دانشکده فناوری های نوین

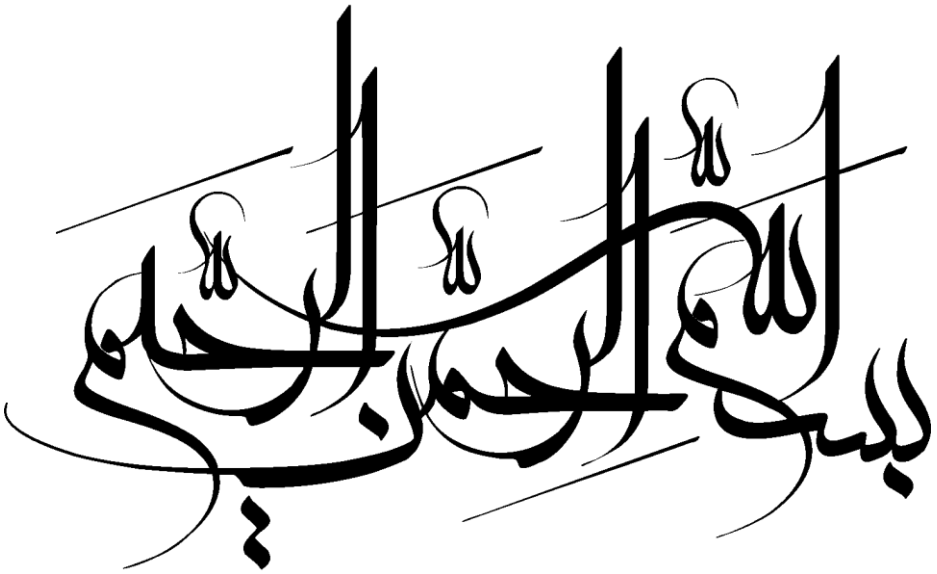
گروه علوم مهندسی

دستور کار آزمایشگاه انتقال حرارت

گرد آورندگان:

مهرداد شیخلو

محمد حسین ادیب


بسم الله الرحمن الرحيم

نحوه ی نوشتن گزارش کار

یک گزارش مناسب باید شامل قسمت های زیر باشد:

- روی جلد گزارش نام آزمایشگاه، عنوان آزمایش ، اسامی و شماره دانشجویی اعضای گروه و تهیه کننده گزارش به صورت تفکیک شده، تاریخ انجام آزمایش و تحویل گزارش کار
- هدف، مقدمه و چکیده آزمایش
- تجزیه و تحلیل تئوری آزمایش
- جدول اطلاعات آزمایش
- نمونه محاسبات مربوط به آزمایش
- جدولی از کل محاسبات انجام شده برای تمام مراحل آزمایش
- نمودارها و منحنی های خواسته شده
- پاسخ به سوالات دستور کار
- بحث و نتیجه گیری از آزمایش
- منابع مورد استفاده

لطفا به هنگام نوشتن گزارش نکات زیر را رعایت کنید:

در صورت دست نویس بودن گزارش، باید بر روی کاغذ *A4* ، با خودکار آبی و با رعایت حاشیه های مناسب باشد و در صورت تایپ کردن آن باید به صورت کامل منظم و با رعایت حاشیه های مناسب و همچنین انتخاب کادر باشد. منحنی ها ترجیحا با نرم افزار رسم شود، همچنین مهلت تحویل هر گزارش حداکثر تا دو هفته بعد از تاریخ انجام آن می باشد.

عنوان **صفحه**

نحوه ی نوشتن گزارش کار ..... *i*

۱ فصل اول: تعیین ضریب هدایت حرارتی مواد جامد ۱

۱-۱ مقدمه : ۱

۱-۲ شرح دستگاه ۲

۱-۲-۱ واحد انتقال حرارت خطی (محوری) : ۲

۱-۲-۲ واحد انتقال حرارت شعاعی : ۳

۱-۲-۳ فهرست آزمایش های مختلفی که با این دستگاه قابل انجام می‌باشد : ۳

1-3 روش کار با دستگاه : ۴

۱-۴ آزمایش هدایت حرارتی در طول یک میله با جنس ساده. ۴

۱-۴-۱ نحوه انجام آزمایش : ۵

1-4-2 خواسته های آزمایش: ۵

۱-۵ آزمایش هدایت حرارت در طول یک میله با جنس مرکب ۵

۱-۵-۱ خلاصه تئوری آزمایش : ۶

۱-۵-۲ نحوه انجام آزمایش : ۷

۱-۵-۳ خواسته های آزمایش: ۷

۱-۶ آزمایش اثر سطح مقطع روی انتقال حرارت ۷

۱-۶-۱ تئوری آزمایش : ۷

۱-۶-۲ نحوه انجام آزمایش : ۸

۱-۶-۳ خواسته های آزمایش: ۹

۱-۷ آزمایش هدایت حرارتی شعاعی: ۹

۱-۷-۱ شرح دستگاه آزمایش: ۹

۱-۷-۲ نحوه انجام آزمایش : ۱۰

۱-۷-۳ خلاصه تئوری آزمایش : ۱۰

۱-۷-۴ خواسته های آزمایش: ۱۱

۲ فصل دوم: تعیین ضریب هدایت حرارتی سیالات ۱۲

۲-۱ مقدمه: ۱۲

۲-۲ شرح دستگاه: ۱۲

2-3 روش کار با دستگاه: ۱۲

۲-۴ آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی سیالات ۱۳
۲-۴-۱ تئوری آزمایش: ۱۳
۲-۴-۲ نحوه انجام آزمایش: ۱۴
۲-۴-۳ خواسته های آزمایش: ۱۶
3 **فصل سوم: مبدل های حرارتی ۱۷**
۳-۱ مقدمه: ۱۷
۳-۲ تئوری آزمایش: ۱۷
۳-۳ آزمایش مبدل حرارتی دو لوله ای: ۱۹
۳-۳-۱ مراحل انجام آزمایش: ۲۰
۳-۳-۲ خواسته های آزمایش: ۲۱
۳-۴ آزمایش مبدل حرارتی پوسته و لوله: ۲۱
۳-۴-۱ مراحل انجام آزمایش: ۲۲
۳-۴-۲ خواسته های آزمایش: ۲۳
۳-۵ آزمایش مبدل حرارتی صفحه ای: ۲۳
۳-۵-۱ مراحل انجام آزمایش: ۲۴
۳-۵-۲ خواسته های آزمایش: ۲۴
۴ **فصل چهارم: آزمایش چگالش ۲۵**
۴-۱ مقدمه: ۲۵
۴-۱-۱ میعان فیلمی (*Filmwise Condensation*) : ۲۵
۴-۱-۲ میعان قطره ای (*Dropwise Condensation*) : ۲۵
۴-۱-۳ جوشش هسته ای: ۲۶
۴-۱-۴ تاثیر وجود هوا و یا گاز های غیر قابل میعان در محفظه: ۲۶
۴-۲ شرح دستگاه: ۲۶
۴-۳ روش کار با دستگاه: ۲۹
۴-۴ آزمایش مشاهده ی میعان فیلمی و قطره ای و جوشش هسته ای ۳۰
۴-۵ آزمایش اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان فیلمی: ۳۱
۴-۵-۱ خلاصه تئوری مربوط به آزمایش: ۳۱
۴-۵-۲ نحوه انجام آزمایش: ۳۲
۴-۵-۳ خواسته های آزمایش: ۳۳
۴-۶ آزمایش اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان قطرهای: ۳۴

۴-۶-۱ خلاصه تئوری مربوط به آزمایش:..... ۳۴
۴-۶-۲ نحوه انجام آزمایش:..... ۳۴
۴-۶-۳ خواسته های آزمایش:..... ۳۵
۴-۷ آزمایش بررسی رابطه ی فشار و دمای اشباع برای آب: ۳۵
۴-۷-۱ نحوه انجام آزمایش:..... ۳۵
۴-۷-۲ خواسته های آزمایش:..... ۳۶

فصل اول: تعیین ضریب هدایت حرارتی مواد جامد

۱-۱ مقدمه :

انتقال حرارت هدایتی(*conduction*) در داخل اجسام موقعی پدید می‌آید که یک گرادیان دمایی بین دو نقطه از جسم ایجاد شود و هر قدر گرادیان دمایی (گرادیان درجه حرارت) بیشتر باشد شدت انتقال حرارت هم زیادتر خواهد بود. البته انتقال حرارت هدایتی در اجسام جامد بهتر صورت می‌گیرد تا مایعات و گازها ، و بر عکس انتقال حرارت جابجایی (*convection*) در مایعات و گازها خیلی بهتر انجام می‌شود که در جامدات اصلاً صورت نمی‌گیرد. انتقال حرات هدایتی معمولاً در داخل اجسام بطور سه بعدی انجام می‌پذیرد. آنالیز سه بعدی انتقال حرارت ساده نبوده و نیازمند صرف وقت زیاد جهت انجام محاسبات است. که البته از طریق المان‌های محدود و برنامه‌های کامپیوتری می‌توان در صرف وقت و مشکلات دیگر صرفه‌جویی کرد. در این آزمایش انتقال حرارت هدایتی یک بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. قانون حاکم بر این آزمایش قانون فوریه است که میزان حرارت منتقل شده را به گرادیان درجه حرارت و سطح مقطعی مربوط می‌سازد.

دستگاه مورد نظر شامل دو قسمت می‌باشد که یک قسمت آن انتقال حرارت را در جهت محوری و قسمت دیگر در جهت شعاعی نشان می‌دهد. هر دو قسمت دارای ترموکوپل‌هایی هستند که درجه حرارت را در نقاط مختلف نشان می‌دهند. یک المان حرارتی جهت تولید حرارت در قسمت گرم به‌کار رفته است و جهت خنک نمودن قسمت سرد از آب شهر استفاده می‌شود.

ترموکوپل‌هایی که در این دستگاه به‌کار رفته است درجه حرارت را با دقت ۰/۱ $^{\circ}C$ اندازه‌گیری می‌نماید، توان مصرفی دستگاه توسط یک مدار برقی که قدرت خروجی آن تغییر می کند تامین می‌گردد. این دستگاه طوری طراحی شده است که خطاهای آزمایش مربوط به انتقال حرارت را در سه بعد به حداقل خود برساند و از اتلاف حرارتی از طریق کنوکسیون و تشعشع جلوگیری نماید.

قطعات متفاوتی جهت مقاصد مختلف که قابل تعویض و جایگزینی می‌باشد همراه دستگاه آزمایش بوده که با استفاده از آنها می‌توان اثرات سطح مقطع ، ضریب هدایت حرارتی ، ترکیب دو فلز غیر هم‌جنس، اثر لایه عایق و بالاخره بررسی انتقال حرارت در حالت نا پایدار را نشان می‌دهد.

۱-۲ شرح دستگاه

۱-۲-۱ واحد انتقال حرارت خطی (محوری) :

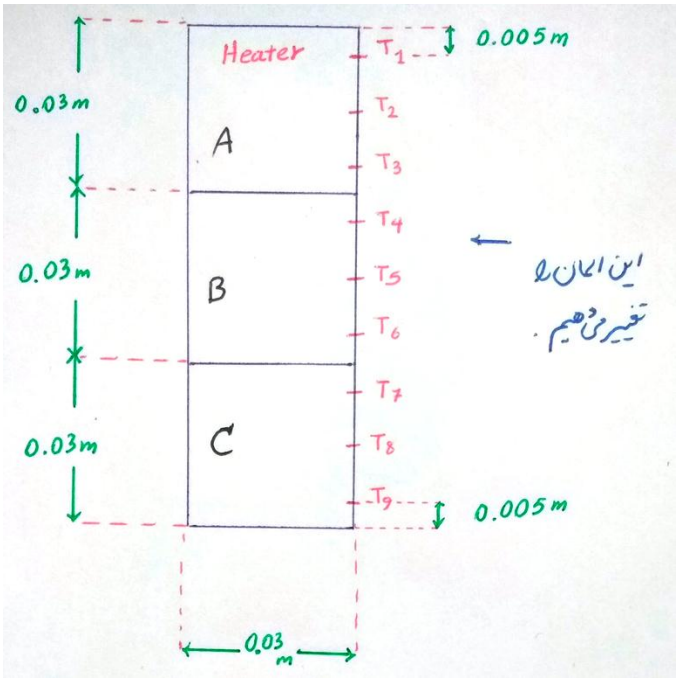
با استفاده ا این واحد می‌توان قانون هدایت حرارتی فوریه را به‌سادگی نشان داد ، مطابق شکل این دستگاه از سه قسمت تشکیل شده است قسمت گرم‌کننده (A) که از برنج ساخته شده است و یک هیتر برقی در آن جاسازی شده است، سه عدد ترموکوپل روی این قسمت به‌فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند که درجه حرارت را در جهت محوری این میله برنجی که قطر آن ۲۵ میلی‌متر است را اندازه‌گیری می‌نماید. در طرف دیگر یک میله برنجی به‌قطر ۲۵ میلی‌متر (C) که توسط جریان آب خنک می‌شود. قسمت سرد را تشکیل می‌دهد و روی این قسمت ترموکوپل‌هایی به‌فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر تعبیه شده است. در حالت کلی المان‌های واسطه بایستی بین این دو قسمت قرار گرفته و مورد آزمایش واقع شوند.

اولین المان از این نوع عبارتست از یک میله برنجی به‌قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۳۰میلی‌متر (B) که روی آن ۳ عدد ترموکوپل به فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر تعبیه شده‌اند (شکل ۱). این المان را در حالی‌که بین دو قسمت گرم و سرد جا داده شده و بصورت یک میله یکنواخت که دارای ۹ عدد ترموکوپل متوالی و به‌فاصله ۱۰ میلی‌متری از یکدیگر روی آن قرار دارد ، نشان می‌دهد.

دومین المانی که بین قسمت گرم و سرد قرار می‌گیرد از برنج ساخته شده که در طول آن ۳۰ میلی‌متر می‌باشد و اندازه قطر آن ۱۵ میلی‌متر است که از قطر قسمت سرد و گرم کمتر است و هیچ‌گونه ترموکوپلی روی آن تعبیه نشده است. این المان امکان بررسی و تحقیق اثر تغییر قطر سطح مقطع عبور جریان هدایت حرارتی را فراهم می‌سازد.

سومین المان که می‌تواند بین قسمت سرد و گرم قرار گیرد از آهن ساخته شده است که ابعاد آن برابر ابعاد اولین المان می‌باشد و هیچ‌گونه ترموکوپلی روی آن قرار داده نشده است. این المان امکان بررسی و تحقیق اثر تغییر جنس در طول مسیر جریان هدایت حرارتی را فراهم می‌سازد. هر چند که سطوحی از المان‌ها در تماس با سطوح قسمت‌های گرم و سرد هستند به‌اندازه کافی صیقل داده شده تا دو سطح به‌خوبی با هم تماس حاصل نمایند با وجود این برای تماس صد در صد از ماده‌ای بنام هادی حرارت استفاده می‌شود که بایستی سطوح مماس بر هم را به آن آغشته نمود.

برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی مواد عایق می‌توان هر نوع عایقی را بین دو قسمت سرد و گرم قرار داد و ضریب هدایت حرارتی آنرا به‌دست آورد. نمونه‌ای از مواد عایق می‌تواند یک ورق کاغذ باشد. اتلاف حرارتی در طول قسمت مورد آزمایش با استفاده از یک لایه هوا و یک پوشش پلاستیکی به حداقل خود کاهش داده شده است.



شکل ۱: واحد انتقال حرارت خطی و محل قرار گرفتن سنسورها

۱-۲-۲ واحد انتقال حرارت شعاعی :

مطابق شکل ۲ این واحد از یک دیسک برنجی تشکیل شده که قطر آن ۱۱۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر که در مرکز این دیسک توسط یک المان الکتریکی حرارت لازم تولید می‌شود و در محیط آن توسط یک لوله مسی دایره‌ای شکل که آب شهر می‌تواند در آن جریان یابد خنک می‌شود.

۶ عدد ترموکوپل به فواصل ۱۲ میلی‌متر از یکدیگر به ترتیب از مرکز دیسک و در جهت شعاعی قرار گرفته است که می‌تواند تغییرات درجه حرارت را در جهت شعاعی اندازه‌گیری نمایند. برای جلوگیری از اتلاف حرارتی این دیسک توسط یک لایه هوا و یک پوشش پلاستیکی محاط شده است.

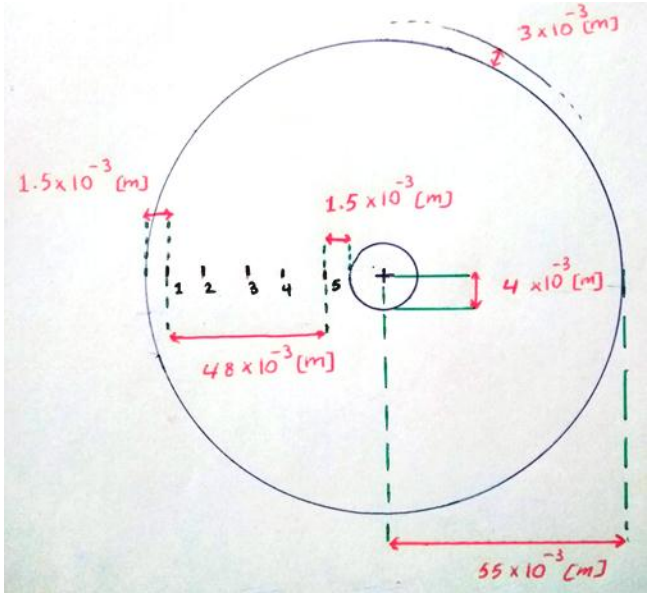
۱-۲-۳ فهرست آزمایش های مختلفی که با این دستگاه قابل انجام می‌باشد :

۱- آزمایش هدایت حرارتی در طول یک میله ساده: جهت تحقیق قانون فوریه برای هدایت حرارتی در طول یک میله ساده. (یک بعدی)

۲- آزمایش هدایت حرارتی در طول یک میله مرکب. (مختلف الجنس): جهت مطالعه هدایت حرارتی در طول یک میله‌ای که دارای یک جنس نبوده و همچنین محاسبه ی ضریب هدایت حرارت کلی این میله.

۳- آزمایش تاثیر سطح مقطع: جهت بررسی اثر تغییر سطح مقطع روی پروفیل درجه حرارت در یک میله ساده.

۴- آزمایش هدایت حرارتی در جهت شعاعی: برای آزمایش پروفیل درجه حرارت و محاسبه میزان حرارت منتقل شده در جهت شعاعی یک دیواره استوانه‌ای.



شکل ۲: واحد انتقال حرارت شعاعی و محل قرار گرفتن سنسورها

۱-۳ روش کار با دستگاه :

۱- شیر آب خنک کننده ورودی به دستگاه باید باز باشد.

۲- دستگاه به وسیله کلید *off/on* روشن می شود.

۳- توان مصرفی دستگاه, توسط کنترلر دیجیتال توان قابل تنظیم است.

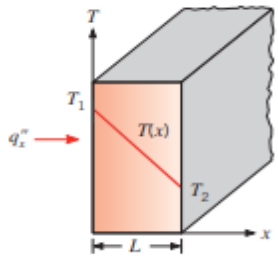
۴- جهت تعویض المان در واحد انتقال حرارت محوری, ابتدا المان مورد نظر بین دو قسمت گرم و سرد قرار می گیرد (به شکلی که قسمت بر آمده المان به سمت منبع گرم, و قسمت فرو رفته آن به سمت منبع سرد باشد).

۱-۴ آزمایش هدایت حرارتی در طول یک میله با جنس ساده.

یک سطح از دیوار به ضخامت (ΔX) و مساحت (A) در نظر بگیرید؛ به طوری که اختلاف درجه حرارت در ضخامت(ΔX) برابر با ΔT باشد. در این صورت مقدار حرارت انتقال شده از طریق هدایت در واحد زمان, از رابطه زیر به دست می آید:

$$q_x = q''_x A = (k\frac{\Delta T}{\Delta x})A$$

که در آن k ضریب انتقال حرارت رسانشی، A مساحت سطح مقطع و q_x حرارت منتقل شده از سطح است.



شکل ۳: انتقال حرارت یک بعدی

۱-۴-۱ نحوه انجام آزمایش :

کنترل کنندهٔ گرم‌کن را در حد ۴۰ وات قرار داده و صبر نمائید تا به‌حالت تعادل حرارتی برسد و سپس درجه حرارت ۹ نقطه در طول نمونه مورد آزمایش را یادداشت نمائید و هم‌چنین توان ورودی را یادداشت نمائید. این مرحله را حداقل برای ۳ حالت مختلف تکرار نموده به‌شرطی که درجه حرارت از ۱۰۰ درجه بالاتر نرود. توجه داشته باشید بعد از هر تغییر توان بایستی به اندازه کافی صبر نموده تا سیستم به‌حالت تعادل دمایی برسد و نتایج را در جدول زیر ثبت نمائید.

جدول ۱

شماره آزمایش	توان $q(watt)$	T_1 $(°C)$	T_2 $(°C)$	T_3 $(°C)$	T_4 $(°C)$	T_5 $(°C)$	T_6 $(°C)$	T_7 $(°C)$	T_8 $(°C)$	T_9 $(°C)$
۱										
۲										
۳										

۱-۴-۲ خواسته های آزمایش:

۱- منحنی تغییرات دما نسبت به طول میله را رسم نمایید

۲- ضریب هدایت حرارتی میله ی (B) را محاسبه نمایید

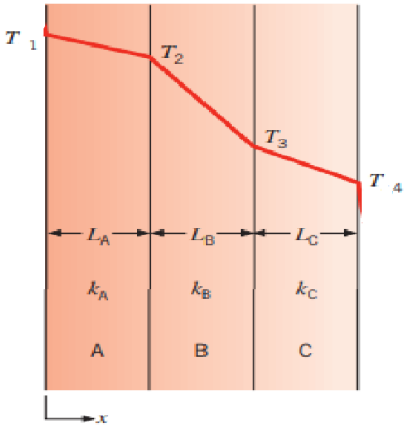
۳- مقادیر ضریب هدایت به دست آمده بایستی با مقادیر موجود در منابع مقایسه کنید.

۴- در مورد اثر تغییرات درجه حرارت بر روی ضریب هدایت حرارتی و شکل پروفیل درجه حرارت بحث کنید.

۱-۵ آزمایش هدایت حرارت در طول یک میله با جنس مرکب

هدف این آزمایش مطالعه روی نمونه‌ای که از چند ماده مختلف تشکیل شده است و محاسبه ی ضریب هدایت حرارتی کلی. برای این کار المان وسطی را تعویض می کنیم و به جای آن نمونه ای را که از آهن

ساخته شده است جایگزین آن می کنیم ؛ ابعاد این المان برابر ابعاد المان قبلی می باشد. این المان امکان بررسی و تحقیق اثر تغییر جنس در طول مسیر جریان هدایت حرارتی را فراهم می سازد.



شکل ۴: توزیع دما در جسم مرکب

۱-۵-۱ خلاصه تئوری آزمایش :

برای هدایت حرارتی ثابت در داخل نمونه، مقدار حرارت منتقل شده در سطح مقطع نمونه در تمام قسمت‌های مختلف میله مورد نظر در واحد زمان مقداری ثابت است و لذا قانون فوریه را می‌شود برای قسمت‌های مختلف میله به صورت زیر نوشت:

$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{(L_A/K_A A_A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/K_B A_B)} = \frac{T_3 - T_4}{(L_C/K_C A_C)} = UA(T_1 - T_4)$$

معادله را برای سطح مقطع ثابت و جنس متغیر در $1/A$ ضرب می کنیم و در نظر داریم که $(A_A = A_B = A_C = A)$:

$$\frac{q_x}{A} = \frac{T_1 - T_2}{(L_A/K_A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/K_B)} = \frac{T_3 - T_4}{(L_C/K_C)} = U(T_1 - T_4)$$

$$\frac{q_x}{A} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_A}{K_A} + \frac{L_B}{K_B} + \frac{L_C}{K_C}}$$

با توجه به روابط بالا ضریب کلی هدایت حرارتی به صورت زیر بدست می آید:

$$\frac{1}{U} = \frac{L_A}{K_A} + \frac{L_B}{K_B} + \frac{L_C}{K_C}$$

که در آن K_A، K_B و K_C به ترتیب ضرایب هدایت حراراتی اجزای مختلفی است که نمونه را تشکیل می دهند و U ضریب انتقال حرارت کلی میله است.

۱-۵-۲ نحوه انجام آزمایش :

روش آزمایش مانند مطابق بخش ۱-۵-۱ است. المان وسطی را تعویض می کنیم و به جای آن نمونه ای را که از آهن ساخته شده است جایگزین آن می کنیم؛ ابعاد این المان برابر ابعاد المـان قبلی می باشد و هیچگونه ترموکوپلی روی آن قرار داده نشده است. پس از انجام آزمایش جـدول زیـر را تکمیـل نمـوده و منحنی تغییرات درجه حرارت در طول میله مورد آزمایش را رسم نمایید.

جدول ۲

شماره آزمایش	توان $Q(watt)$	T_1 $(°C)$	T_2 $(°C)$	T_3 $(°C)$	T_7 $(°C)$	T_8 $(°C)$	T_9 $(°C)$
۱							
۲							
۳							

توجه : بعد از هر تغییر توان بایستی به اندازه کافی صبر نمایید تا سیستم به حالت تعادل دمایی برسد.

۱-۵-۳ خواسته های آزمایش:

۱- منحنی تغییرات دما نسبت به طول میله را در مراحل فوق، رسم نمایید.

۲- ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید.

۱-۶ آزمایش اثر سطح مقطع روی انتقال حرارت

بررسی انتقال حرارت از طریق هدایت در داخل یک میله استوانه‌ای کـه جریـان حـرارت در طـول محـور استوانه صورت می‌گیرد ولی سطح مقطع استوانه در قسمت میانی استوانه تغییر یافته و در این حالت اثـر این تغییر قطر را روی پروفیل درجه حرارت در طول محور استوانه بررسی می شود.

۱-۶-۱ تئوری آزمایش :

از آنجایی که جسم به‌حالت پایا رسیده است و لذا مقدار حرارتی در هر مقطعی از شکل زیـر مقـدار ثابـت q_x است، بنابر این داریم :

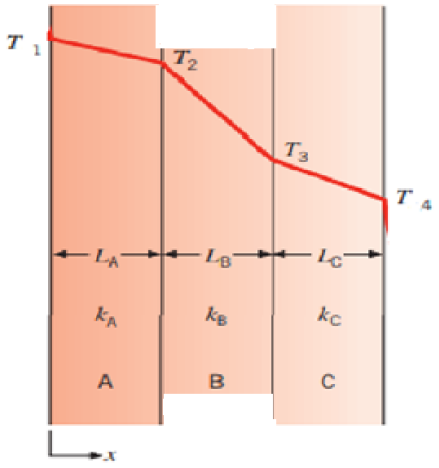
$$q_x = \frac{T_1 - T_2}{(L_A/K_A A_A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/K_B A_B)} = \frac{T_3 - T_4}{(L_C/K_C A_C)}$$

همچنین چون نمونه با دو قسمت سرد و گرم همجنس می‌باشد(برنج). لـذا بـا توجـه بـه اینکـه ضـریب هدایت حرارتی در تمام قسمت‌ها مقداری ثابت است، داریم:

$$\frac{q_x}{K} = \frac{T_1 - T_2}{(L_A/A_A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/A_B)} = \frac{T_3 - T_4}{(L_C/A_C)}$$

از رابطه فوق نتیجه گرفته می‌شود گرادیان درجه حرارت با سطح مقطع نسبت معکوس دارد.

$$\frac{\left(\frac{dT}{dX}\right)_A}{\left(\frac{dT}{dX}\right)_C} = \frac{A_C}{A_A}$$



شکل ۵: توزیع دما در داخل جسم با سطح مقطع متغیر

۱-۶-۲ نحوه انجام آزمایش :

روش انجام آزمایش مطابق بخش ۱-۵-۱ است، دوباره المان وسطی را تعـویض میکنـیم و بـه جـای آن المانی برنجی به قطر ۱۵ میلی متر را جایگزین می کنیم؛ هیچگونه ترموکوپلی روی آن قرار داده نشده است. این المان امکان بررسی و تحقیق اثر تغییر سطح مقطع در طول معبـر جریـان هـدایت حرارتـی را فراهم می سازد. سطوحی از المان ها که در تمـاس با سطوح قسمت هـا ی گـــرم و ســـرد هســـتند، بـه اندازه کافی صیقل داده شده تا دو سطح به خوبی با هم تماس داشته باشند. پس از انجـام آزمـایش‌هـای مختلف جدول زیر را تکمیل نمایید.

جدول ۳

شماره آزمایش	توان $Q(watt)$	T_1 $(°C)$	T_2 $(°C)$	T_3 $(°C)$	T_7 $(°C)$	T_8 $(°C)$	T_9 $(°C)$
۱							
۲							
۳							

۱-۶-۳ خواسته های آزمایش:

۱- منحنی تغییرات دما نسبت به طول میله را در مراحل فوق، رسم نمایید.

۲- گرادیان درجه حرارت را در قسمت گرم (A) و سرد (C) و نمونه (B) به دست آورید و نشان دهید که گرادیان درجه حرارت با سطح مقطع نسبت معکوس دارد.

۳- نتایج گرادیان درجه حرارت به دست آمده از آزمایش را با نتایج حاصل از رابطه زیر مقایسه کنید.

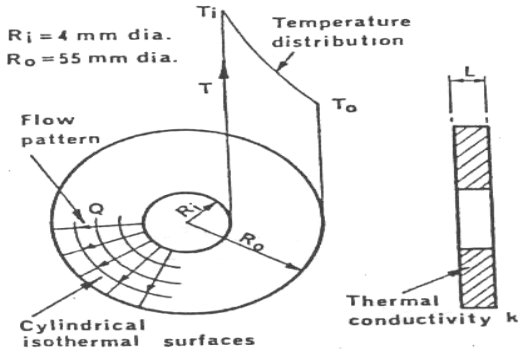
$$\frac{\left(\frac{dT}{dX}\right)_A}{\left(\frac{dT}{dX}\right)_C} = \frac{A_C}{A_A}$$

۱-۷ آزمایش هدایت حرارتی شعاعی:

در این آزمایش بررسی پروفیل درجه حرارت و میزان انتقال حرارت در جهت شعاعی در حالت پایا بررسی می شود.

۱-۷-۱ شرح دستگاه آزمایش:

دستگاه آزمایش از یک دیسک برنجی تشکیل شده که در مرکز آن المان حرارتی قرار گرفته و در پیرامون آن جریان آب خنک‌کننده برقرار است و لذا فرض می‌شود که تمام حرارت تولید شده در مرکز المان فقط در جهت شعاعی و بطریق هدایت منتقل می‌شود و شکل شماتیک با شعاع‌های داخلی و خارجی و هم‌چنین جریان حرارت و با جهت شعاعی و منحنی تغییرات دما برجهت شعاعی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶

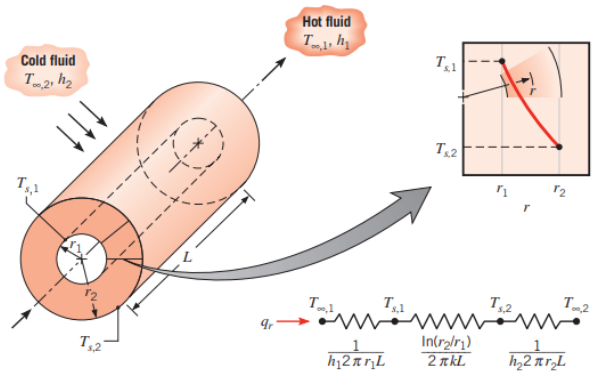
۱-۷-۲ نحوه انجام آزمایش :

شیر آب سرد ورودی را باز می کنیم تا آب در قسمت سرد دستگاه جریان داشته باشد. توان مصرفی را به وسیله کنترلر دیجیتال توان، در حد ۴۰ وات قرار داده و صبر کنید تا به حالت تعادل حرارتی برسد و سپس درجه حرارت ۵ نقطه در دیسک مورد آزمایش و همچنین توان ورودی را در جدول شماره (۴) یادداشت کنید. این مرحله را حداقل برای ۳ توان ورودی مختلف تکرار کنید.

جدول ۴

شماره آزمایش	توان $q(watt)$	T_1 $(°C)$	T_2 $(°C)$	T_3 $(°C)$	T_4 $(°C)$	T_5 $(°C)$
۱						
۲						
۳						

۱-۷-۳ خلاصه تئوری آزمایش :



شکل ۷: توزیع دما در داخل پوسته ی استوانه ای

موقعی‌که درجه حرارت در سطوح داخلی و خارجی یک دیـواره اسـتوانه‌ای ضـخیم ثابـت باشـد، جریـان حرارت از مرکز به طرف محیط برقرار خواهد شد و مقدار حرارت منتقل شده در جهت شعاعی از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$q_r = 2\pi Lk \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

در اینجا اندیس(۱) به معنای خاصیت مربوط به شعاع داخلی یا r_1 می باشـد و انـدیس (۲) بـه معنـای خاصیت مربوط به شعاع خارجی r_2 می باشد.

۴-۷-۱ خواسته های آزمایش:

۱- منحنی تغییرات دما نسبت به شعاع را رسم نمایید.

۲- مقدار ضریب هدایت حرارتی k را برای دیسک برنجی محاسبه کنید.

فصل دوم: تعیین ضریب هدایت حرارتی سیالات

۲-۱ مقدمه:

انتقال حرارت هدایتی(*conduction*) در داخل اجسام موقعی پدید می‌آید که یک گرادیان دمایی بین دو نقطه از جسم ایجاد شود و هر چقدر اندازه گرادیان دمایی (گرادیان درجه حرارت) بزرگتر باشد شدت انتقال حرارت هم زیادتر خواهد بود. سازوکار این نوع انتقال گرما بر اساس جنبش اتمی یا مولکولی است.

۲-۲ شرح دستگاه:

این دستگاه قابلیت اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی انواع سیالات (گازها و مایعات) را دارا می باشد. مطابق شکل ۸ دستگاه شامل دو قسمت استوانه ای است که به صورت هم مرکز در داخل هم قرار گرفته اند. در درون استوانه‌ی داخلی یک گرمکن قرار گرفته و به عنوان منبع گرم عمل می کند و استوانه‌ی خارجی در واقع پوسته است که در داخل آن آب سرد جریان دارد و به عنوان منبع سرد عمل می کند بین این دو منبع یک فضای خالی استوانه‌ای شکل ایجاد شده که سیال مورد آزمایش در داخل آن قرار می گیرد و در اثر گرادیان دمایی ایجاد شده بین منبع گرم و سرد در داخل این لایه‌ی نازک سیال انتقال حرارت رسانشی بوجود می آید. در داخل هر یک از منابع گرم و سرد یک ترموکوپل برای اندازه گیری دمای آن قرار داده شده است و دماهای اندازه گیری شده برای هر دو منبع بر روی نمایشگر دستگاه نشان داده می شود. قطر خارجی منبع گرم $۳۰\ mm$، قطر داخلی منبع سرد $۳۰/۶\ mm$ و طول آنها $۹\ cm$ است. بنابراین ضخامت لایه‌ی سیال $۰/۳\ mm$ می باشد. با توجه به کوچک بودن ضخامت لایه سیال مورد آزمایش می توان دمای سیال را با تقریب خوبی برابر با دمای گرمکن درنظر گرفت، همچنین می توان انتقال گرما را یک بعدی فرض کرد. توجه داشته باشید که باید دبی آب سرد در طول آزمایش ثابت باشد.

۲-۳ روش کار با دستگاه:

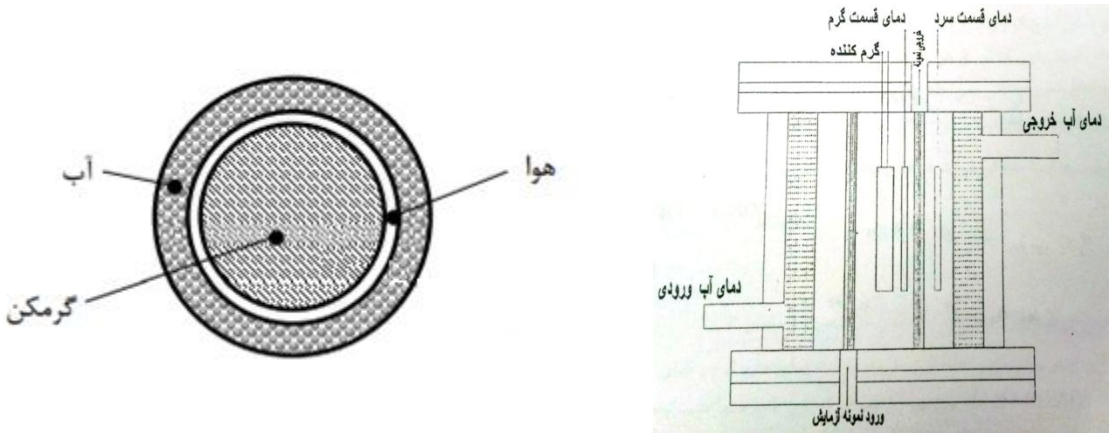
۱- شیر آب خنک کننده ورودی به دستگاه باید باز باشد.

۲- سیال مورد آزمایش از شیر ورودی محفظه آزمایش به محفظه تزریق می شود (آب و سایر مایعات به وسیله‌ی سرنگ و گاز ها توسط کپسول تزریق می گردد).

۳- برای روشن کردن دستگاه ازکلید روشن/ خاموش استفاده می شود.

۴- توان مصرفی گرمکن توسط ولوم قابل تنظیم است. مقدار توان مصرفی گرمکن بر روی نمایشگر قابل مشاهده است.

۵- دمای آب ورودی و خروجی هم از طریق نمایشگر قابل مشاهده است.

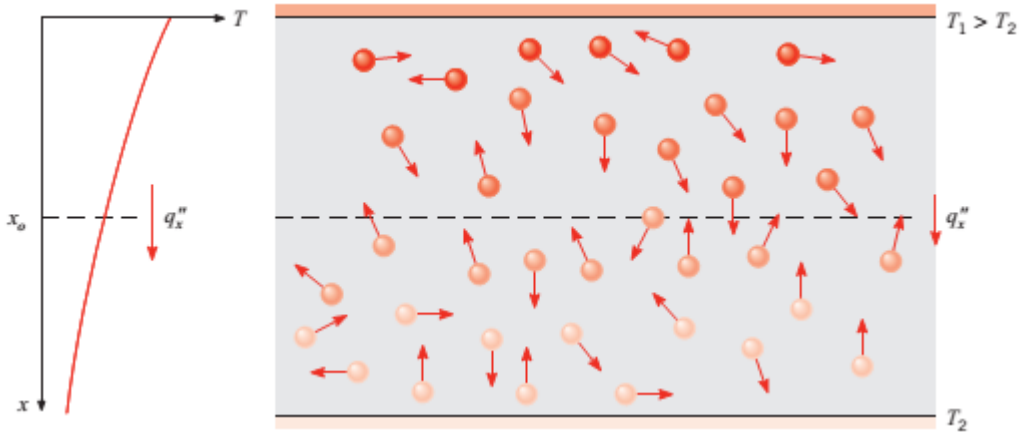


شکل ۸: مقطعی از دستگاه

۲-۴ آزمایش تعیین ضریب هدایت حرارتی سیالات

۲-۴-۱ تئوری آزمایش:

برای بررسی هدایت در سیالات، گازی را درنظر بگیرید که مطابق شکل ۹ بین دو سطح با دماهای متفاوت قرار گرفته است و مولکول های گاز حرکت توده‌ای ندارد. دمای هر نقطه به انرژی مولکول های گاز در همسایگی آن نقطه وابسته است. این انرژی به حرکت انتقالی مولکول ها و نیز به حرکت های چرخشی و ارتعاشی درونی مولکول‌ها بستگی دارد. هرچه دما بالاتر باشد انرژی مولکولی بیشتر است. از آنجا که مولکول‌ها دائما در حال برخورد با یکدیگر هستند، انرژی از مولکول های پر انرژی به مولکول های کم انرژی انتقال می‌یابد. در صورت وجود گرادیان دما انتقال انرژی توسط هدایت در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. در مایعات نیز تقریبا وضعیت مشابهی اتفاق می‌افتد با این تفاوت که فاصله مولکول‌ها نزدیکتر بوده و فعل و انفعال مولکولی قویتر و بیشتر می باشد.



شکل ۹

حرارت ایجاد شده توسط گرمکن از طریق رسانش داخل سیال مورد آزمایش و از طریق رسانش در داخل درپوش های دایره‌ای شکل بالا و پایین به منبع سرد منتقل می شود همچنین از طریق در پوش ها به محیط نیز منتقل می شود. برای محاسبه‌ی آهنگ گرمای منتقل شده از داخل سیال مورد آزمایش را q_{cond} در نظر می گیریم و بقیه را به عنوان q_{loss} در نظر می گیریم:

$$q_{total} = q_{cond} + q_{loss}$$

$$q_{cond} = \frac{2\pi Lk(T_{hot} - T_{cold})}{ln\left(\frac{r_{cold}}{r_{hot}}\right)}$$

با توجه به این که تمام پارامتر های موجود در معادله‌ی دوم مشخص هستند اگر مقدار k هم معلوم باشد می توان مقدار q_{cond} را حساب کرد. به همین دلیل برای کالیبره کردن دستگاه از هوا استفاده می شود زیرا ضریب هدایت حرارتی هوا با فشار تغییر چندانی نمی کند. مقدار ضریب هدایت حرارتی هوا از رابطه ی زیر زیر محاسبه می شود:

$$k_{f,Air} = 0.0242(1 + 0.003T)$$

که در آن $T = \frac{T_{hot}+T_{cold}}{2}$، T_{hot} و T_{cold} به ترتیب دمای منبع گرم و سرد هستد. با توجه به معلوم بودن مقدار ضریب هدایت حرارتی هوا، برای توان‌های مختلف گرمکن q_{loss} را بر حسب $\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$ محاسبه می شود بعد برای سایر سیالاتی که مورد آزمایش قرار می گیرند با داشتن اختلاف دمای بین منبع گرم و سرد ΔT مقدار q_{loss} با استفاده از داده های مربوط به آزمایش هوا محاسبه می شود.

۲-۴-۲ نحوه انجام آزمایش:

قبل از انجام هر آزمایش باید دستگاه را کالیبره کرد. برای این منظور شیر ورودی و خروجی هوا را بازکنید. از پمپ باد استفاده کنید تا هوا درون سیستم جریان داشته باشد. چند بار این عمل را تکرار کنید تا از خروج هر گونه ناخالصی و یا سیال باقی مانده از آزمایش قبل مطمئن شوید. پاک بودن دستگاه از هر گونه آلودگی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا وجود مقادیر بسیار کم از هرگونده ناخالصی می تواند تأثیر بسیار زیادی در نتیجه آزمایش داشته باشد. حال شیر ورودی و خروجی هوا را ببندید تا هوا درون استوانه حبس شود. شیر آب شهر را باز کنید تا آب درون سیستم جریان داشته باشد. با استفاده از کلید روشن/خاموش دستگاه را روشن کرده و سپس گرمکن را نیز روشن کنید. ابتدا توان ورودی گرمکن را بر روی W ۵ تنظیم کنید و به سیستم زمان کافی بدهید تا به حالت پایا برسد و دما ثابت شود. حال دماهای منبع گرم و سرد را در جدول ۵ یادداشت کنید. سپس با افزایش توان ورودی گرمکن مرحله قبلی را تکرار کنید (در هر مرحله توان را به اندازه W ۵ افزایش دهید تا به W ۵۰ برسد). با توجه به اینکه

مقداری اتلاف گرما وجود دارد و تمام انرژی بین منبع گرم و سرد منتقل شود، باید مقدار گرمای خالص انتقال یافته را به دست آورد. برای این منظور در هر مرحله دمای میانگین منبع گرم و سرد $\left(T = \frac{T_{hot}+T_{cold}}{2}\right)$ را حساب کنید، سپس ضریب هدایت حرارتی هوا $k_{f,Air}$ را با استفاده از رابطه ارائه شده محاسبه نمایید. با جایگذاری ضریب هدایت حرارتی محاسبه شده برای هوا در رابطه q_{cond} مقدار حرارت منتقل شده بین منبع گرم و سرد از طریق لایه‌ی هوا و سپس q_{loss} را محاسبه کنید. توجه داشته باشید که q_{loss} در هر مرحله تابع اختلاف دمای بین منبع گرم و سرد $(\Delta T = T_{hot} - T_{cold})$ است.

جدول ۵: داده های کالیبراسیون دستگاه با هوا

توان گرمکن $q_{total}(W)$	دمای منبع گرم T_{hot} (°C)	دمای منبع سرد T_{cold} (°C)	اختلاف دمای منبع گرم و سرد ΔT(°C)	$k_{f,Air}(\frac{W}{mK})$	$q_{cond}(W)$	$q_{loss}(W)$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی سیالات دیگر بعد از کالیبره کردن دستگاه شیر ورودی و خروجی هوا را باز کنید و مایع مورد آزمایش را از طریق شیر ورودی به داخل محفظه تزریق نمایید تا از بالای محفظه سرریز کند و از طریق شیر خروجی خارج شود سپس شیر ورودی محفظه را ببندید و مثل حالت قبل در هر مرحله توان گرمکن را به اندازه W ۵ افزایش دهید و بعد از پایا شدن سیستم دماها را ثبت کنید توان گرمکن را تا W ۵۰ افرایش بدهید و داده ها را در جدول ۶ ثبت کنید. در هر مرحله با توجه به اختلاف دمای بین منبع گرم و سرد ΔT مقدار q_{loss} را از داده های جدول ۵ محاسبه کنید.

جدول ۶: داده های آزمایش هدایت سیال

توان گرمکن $q_{total}\,(W)$	دمای منبع گرم $T_{hot}\,(°C)$	دمای منبع سرد $T_{cold}\,(°C)$	اختلاف دمای منبع گرم و سرد $\Delta T(°C)$	$q_{loss}\,(W)$	$q_{cond}\,(W)$	$k\,(\frac{W}{mK})$

۲-۴-۳ خواسته های آزمایش:

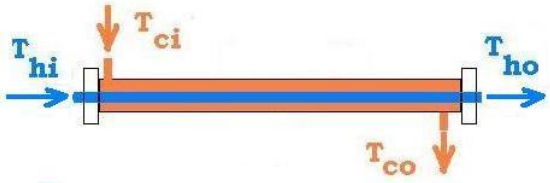
۱- نمودار تغییرات ضریب هدایت حرارتی هوا $k_{f,Air}$ را بر حسب اختلاف دمای منبع گرم و سرد ΔT رسم کنید و توضیح دهید که افزایش دما چه تاثیری بر ضریب هدایت حرارتی هوادارد؟

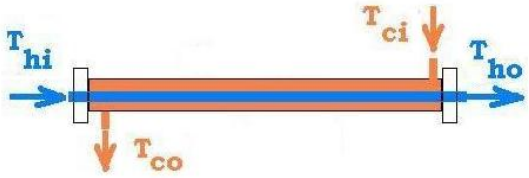
۲- با افزایش توان مقدار ضریب هدایت حرارتی روغن افزایش می یابد یا کاهش؟ چرا؟

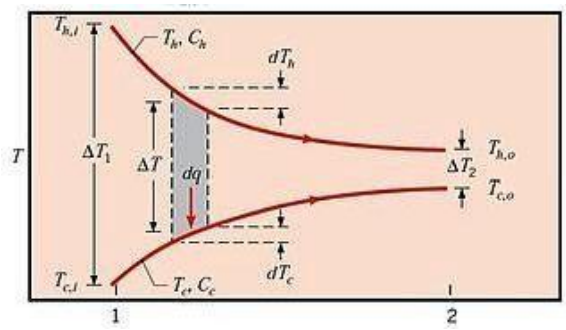
فصل سوم: مبدل های حرارتی

۳-۱ مقدمه:

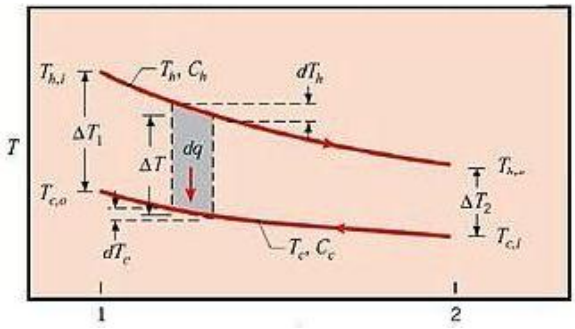
مبدل حرارتی وسیله ای برای تبادل حرارت بین دو سیال می باشد. آرایش دو جریان در مبدل های حرارتی به صورت همسو، ناهمسو و عمود بر هم و یا ترکیبی از آنها می باشد. در شکل های زیر نمای شماتیک مبدل با جریان همسو و غیر همسو و تغییرات دمای دو سیال در آنها نشان داده شده است. انواع متفاوت مبدل حرارتی در صنعت مورد استفاده قرار می گیرندکه در این آزمایشگاه سه نوع دو لوله ای، پوسته لوله و صفحه ای بررسی می گردد.







شکل ۱۱: تغییرات دما در مبدل حرارتی جریان ناهمسو



شکل ۱۰: تغییرات دما در مبدل حرارتی جریان همسو

۳-۲ تئوری آزمایش:

برای تحلیل انتقال حرارت در مبدل های حرارتی، فرض می شود مبدل حرارتی به خوبی عایق باشد، به عبارت دیگر فرض می شود تمام گرمایی که سیال گرم از دست می دهد به سیال سرد منتقل می شود. بنابراین با داشتن دماهای ورودی و خروجی دو سیال، خواص حرارتی دو سیال و همچنین دبی جرمی دو سیال می توان با نوشتن معادله قانون بقای انرژی، مقادیر نرخ انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت کلی بین دو سیال(U) را به دست آورد.

نرخ انتقال حرارت به سیال سرد: $q_c = \dot{m}_c c_{pc}(T_{co} - T_{ci})$

نرخ انتقال حرارت از سیال گرم: $q_h = \dot{m}_h c_{ph}(T_{ho} - T_{hi})$

نرخ تبادل حرارت بین هر دو سیال: $q = UA\Delta T_{LMTD}$

پس اگر مبدل حرارتی موجود، فاقد اتلاف حرارتی باشد:

$$q = \dot{m}_c c_{pc}(T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_h c_{ph}(T_{ho} - T_{hi}) = UA\Delta T_{LMTD}$$

که در روابط بالا نیاز می باشد که خواص را در دمای متوسط ورودی و خروجی بخوانیم و اختلاف دمـای متوسط لگاریتمی برای جریان های همسو و غیر همسو از روابط زیر به دست می آید:

جریان همسو:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{ln\left(\frac{T_{hi} - T_{ci}}{T_{ho} - T_{co}}\right)}$$

جریان غیرهمسو:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{ln\left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}}\right)}$$

اگر مبدل حرارتی اتلاف داشته باشد برای آن بازده گرمایی تعریف می شود:

$$\eta = \frac{q_c}{q_h} \times 100$$

ضریب کارایی مبدل حرارتی:

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c c_{pc}(T_{co} - T_{ci})}{(\dot{m}c)_{min}(T_{hi} - T_{ci})} = \frac{\dot{m}_h c_{ph}(T_{ho} - T_{hi})}{(\dot{m}c)_{min}(T_{hi} - T_{ci})}$$

که در آن:

$$(\dot{m}c)_{min} = min(\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_h c_{ph})$$

روش $LMTD$ برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت کلی:

$$q = UA\Delta T_{LMTD} \rightarrow U = \frac{q}{A\Delta T_{LMTD}}$$

که در رابطه بالا A مساحت کلی انتقال حرارت می باشد.

روش $\varepsilon - NTU$ برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت کلی:

$$NTU = f(\varepsilon, C_r)$$

که $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$ می باشد. در اکثر کتابهای مبدل حرارتی و انتقال حرارت روابط مابین ε و NTU به صورد معادله یا نمودار موجود می باشد. (جدول های پایین مربوط به کتاب اینکروپرا می باشد)

جدول ۷

TABLE 11.3 Heat Exchanger Effectiveness Relations [5]

Flow Arrangement	Relation		
Parallel flow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 + C_r)]}{1 + C_r}$		(11.28a)
Counterflow	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$	
	$\varepsilon = \dfrac{\text{NTU}}{1 + \text{NTU}}$	$(C_r = 1)$	(11.29a)
Shell-and-tube			
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2\left\{1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \dfrac{1 + \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}\right\}^{-1}$		(11.30a)
n shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - 1\right]\left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - C_r\right]^{-1}$		(11.31a)

TABLE 11.4 Heat Exchanger NTU Relations

Flow Arrangement	Relation		
Parallel flow	$\text{NTU} = -\dfrac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$		(11.28b)
Counterflow	$\text{NTU} = \dfrac{1}{C_r - 1}\ln\left(\dfrac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right)$	$(C_r < 1)$	
	$\text{NTU} = \dfrac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$	$(C_r = 1)$	(11.29b)
Shell-and-tube			
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$(\text{NTU})_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2}\ln\left(\dfrac{E - 1}{E + 1}\right)$		(11.30b)
	$E = \dfrac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$		(11.30c)
n shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \dfrac{F - 1}{F - C_r}$ $F = \left(\dfrac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n}$ $\text{NTU} = n(\text{NTU})_1$		(11.31b, c, d)

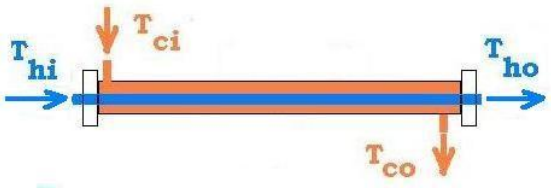
و در نهایت ضریب انتقال حرارت کلی از رابطه زیر به دست می آید:

$$U = \frac{NTU \times C_{min}}{A}$$

۳-۳ آزمایش مبدل حرارتی دو لوله ای:

این دستگاه به صورت کلی از دو لوله هم محور تشکیل شده است که سیال گرم از لوله داخلی و سیال سرد از لوله بیرونی عبور می کند. نوع جریان در این آزمایش می تواند همسو و یا غیر همسو باشد. ۴ ترموکوپل دماهای سیالها را در نقاط مختلف نشان می دهد که سه ترموکوپل مربوط به سیال گرم و سه ترموکوپل هم مربوط به سیال سرد می باشد که در نقاط ورودی و خروجی سیال سرد و گرم تعبیه شده

اند.) ترموکوپل ها از ۱ تا ۴ شماره گذاری شده اند. دبی آب سرد و گرم ورودی به مبدل، توسط دو عـدد روتامتر اندازه گیری می شود، البته باید دبی حجمی را که بر حسب لیتر بر دقیقه می باشد را بـر حسـب متر مکعب بر ثانیه بدست آورد و سپس در مقدار دانسیته سیال ضرب کرد تا مقدار دبی جرمی به دسـت آید. دبی آب سرد و گرم توسط دو عدد شیر فلکه ای قابل تنظیم است. برای ایجـاد جریـان همسـو و نـا همسو نیز از دو عدد شیر دو طرفه استفاده شده است. برای ایجاد جریان همسو دو شیر دوطرفه (دو شیر گازی) را در حالت عمودی قرار دهید و برای ایجاد جریان ناهمسو دو شیر مذکور را در حالت افقـی قـرار دهید. نمای دستگاه در شکل زیر آورده شده است:



قطر داخلی لوله داخلی: ۱۳/۷ mm

قطر خارجی لوله داخلی: ۱۵/۸ mm

قطر داخلی پوسته: ۲۶ mm

طول لوله ها: ۵۲۰ mm

نکته: برای محاسبه سطح انتقال حرارت موثر، نیاز به دانستن قطر موثر می باشد که برابر با میانگین قطر داخلی و خارجی لوله داخلی می باشد.

۳-۳-۱ مراحل انجام آزمایش:

۱- شیر آب سرد را باز کنید و دبی آب سرد را روی مقدار مشخصی قرار دهید.

۲- حال پمپ آب را روشن کنید تا جریان آب گرم برقرار شود.

۳- وقتی سیستم به حالت پایا رسید دماها و دبی سیال گرم و سرد را در جدول پـایین یادداشـت کنید.

۴- دو بار دیگر آزمایش را برای دبی های دیگر آب سرد انجام دهید.

۵- حال جهت جریان آب سرد را معکوس کنید و آزمایش را تکرار کنید.

جدول ۸

دبی سیال سرد	دبی سیال گرم	T_{hi}	T_{ho}	T_{ci}	T_{co}

۳-۳-۲ خواسته های آزمایش:

۱- مقادیر حرارت جذب شده توسط آب سرد و دفع شده توسط آب گرم و بازده حرارتی و ضریب عملکرد مبدل را بیابید.

(خواص فیزیکی سیال گرم و سرد را در دمای میانگین $T_{mc} = (T_{ci} + T_{co})/2$ و $T_{mh} = (T_{hi} + T_{ho})/2$ از جداول خواص فیزیکی آب بخوانید).

۲- ضرایب جابجایی , h_i و h_o را با استفاده از روابط تجربی موجود، مانند رابطه *Dittus & Boelter*، با در نظر گرفتن شرایط کاربرد رابطه، محاسبه کنید.

توجه: برای محاسبه h_o (جریان آب سرد) از پارامتری به نام قطر هیدرولیکی D_h *(Hydraulic Diameter)* استفاده شود. با استفاده از $D_h = \frac{4A_c}{p} = D_o - D_i$ عدد رینولدز بدین صورت محاسبه می شود (رجوع به فصل ۸ کتاب *Incropera*):

$$\mathrm{Re}_{(D_h)} = \frac{4\dot{m}_c}{\pi (D_o - D_i)\mu_c}$$

۳- با فرض براینکه تبادل حرارت بین مبدل حرارتی و محیط اطراف ناچیز است و همچنین هدایت حرارتی از میان ضخامت دیواره بین دوسیال ناچیز است، U را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید و نحوه اثبات آن را توضیح دهید:

$$U_i A_i = U_o A_o = \frac{1}{\frac{1}{A_i h_i} + \frac{1}{A_0 h_0}}$$

توجه : اندیس i و o در رابطه فوق , نشانگر شرایط داخل و خارج لوله داخلی می باشد ($A_o = \pi D_o L$ $A_i = \pi D_i L,$).

۴- با استفاده از روش *LMTD* و نتایج آزمایش ها مقدار ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید.

۵- با استفاده از روش *NTU* و نتایج آزمایش ها مقدار ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید و با مقدار به دست آمده در قسمت های قبل مقایسه کنید.

۳-۴ آزمایش مبدل حرارتی پوسته و لوله:

این دستگاه از یک پوسته و مجموعه ۱۱ لوله تشکیل شده است که سیال گرم از درون لوله ها و سیال سرد از قسمت پوسته عبور می کند. آرایش آن می تواند به صورت همسو و یا غیر همسو باشد. پوسته دارای یک گذر(تک پاس) و لوله ها نیز دارای یک گذر هستند. دبی آب سرد و گرم ورودی به مبدل، توسط دو عدد روتامتر اندازه گیری می شود. دبی آب سرد و گرم توسط دو عدد شیر فلکه ای قابل تنظیم است. برای ایجاد جریان همسو و نا همسو نیز از دو عدد شیر دو طرفه استفاده شده است. برای ایجاد

جریان همسو دو شیر دوطرفه (دو شیر گازی) را در حالت عمودی قرار دهید و برای ایجاد جریان ناهمسو دو شیر مذکور را در حالت افقی قرار دهید. نمای دستگاه در شکل زیر آورده شده است:

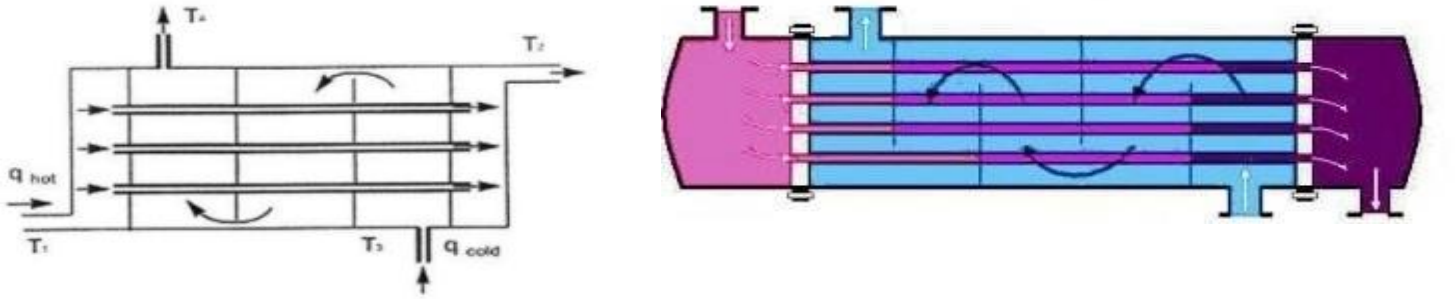
طول هر لوله : ۵۰ cm

تعداد لوله ها: ۱۱ عدد

قطر خارجی لوله ها: ۶ mm

قطر داخلی پوسته: ۹۰ mm

سطح انتقال حرارت موثر: A =۰/۱۰۳۶۷ m^2



شکل ۱۲

۳-۴-۱ مراحل انجام آزمایش:

۱- شیر آب سرد را باز کنید و دبی آب سرد را روی مقدار مشخصی قرار دهید.

۲- پمپ آب را روشن کنید تا جریان آب گرم برقرار شود و دبی آن را روی مقداری مشخص قرار دهید.

۳- وقتی سیستم به حالت پایا رسید دماها و دبی سیال گرم و سرد را در جدول پایین یادداشت کنید.

۴- دو بار دیگر آزمایش را برای دبی های دیگر آب سرد انجام دهید.

۵- حال جهت جریان آب سرد را معکوس کنید و آزمایش را تکرار کنید.

جدول ۹

T_{co}	T_{ci}	T_{ho}	T_{hi}	دبی سیال گرم	دبی سیال سرد

۳-۴-۲ خواسته های آزمایش:

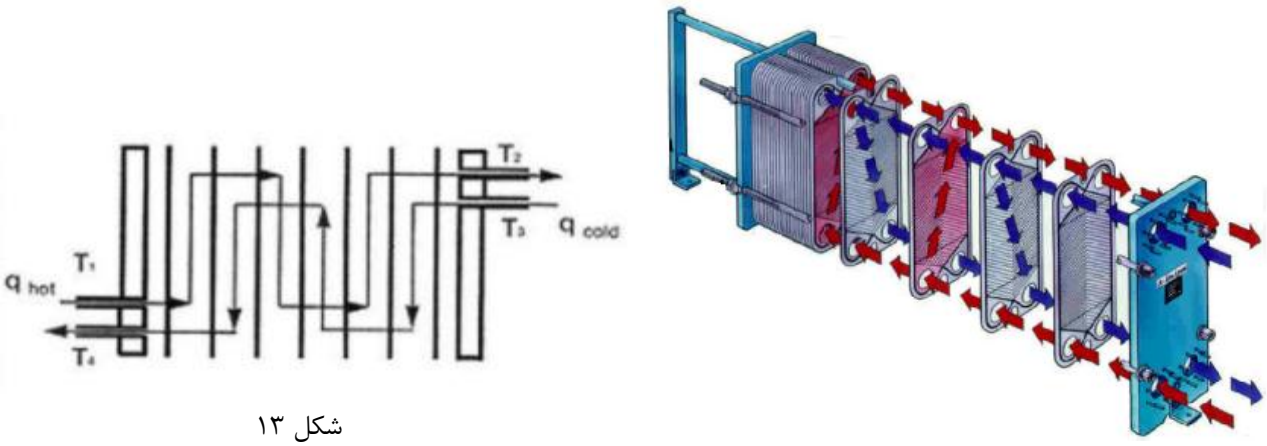
۱- مقادیر حرارت جذب شده توسط آب سرد و دفع شده توسط آب گرم و بازده حرارتی مبدل را بیابید(خواص فیزیکی سیال گرم و سرد را در دمای میانگین $T_{mc} = (T_{ci} + T_{co})/2$ و $T_{mh} = (T_{hi} + T_{ho})/2$ از جداول خواص فیزیکی آب بخوانید).

۲- با استفاده از روش *LMTD* و نتایج آزمایش ها مقدار ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید.

۳- با استفاده از روش *NTU* و نتایج آزمایش ها مقدار ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید و با مقدار به دست آمده در قسمت قبل مقایسه کنید.

۳-۵ آزمایش مبدل حرارتی صفحه ای:

این مبدل از ۱۵ صفحه (*plate*) پشت سر هم تشکیل شده است که وظیفه انتقال حرارت بین سیال سرد و گرم را بر عهده دارند. ابعاد هریک از صفحه ها mm ۱۹۳×۸۳ می باشد و سطح خالص انتقال حرارت برای هر صفحه m^2 ۰/۰۱۶ می باشد که برای به دست آوردن سطح کلی انتقال حرارت این مقدار باید در ۱۵ ضرب شود. سطح انتقال حرارت موثر m^2 ۰/۲۴ می باشد. فاصله ی بین صفحات مبدل mm ۲/۸ می باشد. دبی آب سرد و گرم ورودی به مبدل، توسط دو عدد روتامتر اندازه گیری می شود. دبی آب سرد و گرم توسط دو عدد شیر فلکه ای قابل تنظیم است. برای ایجاد جریان همسو و نا همسو نیز از دو عدد شیر دو طرفه استفاده شده است. برای ایجاد جریان همسو دو شیر دوطرفه (دو شیر گازی) را در حالت عمودی قرار دهید و برای ایجاد جریان ناهمسو دو شیر مذکور را در حالت افقی قرار دهید. نمای دستگاه در شکل زیر آورده شده است:



شکل ۱۳

۳-۵-۱ مراحل انجام آزمایش:

۱- شیر آب سرد را باز کنید و دبی آب سرد را روی مقدار مشخصی قرار دهید.

۲- پمپ آب را روشن کنید تا جریان آب گرم برقرار شود.

۳- وقتی سیستم به حالت پایا رسید دماها و دبی سیال گرم و سرد را در جدول پایین یادداشت کنید.

۴- دو بار دیگر آزمایش را برای دبی های دیگر آب سرد انجام دهید.

۵- حال جهت جریان آب سرد را معکوس کنید و آزمایش را تکرار کنید.

جدول ۱۰

T_{co}	T_{ci}	T_{ho}	T_{hi}	دبی سیال گرم	دبی سیال سرد

۳-۵-۲ خواسته های آزمایش:

۱- مقادیر حرارت جذب شده توسط آب سرد و دفع شده توسط آب گرم و بازده حرارتی مبدل را بیابید(خواص فیزیکی سیال سرد و گرم را در دمای میانگین $T_{mc} = (T_{ci} + T_{co})/2$ و $T_{mh} = (T_{hi} + T_{ho})/2$ از جداول خواص فیزیکی آب بخوانید).

۲- ضرایب جابجایی , h_i و h_o را با استفاده از روابط تجربی مربوطه محاسبه کنید.

۳- با فرض براینکه تبادل حرارت بین مبدل حرارتی و محیط اطراف ناچیز است و همچنین هدایت حرارتی از میان ضخامت دیواره بین دوسیال ناچیز است، ضریب کلی انتقال حرارت U را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کنید و نحوه اثبات آن را توضیح دهید:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0}}$$

۴- با استفاده از روش $LMTD$ و نتایج آزمایش ها مقدار ضریب انتقال حرارت کلی را بیابید.

فصل چهارم: آزمایش چگالش

۴-۱ مقدمه:

هر گاه بخاری با سطح جامدی تماس پیدا کند که درجه حرارت سطح از درجه حرارت اشباع بخار کمتر باشد، بخار موجود به مایع تبدیل می شود و فرایند میعان (چگالش) اتفاق می افتد. با توجه به اصل کلی فوق دستگاه های متعددی در صنعت ساخته شده و به کار می روند. به عنوان مثال در دستگاه هایی مانند بلورساز ها، مبدل‌های حرارتی و دستگاه هایی از این قبیل، فرایند میعان عامل اصلی انتقال حرارت می باشد. در طی فرایند میعان در واحد سطح حرارت زیادی منتقل می شود. چنین شرایطی باعث افزایش کارایی مبدل حرارتی و کوچکتر شدن اندازه‌ی آن می شود. میعان بخار روی سطح جامد ممکن است به دو صورت میعان فیلمی و قطره ای انجام شود.

۴-۱-۱ میعان فیلمی (*Filmwise Condensation*) :

موادی که عموماً در ساختمان مبدل های حرارتی به کار می روند تر شونده هستند، در نتیجه در طول میعان یک لایه از مایع روی سطح جامد را می پوشاند و جریانی از مایع به سمت پایین بوجود می آید و مایع از پایین ترین نقطه‌ی سطح جدا می شود. بدین ترتیب در طول فرایند میعان انرژی (حرارت) از بخار به فیلم مایع منتقل می شود و توسط هدایت حرارتی در داخل فیلم به سطح فلز می رسد و از فلز نیز به مایع خنک کننده منتقل می شود. علیرغم کوچک بودن ضخامت فیلم مایع، مقاومت حرارتی قابل ملاحظه ای روی سطح ایجاد می شود. دلیل تفاوت زیاد مقدار حرارت منتقل شده در چگالش قطره ای و فیلمی همین مقاومت حرارتی فیلم مایع می باشد.

۴-۱-۲ میعان قطره ای (*Dropwise Condensation*) :

با انجام اعمال خاصی بر روی سطح یک مبدل می توان لایه ای بر روی سطح مبدل ایجاد کرد که مانع چسبیدن ذرات بخار به سطح جامد و تشکیل فیلم مایع شود. در این صورت بخار هنگام مایع شدن به صورت دانه های بسیار زیاد و کروی شکل روی سطح مبدل تولید می شود و با ادامه ی میعان، این دانه های مایع تولید شده بزرگتر شده و به یک دیگر متصل می شوند و به پایین می افتند. حرکت دانه ها به سمت پایین باعث می شود که دانه های ساکن روی سطح به یکدیگر متصل بشوند، با پایین آمدن این قطرات و بزرگتر شدن آنها، سرعت حرکت به پایین بیشتر شده و مایع از سطح جدا می شود و به سمت پایین می ریزد و سطح کاملا از مایع تمیز می شود. در عمل ترکیبات گوناگونی (غالبا اسید های چرب) به داخل بخار و سپس روی سطح تزریق می کنند که همانند پرداخت سطوح حرارتی باعث ایجاد شرایط لازم جهت پدیده‌ی میعان قطره ای می شود.

در شرایطی که اختلاف دمای بین سطح جامد و بخار در دو میعان کننده فیلمی و قطره ای برابر باشد انتقال حرارت در میعان قطره ای چندین برابر میعان فیلمی می باشد. با گذشت زمان به دلایلی از جمله آلوده شدن سطح میعان کننده یا ایجاد شدن رسوبات بر روی سطح ممکن است لایه‌ی ایجاد شده بر روی سطح مبدل کارایی خود را از دست بدهد و حالت میعان فیلمی به وجود بیاید به همین دلیل در طراحی ها شرایط میعان فیلمی در نظر گرفته می شود.

۴-۱-۳ **جوشش** هسته **ای:**

در اثر تشکیل حباب های بخار در سطح المان حرارتی، تلاطم شدیدی به وجود می آید که کاملاً قابل مشاهده است. این تلاطم عامل افزایش شار حرارتی در حین جوشش است.

۴-۱-۴ **تاثیر وجود هوا و یا گاز های غیر قابل میعان در محفظه:**

در اثر وارد شدن مقدار کمی هوا در محفظه ی بخار، بازده مبدلهای حرارتی کاهش می یابد. در حقیقت در همه ی مبدل های حرارتی که در آنها فرایند میعان اتفاق می افتد، با حذف گاز های مایع نشدنی از سیستم عملکرد آن بهتر خواهد شد. در مبدل های میعان کننده زمانی که عمل میعان صورت می گیرد، هوا و بخار با سرعت بالایی به سمت سطح خنک کننده جریان می یابند. بعد از چگالش بخار هوای باقیمانده تمایل دارد به اطراف حرکت کند ولی هوای تازه در حال حرکت با بخار به سمت سطح مبدل میعان کننده، مانع برگشت آن می شود و این عمل موجب تشکیل یک لایه ی هوا در اطراف سطح می شود. بخار برای رسیدن به سطح سرد باید از این لایه ی هوا بگذرد. این سد ایجاد شده توسط هوا باعث کاهش ضریب انتقال حرارت می شود.

۴-۲ شرح دستگاه:

محفظه ی بخار:

استوانه ای با دیواره ی شیشه ای و ضخیم می باشد که صفحات انتهایی آن از جنس استیل ضد زنگ است. صفحه پایین شامل یک المان گرمایی است که متناسب با توان ورودی، آب را بخار می کند. بخارتولید شده به سمت بالا حرکت می کند و با برخورد به دو خنک کننده ی موجود در بالای محفظه، مایع شده و به پایین بر می‌گردد.

المان گرم کننده:

المان گرم کننده آب درون محفظه، یک المان حلزونی شکل است که دارای قدرتی برابر kW ۲/۵ می باشد.

کنترل کننده ی گرمکن:

توان المان حرارتی را می توان توسط یک ولوم از صفر تا kW ۲/۵ تغییر دارد.

میعان کننده فیلمی:

این میعان کننده از مس ساخته شده است که به عنوان مبدل حرارتی، جهت گرم کردن آب خنک ورودی به کار برده می شود. برای بدست آوردن دمای آب ورودی و خروجی، دو ترموکوپل در مسیر جریان ورودی و خروجی مبدل قرار داده شده است.

میعان کننده ی قطره ای:

این قسمت از دستگاه نیز کاملاً شبیه میعان کننده ی فیلمی است، به جز اینکه یک روکش طلا بر روی آن ساخته شده است تا امکان ایجاد پدیده ی میعان قطره ای فراهم شود.

نمایشگر الکترونیکی دما:

برای اندازه گیری دما در این دستگاه از ۸ ترموکوپل استفاده شده که توسط چهار نمایشگر الکترونیکی نشان داده می شوند دماهای نشان داده شده به ترتیب عبارتند از:

T_1 -دمای مایع اشباع

T_2 -دمای سطح مبدل میعان فیلمی

T_3 -دمای آب خروجی از مبدل میعان فیلمی

T_4 -دمای آب ورودی به مبدل میعان فیلمی

T_5 -دمای سطح مبدل میعان قطره ای

T_6 -دمای آب خروجی از مبدل میعان قطره ای

T_7 -دمای آب ورودی به مبدل میعان قطره ای

T_8 -دمای بخار آب

روتامتر:

این قسمت دبی جریان آب جاری در میعان کننده ها را نشان می دهد. به کمک شیر تنظیم کننده‌ی جریان، می توان مقدار آب ورودی به میعان کننده ها را تنظیم کرد. برای خواندن مقادیر عددی شدت جریان در این دبی سنج ها عددی را که مقابل سطح بالای شناور قرار دارد، ثبت نمایید.

گیج فشار نسبی:

این گیج نشان دهنده‌ی اختلاف فشار مطلق داخل محفظه‌ی بخار و فشار محیط است (یعنی نشان دهنده ی فشار نسبی است).

کلید فشار:

یک سوئیچ فشاری از نوع دیافراگمی به سیستم محفظه ی بخار وصل شده است. این سوئیچ هنگامی کـه فشار محفظه از حد معینی (حدود $2bar$) بگذرد، توان ورودی به المان گرم کننده را قطع می کند.

شیر اطمینان:

یک شیر اطمینان فلزی در بالای محفظه ی بخار نصب شده است. این شیر طوری نصب شده است که با افزایش فشار نسبی به bar ۲/۵ و بالاتر باز می شود.

محافظت از المان گرم کننده:

حتما توجه داشته باشید که سطح آب مقطر داخل مخزن حدود mm ۱۱بالاتر از سطح هیتر باشد. قبل از انجام هر آزمایشی در صورت پایین بودن سطح آب، مقداری آب مقطر توسط یک پیست از زیر به دستگاه اضافه کنید.

پر نمودن محفظه از آب:

پیست مربوط به شارژ مخزن را از آب مقطر پر کنید. سر شلنگ آن را به ورودی شیر پایین مخزن وصـل کنید. شیر را باز کنید و با فشرده کردن پیست آب را به داخل تانـک هـدایت کنیـد. قبـل از رهـا کـردن پیست شیر را ببندید و تا رسیدن به مقدار مطلوب این عمل را ادامه دهید.

نکات مهم:

۱-برای این آزمایش تنها از آب مقطر با کیفیت بالا استفاده کنید. این عمل مانع آلوده شـدن سـطح خنک کننده ها و ایجاد رسوب در سیستم می شود.

۲- همواره سطح آب داخل محفظه را در ارتفاع مناسبی ثابت نگه دارید. ارتفاع ۱۵ میلیمتر بـالاتر از انتهای المان حرارتی مناسب است. توجه کنید اگر آب داخل محفظه زیـاد باشـد، فـوران آب بـه سطح میعان کننده ها ایجاد اشکال می کند.

۳-مواظب باشید که آب خنک به صورت ناگهانی وارد محفظه ی خالی و داغ نشود. محفظه ی بخار و دیگر سطوح آن ممکن است تا دمای حتی بالاتر از ۱۰۰ درجه ی سانتیگراد گرم شوند. برای کار کردن با آنها مطابق روش های گفته شده عمل کنید.

۴- در صورتی که محفظه ی شیشه ای ترک داشته باشد از آن استفاده نکنید.

۵-اگر در طول آزمایش احتیاج به پر کردن محفظه داشتید، لازم است که ابتدا دمای محفظـه را بـه حدود ۶۰-۵۰ درجه سانتیگراد کاهش دهید. کاهش دما را حتما قبل از اینکه آب مقطـر خنـک وارد محفظه شود انجام دهید، چون مقداری هوا در آب مقطر به صورت محلول وجود دارد. پـس از پر کردن محفظه باید مجدداً عمل استخراج هوا صورت گیرد.

فهرست آزمایش های مختلفی که با این دستگاه قابل انجام می‌باشد:

۱- مشاهده میعان فیلمی و قطره ای و جوشش هسته ای.

۲- اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان فیلمی.

۳- اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان قطره ای.

۴- بررسی رابطه ی فشار و دمای اشباع برای آب.

اطلاعات مورد نیاز:

سطح موثر انتقال حرارت خنک کننده ها: ۵۵ cm^2

قطر داخلی محفظه ی شیشه ای: ۹۰ mm

ارتفاع محفظه ی شیشه ای: ۴۰۰ mm

ظرفیت حرارتی آب (C_p): ۴/۱۸ $kj/kg.K$

حداکثر توان حرارتی المان: ۲/۵ kW

۴-۳ روش کار با دستگاه:

۱- دوشاخه برق دستگاه را به پریز وصل کنید.

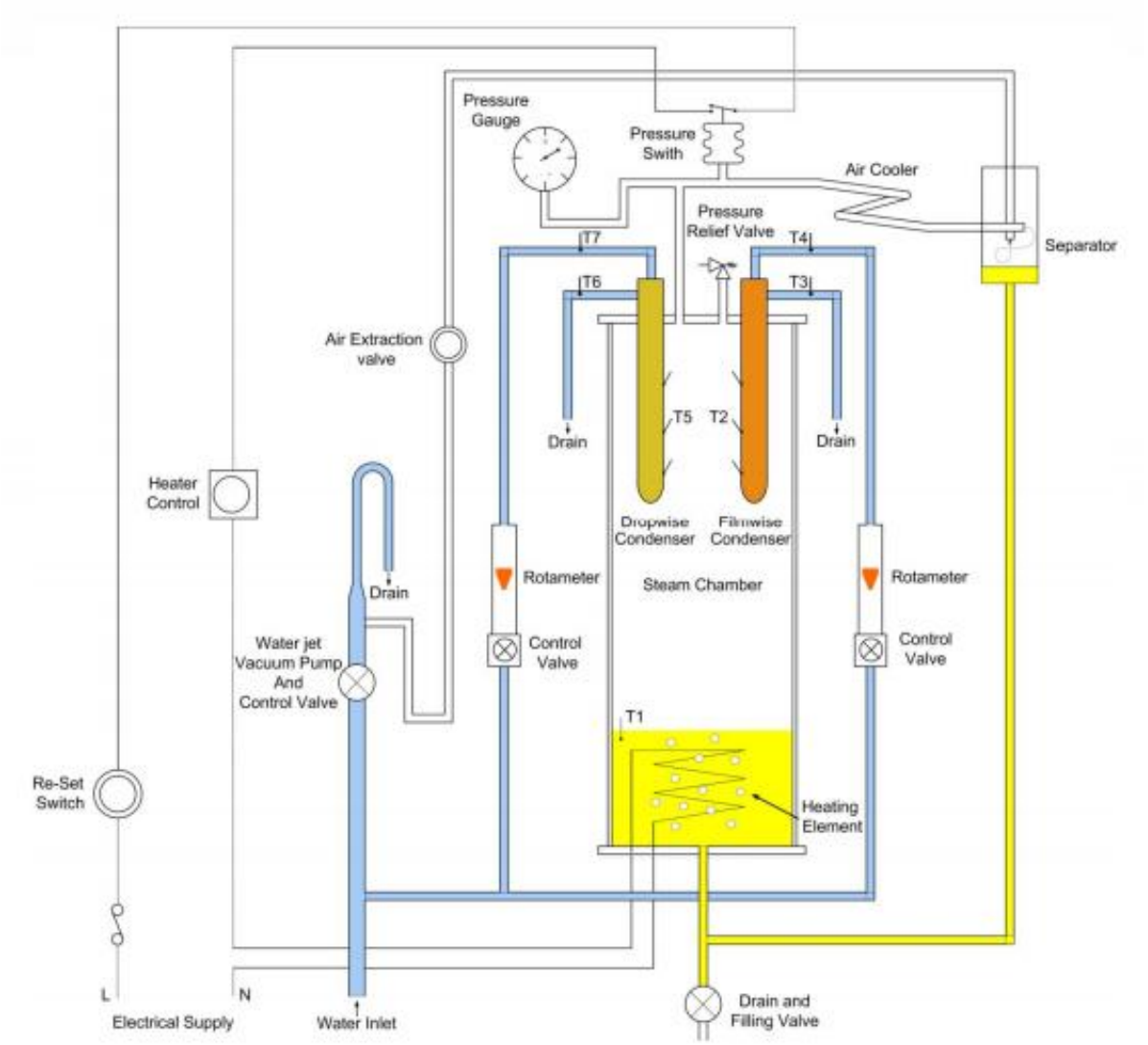
۲- شلنگ های ورودی و خروجی آب به دستگاه را وصل کنید.

۳- به کمک شیر تنظیم دبی و روتامتر مربوط به هر مبدل جریان آب را درون آن مبدل برقرار سازید.

۴- حجم مشخصی آب مقطر را به کمک شیر و شلنگ نصب شده در زیر استوانه بریزید.

۵- به کمک ولوم مربوط وات مصرفی هیتر را تنظیم کنید تا هیتر روشن شود و آب جوش آید.

۶- بعد از به جوش آمدن آب، فشار مقداری افزایش می یابد. در این حالت اگر شیر ربع گرد نصب شده در بالای استوانه را باز کنید و ببندید، مقداری بخار از آن خارج می شود که خاموش نمودن هیتر و سرد شدن داخل استوانه باعث ایجاد فشار منفی در داخل استوانه می شود.



شکل ۱۴: دیاگرام شماتیک دستگاه آزمایش چگالش

۴-۴ آزمایش مشاهده ی میعان فیلمی و قطره ای و جوشش هسته ای

ابتدا به سطح آب موجود در محفظه دقت کنید. ارتفاع آن باید حدود ۴۰ میلیمتر بالاتر از سطح المان حرارتی باشد. المان حرارتی را روشن کنید و دمای آب (T_1) را به ۱۰۰ درجه ی سانتیگراد برسانید. جریان آب میعان کننده ها را طوری تنظیم کنید که دمای آب خروجی از میعان کننده‌ی قطره ای (T_6) و دمای آب خروجی از میعان کننده‌ی فیلمی (T_3) یکسان باشند. حال فرایند میعان را در هر دو مبدل مشاهده و مقایسه کنید.

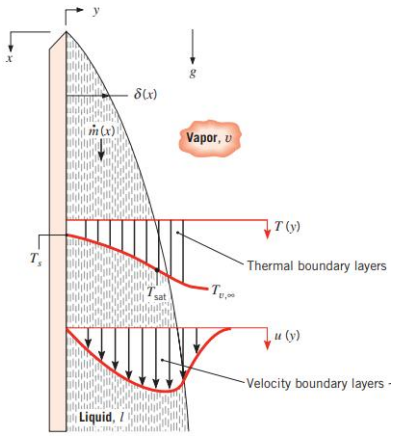
با توجه به محفظه شیشه‌ای دیده می شود که سرعت ریزش مایع حاصل از میعان قطره ای چندین برابر سرعت ریزش مایع حاصل از میعان فیلمی می باشد . این نشان می دهد زمانی که اختلاف دمای سطح و

بخار در هر دو میعان کننده یکسان باشد، میعان کننده ی قطره ای دارای سرعت انتقال حرارت بیشتری است.

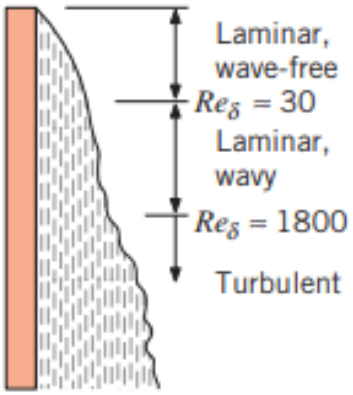
۴-۵ آزمایش اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان فیلمی:

۴-۵-۱ خلاصه تئوری مربوط به آزمایش:

در میعان فیلمی یک لایه نازک از مایع در اطراف سطح سرد تشکیل می شود، این لایه یک مقاومت حرارتی بین بخار و سطح میعان کننده به وجود می آورد. براساس مشاهدات تجربی ضریب انتقال جابجایی در چگالش فیلمی حدود ۰/۱ تا ۰/۲ چگالش قطره ای است. وقتی که بخار در قسمت خارجی سطوح سرد به مایع تبدیل می شود، این مایع بر اثر نیروی وزن به طرف پایین جریان می یابد. با توجه به شکل ۱۵ ضخامت لایه مرزی ایجاد شده از بالا به سمت پایین سطح افزایش می یابد و با افزایش ضخامت لایه مرزی مقاومت در برابر انتقال حرارت نیز بیشتر می شود.



شکل ۱۵ : لایه مرزی ایجاد شده برروی سطح سرد در چگالش فیلمی.



شکل ۱۶

برای بررسی انتقال حرارت در چگالش فیلمی ابتدا باید نوع جریان در داخل لایه مرزی مشخص شود که با توجه به مقدار عدد Re_δ می توان سه نوع جریان را در داخل لایه مرزی مشخص کرد (شکل ۱۶). برای بازه‌ی $Re_\delta \leq 30$ جریان داخل لایه مرزی به صورت لایه ای است. در بازه‌ی $30 \leq Re_\delta \leq 1800$ جریان در لایه مرزی لایه ای و موج دار است و در بازه‌ی $Re_\delta \geq 1800$ جریان داخل لایه مرزی مغشوش است. برای محاسبه Re_δ از روابط زیر استفاده می شود، برای استفاده از این روابط عدد رینولد با استفاده از یکی از روابط پایین محاسبه می شود باید توجه کرد که عدد بدست آمده از رابطه در داخل بازه‌ی مربوطه قرار داشته باشد در غیر این صورت از رابطه ی دیگر استفاده می شود.

$$Re_\delta = \left[\frac{k_l L(T_{sat}-T_s)}{\mu_l h'_{fg}\left(\frac{v_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}\right]^{\frac{3}{4}} \qquad Re_\delta \le 30$$

$$Re_\delta = \left[\frac{3.7\times k_l L(T_{sat}-T_s)}{\mu_l h'_{fg}\left(\frac{v_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}+4.8\right]^{0.82} \qquad 30 \le Re_\delta \le 1800$$

$$Re_\delta = \left[\frac{0.069\times k_l L(T_{sat}-T_s)}{\mu_l h'_{fg}\left(\frac{v_l^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}}}\times Pr_l^{0.5} - 151\times Pr_l^{0.5} + 253\right]^{4/3}, \quad Re_\delta \ge 1800$$

که درآن

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68C_{p,l}(T_{sat}-T_s)$$

در روابط بالا h_{fg} در دمای T_{sat} و بقیه خواص فیزیکی در دمای متوسط $T_f = \frac{T_{sat}+T_s}{2}$ ارزیابی می‌شوند. عدد نوسلت اصلاح شده برای بازه های عدد رینولدز ذکر شده در بالا از روابط زیر بدست می آید:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(v_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = 1.47Re_\delta^{-1/3} \qquad Re_\delta \le 30$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(v_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{8750+58\,Pr_l^{-0.5}\left(Re_\delta^{0.75}-253\right)}, Re_\delta \ge 1800, Pr_l \ge 1$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_L(v_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{8750+58\,Pr_l^{-0.5}\left(Re_\delta^{0.75}-253\right)}, Re_\delta \ge 1800, Pr_l \ge 1$$

مقدار کل حرارت منتقل شده به سطح از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$q = \bar{h}_L A(T_{sat}-T_s)$$

که در آن $A = \pi DL$ مساحت جانبی استوانه است.

۲-۵-۴ نحوه انجام آزمایش:

۱. سطح مایع داخل محفظه باید بالاتر از گرمکن باشد و هوای داخل محفظه‌ی شیشه‌ای باید تخلیه شده باشد.

۲. به منظور گرم شدن قسمت های مختلف سیستم وجلوگیری از میعان بر جداره‌ی محفظه‌ی شیشه‌ای، قبل از شروع آزمایش به مدت ۵ دقیقه دمای آب داخل محفظه(T_1) را نزدیک ۱۰۰ °C نگه دارید. (شیر ربع گرد نصب شده در بالای استوانه را باز کنید تا باعث خروج هوا از محفظه بشود).

۳. پس از گرم شدن جداره شیشه‌ای توان ورودی گرمکن را افزایش بدهید تا بـه فشـار نسـبی $0\ bar$ برسد.

۴. شیر آب ورودی مربوط به مبدل چگالش فیلمی(شیر سمت چپ) را باز کنید، مشاهده می کنید که بعد از جریان یافتن آب در داخل مبدل فشار داخل محفظه به سرعت کاهش می یابد. با افزایش دادن توان ورودی گرمکن فشار نسبی داخل محفظه را به $0\ bar$ برسانید(سعی کنید در طول آزمایش آب داخل محفظه(T_1) ثابت و نزدیک دمای جوش نرمال آب یعنی ۱۰۰ $^{\circ}C$ باشد).

۵. پس از ثابت شدن پارامترها و شرایط آزمایش، یعنی هنگامیکه تغییراتـی در دمـا و فشـار مشـاهده نشـد دبی آب داخل میعان کننده را از روتامتر بخوانید و به همراه دماهـای T_1, T_2, T_3 و T_4 را برای مبدل میعان فیلمی در جدول ۱۱ ثبـت نماییـد. و مراحل بالا را برای دو دبی دیگر نیز انجام دهید.

توجه: در دمای ۱۰۰$^{\circ}C$ درجه سانتیگراد، هوا به محفظه نفوذ نمی کند ولی در دماهای پایین تر امکان نفوذ هوا وجود دارد و جهت حل این مشکل باید چند دفعه محفظه را هوا گیری کنیم.

جدول ۱۱

	دبی حجمی $Q(lit/hr)$	T_1°C	T_2°C	T_3°C	T_4°C
۱					
۲					
۳					

۳-۵-۴ خواسته های آزمایش:

۱- آهنگ انتقال حرارت بوجود آمده بین بخار و سطح را برای چگالش فیلمـی محاسـبه کنیـد. (بـا ایـن فرض که تمام حرارت مبادله شده بین بخار و سطح به آب داخل مبدل منتقل می شود.)

۲- با استفاده از آهنگ انتقال حرارت محاسبه شده و رابطه زیر ضریب انتقال حرارت جابه جـایی $\bar{h}_L$ را برای چگالش فیلمی محاسبه کنید.

$$q = \bar{h}_L A(T_{sat} - T_s)$$

۳- عدد Re_δ را محاسبه کنید و توضیح دهید که جریان داخل لایه مرزی به چه صورتی است.

۴-ضریب بدست آمده برای $\bar{h}_L$ را با استفاده از روابط تجربی محاسبه نمایید و دلیـل تفـاوت آنهـا را ذکـر کنید.

۵- آهنگ جرمی چگالش بخار($\dot{m}$) را محاسبه نمایید.

۴-۶ آزمایش اندازه گیری شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در میعان قطره‌ای:

۴-۶-۱ خلاصه تئوری مربوط به آزمایش:

برای این که میعان قطره ای برروی سطح ایجاد بشود معمولا یک لایه بسیار نازک از سیلیکون، تفلون یا برخی موم ها و اسید های چرب آمینه برروی سطح ایجاد می شود تا مانع چسبیدن بخار به سطح و ایجاد فیلم مایع بشود. در این وسیله‌ی آزمایش نیز یک لایه‌ی بسیار نازک طلا برروی سطح مبدل مسی ایجاد شده است. در حالت میعان قطره ای شرایط سطح جامد مانع تشکیل فیلم مایع می شود، درست همانطورکه بر روی سطوح صیقلی، شبنم به صورت قطرات پراکنده می نشیند و یا قطرات آبی که روی تابه تفلونی منفرد باقی می‌مانند. روابط بسیار معدودی برای این نوع میعان ارائه شده و این روابط وابسته به جنس سطح و نوع سیال هستند. برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی در این حالت ابتدا با استفاده از مقدار دمای آب ورودی و خروجی مبدل میعان قطره‌ای و دبی جریان آب داخل مبدل آهنگ انتقال حرارت بوجود آمده بین بخار و سطح محاسبه می‌شود (با این فرض که تمام حرارت مبادله شده بین بخار و سطح به آب داخل مبدل منتقل می شود).

$$q = \rho Q c_p (T_6 - T_7)$$

که در آن Q دبی جریان آب داخل مبدل میعان قطره‌ای است که با استفاده از روتامتر اندازه گیری می شود. با استفاده رابطه زیر ضریب انتقال حرارت جابه جایی $\bar{h}_L$ را برای میعان قطره‌ای محاسبه می شود.

$$q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)$$

۴-۶-۲ نحوه انجام آزمایش:

۱. سطح مایع داخل محفظه باید بالاتر از گرمکن باشد و هوای داخل محفظه‌ی شیشه‌ای باید تخلیه شده باشد.

۲. به منظور گرم شدن قسمت های مختلف سیستم وجلوگیری از میعان بر جداره‌ی محفظه‌ی شیشه-ای، قبل از شروع آزمایش به مدت ۵ دقیقه دمای آب داخل محفظه(T_1) را نزدیک ۷۵ °C نگه دارید. (شیر ربع گرد نصب شده در بالای استوانه را باز کنید تا باعث خروج هوا از محفظه بشود).

۳. پس از گرم شدن جداره شیشه‌ای توان ورودی گرمکن را افزایش بدهید تا به فشار نسبی $0\ bar$ برسد.

۴. شیر آب ورودی مربوط به مبدل میعان قطره‌ای(شیر سمت راست) را باز کنید، مشاهده می کنید که بعد از جریان یافتن آب در داخل مبدل فشار داخل محفظه به سرعت کاهش می یابد. با افزایش دادن

توان ورودی گرمکن فشار نسبی داخل محفظه را به $0\ bar$ برسانید(سعی کنید در طول آزمایش آب داخل محفظه(T_1) ثابت و نزدیک دمای جوش نرمال آب یعنی $100\ ^\circ C$ باشد).

۵. پس از ثابت شدن پارامترها و شرایط آزمایش، یعنی هنگامیکه تغییراتی در دما و فشار مشاهده نشد دبی آب داخل میعان کننده را از روتامتر بخوانید و به همراه دماهای T_1, T_5, T_6 و T_7 را برای مبدل میعان قطره‌ای در جدول ۱۲ ثبت نمایید. و مراحل بالا را برای دو دبی دیگر نیز انجام دهید.

جدول ۱۲

	دبی حجمی $Q(lit/hr)$	$T_1°C$	$T_5°C$	$T_6°C$	$T_7°C$
۱					
۲					
۳					

۴-۶-۳ خواسته های آزمایش:

۱- آهنگ انتقال حرارت بوجود آمده بین بخار و سطح را برای چگالش قطره‌ای محاسبه کنید. (با این فرض که تمام حرارت مبادله شده بین بخار و سطح به آب داخل مبدل منتقل می شود.)

۲- با استفاده از آهنگ انتقال حرارت محاسبه شده و رابطه زیر ضریب انتقال حرارت جابه جایی $\bar{h}_L$ را برای چگالش قطره‌ای محاسبه کنید.

$$q = \bar{h}_L A(T_{sat} - T_s)$$

۳- آهنگ جرمی چگالش بخار$(\dot{m})$ را برای چگالش قطره‌ای محاسبه نمایید.

۴-۷ آزمایش بررسی رابطه ی فشار و دمای اشباع برای آب:

۴-۷-۱ نحوه انجام آزمایش:

۱. سطح مایع در محفظه را کنترل کنید و از عدم وجود هوا در محفظه مطمئن شوید.

۲. برای گرم شدن قسمت های مختلف دستگاه، جریان میعان کننده ها را کم کنید و دمای مایع اشباع را به ۱۰۰درجه ی سانتیگراد برسانید و اجاره دهید به مدت ۵ دقیقه دستگاه در این حالت باقی بماند.

۳. مقادیر (T_1)و (P) را در جدول ۱۳ یادداشت کنید.

۴. با افزایش مقدار آب ورودی به مبدل های حرارتی و یا کاهش توان ورودی به المان حرارتی، دمای مایع اشباع (T_1) را به ۹۵ درجه ی سانتی گراد کاهش دهید.

۵. مجدداً دمای اشباع (T_1) و فشار (P) را در جدول ۱۳ یادداشت کنید.

۶. با رعایت همین فاصله بین دماها، دمای (T_1)را کاهش دهید و مقادیر بدست آمده را ثبت کنید (این عمل را تا دمای ۸۰ سانتی گراد درجه ادامه دهید).

۷. دمای (T_1)را مجدداً مرحله به مرحله به همان اندازه قبل افزایش دهید و مقادیر فشار را در جدول ۱۴ یادداشت کنید.

جدول ۱۳

	T_1°C	P
۱	۱۰۰	
۲	۹۵	
۳	۹۰	
۴	۸۵	
۵	۸۰	

جدول ۱۴

	T_1°C	P
۱	۱۰۰	
۲	۹۵	
۳	۹۰	
۴	۸۵	
۵	۸۰	

۴-۷-۲ خواسته های آزمایش:

۱- مقادیر فشار ثبت شده در جدول ۱۳ و جدول ۱۴ را مقایسه کنید و در صورت وجود اختلاف، درباره دلایل احتمالی آن بحث کنید.

۲- نمودار میانگین فشار را بر حسب دما رسم کنید.