

Pęczek rur poziomych z ożebrowaniem w postaci płaskich płyt ma następującą charakterystykę:

Układ rurek w pęczku: w szachownicę

Podziałka rur w kierunku przepływu: $X_l := 22 \cdot \text{mm}$

Podziałka rur w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu: $X_t := 25.4 \cdot \text{mm}$

Liczba rur w jednym rzędzie: $n_{r1} := 20$

Liczba rzędów rur: $n_{rz} := 4$

Średnica zewnętrzna rurek: $d_z := 10.2 \cdot \text{mm}$

Grubość ścianki rurki: $\delta_r := 0.6 \cdot \text{mm}$

Długość rurki: $l := 600 \cdot \text{mm}$

Typ ożebrowania: płaskie, gładkie płyty

Liczba żeber na 1 m rurki: $n_{z1} := 315$

Średnica hydrauliczna: $D_{h2} = 4 \cdot L \cdot \frac{A_s}{A}$; $D_{h2} := 3.64 \cdot \text{mm}$

Grubość żeber: $\delta := 0.33 \cdot \text{mm}$

Względny swobodny przekrój pęczka $\sigma = \frac{A_s}{A_p}$; $\sigma := 0.534$

Zewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła odniesiona do jednostki objętości pęczka

$$\beta = \frac{A}{V}; \quad \beta := 585 \cdot \frac{1}{\text{m}}$$

Udział powierzchni ożebrowania w całkowitej powierzchni wymiany ciepła: $\frac{A_z}{A} = 0.839$

Materiał rurek i żeber: miedź o przewodności cieplnej $\lambda_r := 375 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Pęczek ten jest wykorzystywany do podgrzewania powietrza, które płynie na zewnątrz rurek.

Temperatura wody na wlocie do wymiennika: $T'_1 := 47 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura wody na wylocie z wymiennika: $T''_1 = 43.21 \text{ } ^\circ\text{C}$ - założona

Temperatura powietrza na wlocie do wymiennika: $T'_2 := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura powietrza na wylocie z wymiennika: $T''_2 := 30 \text{ } ^\circ\text{C}$

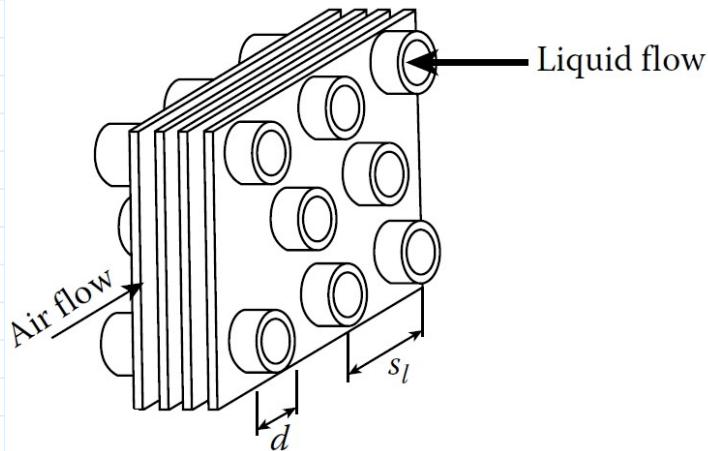
Średnie ciśnienie powietrza: $p_2 := 1.2 \cdot \text{bar}$

Strumień powietrza: $m_2 := 3.2 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

OBLICZYĆ:

- 1) Współczynnik wnikania ciepła po stronie rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła (zewnątrznej).
- 2) Sprawność żebra.
- 3) Zewnętrzną powierzchnię wymiany ciepła.
- 4) Moc cieplną wymiennika.
- 5) Temperaturę powierzchni ścianki wewnątrz i na zewnątrz rurki.
- 6) Współczynnik wnikania ciepła po stronie wody.

- 7) Współczynnik przenikania ciepła odniesiony do zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła.
 8) Obliczeniową zewnętrzną powierzchnię wymiany ciepła metodą średniej różnicy temperatur oraz metodą sprawnościową.



Rys. 1. Schemat pęczka.

1) Współczynnik wnikania ciepła po stronie rozwiniętej powierzchni wymiany ciepła (zewnętrznej).

Wymiary pęczka

Szerokość pęczka jest równa długości rurki

$$l = 0.6 \text{ m}$$

Wysokość pęczka

$$H := n_{r1} \cdot X_t = 0.508 \text{ m}$$

Głębokość pęczka mierzona jest w kierunku przepływu powietrza

$$L := n_{rz} \cdot X_t = 0.088 \text{ m}$$

Przekrój poprzeczny pęczka

$$A_p := l \cdot H = 0.305 \text{ m}^2$$

Swobodny przekrój pęczka

$$A_s := \sigma \cdot A_p = 0.163 \text{ m}^2$$

Średnia temperatura powietrza

$$T_{f2} := \frac{T'_2 + T''_2}{2} = 27.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Właściwości powietrza w temperaturze $T_{f2} = 27.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Gęstość powietrza

$$R := 286.7 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \rho_2 := \frac{p_2}{R \cdot T_{f2}} = 1.392 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Współczynnik lepkości kinematycznej

$$\nu_2 := 16 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Liczba Prandtla

$$Pr_2 := 0.702$$

Ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu

$$c_{p2} := 1005 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Prędkość powietrza w przekroju swobodnym A_s (maksymalna prędkość powietrza)

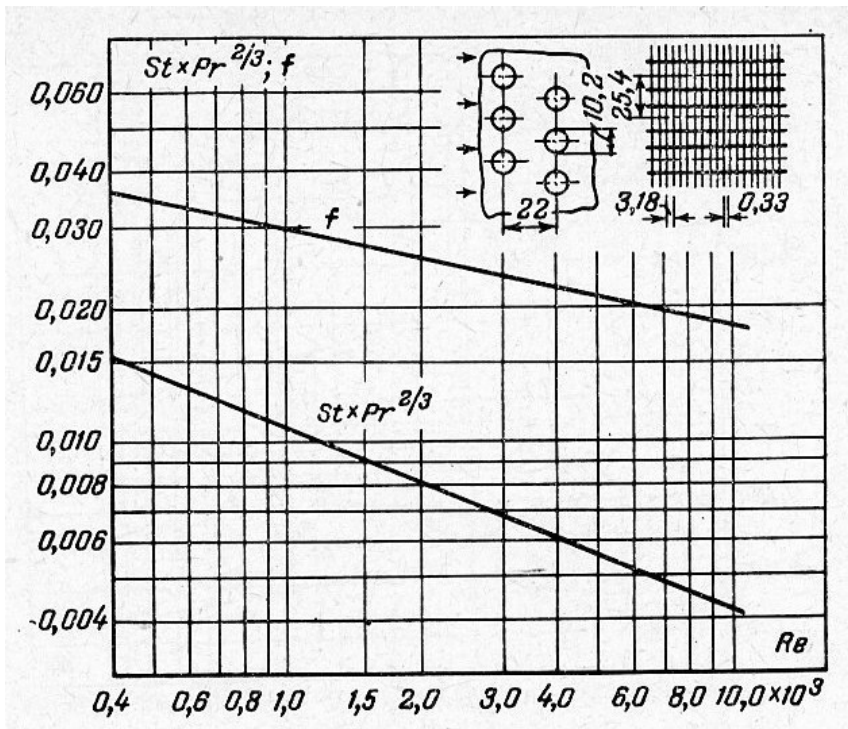
$$w_{2max} := \frac{m_2}{A_s \cdot \rho_2} = 14.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Prędkość masowa powietrza

$$G_2 := \rho_2 \cdot w_{2max} = 19.66 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Liczba Reynoldsa

$$Re_2 := \frac{w_{2max} \cdot D_{h2}}{\nu_2} = 3212.8$$



Rys. 2. Zależność modułu Colburna i współczynnika tarcia od liczby Reynoldsa.

Moduł Colburna odczytujemy z wykresu sporządzonego dla danego pęczka

$$j_2 := 0.0066$$

Obliczamy teraz liczbę Stanton

$$St_2 := \frac{j_2}{Pr_2^{\frac{2}{3}}} = 0.008356$$

a następnie współczynnik wnikańia ciepła po stronie powietrza

$$\alpha_2 := St_2 \cdot G_2 \cdot c_{p2} = 165.099 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

2. Sprawność żebra.

$$X_l := 22 \cdot mm$$

$$X_t := 25.4 \cdot mm$$

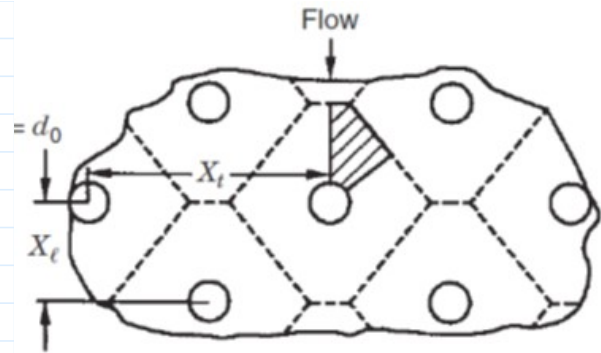
$$d_z := 10.2 \cdot mm$$

Pole sześciokąta, na jakie podzielono żebro płytowe

$$A_6 := X_t \cdot X_t = 558.8 \text{ mm}^2$$

Pole równoważnego żebra okrągłego

$$A_o := A_6 - \frac{\pi \cdot d_z^2}{4} = 477.087 \text{ mm}^2$$



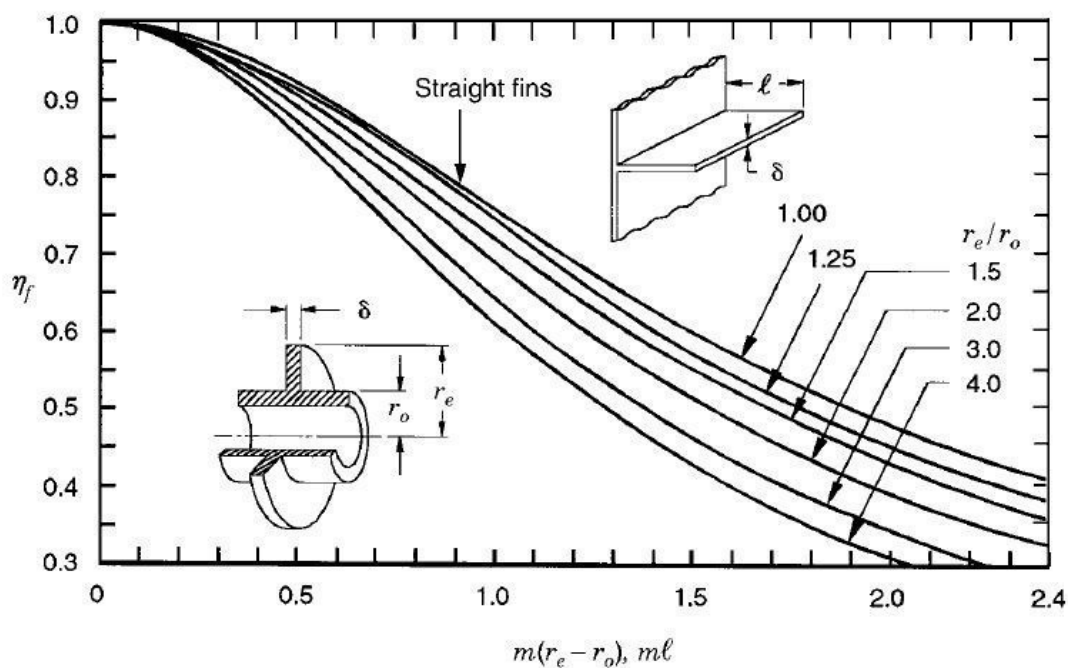
Średnica równoważnego żebra okrągłego

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot A_6}{\pi}} = 26.674 \text{ mm}$$

$$D := \sqrt{\frac{4 \cdot A_o}{\pi} + d_z^2} = 26.674 \text{ mm}$$

$$r_o := \frac{d_z}{2} = 0.005 \text{ m}$$

$$r_e := \frac{D}{2} = 0.013 \text{ m}$$



Rys. 3. Sprawność żebra.

$$m_z := \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_2}{\delta \cdot \lambda_r}} = 51.655 \frac{1}{\text{m}}$$

$$m_z \cdot (r_e - r_o) = 0.425$$

$$\frac{r_e}{r_o} = 2.615$$

$$\eta_z := 0.92 \quad \text{odczyt z wykresu}$$

Sprawność powierzchni ożebrowanej

$$A_z \cdot A := 0.839$$

$$\eta_{poz} := 1 - A_z \cdot A \cdot (1 - \eta_z) = 0.9329$$

Objętość pęczka

$$V := n_{r1} \cdot X_t \cdot n_{rz} \cdot X_l \cdot l = 0.02682 \text{ m}^3$$

Całkowita zewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła

$$A := \beta \cdot V = 15.691 \text{ m}^2$$

Moc cieplna wymiennika

$$Q_p := m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T''_2 - T'_2) = 16.08 \text{ kW}$$

Temperatura na powierzchni zewnętrznej ścianki rurki

$$T_{w2} := T_{f2} + \frac{Q_p}{A \cdot \alpha_2 \cdot \eta_{poz}} = 34.15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Średnica wewnętrzna rurki

$$d_w := d_z - 2 \cdot \delta_r = 9 \text{ mm}$$

Liczba rurek

$$n := n_{rz} \cdot n_{r1} = 80$$

Wewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła

$$A_w := n \cdot \pi \cdot d_w \cdot l = 1.357 \text{ m}^2$$

Temperatura powierzchni ścianki rury po stronie wody

$$T_{w1} := T_{w2} + Q_p \cdot \frac{\ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right)}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot l \cdot \lambda_r} = 34.17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Średnia temperatura wody

$$T_{f1} := \frac{T'_1 + T''_1}{2} = 45.105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Zależność właściwości wody od temperatury

$$_W := \begin{bmatrix} 35 & 994.03 & 4.1793 & 0.00071932 & 0.62332 \\ 40 & 992.22 & 4.1794 & 0.00065298 & 0.63063 \\ 45 & 990.21 & 4.1801 & 0.00059607 & 0.63739 \\ 50 & 988.03 & 4.1813 & 0.00054685 & 0.64359 \\ 55 & 985.65 & 4.1830 & 0.00050398 & 0.64926 \end{bmatrix}$$

$$f\rho(t) := \text{linterp}(_W^{(0)}, _W^{(1)}, t) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$fc_p(t) := \text{linterp}(_W^{(0)}, _W^{(2)}, t) \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$f\mu(t) := \text{linterp}(_W^{(0)}, _W^{(3)}, t) \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$f\lambda(t) := \text{linterp}(_W^{(0)}, _W^{(4)}, t) \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Właściwości fizyczne wody w temperaturze T_{f1}

$$\rho_1 := f\rho\left(\frac{T_{f1}}{\text{K}} - 273.15\right) = 990.164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{p1} := fc_p\left(\frac{T_{f1}}{\text{K}} - 273.15\right) = 4180.125 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\lambda_1 := f\lambda\left(\frac{T_{f1}}{\text{K}} - 273.15\right) = 0.6375 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$\mu_1 := f\mu \left(\frac{T_{f1}}{K} - 273.15 \right) = (5.95 \cdot 10^{-4}) \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\nu_1 := \frac{\mu_1}{\rho_1} = (6.009 \cdot 10^{-7}) \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr_1 := \frac{\mu_1 \cdot c_{p1}}{\lambda_1} = 3.902$$

Strumień ciepła przekazywany przez wodę

$$Q_w := Q_p = 16.08 \text{ kW}$$

Strumień wody

$$m_1 := \frac{Q_w}{c_{p1} \cdot (T'_1 - T''_1)} = 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Przekrój poprzeczny całkowitego strumienia wody

$$A_r := n \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4} = 5089.38 \text{ mm}^2$$

cały strumień we wszystkich rurkach (wymiennik jednoprzepływowy)

Średnia prędkość wody

$$w_1 := \frac{m_1}{A_r \cdot \rho_1} = 0.20141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Liczba Reynoldsa dla przepływu w rurkach

$$Re_1 := \frac{w_1 \cdot d_w}{\nu_1} = 3016.42$$

Korelacja Bohma

$$Nu_1 := \frac{1}{300} \cdot Re_1 \cdot Pr_1^{0.37} = 16.64$$

$$3 \cdot 10^4 > Re > 3000$$

Współczynnik wnikania ciepła po stronie wody

$$\alpha_1 := \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_w} = 1178.64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Współczynnik przenikania ciepła

$$k_z := \left(\frac{A}{A_w \cdot \alpha_1} + \frac{A \cdot \ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot n \cdot \lambda_r} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \eta_{\text{poż}}} \right)^{-1} = 61.28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Metoda średniej różnicy temperatur

$$\Delta T' := T'_1 - T''_2 = 17 \text{ K}$$

$$\Delta T'' := T''_1 - T'_2 = 18.21 \text{ K}$$

Średnia różnica temperatur dla wymiennika przeciwprądowego

$$\Delta T_{\text{lnp}} := \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln\left(\frac{\Delta T'}{\Delta T''}\right)} = 17.6 \text{ K}$$

$$P := \frac{T''_2 - T'_2}{T'_1 - T'_2} = 0.227 \quad R := \frac{T'_1 - T''_2}{T''_1 - T'_2} = 3.4 \quad \varepsilon_{\Delta T} := 0.95$$

$$\Delta T_{\text{ln}} := \Delta T_{\text{lnp}} \cdot \varepsilon_{\Delta T} = 16.72 \text{ K}$$

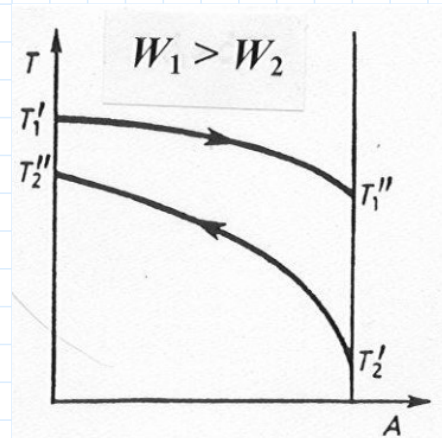
Strumień ciepła przenikającego od wody do powietrza $Q_k = Q_p = Q_w$

$$Q_k := Q_p$$

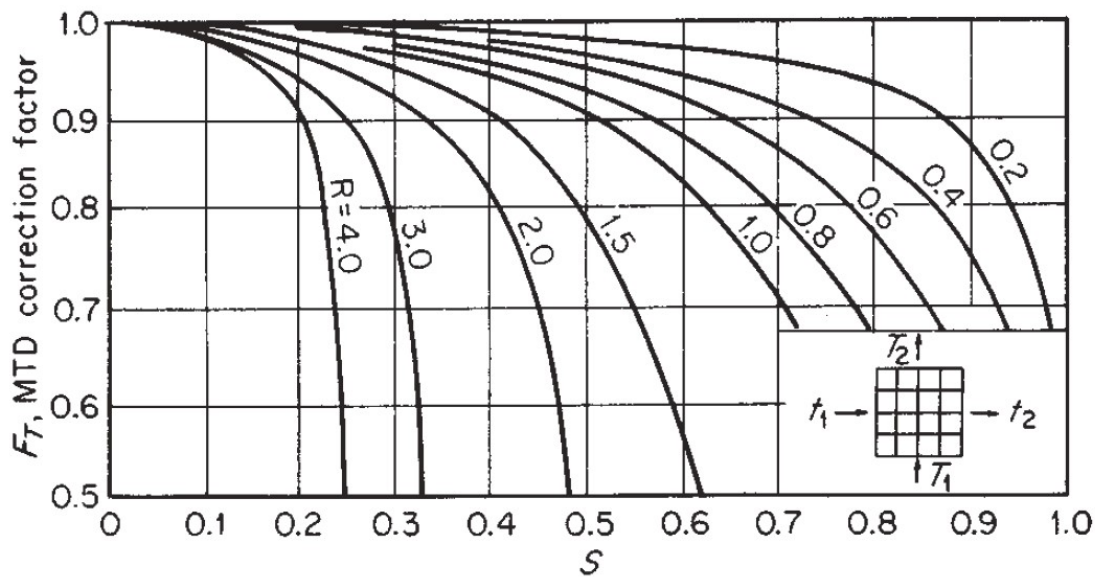
$$A_{\Delta T} := \frac{Q_k}{k_z \cdot \Delta T_{\text{ln}}} = 15.70 \text{ m}^2$$

$$A = 15.69 \text{ m}^2$$

$$T''_1 \equiv 43.21 \text{ }^\circ\text{C}$$



Rys. 4. Rozkład temperatur czynników w przeciwprądowym wymienniku ciepła



Rys. 5. Poprawka $\epsilon_{\Delta T}$.

Metoda sprawnościowa

$$W_1 := m_1 \cdot c_{p1} = (4.243 \cdot 10^3) \frac{W}{K}$$

$$W_2 := m_2 \cdot c_{p2} = (3.216 \cdot 10^3) \frac{W}{K}$$

$$W_{min} := W_2$$

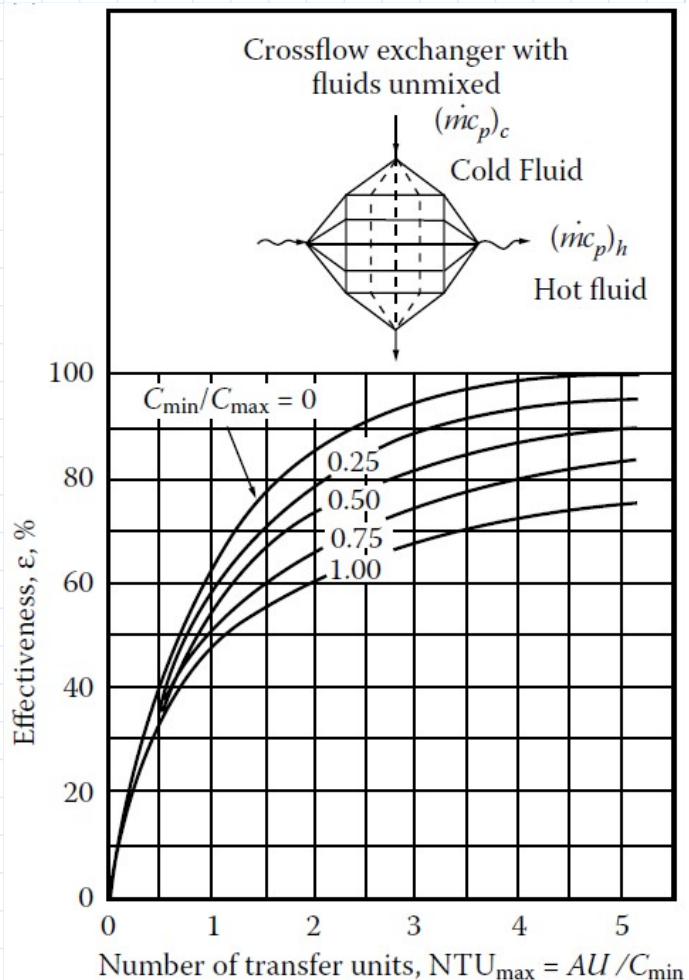
$$W := \frac{W_2}{W_1} = 0.758$$

$$\epsilon := \frac{T''_2 - T'_2}{T'_1 - T'_2} = 0.227$$

$$N := 0.3 \quad \text{z wykresu}$$

$$A_\epsilon := \frac{N \cdot W_{min}}{k_z} = 15.75 \text{ m}^2$$

$$A = 15.69 \text{ m}^2$$



Rys. 6. Sprawność wymiennika.

Opory tarcia w pęczku

Z wykresu

$$f := 0.022$$

$$\Delta p_f := f \cdot \frac{G_2^2}{2 \cdot \rho_2} \cdot \frac{4 \cdot L}{D_{h2}} = 295.345 \text{ Pa}$$