

بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت در جریان جوششی R-134a داخل لوله میکروفین‌دار تخت

سید احسان مرعشی¹، محمد علی اخوان بهابادی²

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی-دانشگاه تهران؛ ehsan_marashi@yahoo.com
² دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده فنی-دانشگاه تهران؛ akhavan@ut.ac.ir

چکیده

مطالعه حاضر تاثیر پخ کردن لوله میکروفین‌دار را بر افزایش انتقال حرارت جوششی بررسی می‌کند. به همین منظور با استفاده از یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز، داده‌های آزمایشگاهی برای مبرد R-134a در محدوده سرعت جرمی 74 تا $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار بین 25٪ تا 95٪ جمع‌آوری می‌گردد.

نتایج آزمایش حاکی از افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی در لوله‌های پخ شده با افزایش سرعت جرمی و کیفیت بخار، همانند لوله با مقطع دایروی می‌باشد. پخ کردن لوله، تاثیر مطلوبی در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد، به طوری که در بهترین حالت ضریب انتقال حرارت لوله پخ میکروفین‌دار تا میزان 239٪ نسبت به لوله گرد مشابه افزایش می‌یابد. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش رابطه‌ای برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در لوله‌های میکروفین‌دار پخ شده ارائه می‌گردد.

کلمات کلیدی: افزایش انتقال حرارت، جوشش، لوله میکروفین، پخ

مقدمه

با توجه به اهمیت صرفه جویی در مصرف انرژی، مسائل مربوط به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی همواره محققان بسیاری را به خود مشغول داشته است. در سالهای اخیر توجه زیادی به مبدل‌های با سطوح فشرده معطوف شده است و در نتیجه مبدل‌هایی با وزن کمتر، کوچکتر و ارزانتر طراحی گردیده است.

اوپراتور یکی از پرکاربردترین تبادل گرهای حرارتی می‌باشد. در حقیقت فرآیند جوشش درون لوله‌ای در تجهیزات گوناگونی از قبیل نیروگاه‌ها (حرارتی، خورشیدی و هسته‌ای)، کارخانجات صنایع شیمیایی، سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع رخ می‌دهد. بنابراین، طراحی بهینه این تبادل گر حرارتی اهمیت زیادی در صرفه جویی انرژی دارد.

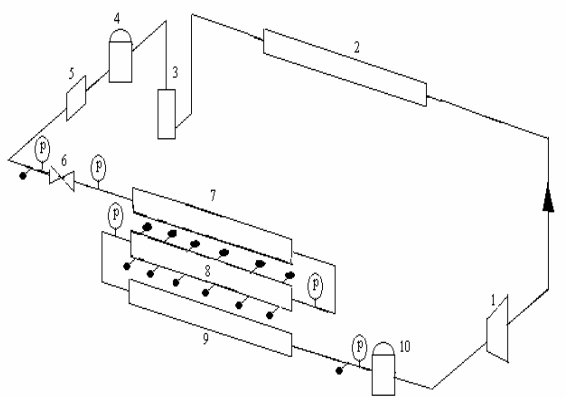
روشهای مختلفی جهت افزایش ضریب انتقال حرارت در تبادل گرهای پیشنهاد شده است. این روشها به دو دسته روشهای غیر فعال و روشهای فعال تقسیم می‌شوند. در روشهای غیر فعال از سطوح با هندسه‌های خاص یا سیال‌های افزودنی برای افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود، درحالیکه در روشهای فعال به یک نیروی خارجی نظیر میدان‌های الکتریکی یا آکوستیک و ارتعاش سطحی نیاز داریم. یکی از روش‌های غیرفعال استفاده از لوله‌های میکروفین‌دار می‌باشد. لوله‌های میکروفین‌دار با توجه به کارایی بالا

در افزایش انتقال حرارت، به طور وسیعی در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحقیقات زیادی درباره عملکرد آنها به انجام رسیده است. روش دیگری که البته برای افزایش انتقال حرارت در کندانسور استفاده شده است، استفاده از لوله‌های پخ شده به جای لوله‌های گرد می‌باشد [1].

در این تحقیق به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت در جریان جوششی R-134a داخل لوله میکروفین‌دار پخ پرداخته می‌شود.

دستگاه آزمایش

طرح شماتیک دستگاه آزمایش در شکل 1 آمده است. اجزای این سیستم در جدول 1 توضیح داده شده است.



شکل 1: طرح شماتیک دستگاه آزمایش

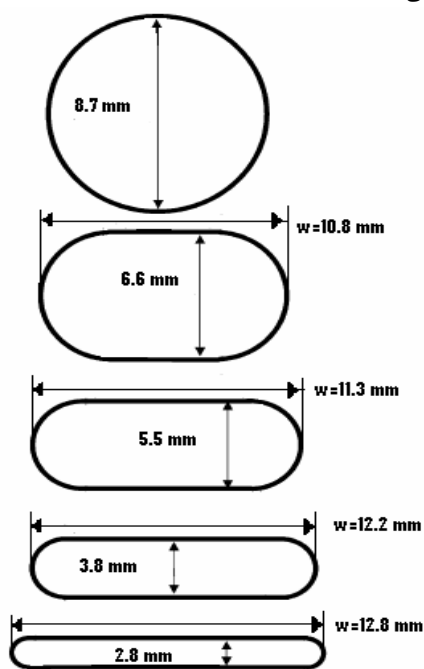
جدول 1: اجزای دستگاه آزمایش

شماره	نام تجهیز
1	کمپرسور
2	کندانسور
3	دبی سنج
4	دریافت کننده مایع
5	فیلتر درایر
6	شیر انبساط
7	پیش‌اوپراتور
8	تست‌اوپراتور
9	پس‌اوپراتور
10	جمع‌کننده مایع
●	ترموکوپل
P	فشارسنج
→	جهت جریان

(قلع- مس) اندازه گیری می شود. میانگین دماهای به دست آمده به عنوان دمای متوسط سطح لوله در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار می گیرد. دمای اشباع سیال، دمای اشباع در فشار متوسط ورودی و خروجی تست اوپراتور می باشد. ضریب انتقال حرارت از تقسیم مقدار شار حرارتی داده شده به تست اوپراتور بر اختلاف دمای متوسط دیواره و دمای اشباع سیال به دست می آید.

مشخصات ترمودینامیکی مبرد R-134a از منابع [2 و 3] استخراج می گردد.

به منظور بررسی اثر پخ شدگی لوله بر ضریب انتقال حرارت، لوله های میکروفین دار گرد با عبور از میان دستگاه نورد به لوله های با سطح مقطع پخ شده (تخت) با ارتفاع داخلی 6/6، 5/5، 3/8 و 2/8 میلیمتر تبدیل می شود. شکل 2 نمای شماتیک مقاطع لوله ها را نشان می دهد.



شکل 2: ابعاد سطح مقطع لوله تخت (پخ شده)

نتایج انتقال حرارت

در ابتدا ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از داده های آزمایشگاهی لوله گرد میکروفین دار با روابط موجود برای لوله گرد میکروفین دار مقایسه می گردد. برای این منظور از روابط کویاما و همکاران [4]، جانگر و وینرتون (1985) [5] و رابطه جانگر و وینرتون (1987) [6] استفاده می شود. هر سه رابطه مذکور، نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را در محدوده قابل قبولی پیش بینی می کنند.

در جدول 3 میزان تفاوت نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با هر یک از روابط مذکور به صورت مجزا آمده است. شکل 3 نیز مقادیر پیش بینی شده توسط سه رابطه بالا را در کنار نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای لوله گرد میکروفین دار نشان می دهد.

این دستگاه در واقع یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد نیاز است. دستگاه شامل پیش اوپراتور، تست اوپراتور و پس اوپراتور می باشد. به منظور حرارت دهی به اوپراتورها به دور آنها المنت حرارتی پیچیده شده است. توان ورودی به اوپراتورها توسط دیمرها سری شده به منبع تغذیه الکتریکی قابل تنظیم می باشد.

تست اوپراتور، یک لوله مسی میکروفین دار به طول 1/10 متر می باشد که به صورت افقی در دستگاه آزمایش قرار داده شده است. شکل و مشخصات لوله میکروفین دار در جدول 2 مشاهده می شود.

جدول 2: مشخصات لوله میکروفین دار

Outside diameter	$d_o = 9.52mm$	Fin tip	$tf = 0.096mm$
Wall thickness	$t_w = 0.3mm$	Fin pitch	$p = 0.48mm$
Fin height	$e = 0.25mm$	Helix angle	$\beta = 15^\circ$
Number of fin	$n = 55$	Fin tip angle	$2\theta = 15^\circ$
Fin base	$bf = 0.207mm$	Fin area	$A_f = 0.379$
Pipe length	$L = 1200mm$	Area enhancement	$\epsilon_a = 1.63$

نظر به اینکه طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تست اوپراتور قابل حصول می باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه ای طراحی شده است که کیفیت های متفاوت بخار، در ورود به تست اوپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک پیش اوپراتور در بین شیر انبساط و تست اوپراتور محقق شده و با تغییر توان ورودی به المنت های حرارتی نصب شده بر روی پیش اوپراتور می توان کیفیت بخار را در ورود به تست اوپراتور تنظیم کرد. به علاوه جهت جوشش (تبخیر) کامل مبرد از پس اوپراتور بعد از تست اوپراتور استفاده شده است تا سیال به هنگام ورود به کمپرسور به صورت بخار سوپر هیت در آمده و از ایجاد آسیب به کمپرسور جلوگیری شود.

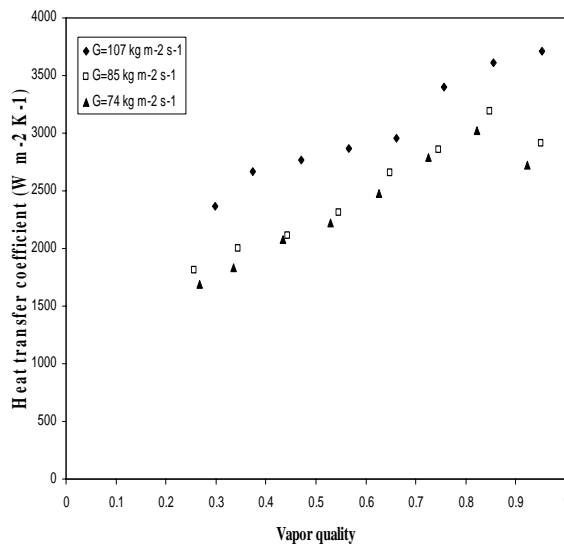
کندانسور استفاده شده یک تبادل گر حرارتی از نوع پوسته-لوله می باشد، برای اطمینان از مادون سرد شدن مبرد از دو کندانسور استفاده گردیده است (کندانسور اصلی و کمکی). کندانسورها شامل لوله های مسی هستند که به صورت رفت و برگشتی با اتصالات U شکل به هم متصل گردیده و درون یک لوله فولادی (پوسته) قرار گرفته اند. آب سرد در داخل پوسته و مبرد در داخل لوله های مسی جریان می یابد. کندانسور اصلی در کل آزمایشات فعال است، ولی کندانسور کمکی در صورت نیاز (مادون سرد نشدن مبرد توسط کندانسور اصلی) مورد استفاده قرار می گیرد.

دمای سطح خارجی دیواره تست اوپراتور، در شش مقطع و در هر مقطع در نقطه بالا و پایین لوله بوسیله ترموکوپل های سری T

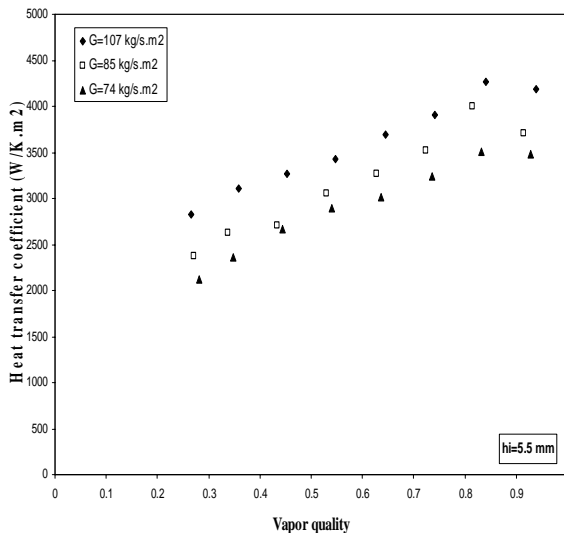
جدول 3: میزان اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و روابط موجود برای لوله گرد میکروفین دار

میزان اختلاف	رابطه پیشنهاد شده
26٪- تا 5٪+	کویاما و همکاران (1995) [4]
26٪- تا 20٪-	جانگر و وینترتون (1985) [5]
19٪- تا 9٪+	جانگر و وینترتون (1987) [6]

حرارت با کیفیت بخار می تواند به علت تغییر الگوی جریان و مکانیزم های مختلف جوشش (هسته ای و جابجایی) باشد.



شکل 4: تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله گرد

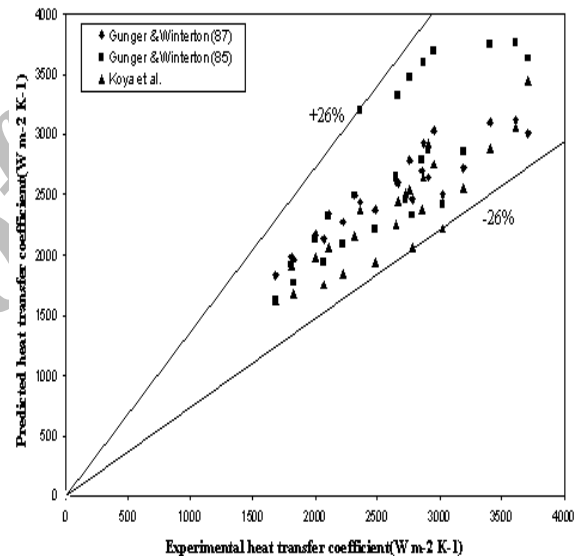


شکل 5: تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله میکروفین دار تخت با ارتفاع داخلی 5/5 میلی متر

در الگوی جریان حبایی ($x < 0/2$) جوشش هسته ای مکانیزم غالب جوشش جریان است. ولی با افزایش کیفیت بخار ($0/2 < x < 0/5$) و با توجه به سرعت جرمی، الگوی جریان به جریان حلقوی و یا جریان موجی جداشونده تغییر می کند. در این شرایط جوشش جابجایی به صورت قابل توجهی افزایش می یابد. همزمان جوشش هسته ای نیز در فیلم مایع کاهش می یابد ولی هنوز وجود دارد. در نتیجه در این ناحیه هر دو مکانیزم جوشش هسته ای و جابجایی وجود دارد.

سرعت بالای بخار هسته میانی در جریان حلقوی و جریان موجی جداشونده در حین جوشش باعث جدا شدن قطرات مایع از فیلم مایع و معلق شدن در این هسته بخار شود. این اثر و جوشش مستقیم لایه

همان گونه که در شکل 3 مشخص است، میزان تفاوت داده های آزمایشگاهی از داده های پیش بینی شده توسط روابط مذکور [4-6] از 26٪- تا 26٪+ می باشد. تطبیق پذیری خوب میان نتایج آزمایشگاهی لوله میکروفین دار گرد با مقادیر پیش بینی شده بوسیله روابط مذکور، حاکی از صحت و دقت وسایل اندازه گیری و آزمایشات انجام شده می باشد.



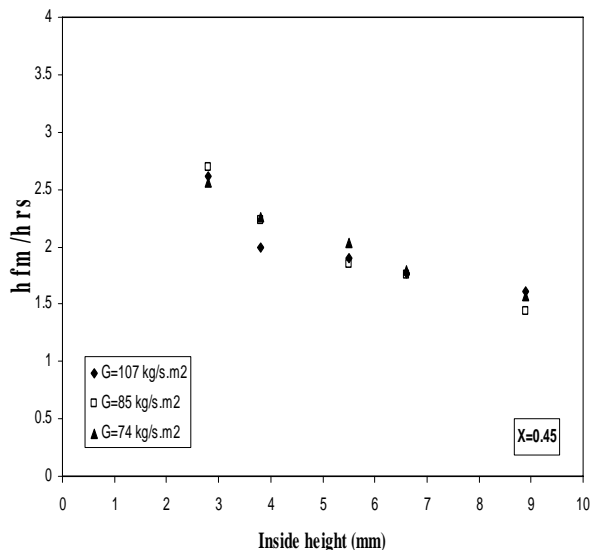
شکل 3: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش بینی شده توسط روابط موجود برای لوله میکروفین دار گرد

شکل های 4 و 5 بترتیب ضرایب انتقال حرارت جوششی را برای لوله میکروفین دار گرد و لوله میکروفین دار پخ با ارتفاع داخلی 5/5 میلی متر نشان می دهند.

همانگونه که از اشکال 4 و 5 مشخص است روندی مشابه در افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار در لوله گرد و پخ شده دیده می شود. وابستگی ضریب انتقال حرارت به کیفیت بخار متأثر از توزیع نسبی دو مکانیزم جوشش (هسته ای و جابجایی) و الگوی جریان جوششی می باشد.

شکل های 4 و 5 نشان می دهند که ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار افزایش می یابد (این پدیده بدین سبب است که در کیفیت بخار بالا، لایه مایع روی دیواره داخلی لوله نازکتر بوده و باعث مقاومت حرارتی کمتری می شود). تا به یک مقدار ماکزیمم می رسد و سپس افت می کند. تغییر شیب منحنی ضریب انتقال

همانگونه که از شکل 6 مشخص است روند کلی نمودار نشان می‌دهد که با افزایش کیفیت بخار، نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در سرعت‌های گرمی پایین بسیار ملموس‌تر می‌باشد. همچنین مشخص است که این نسبت با کاهش ارتفاع داخلی لوله افزایش می‌یابد. شکل 7 تغییرات نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت را بر حسب ارتفاع داخلی لوله در سرعت‌های گرمی متفاوت و کیفیت بخار 45٪ نشان می‌دهد.



شکل 7: تغییرات نسبت ضریب افزایش انتقال حرارت با ارتفاع داخلی لوله میکروفین‌دار تخت در سرعت گرمی‌های مختلف و کیفیت 45٪.

همانگونه که قبلاً گفته شد و در این شکل نیز مشهود است، با افزایش ارتفاع داخلی لوله نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. البته بایستی توجه کرد که مطالعه انجام شده در کندانسور [1] نشان می‌دهد که این نسبت در لوله‌ای با ارتفاع داخلی کمتر از 2 میلی‌متر، کمتر از نسبت مربوط به لوله با ارتفاع داخلی 3 میلی‌متر می‌باشد. به همین جهت لزوم تحقیقات مشابه در اواپراتور احساس می‌شود.

از شکل 7 همچنین می‌توان دریافت که در لوله‌ای با هندسه خاص و در کیفیت مشخص، روند یکنواختی بین سرعت گرمی و نسبت افزایش انتقال حرارت دیده نمی‌شود. شکل 8 نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله گرد و پخ شده میکروفین‌دار به لوله گرد صاف را در تمامی موارد بر حسب ارتفاع داخلی لوله نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل 8 دیده می‌شود، نسبت ضرایب انتقال حرارت جوششی در لوله‌های پخ شده میکروفین‌دار به لوله گرد صاف در تمامی موارد بیشتر از یک می‌باشد. این نسبت با کاهش ارتفاع داخلی لوله افزایش می‌یابد و بین 1/34 تا 3/39 تغییر می‌کند. همانطور که انتظار داشتیم ماکزیمم نسبت h_{fm} / h_{rs} در لوله‌ی پخ شده با کمترین ارتفاع داخلی یعنی 2/8 mm و سرعت

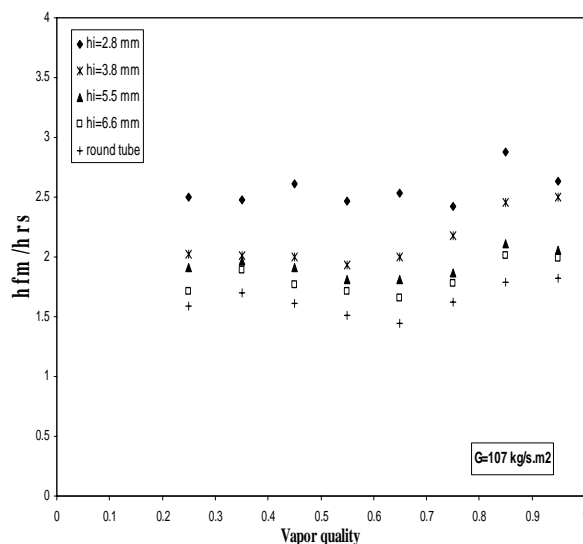
حلقوی باعث می‌شود که با افزایش میزان کیفیت بخار، لایه مایع روی دیواره نازک‌تر شده و باعث مقاومت حرارتی کمتری شود. زمانی که ضخامت فیلم بسیار کاهش می‌یابد جوشش هسته‌ای کاملاً از بین می‌رود. سرانجام فیلم مایع در بالای لوله کاملاً ناپدید می‌شود (به علت نیروی گرانشی) که در این حالت خشک شدگی جزئی دیواره لوله شروع می‌شود و ماکزیمم ضریب انتقال حرارت در شروع خشک شدگی اتفاق می‌افتد.

بعد از شروع خشک شدگی جزئی دیواره ($0/8 < X < 0/9$)، می‌توان از انتقال حرارت در قسمت خشک در مقایسه با قسمت خیس شده با مایع صرف نظر کرد. همچنین با افزایش کیفیت بخار ضخامت قسمت خیس دیواره کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد (به دلیل ضریب هدایت پایین بخار). زمانی که کل دیواره خشک می‌شود، انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت نزدیک به مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بخار اشباع گردد.

از طرف دیگر از اشکال 4 و 5 مشخص است که ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت گرمی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت گرمی باعث تغییر الگوی جریان از موجی جداشونده به حلقوی می‌شود. در جوشش جابجایی زمانی که سرعت سیال افزایش می‌یابد، گرمای دیواره لوله سریعتر توسط سیال گرفته می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز $Re = GD / \mu$ بالا می‌دهد، بنابراین مانند جابجایی اجباری تک فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

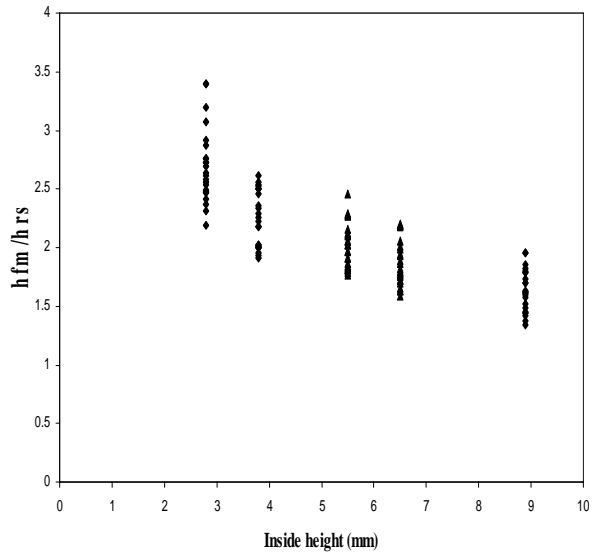
با تعریف ضریب افزایش انتقال حرارت به صورت نسبت ضریب انتقال حرارت لوله میکروفین‌دار پخ شده به ضریب انتقال حرارت لوله گرد صاف، h_{fm} / h_{rs} ، به بررسی تاثیر حضور فین و پخ کردن لوله در میزان افزایش ضریب انتقال حرارت می‌پردازیم.

شکل 6 تغییرات ضریب افزایش انتقال حرارت را بر حسب کیفیت در سرعت گرمی $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ نشان می‌دهد.



شکل 6: تغییرات ضریب افزایش انتقال حرارت با کیفیت بخار در لوله‌های مختلف میکروفین‌دار در سرعت گرمی $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$

جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ روی می دهد. کمترین مقدار این نسبت نیز در لوله با کمترین میزان پخ شدگی و همین سرعت جرمی رخ می دهد.



شکل 8: تغییرات نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت با ارتفاع داخلی لوله میکروفین دار تخت

با توجه به این نکته که فیلم مایع اطراف لوله سبب افزایش اثرات توربولانس بین فاز مایع و گاز می گردد، در نتیجه میزان انتقال حرارت در رژیم جریان حلقوی بیشتر می باشد. بنابراین، میزان انتقال حرارت در لوله های پخ شده نسبت به لوله گرد بیشتر است.

ثانیا، استفاده از لوله های پخ شده ممکن است میدان جریان را به گونه ای تغییر دهد که بدون آنکه رژیم جریان تغییر کند، میزان انتقال حرارت افزایش یابد. یعنی میدان جریان بدون آنکه رژیم جریان از جدا شده به حلقوی تغییر کند تحت تاثیر قرار گیرد. برای مثال در رژیم جریان حلقوی، در بعضی از جریان ها موج های مغشوش یا موج حلقوی دیده می شود، در حالی که در بعضی از جریانات حلقوی این موج ها دیده نمی شوند.

سومین احتمال می تواند مربوط به شکل گیری رژیم جریان متفاوت از آنچه تاکنون دیده شده است باشد، به نحوی که میزان انتقال حرارت را افزایش دهد.

رابطه پیشنهادی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت

بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، رابطه زیر برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت در لوله های میکروفین دار تخت پیشنهاد ارائه می شود:

$$h_{TP} = h_f \left(1 + 3000Bo^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right) \times \frac{D_r}{D_f} \times \frac{S_m}{S_s} \times \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.05} \quad (1)$$

که D_r معرف قطر داخلی در ریشه فین لوله گرد و D_f معرف قطر هیدرولیکی لوله پخ می باشد که از رابطه $D_f = \frac{4 \times A}{P}$ به دست می آید، که در آن A مساحت داخلی و P محیط سطح داخلی ریشه فین لوله می باشد. نسبت S_m/S_s نسبت افزایش سطح داخلی لوله میکروفین دار در اثر حضور فین می باشد. Bo و h_f نیز از روابط زیر به دست می آیند:

$$h_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left(\frac{k_f}{D} \right) \quad (2)$$

$$Bo = \frac{q}{Gh_{fg}} \quad (3)$$

Re_f نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Re_f = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (4)$$

شکل 9 مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (1) را نشان می دهد.

همان گونه که از شکل 9 مشخص است، میزان انحراف داده های پیشنهادی این رابطه از نتایج آزمایشگاهی در محدوده 15- تا 21+ می باشد.

افزایش انتقال حرارت جوششی در مورد لوله های میکروفین دار عموماً ناشی از ترکیب چهار اثر زیر می باشد:

- 1- فین های مارپیچ با بالا بردن آشفتگی در انتقال حرارت جابجایی و افزایش سرعت مماسی در نزدیک دیواره و ایجاد جریان های چرخشی، بر ضریب انتقال حرارت تاثیر می گذارند.
- 2- حرکت چرخشی باعث ایجاد میدان شتاب گریز از مرکز، درون لوله می شود. برای جریان های چرخشی دوفاز که جوشش در دیواره لوله اتفاق می افتد، حباب های تشکیل شده در سطح داغ لوله بوسیله مایع چرخشی بطور سریع احاطه می شوند. بعلاوه اختلاف چگالی بین مایع و بخار، نیروی گریز از مرکز بیشتری به مایع نسبت به حباب ها وارد می شود. بنابراین حباب ها به سرعت از دیواره به سمت مرکز لوله منتقل شده و مایع جایگزین آنها می شود.
- 3- اثر فینی باعث افزایش سطح انتقال حرارت می گردد.

اهمیت این مورد نسبت به موارد دیگر ناچیز است.

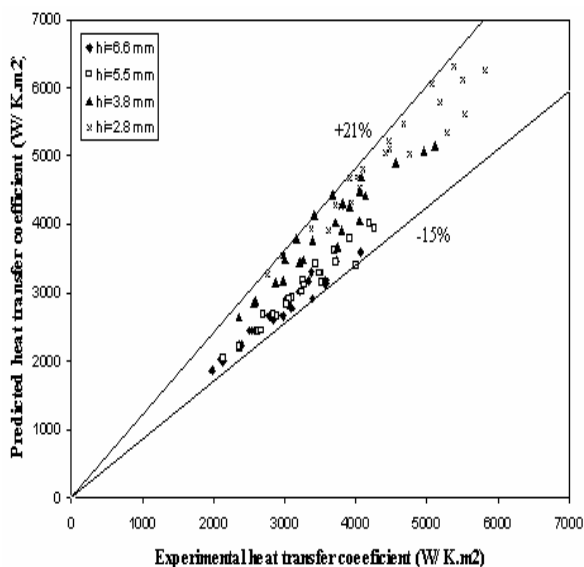
- 4- کاهش به وجود آمده در قطر هیدرولیکی به واسطه حضور فین ها نیز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. کاهش سطح مقطع جریان، افزایش محیط تر شده و افزایش سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد.

دلایل افزایش انتقال حرارت در لوله های پخ شده مشخص نمی باشد. اما ویلسون و همکاران [1]، چند فرضیه را برای افزایش انتقال حرارت با استفاده از لوله های پخ شده در کندانسور مطرح کرده اند که این دلایل برای انتقال حرارت جوششی نیز توجیه پذیر می باشد: اولاً، کاهش ارتفاع داخلی لوله سبب کاهش انرژی مورد نیاز برای تر کردن سطح بالایی لوله می شود. در نتیجه تغییر رژیم جریان از جریان جدا شده به حلقوی نسبت به لوله گرد سریع تر اتفاق می افتد.

4. نسبت ضریب انتقال حرارت لوله میکروفین دار پخ شده به ضریب انتقال حرارت لوله گرد صاف با افزایش کیفیت بخار افزایش می یابد ولی در مورد تغییر آن با افزایش سرعت جرمی نمی توان پیش بینی خاصی داشت.
5. براساس داده های تجربی مطالعه حاضر، رابطه ای برای تخمین ضرایب انتقال حرارت در لوله های میکروفین دار تخت ارائه گردید.

مراجع

- [1]- M.J. Wilson, T.A. Newell, J.C. Chato, C.A. Infante Ferreira, "Refrigerant charge, pressure drop, and condensation heat transfer in flattened tubes," International journal of refrigeration, Vol. 26, pp. 442-451, 2003.
- [2]- Sonntag, Borgnakke, Vanwylen, Fundamentals of thermodynamics, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 700-701, 2003.
- [3]- J.Collier and J.Thome, Convective Boiling and Condensation, Oxford University Press, 1994.
- [4]- Koyama S., Yu J., Momoki S., Fujii T., Honda H. "Forced convective flow boiling heat transfer of pure refrigerants inside a horizontal microfin tube", Proceeding of Engineering Foundation Conference on Convective Flow Boiling, Bnaff, Canada, Taylor and Francis, pp.137-142, 1995.
- [5]- Gungor, K.E. and Winterton, R.H., "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29(3), pp. 351-358, 1985.
- [6]- Gungor, K.E. and Winterton, R.H., "Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison of correlations to data", Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 65, pp. 148-156, 1987.



شکل 9: مقایسه ضرایب انتقال حرارت آزمایشگاهی لوله میکروفین دار تخت با پیش بینی رابطه (1)

نتیجه گیری

به طور خلاصه می توان نتایج زیر را از مطالعه حاضر ارائه کرد:

1. ضریب انتقال حرارت جوششی در لوله های میکروفین دار تخت نیز مانند لوله میکروفین دار گرد با افزایش سرعت جرمی و کیفیت بخار افزایش می یابد.
2. استفاده از لوله های تخت سبب افزایش انتقال حرارت نسبت به لوله گرد مشابه می شود.
3. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت در لوله تخت میکروفین دار با ارتفاع داخلی 2/8 میلیمتر (پخ ترین لوله) و در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ روی می دهد که به میزان 239٪ می باشد.