



## بررسی تجربی انتقال حرارت جوششی R-134a در لوله U شکل با شعاع خم مختلف

مهدی کاظمیان فر - کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

محمد علی اخوان بهابادی - دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

مسعود جمالی آشتیانی - کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران

E-mail: [mahdi.kazemianfar@gmail.com](mailto:mahdi.kazemianfar@gmail.com)

**چکیده:** در این تحقیق به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت در لوله‌های U شکل در جریان جوششی مبرد R-134a پرداخته می‌شود. بدین منظور یک سیکل تبرید تراکمی بخار طراحی و ساخته شده است. تبخیرکننده تحت آزمایش لوله مسی به قطر داخلی 8.25 mm و قطر خارجی 9.52 mm و طول 1100 mm می‌باشد. مبرد R-134a جاری در لوله تبخیرکننده، با جذب حرارت از یک کویل برقی دور آن تبخیر می‌شود. در این مطالعه تعداد 126 آزمایش بر روی یک لوله صاف و پنج لوله U شکل با نسبت‌های خم متفاوت 12.62، 9.71، 7.27، 5.16 و 3.37 انجام شده است. این آزمایش‌ها برای 3 سرعت جرمی متفاوت 55، 77 و 99 kg/m<sup>2</sup>s و پس از ثبت داده‌ها و بررسی آنها مشاهده شد که لوله‌های U شکل در بهترین حالت میزان انتقال حرارت را تا 35٪ نسبت به لوله صاف مشابه افزایش می‌دهد. همچنین در این مطالعه مشخص شد که بهترین عملکرد لوله U شکل مورد آزمایش، در سرعت‌های جرمی پائین مربوط به لوله با نسبت خم 5.16 و در سرعت‌های جرمی بالا مربوط به لوله با نسبت خم 9.71 می‌باشد.

**واژه های کلیدی:** هواگرمکن انتقال حرارت، جوشش، لوله U شکل، نسبت خم، R-134a.

## Experimental study of R-134a Evaporization Heat Transfer in U-Shaped pipes with various Radius of Curvature

M. Kazemyan-fard, Department of Mech. Eng., Faculty of Eng., Tehran University

M.A. Akhavan Behabadi Department of Mech. Eng., Faculty of Eng., Tehran University

M. Jamali Ashtiani, Housing and Building Research Center of Tehran

**Abstract:** In this study, the enhancement of heat transfer in the flow of R-134a in vaporization state through U-shaped pipes has evaluated, experimentally. To carrying out the experiments a compression evaporative cooling cycle designed and built. The evaporator of this cycle is a copper pipe with an I.D. and O.D. of 8.25 and 9.52 mm, respectively. The working fluid flowing through this pipe is vaporized by an electric coil surrounded this pipe. In this study, totally 126 experiments on straight and U-shaped pipes have carried out at various curvature ratio of 12.62, 9.71, 7.27, 5.16 and 3.37 with three level of mass flow velocity of 55, 77, and 99 kg/m<sup>2</sup>.s. A careful examination of the experimental results it reveals that the rate of heat transfer in U-shaped pipes enhanced up to 35% in comparison with the straight pipes at same length. In addition, it shows that the optimum thermal performance of U-shaped pipes in low and high mass flow velocity is at the cases with curvature ratio of 5.16 and 9.71, respectively.

Keywords: Nano-particle; Wet-type milling process; Taguchi method; RSM and GA

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با توجه به محدودیت منابع انرژی استفاده از روش‌های مختلف به منظور افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به یکی از زمینه‌های تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. در صنایع مختلف نظیر یخچال‌سازی و کولر‌سازی بطور معمول از سطوح گسترده در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌کنند. در واقع هر مبدل نامزد بالقوه‌ای برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. بدین منظور از روش‌های فعال و غیرفعال، جهت افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود. یکی از روش‌های غیرفعال، استفاده از لوله‌های U شکل می‌باشد. مزیت این لوله‌ها نسبت به لوله‌های مشابه صاف کاهش فضای مفید اشغال شده و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که مطالعات زیادی بر روی تاثیر تغییر شعاع خم لوله در انتقال حرارت جوششی صورت نگرفته است. اکثر این مطالعات به بررسی ضرایب انتقال حرارت در جریان تک فاز پرداخته‌اند و مطالعات محدودی بر روی جریان دو فاز انجام شده است [۱-۲]. بنابراین مطالعه حاضر به اثر لوله‌های U شکل بر ضریب انتقال حرارت در تبخیرکننده افقی و با مبرد R-134a می‌پردازد.

## ۲- دستگاه مورد آزمایش

دستگاه مورد آزمایش یک سیکل تبرید تراکمی بخار مجهز به ابزار اندازه‌گیری مورد نیاز است. در شکل (۱) طرحواره این دستگاه بهمراه اجزای مختلف آن نشان داده شده است. بطوریکه از این شکل مشاهده می‌شود، دستگاه شامل تبخیرکننده اصلی، (تبخیرکننده مورد آزمایش)، تبخیرکننده ثانویه، کمپرسور، چگالنده، شیرانبساطی و وسایل لازم برای اندازه‌گیری و کنترل می‌باشد.

تبخیرکننده مورد آزمایش شامل یک لوله مسی به قطر داخلی ۸/۲۵ mm و قطر خارجی ۹/۵۲ mm و طول ۱۱۰۰ mm می‌باشد. گرمای مورد نیاز تبخیرکننده توسط یک گرمکن برقی

که به طور یکنواخت دور لوله مسی پیچیده شده، شار حرارتی ثابتی را تامین می‌کند. مقدار توان مطلوب گرمکن توسط یک منبع تغذیه صنعتی بقدرت ۲ kW تنظیم می‌گردد.

بلحاظ اینکه طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تبخیرکننده مورد آزمایش قابل حصول می‌باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه‌ای طراحی شده که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تبخیرکننده مورد آزمایش قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک تبخیرکننده اولیه پیش از تبخیرکننده مورد آزمایش محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به گرمکن برقی بر روی تبخیرکننده اولیه، می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تبخیرکننده مورد آزمایش تنظیم کرد. برای فوق‌گرم کردن مبرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور از یک تبخیرکننده ثانویه و یک جمع‌کننده مایع استفاده گردیده است.

ترموکوپل‌های مورد استفاده از نوع سری T می‌باشند که با دقت  $0.1^{\circ}\text{C}$  کالیبره شده‌اند، فشارسنج‌ها نیز با دقت ۲ kPa کالیبره شده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار جریان عبوری از تبخیرکننده مورد آزمایش، از یک دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار که قادر به اندازه‌گیری اختلاف فشار تا ۳ bar بوده و برای صفر تا ۱۵۰ kPa کالیبره شده، استفاده شد.

در این مطالعه از لوله‌های U شکل با پنج شعاع خم متفاوت با نسبت‌های خم ۱۲/۶۲، ۹/۷۱، ۷/۲۷، ۵/۱۶ و ۳/۳۷  $2R/D=$  استفاده شده، که مطابق شکل (۲) قطر داخلی لوله و R شعاع متوسط خم می‌باشد.

## ۳- جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

در مجموع ۱۲۶ آزمایش با سه سرعت جرمی متفاوت ۹۹، ۷۷ و  $55 \text{ kg/m}^2\text{s}$  برای جریان داخل لوله صاف و لوله‌های U شکل انجام شد. محدوده پارامترهای مختلف آزمایش در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

۲- میانگین دمای سطح خارجی دیواره تبخیرکننده مورد آزمایش،  $t_{w0}$ ، از متوسط گیری دماهای قرائت شده در هر نقطه به صورت زیر تعیین می شود:

$$t_w = \frac{\sum_{i=1}^k t_{ws}}{k} \quad (2)$$

که عدد  $k$  بیانگر تعداد نصب ترموکوپل ها می باشد.

۳- گرمای داده شده به تبخیرکننده مورد آزمایش:

$$Q = W \times \eta \quad (3)$$

که  $W$  توان برقی دو سر المنت حرارتی تبخیرکننده مورد آزمایش می باشد.

۴- شارحرارتی شعاعی  $q$ ، برای تبخیرکننده مورد آزمایش توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q = Q / (\pi \cdot d \cdot L) \quad (4)$$

۵- با توجه به اینکه افت دما در دیواره لوله، از مرتبه  $0.01^\circ\text{C}$  و دقت اندازه گیری دستگاه  $0.1^\circ\text{C}$  می باشد، از وارد کردن افت دما در محاسبات صرف نظر می شود.

۶- فشار استاتیک متوسط در تبخیرکننده مورد آزمایش بصورت میانگین فشارهای ورودی و خروجی مبرد در نظر گرفته می شود. دمای اشباع بخار در این قسمت،  $t_s$ ، دمای اشباع متناظر با این فشار استاتیک می باشد.

۷- ضریب انتقال حرارت تبخیرکننده مورد آزمایش با معلوم بودن شارحرارتی از رابطه (۴)، دمای جوشش متوسط و درجه حرارت سطح داخلی لوله، توسط معادله (۵) محاسبه می شود.

برای محاسبه دمای اشباع و آنتالپی R-134a در حالت های مختلف از مرجع [۳] و سایر خواص از جمله ویسکوزیته از مرجع [۴] استفاده شده است. با استفاده از خاصیت فرآیند خفگی در شیر سوزنی کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده اولیه تعیین می شود. برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تبخیرکننده مورد آزمایش از موازنه حرارتی استفاده می گردد. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از تبخیرکننده مورد آزمایش محاسبه می گردد.

#### ۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت

در این آزمایش برای تعیین ضریب انتقال حرارت، مطابق شکل (۳)، در هر مرحله، تبخیرکننده مورد آزمایش را به سه قسمت؛ لوله مستقیم قبل از خم، قسمت دوم خم  $U$  شکل و قسمت سوم لوله صاف بعد از خم تقسیم می شود. هدف از این تقسیم بندی بررسی دقیق خم  $U$  شکل بر روی افزایش میزان انتقال حرارت در هریک از سه قسمت فوق می باشد.

متوسط دمای جدار در هر بخش، متوسط دمای بین ترموکوپل های نصب شده در آن بخش می باشد و شار حرارتی و دمای اشباع متوسط ابتدا به صورت کلی در سراسر لوله محاسبه شده و سپس برای هر بخش از آن استفاده می شود. مراحل محاسبه به شرح زیر می باشد:

۱- دمای متوسط سطح خارجی تبخیرکننده مورد آزمایش در یک نقطه،  $t_{ws}$ ، توسط رابطه (۱) تعیین می شود:

$$t_{ws} = \frac{t_T + t_B}{2} \quad (1)$$

که،  $t_T$  و  $t_B$  به ترتیب دمای فوقانی و تحتانی سطح خارجی لوله در هر مقطع می باشند.

### ۶- انتقال حرارت لوله‌های U شکل

بطوریکه اشاره رفت، تبخیرکننده مورد آزمایش جهت جمع-آوری داده‌ها و تحلیل نتایج به سه بخش تقسیم و برای هر بخش در نسبت‌های خم ۳/۳۷، ۵/۱۶، ۷/۲۷، ۹/۷۱ و ۱۲/۶۲ در سه سرعت جرمی متفاوت مبرد  $0.55 \text{ kg/m}^2\text{s}$  و ۷۷ و ۹۹ داده‌ها بدست آمد. تأثیر پارامترهای گوناگون از قبیل سرعت جرمی، کیفیت بخار و نسبت خم بر ضریب انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت، با توجه به تعدد نتایج، تنها برخی از آنها در این مقاله ارائه می‌شود، که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

در شکل (۵)، ضرایب انتقال حرارت برای لوله‌های U شکل برحسب کیفیت بخار در سرعت جرمی‌های مختلف نشان داده شده است. با بررسی نمودارهای این شکل نتایج ذیل حاصل می‌شود:

- ضرایب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار در حدود سرعت‌های جرمی و نسبت‌های خم تا کیفیت حدود ۰/۸ افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش کیفیت بخار ضخامت لایه مایع روی دیواره داخلی لوله نازکتر شده و مقاومت حرارتی کمتری و در نتیجه ضریب انتقال حرارت زیادی را موجب می‌شود. از طرفی، با افزایش کیفیت بخار به مقدار بیش از حدود ۰/۸ ضریب انتقال کاهش می‌یابد. علت این کاهش رخ دادن خشک‌شدگی جزئی روی دیواره لوله می‌باشد. لازم به ذکر است که موارد فوق برای هر سه بخش لوله آزمایش برقرار است بدین معنی که اثرات تغییر کیفیت بخار روی ضریب انتقال حرارت در خم U شکل نیز مانند لوله صاف می‌باشد اما نرخ تغییرات متفاوت خواهد بود.

- ضریب انتقال حرارت در حدود سرعت‌های جرمی در نسبت خم ۵/۱۶ بیشینه می‌باشد. لازم به یادآوری است که از الگوی جریان در لوله‌های با خم U شکل اطلاع درستی دردست نیست و برای تحلیل دقیق پیرامون افزایش انتقال

$$h = \frac{q}{(t_w - t_s)} \quad (5)$$

### ۵- نتایج انتقال حرارت لوله صاف

نخست ضرایب انتقال حرارت در لوله صاف را تعیین و با روابط متعدد موجود مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های حاصل، سازگاری خوبی را با رابطه پیشنهادی جانگر و ویترتون دارند [۵]. این رابطه به صورت زیر است:

$$h_p = h_f \left[ 1 + 3000Bo^{0.86} + 1.12 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right] \quad (6)$$

$h_f$  در رابطه فوق بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left( \frac{k_f}{D} \right) \quad (7)$$

همچنین:

$$Re_f = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (8)$$

$$Bo = \frac{q}{Gh_{fg}} \quad (9)$$

که  $h_p$  ضریب انتقال حرارت دوفازی در لوله صاف،  $Bo$  عدد جوشش،  $x$  کیفیت متوسط بخار در تبخیرکننده مورد آزمایش،  $\rho_f$  و  $\rho_g$  بترتیب چگالی فاز مایع و گاز،  $G$  سرعت جرمی،  $D$  قطر داخلی لوله،  $k_f$  ضریب هدایت حرارتی مایع،  $\mu_f$  لزجت دینامیکی مایع،  $Pr_f$  عدد پرانتل مایع و  $h_{fg}$  آنتالپی نهان تبخیر می‌باشند.

رابطه فوق مطابق شکل (۴)، نتایج آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با ۱۳-٪ الی ۳+٪ خطا پیش‌بینی می‌کند که برای مطالعات آزمایشگاهی قابل قبول است. بنابراین از این رابطه جهت تحلیل‌های آتی استفاده خواهیم کرد.

جریان از جداشونده موجی به حلقوی می‌شود، که این نیز خود باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.

- با افزایش سرعت جرمی در هریک از نسبت‌های خم میزان افزایش انتقال حرارت در خم بیشتر از هر دو بخش صاف لوله می‌باشد که علت آنرا می‌توان ایجاد یک جریان ثانویه در فاز مایع در جریان دوفازی داخل لوله در نظر گرفت که سبب افزایش اغتشاش و در نتیجه افزایش انتقال حرارت در جریان داخل لوله می‌گردد.
- ایجاد اغتشاش در خم روی جریان پایین دست خود نیز تاثیر مثبتی خواهد داشت که با اندکی دقت در نمودارها می‌توان این تغییرات را در بخش صاف بعد از خم نسبت به قبل از خم مشاهده نمود.
- در لوله‌های دارای خم U شکل ضریب انتقال حرارت تا  $1/42$  برابر نسبت به لوله‌های صاف در نسبت خم  $5/16$  افزایش می‌یابد.
- باتوجه به نمودارهای شکل (۶)، می‌توان دریافت که در حدود سرعت‌های جرمی ضریب انتقال حرارت در خم U نسبت به هر دو بخش مستقیم لوله بیشتر بوده و در بخش مستقیم بعد از خم نیز ضریب انتقال حرارت نسبت به بخش مستقیم قبل از خم بیشتر می‌باشند که علت این افزایش ضریب انتقال حرارت همان ایجاد اغتشاشات در جریان دوفازی در طول خم و تاثیر این اغتشاشات روی بخش مستقیم بعد از خم می‌باشد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل و بررسی داده‌های آزمایشگاهی، نتایج زیر در مورد اثر خم U در لوله مستقیم بر ضریب انتقال حرارت حاصل شد:

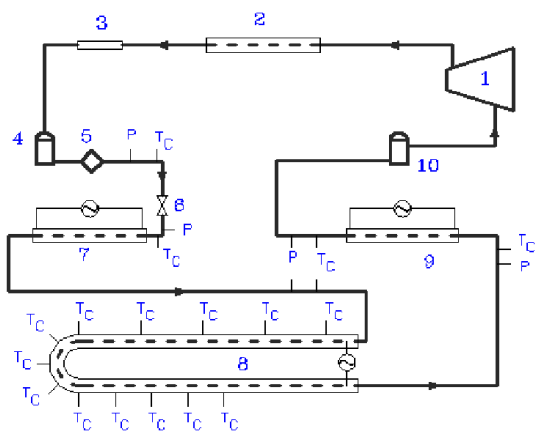
حرارت در این لوله‌ها، بررسی الگوی جریان باتوجه به نقش مهم آن در میزان ضریب انتقال ضروری می‌باشد. چند فرضیه را می‌توان برای افزایش انتقال حرارت در این لوله‌ها مطرح کرد. اولاً، در خم U سیال دوفاز وارد یک مسیر دایره‌ای می‌شوند که در این مسیر فاز مایع از سیال دوفازی تحت تاثیر نیروی جانب مرکز قرار خواهد گرفت و در این نقطه ضخامت فیلم مایع بر روی جدار داخلی و خارجی نسبت به لوله صاف تغییر خواهد کرد که می‌تواند باعث افزایش ضریب انتقال حرارت گردد. دومین احتمال می‌تواند به شکل‌گیری رژیم جریان متفاوت از آنچه تاکنون دیده شده، مربوط باشد به نحوی که میزان انتقال حرارت را افزایش دهد.

شکل (۶) روند تغییر ضریب انتقال حرارت را بر حسب کیفیت بخار برای بخش لوله صاف قبل از خم، بخش خم و بخش لوله صاف بعد از خم لوله با خم U شکل در نسبت خم  $5/16$  و سرعت‌های جرمی مختلف را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای این شکل نشان می‌دهد:

- ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت جرمی و با فرض ثابت ماندن سایر پارامترها در هر سه بخش لوله افزایش می‌یابد. این مسئله بر اساس اثر جابجایی بزرگتر در سرعت جرمی بالاتر توجیه می‌شود. در جوشش جابجایی زمانیکه سرعت سیال افزایش می‌یابد، گرمای دیواره لوله سریعتر توسط سیال دفع می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز بالا را موجب می‌شود ( $Re = GD/\mu$ )، بنابراین مانند جابجایی اجباری تک‌فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در حقیقت، سرعت جرمی بخار بالاتر باعث آشفته‌گی بیشتر در فیلم مایع می‌گردد و در نتیجه موجب افزایش میزان جوشش می‌شود. افزایش سرعت جرمی باعث تغییر الگوی

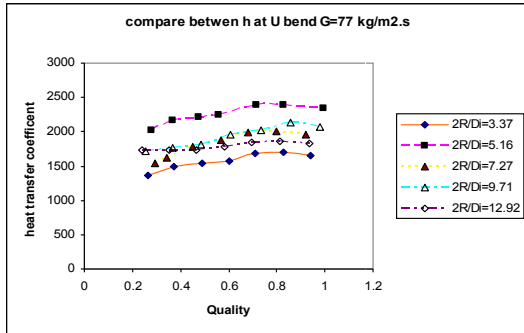
- [1] Chol, K. and Tae, S.J., 2000, "Evaporation Heat Transfer for R-22 and R-407C Refrigerant Oil Mixture in a Micro-Fin Tube with a U-bend", Int. J. of Refrigeration, Vol. 23, pp 219-231.
- [2] Wang, C.C., Chen, I.Y., Yang, Y.W. and Hu, R., 2004, "Influence of Horizontal Return Bend on the Two-Phase Flow Pattern in Small Diameter Tubes", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp 145-152.
- [3] Sonntag, R., Borgnakke, C. and Van Wylen, G., 1997, "Fundamentals of Thermodynamics", J. Wiley and Sons, New York.
- [4] Collier, J. and Thome, J., 1994, "Convective Boiling and Condensation", Oxford University Press.
- [5] Gungor, K.E., and Winterton, R.H., 1985, "A general Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, No. 3, pp 351-358.

- میزان افزایش ضریب انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از سرعت جرمی، کیفیت بخار و هندسه لوله می‌باشد.
- با افزایش سرعت جرمی سیال ضریب انتقال حرارت نیز افزایش خواهد یافت اما میزان این افزایش برای نسبت‌های خم مختلف یکسان نخواهد بود. بیشینه افزایش انتقال حرارت در خم U در حین تغییر سرعت جرمی در سرعت جرمی ۹۹ کیلوگرم بر مربع ثانیه رخ خواهد داد.
- در یک لوله آزمایش با خم U شکل با افزایش سرعت جرمی مقادیر ضریب انتقال حرارت به یک نسبت در سه بخش این لوله افزایش نخواهند یافت و میزان این افزایش در طول خم بیشتر از دو بخش مستقیم لوله و هم چنین در بخش مستقیم بعد از خم بیشتر از بخش مستقیم قبل از خم می‌باشد.
- رفتار خم U شکل برای تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت مانند لوله صاف است فقط نرخ این تغییر کمی متفاوت است.
- در آزمایش‌های انجام شده بطوریکه اشاره شد تست اوپراتور به سه قسمت تقسیم گردید که ضرایب انتقال حرارت در هر قسمت جداگانه به دست آمد. ضرایب انتقال حرارت بین نسبت‌های خم رابطه‌ی زیر را با هم دارند. نسبت ضریب انتقال حرارت در خم U به بخش مستقیم صاف قبل از خم و بعد از خم در نسبت خم ۵/۱۶ بیشینه خواهد بود
- در مقایسه ضریب انتقال حرارت در خم U شکل در نسبت‌های خم مختلف، ضریب انتقال حرارت در نسبت خم ۵/۱۶ بیشینه خواهد بود.
- در یک لوله دارای خم U شکل ضریب انتقال حرارت حداکثر ۱/۴۲ برابر لوله صاف می‌باشد.

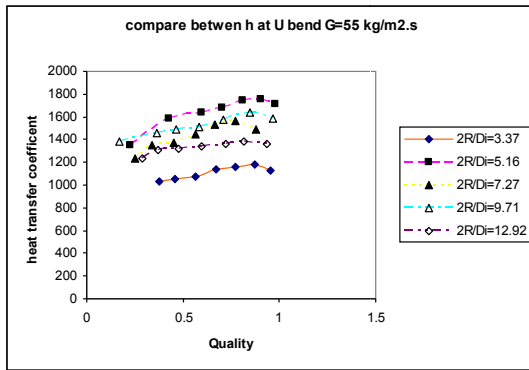


- |                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| ۱- کمپرسور           | ۸- تست اوپراتور                 |
| ۲- کندانسور          | ۹- اوپراتور ثانویه              |
| ۳- دبی سنج           | ۱۰- جمع کننده مایع              |
| ۴- دریافت کننده مایع | DP- دستگاه اندازه گیری افت فشار |
| ۵- فیلتر- درایر      | TC- ترموکوپل                    |
| ۶- شیر انبساط        | P- فشار سنج                     |
| ۷- اوپراتور اولیه    |                                 |

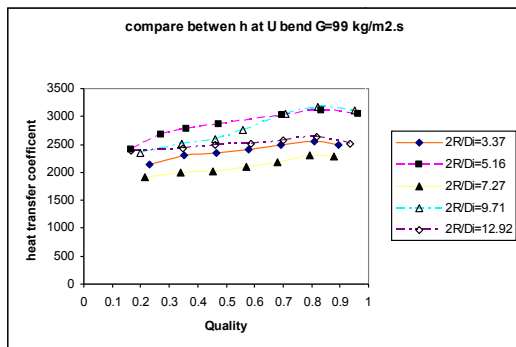
شکل (۱): طرحواره دستگاه مورد آزمایش



الف: سرعت جرمی ۵۵ kg/m<sup>2</sup>s

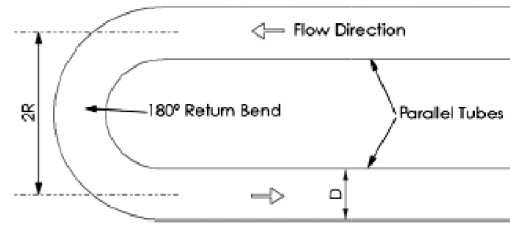


ب: سرعت جرمی ۷۷ kg/m<sup>2</sup>s



ج: سرعت جرمی ۹۹ kg/m<sup>2</sup>s

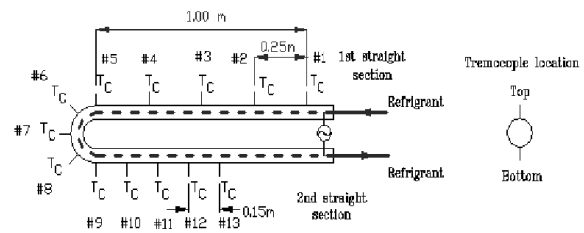
شکل (۵): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله های U شکل در سرعت های جرمی مختلف



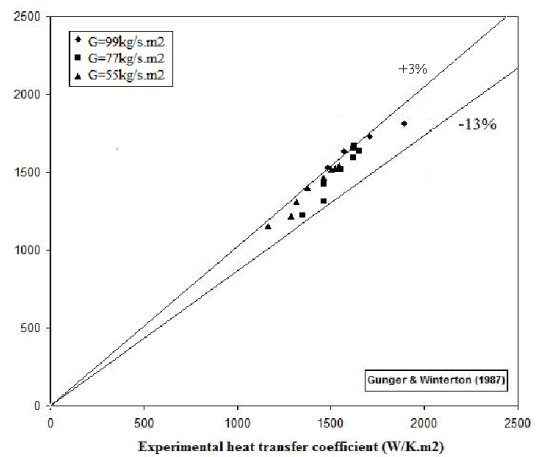
شکل (۲): نمای طرحواره خم برگشتی

جدول (۱): محدوده پارامترهای آزمایش

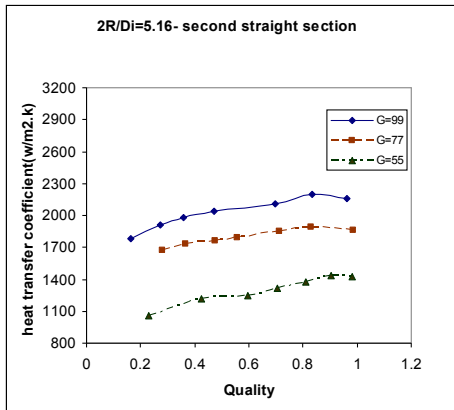
نام کمیت و یا پارامتر	حدود
کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده مورد آزمایش	۰/۲ - ۰/۹
کیفیت بخار خروجی از تبخیرکننده مورد آزمایش	۰/۳ - ۱
سرعت جرمی مبرد	۵۴ - ۹۹ kg/m <sup>2</sup> s
درجه حرارت جوشش متوسط	۱۹ °C تا ۳ -
عدد رینولدز مایع	۲۸۰۰ - ۱۳۰۰
عدد رینولدز بخار	۸۱۰۰۰ - ۴۵۰۰۰



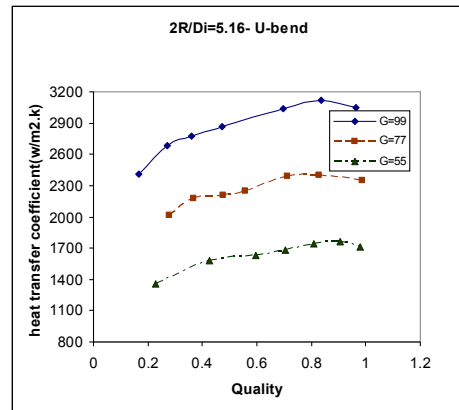
شکل (۳): طرحواره تبخیرکننده مورد آزمایش و محل ترموکوپل ها



شکل (۴): مقایسه نتایج آزمایشگاهی لوله صاف با رابطه (۶) [۵]

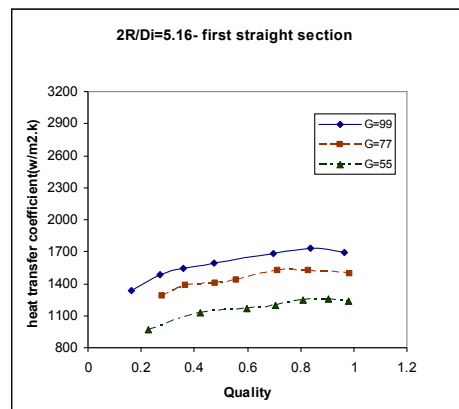


ج: سرعت جرمی ۹۹ kg/m<sup>2</sup>s



الف: سرعت جرمی ۵۵ kg/m<sup>2</sup>s

شکل (۶): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله با خم U شکل در نسبت خم ۵/۱۶ و سرعت‌های جرمی مختلف



ب: سرعت جرمی ۷۷ kg/m<sup>2</sup>s