła, tak aby skraplanie na niej było kroplowe, dochodzi do utraty tych właściwości wskutek różnych czynników. Należą do nich:

- zanieczyszczenie powierzchni wymiany ciepła,
- utleniania powierzchni wymiany ciepła,
- zużywanie się powłok specjalnych w trakcie eksploatacji skraplacza

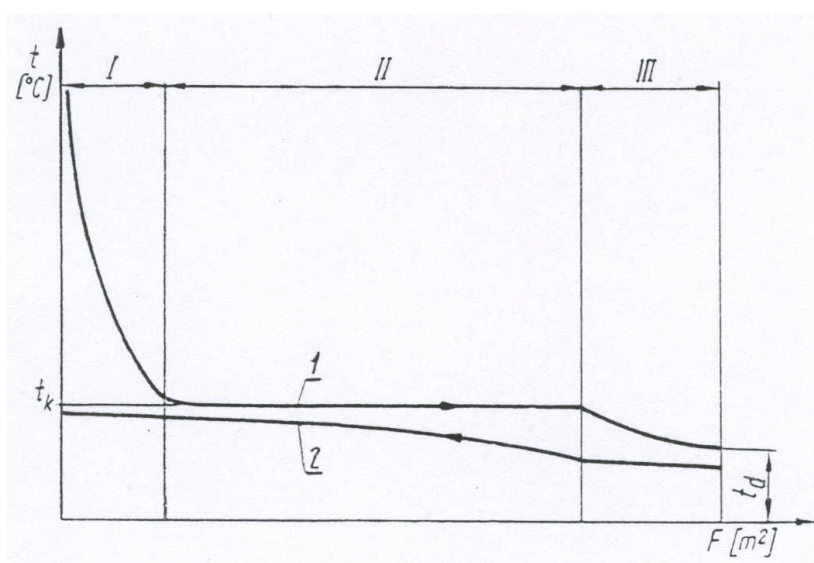
Dla często występującego w technice przypadku skraplania kroplowego pary wodnej na powierzchni miedzianej można wykorzystać równanie *Griffitha* (1983 r.)

$$\alpha \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = \begin{cases} 51104 + 2044T_s [^{\circ}C] & 22^{\circ}C < T_s < 100^{\circ}C \\ 255310 & T_s > 100^{\circ}C \end{cases} \quad (3.1)$$

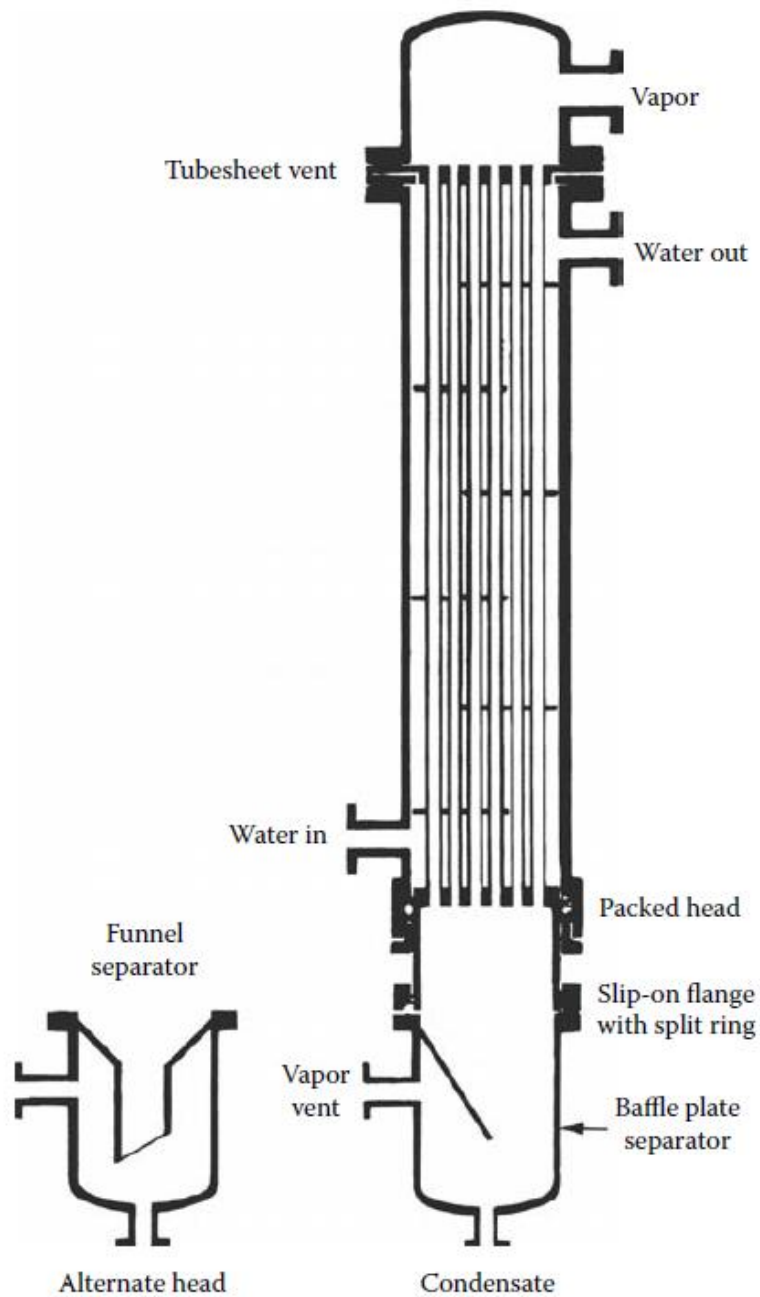
4. Przykładowe skraplacze



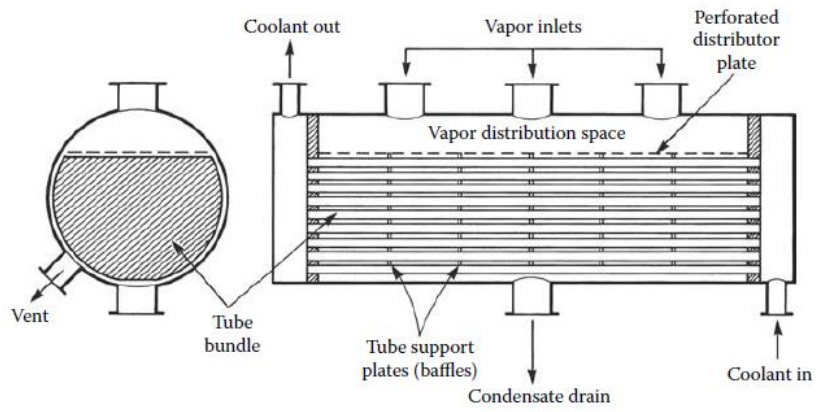
Rys. 4-1. Skraplacz chłodniczy płaszczowo-rurowy, dwudrogowy.



Rys. 4.2. Przebieg temperatury w skraplaczu przeciwprądowym
1 – czynnika chłodniczego; 2 – wody chłodzącej



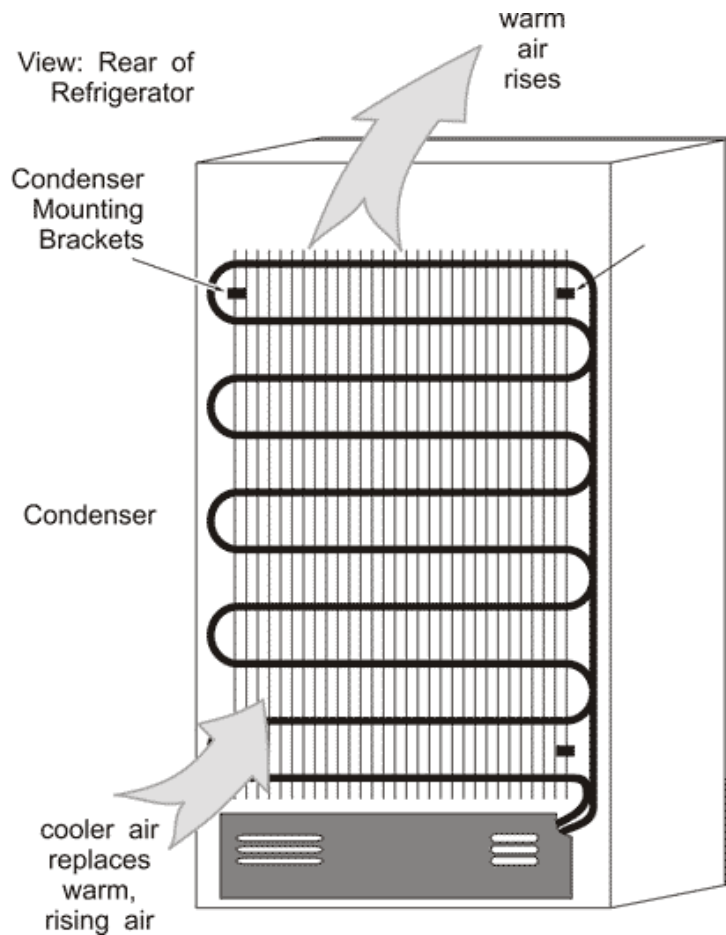
Rys. 4.3. Skraplacz płaszczowo-rurowy: pionowy, skraplana para w rurkach, przepływ z góry na dół.



Rys. 4.4. Skraplacz krzyżowo-prądowy.

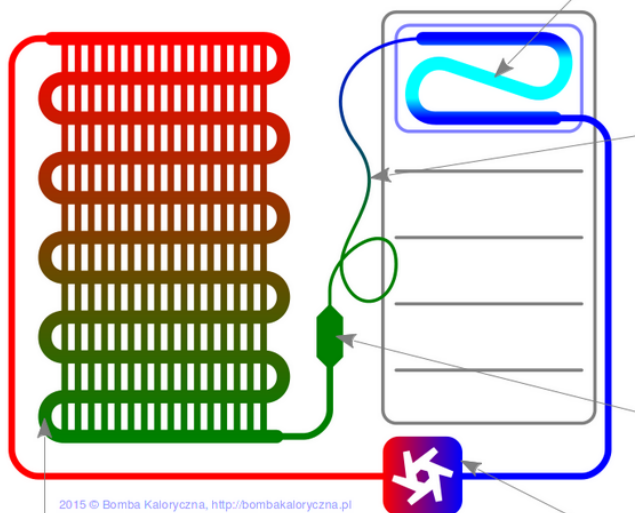


Rys. 4.5. Skraplacz chłodniczy.



Rys. 4.6. Skraplacz chłodziarki domowej.

Schemat chłodziarki sprężarkowej



Parownik (w zamrażalniku)

Zimny, ciekły czynnik chłodniczy, przepływając przez parownik, intensywnie wrze i zamienia się w gaz, pobierając jednocześnie znaczne ilości ciepła od zamrażalnika i znajdujących się w nim produktów spożywczych.

Rurka kapilarna

... służy do obniżania ciśnienia czynnika chłodniczego dopływającego do parownika w stosunku do ciśnienia występującego w skraplaczu, poprzez dławienie przepływu. Ponadto zmniejsza moment rozruchowy silnika sprężarki. Następuje tu częściowe odparowanie, przyspieszenie i obniżenie temperatury czynnika chłodniczego.

Filtr odwadniacz

... zatrzymuje cząstki stałe i wodę, które mogłyby się pojawić w czynniku chłodniczym i zatrzymać jego obieg.

Skraplacz

Gorący, gazowy czynnik chłodniczy, przepływając przez meandrujące rurki, oddaje swoje ciepło i zamienia się w ciecz. Metalowe żeberka poprawiają rozpraszanie ciepła do otoczenia.

Agregat (sprężarka)

... przepompowuje gazowy czynnik chłodniczy, zwiększając jednocześnie jego ciśnienie