



WHITE PAPERS

ASK-RD-ENG-019

R&D Department

ARYA SEPEHR KAYHAN (ASK) | SHAHID SALIMI INDUSTRIAL CITY, TABRIZ, IRAN

شرکت آریا سپهر کیهان با نام اختصاری ASK، طراح و تولیدکننده پمپ های گریز از مرکز و روتاری و ارائه دهنده راهکارهای بهینه سازی سیستم های فرایندی و پمپاژ می باشد.

توجه!

مقالات تخصصی با عنوان White Papers جهت افزایش دانش عمومی پمپ ها در بخش تحقیق و توسعه این شرکت نگارش شده است. استفاده از این مقالات رایگان می باشد و لازم است جهت استفاده از محتویات آن به موارد ذیل توجه فرمایید:

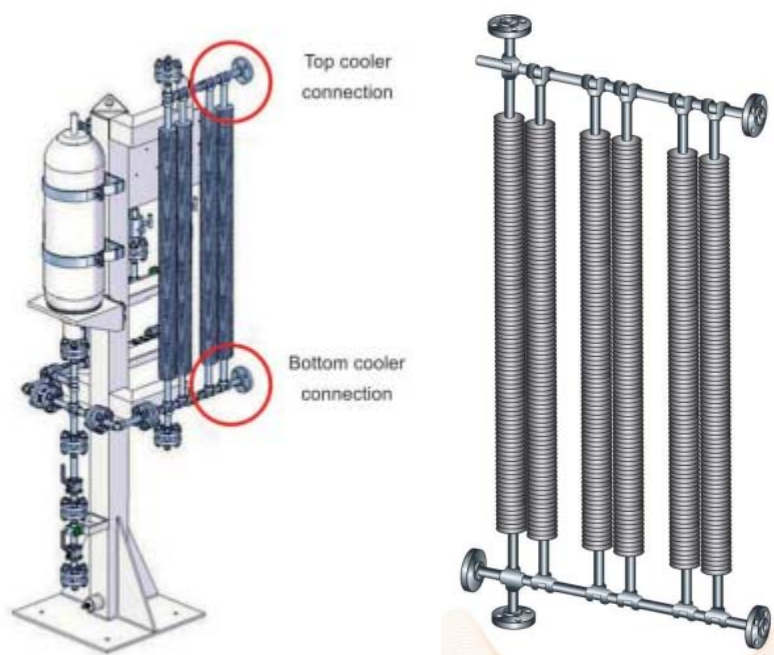
- 1- انتشار مجدد مطالب مقالات (به شکل اولیه و بدون تغییر در ساختار محتوایی و ظاهری) با ذکر منبع، بلامانع است.
- 2- استفاده تجاری از محتویات مقالات در نشریات مجاز نمی باشد.

تحلیل انتقال حرارت در فین تیوب

۱- مقدمه

پره^{۴۹} یا سطح گسترده^{۵۰} قسمتی متصل به بدنه ی قطعه ی جامد است که به وسیله ی رسانش گرما را از آن قطعه می گیرد و به وسیله ی جابجایی آن گرما را به سیال پیرامونش منتقل می کند. لوله ی پره دار^{۵۱}، همانطور که از اسمش پیداست، لوله ای است که در سطح خارجی آن پره هایی تعبیه شده است. معمولاً این پره ها به دو گونه ی صفحه ای یا دایروی به لوله افزوده می شوند. در این مقاله به بررسی انتقال حرارت لوله پره دار با پره ی دایروی پرداخته می شود.

لوله های پره دار در پمپ های API در پلان های ۲۳، ۲۲، ۲۱ و ۵۳B جهت خنک کاری به کار می روند. در این پلان ها به دلیل عدم امکان استفاده از سیستم های خنک کاری آب خنک از لوله های پره دار به عنوان قطعه ی هواخنک استفاده می شود. بسته به میزان گرمای دفع شده ی مطلوب، تعداد این لوله های پره دار ۲، ۴ و ۶ است و به دو صورت جابجایی اختیاری و جابجایی اجباری (با کمک فن) مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل دو تصویر از این لوله های پره دار نشان داده شده است.



شکل ۱- کاربرد لوله پره دار در پلان های آب بندی پمپ های API

۲- انتقال حرارت در پره (فین)

انتقال حرارت در پره شامل دو قسمت زیر است:

- ۱- انتقال حرارت از بدنه ی قطعه ی جامد به فین از طریق رسانش
- ۲- انتقال حرارت از فین به سیال پیرامون از طریق جابجایی

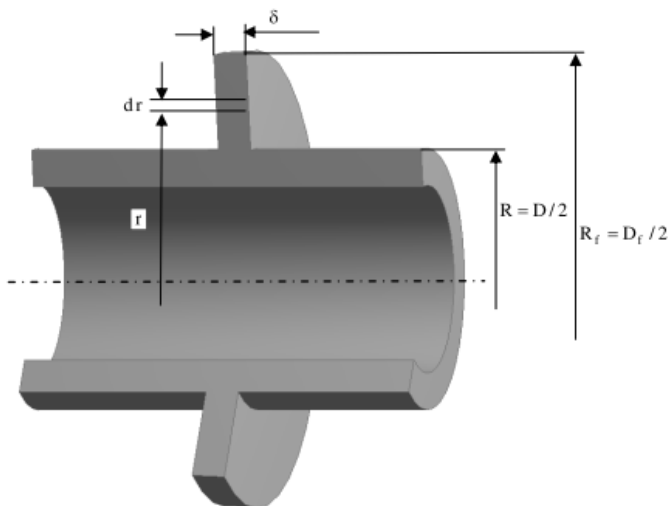
⁴⁹ Fin

⁵⁰ Extended surface

⁵¹ Fin-tube

جهت ساده سازی تحلیل انتقال حرارت در یک پره فرض های زیر را در نظر می گیریم:

- ۱- شار گرمایی و دما با زمان تغییر نمی کند. (پایا)
 - ۲- فین همگن است و ضریب رسانش گرمایی آن ثابت و ایزوتروپ است.
 - ۳- انتقال حرارت جابجایی در تمامی سطوح آن فین ثابت و یکسان است.
 - ۴- دمای میانگین اطراف فین ثابت است.
 - ۵- ضخامت فین نسبت به ارتفاع آن ناچیز است. در نتیجه گرادیان دما در جهت ضخامت آن ناچیز بوده و قابل صرف نظر است.
 - ۶- دمای پایه ی فین ثابت است.
 - ۷- در محل اتصال فین به قطعه هیچگونه مقاومت حرارتی تماسی وجود ندارد.
 - ۸- هیچ منبع تولید حرارتی ای در فین وجود ندارد.
 - ۹- حرارت منتقل شده از نوک پره قابل صرف نظر کردن است.
 - ۱۰- حرارت منتقل شده از فین متناسب با اختلاف دمای سطح فین و سیال اطراف آن است.
 - ۱۱- از انتقال حرارت تابشی صرف نظر می شود.
- فینی با ضخامت ثابت و با پروفیلی دایروی روی سطح خارجی یک لوله در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فین روی سطح خارجی لوله

اکنون المانی از فین را در نظر گرفته و به نوشتن معادله تعادل گرمایی آن می پردازیم.

$$(q \ 2\pi r \ \sigma)_r - (q \ 2\pi r \ \sigma)_{r+dr} - 2h(2\pi r)dr(T - T_{\infty}) = 0$$

که در آن :

$$q = -k_f \frac{dT}{dr}$$

$$k_f = \text{رسانایی گرمایی فین}$$

$$\delta = \text{ضخامت فین}$$

$$T_\infty = \text{دمای سیال اطراف فین}$$

با استفاده از بسط تیلور، ترم دوم عبارت فوق را گسترش می دهیم. عبارت فوق به عبارت زیر ساده می شود:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) - \frac{2hr}{\sigma k_f} (T - T_\infty) = 0 \quad (*)$$

برای سادگی دو پارامتر تعریف می کنیم:

$$\theta(x) = T(x) - T_s$$

$$m^2 = \frac{hP}{k_f A_k} = \frac{h[2(2\pi r)]}{k_f(2\pi r)\sigma} = \frac{2h}{k_f \sigma}$$

با استفاده از پارامترهای فوق، رابطه ی (*) به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} - m^2\theta = 0$$

پاسخ عمومی رابطه فوق برابر است با :

$$\theta = C_1 I_0(mr) + C_2 K_0(mr)$$

که در آن I_0 و K_0 توابع بسط اصلاح شده از درجه صفر^{۵۲} هستند. دو شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای حل معادله ی فوق بر این اساس است که پایه ی فین هم دما با بدنه ی لوله است و به دلیل ضخامت کم فین، انتقال حرارتی از لبه ی آن وجود ندارد. نتیجه ی دو گزاره ی فوق عبارات زیر می شود:

$$r = R \rightarrow T = T_0 \rightarrow \theta_0 = T_0 - T_s$$

$$r = R_f \rightarrow \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R_f} = 0 \rightarrow \frac{d\theta}{dr} \Big|_{r=R_f}$$

که در آن R شعاع لوله و R_f شعاع فین است. بعد از اعمال شرایط مرزی بر معادله، پاسخ زیر حاصل می شود:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{I_0(mr)K_1(mR_f) + K_0(mr)I_1(mR_f)}{I_0(mR)K_1(mR_f) + K_0(mR)I_1(mR_f)}$$

که در آن I_1 و K_1 توابع بسط اصلاح شده ی درجه ی ۱ نوع اول و دوم می باشد. با استفاده از توزیع دمای به دست آمده، گرمای دفع شده توسط فین از رابطه ی زیر قابل استنتاج است:

⁵² Zero Order Modified Bessel

$$Q = -k_f A_k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R}$$

که با جاگذاری توزیع دما نتیجه می دهد:

$$Q = 2\pi R \sigma k_f \theta_0 m \frac{K_1(mR)I_1(mR_f) + I_1(mR)K_1(mR_f)}{K_0(mR)I_1(mR_f) + I_0(mR)K_1(mR_f)} \quad (**)$$

بازده فین از رابطه زیر به دست می آید :

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}}{2h\pi(R_f^2 - R^2)\theta_0} = \frac{2R}{m(R_f^2 - R^2)} \frac{K_1(mR)I_1(mR_f) + I_1(mR)K_1(mR_f)}{K_0(mR)I_1(mR_f) + I_0(mR)K_1(mR_f)}$$

۳- گرمای دفع شده توسط لوله ی فین دار مورد نظر

لوله ی پره داری با خصوصیات آورده شده در جدول ۱ مدنظر است. جنس لوله ی آن از فولاد ضد زنگ 304L و جنس فین ها از آلومینیوم است. با توجه به ساکن بودن هوای اطراف فین ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا $\frac{W}{m^2 K}$ در نظر گرفته می شود. ضریب انتقال حرارت رسانشی آلومینیوم نیز $\frac{W}{m K}$ ۲۱۰ در نظر گرفته می شود. پس :

$$m^2 = \frac{2h}{k_f \sigma} = \frac{2 \times 5}{210 \times 0.0005} = 95.24 \rightarrow m = 9.76$$

جدول ۱- خصوصیات لوله پره دار

واحد	مقدار	نماد	پارامتر
mm	۱۱	R_{in}	شعاع داخلی
mm	۱۴	R_{out}	شعاع خارجی
mm	۲۸/۵	R_{fin}	شعاع فین
m	۱	L	طول لوله
-	۴۰۰	N	تعداد فین
mm	۰/۵	σ	ضخامت فین
°C	۵۲	T_{amb}	دمای محیط
°C	۸۰	$T_{fluid-in}$	دمای سیال ورودی

با فرض دمای ثابت سطح در دمای میانگین سیال ورودی و هوای اطراف فین ها ($T_s = 66^\circ C$) و با استفاده از رابطه ی (***) گرمای دفع شده به وسیله ی فین عبارت است از :

$$Q = 2\pi \times (14 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-4}) \times 210 \times (66 - 52) \\ \times 9.76 \times \frac{K_1(9.76 \times 14 \times 10^{-3})I_1(9.76 \times 28.5 \times 10^{-3}) + I_1(9.76 \times 14 \times 10^{-3})K_1(9.76 \times 28.5 \times 10^{-3})}{K_0(9.76 \times 14 \times 10^{-3})I_1(9.76 \times 28.5 \times 10^{-3}) + I_0(9.76 \times 14 \times 10^{-3})K_1(9.76 \times 28.5 \times 10^{-3})} \\ \rightarrow Q = 1.26 \times \frac{(7.14 \times 0.14) + (0.07 \times 3.33)}{(2.12 \times 0.14) + (1 \times 3.33)} = 1.26 \times \frac{1.2327}{3.6268} = 0.43W$$

دمای دفع شده ی کل برابر است با :

$$Q = 400 \times 0.43 = 172W$$

به عبارت دیگر، وابسته به دمای سطح لوله میزان گرمای دفع شده برابر است با :

$$Q = 12.28 (T_s - 52) \quad W$$

۴- تحلیل کلی لوله پره دار مورد نظر

ضریب انتقال حرارت کلی سیستم لوله پره دار از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{U.A} = \frac{1}{h_{\infty}(A_{out} + \eta_f A_f)} + \frac{\ln(R_{out}/R_{in})}{2\pi L k_{tube}} + \frac{1}{h_{in} A_{in}}$$

که در آن :

$$h_{\infty} = \text{ضریب انتقال حرارت جابجایی هوای ساکن} = \frac{W}{m^2 K} = 5$$

$$A_{out} = \text{سطح خارجی لوله} = 2\pi R_{out} L = 1.088 \quad m^2$$

$$\eta_f = \text{بازده فین} = \text{تقریبا برابر ۱}$$

$$A_f = \text{سطح فین ها} = 2 \times \pi (R_f^2 - R_{out}^2) \times N = 1.55 \quad m^2$$

$$k_{tube} = \text{ضریب انتقال حرارت رسانشی لوله} = \frac{W}{m K} = 15/81$$

$$h_{in} = \text{ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال داخل لوله} = ???$$

$$A_{in} = \text{سطح داخلی لوله} = 2\pi R_{in} L = 1.069 \quad m^2$$

همانطور که از سطور فوق پیداست، تمامی پارامترها به جز ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال داخل لوله مشخص هستند. برای به دست آوردن مقدار پارامتر مجهول فرض می کنیم سطح لوله در اثر خنک کاری فین و گرمای سیال ورودی در مقدار ثابتی بماند. با این فرض و با توجه به عدد رینولدز جریان داخل لوله که مشخص می کند با جریانی آرام روبرو هستیم، عدد بی بعد نوسلت و در نتیجه مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال داخل لوله از روابط زیر به دست می آید.

$$Nu = 3.66$$

$$h = Nu \cdot \frac{k_{water}}{D} = 3.66 \times \frac{0.67}{22 \times 10^{-3}} = 111.46 \quad \frac{W}{m^2 K}$$

اکنون با تکمیل اطلاعات پیرامون جریان و خصوصیات ترموفیزیکی لوله، ضریب انتقال حرارت کلی به دست می آید :

$$\frac{1}{U.A} = \frac{1}{5 \times (0.088 + 1.55)} + \frac{\ln\left(\frac{14}{11}\right)}{2\pi \times 15.81 \times 1} + \frac{1}{111.46 \times 0.069}$$

$$U.A = 3.93$$

اکنون می توان با استفاده از رابطه $Q = U.A.\Delta T_{lm}$

$$Q = U.A. \frac{(T_{\infty} - T_{fluid-out}) - (T_{\infty} - T_{fluid-in})}{\ln\left(\frac{-T_{\infty} + T_{fluid-out}}{-T_{\infty} + T_{fluid-in}}\right)}$$

$$Q = 3.93 \times \frac{(52 - T_{fluid-out}) - (52 - 80)}{\ln\left(\frac{T_{fluid-out} - 52}{80 - 52}\right)}$$

که با مساوی قرار دان این عبارت با حداکثر گرمای تلف شده از فین، نتیجه ای غیر قابل قبول می دهد. لذا نتیجه گیری می شود که دمای سیال خروجی برابر دمای محیط (۵۲ °C) می شود. زیرا دو طرف عبارت صفر می شود.

مراجع و منابع

- 1- A.J.Croft, P.B.Tebby, "The design of finned-tube cryogenic heat exchangers", Cryogenics ,1910.
- 2- Piotr Wais, "Fin-tube heat exchanger optimization", ISBN: 978-953-51-0278-6.