



دستور کار آزمایشگاه انتقال حرارت

تحت نظر:

دکتر محمد باقر آیانی

نگارندگان:

علی اسماعیلی

سید علی ناقدی فر

سید محمد وحید حسینی

الحمد لله الذي
جعلنا من
البرية

فهرست مطالب

۱- هدایت گرمایی سیال	۱
۱-۱- هدف	۲
۱-۲- مقدمه	۲
۱-۳- تئوری	۲
۱-۳-۱- هدایت گرمایی در مختصات استوانه‌ای	۲
۱-۴- شرح دستگاه	۳
۱-۵- روش آزمایش	۴
۱-۶- خواسته‌های آزمایش	۶
۲- تشعشع گرمایی (قانون استفان-بولتزمن)	۸
۲-۱- هدف	۹
۲-۲- مقدمه	۹
۲-۳- تئوری	۹
۲-۴- شرح دستگاه	۱۰
۲-۵- روش آزمایش	۱۲
۲-۵-۱- بررسی رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی	۱۲
۲-۵-۲- بررسی رابطه استفان بولتزمن	۱۳
۲-۶- خواسته‌های آزمایش	۱۴
۲-۶-۱- آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی	۱۴
۲-۶-۲- آزمایش رابطه استفان بولتزمن	۱۵
۳- جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی	۱۷
۳-۱- هدف	۱۸
۳-۲- مقدمه	۱۸
۳-۳- شرح دستگاه	۱۸
۳-۴- روش آزمایش	۲۰
۳-۵- تئوری	۲۱
۳-۵-۱- اندازه‌گیری دبی جریان هوا با استفاده از صفحه اوریفیس	۲۱
۳-۵-۲- اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک	۲۲
۳-۵-۳- تحلیل انتقال حرارت گذرا در دستگاه	۲۳
۳-۵-۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به دیواره	۲۴
۳-۵-۵- بررسی صحت تشابه رینولدز-کلبرن	۲۵
۳-۵-۶- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب	۲۶
۳-۶- خواسته‌های آزمایش	۲۹
۳-۶-۱- خواسته‌های آزمایش برای حالت گرمایش	۲۹
۳-۶-۲- خواسته‌های آزمایش برای حالت سرمایش	۲۹

۳۴	۴- هدایت گرمایی اجسام جامد
۳۵	۴-۱- هدف
۳۵	۴-۲- مقدمه
۳۵	۴-۳- شرح دستگاه
۳۷	۴-۴- روش انجام آزمایش
۳۸	۴-۵- تئوری
۴۱	۴-۶- خواسته‌های آزمایش
۴۲	۵- ضریب صدور
۴۳	۵-۱- هدف
۴۳	۵-۲- مقدمه
۴۳	۵-۳- تئوری
۴۴	۵-۳-۱- تشعشع جسم سیاه:
۴۴	۵-۳-۲- صدور انرژی از سطوح واقعی:
۴۵	۵-۴- شرح دستگاه
۴۸	۵-۵- روش آزمایش
۵۰	۵-۶- خواسته‌های آزمایش
۵۱	۶- جابه‌جایی آزاد
۵۲	۶-۱- هدف
۵۲	۶-۲- مقدمه
۵۲	۶-۳- تئوری
۵۳	۶-۳-۱- عدد گراشف (Gr)
۵۳	۶-۳-۲- رابطه تجربی جابه‌جایی آزاد:
۵۴	۶-۴- شرح دستگاه
۵۴	۶-۵- روش آزمایش
۵۶	۶-۶- خواسته‌های آزمایش
۵۸	۷- مبدل حرارتی
۵۹	۷-۱- هدف
۵۹	۷-۲- مقدمه
۵۹	۷-۳- تئوری
۵۹	۷-۳-۱- ضریب انتقال گرمای کلی:
۶۰	۷-۳-۲- موازنه انرژی در مبدل‌های حرارتی
۶۱	۷-۳-۳- اختلاف دمای متوسط لگاریتمی
۶۲	۷-۳-۴- روش $\epsilon - NTU$
۶۲	۷-۴- شرح دستگاه
۶۴	۷-۵- روش آزمایش

۶-۷- خواسته‌های آزمایش ۶۶

۸- مراجع ۶۹

فهرست جداول

جدول ۱-۱	ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال	۶
جدول ۲-۱	ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال	۷
جدول ۱-۲	ثبت داده‌های آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی	۱۴
جدول ۲-۲	ثبت داده‌های آزمایش رابطه استفان-بولتزمن	۱۵
جدول ۱-۳	ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی	۳۰
جدول ۱-۴	ثبت داده‌های آزمایش هدایت گرمایی اجسام جامد	۳۸
جدول ۱-۵	ثبت داده‌های آزمایش ضریب صدور	۵۰
جدول ۱-۶	ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی آزاد	۵۶
جدول ۱-۷	ثبت داده‌های آزمایش مبدل حرارتی	۶۶
جدول ۲-۷	محاسبه دبی گرمی و حرارت منتقل شده بر اساس روابط ترمودینامیکی	۶۷
جدول ۳-۷	میزان حرارت منتقل شده بر اساس اختلاف دمای متوسط لگاریتمی	۶۸
جدول ۴-۷	میزان حرارت منتقل شده بر اساس روش ϵ -NTU	۶۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ المان استوانه‌ای ۳
- شکل ۲-۱ مقطعی از دستگاه ۳
- شکل ۳-۱ نمودار کالیراسیون ۵
- شکل ۱-۲ شماتیک دستگاه آزمایش تشعشع گرمایی ۱۱
- شکل ۲-۲ از راست به چپ: منبع گرمایی، صفحه تخت فلزی و حسگر شار تشعشع گرمایی ۱۲
- شکل ۳-۲ نمودار محاسبه ضریب دید [۱] ۱۶
- شکل ۱-۳ اجزاء تشکیل دهنده دستگاه ۳۱
- شکل ۲-۳ دیاگرام مودی ۳۲
- شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش ۳۳
- شکل ۱-۴ نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای شکل ۳۶
- شکل ۲-۴ نمای ظاهری از تغییرات دما با مکان در داخل جسم ۳۸
- شکل ۱-۵ شماتیک دستگاه آزمایش ضریب صدور و جابه‌جایی آزاد ۴۷
- شکل ۱-۷ شکل شماتیک مبدل حرارتی موجود و ابعاد آن ۶۴

هدایت گرمایی سیال

۱-۱- هدف

اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی (K) سیالات (هوا) و بررسی اثر دما بر ضریب هدایت گرمایی.

۱-۲- مقدمه

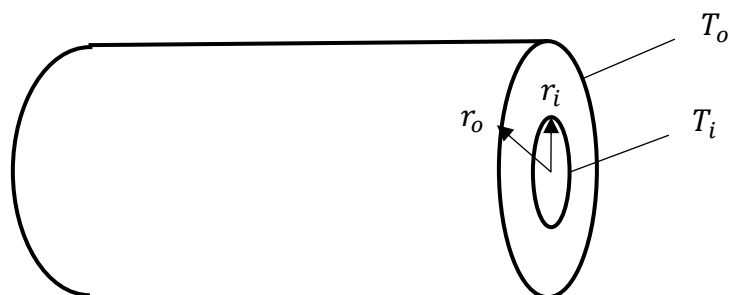
هدایت گرمایی انتقال انرژی در محیط بر اثر وجود شیب دما است. سازوکار این نوع انتقال گرما بر اساس جنبش اتمی یا مولکولی است [۱]. هدایت گرما در بسیاری از پدیده‌های طبیعی و صنعتی وجود دارد.

۱-۳- تئوری

برای بررسی هدایت در گازها، گازی را در نظر بگیرید که در آن گرادیان دما وجود داشته باشد و فرض کنید که توده گاز حرکتی ندارد. گاز فضای بین دو سطح با دمای متفاوت را پر می‌کند. دمای هر نقطه به انرژی مولکول‌های گاز در همسایگی آن نقطه وابسته است. این انرژی به حرکت انتقالی مولکول‌ها و نیز به حرکت‌های چرخشی و ارتعاشی درونی مولکول‌ها بستگی دارد. هرچه دما بالاتر باشد انرژی مولکولی بیشتر است. از آنجا که مولکول‌ها به طور دائم در حال برخورد با یکدیگر هستند، انرژی از مولکول‌های پر انرژی به مولکول‌های کم انرژی انتقال می‌یابد. در صورت وجود گرادیان دما (وجود گرادیان انرژی مولکولی) انتقال انرژی توسط هدایت در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. در مایعات نیز وضعیت تقریباً مشابهی اتفاق می‌افتد با این تفاوت که فاصله مولکول‌ها نزدیک‌تر بوده و فعل و انفعال مولکولی قوی‌تر و بیش‌تر می‌باشد.

۱-۳-۱- هدایت گرمایی در مختصات استوانه‌ای

مطابق شکل ۱-۱ استوانه‌ای به شعاع داخلی r_i و دمای T_i و شعاع خارجی r_o و دمای T_o و طول L را در نظر بگیرید.



شکل ۱-۱ المان استوانه‌ای

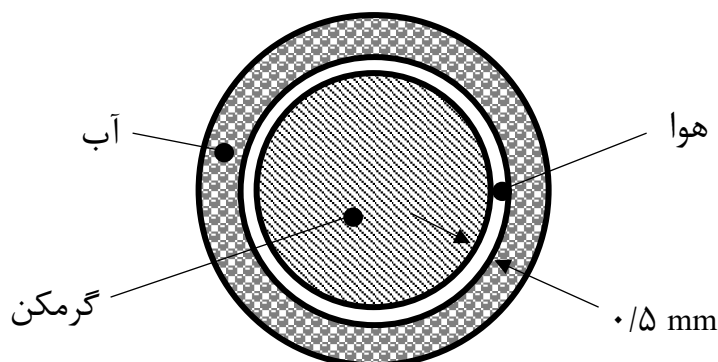
معادله فوریه در دستگاه مختصات استوانه‌ای در راستای r به شکل زیر قابل بیان است:

$$\left. \begin{aligned} Q_r &= -k A_r \frac{\partial T}{\partial r} \\ A_r &= 2\pi r L \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q_r = -k 2\pi r L \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1-1)$$

۴-۱- شرح دستگاه

این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی انواع سیالات (گازها و مایعات) را دارا

می‌باشد. دستگاه شامل ۳ لایه استوانه‌ای شکل است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ مقطعی از دستگاه

درونی‌ترین لایه گرمکنی است که با توجه به توان تنظیم شده توسط کاربر، مقدار گرمای لازم

را فراهم می‌سازد. در مرکز گرمکن ترموکوپلی تعبیه شده است که امکان مشاهده دمای آن را

(T_{heater}) روی صفحه نمایشگر را میسر می‌سازد. لایه بعدی استوانه‌ای به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر

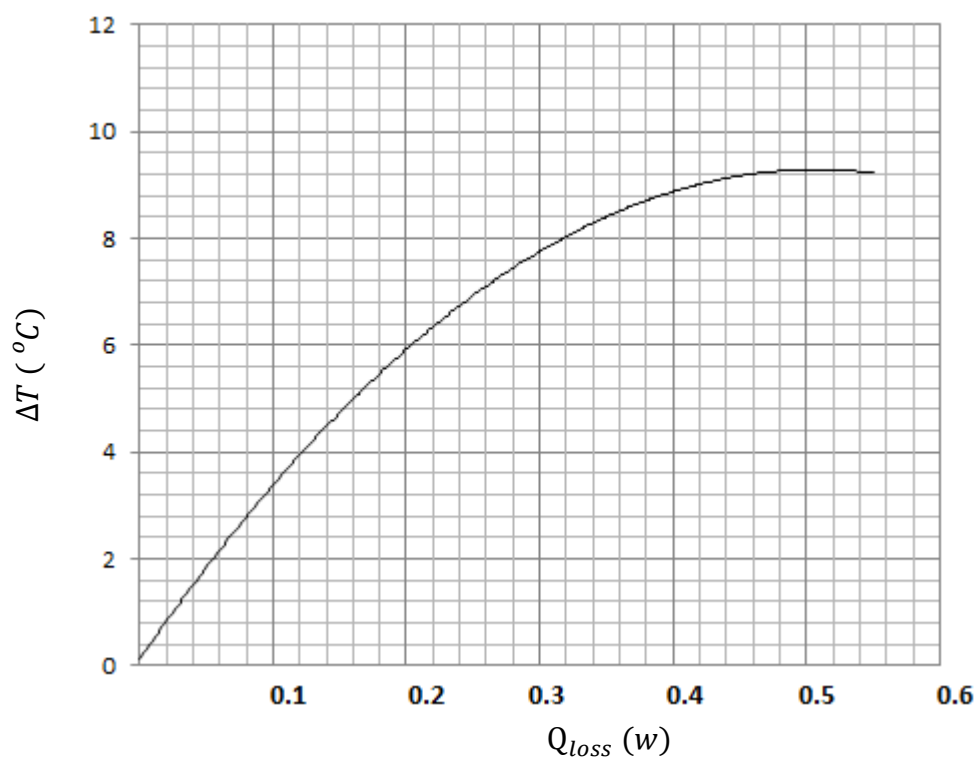
است که سیال موردنظر در این قسمت محبوس می‌گردد. با توجه به نازک بودن ضخامت لایه

سیال مورد آزمایش می‌توان دمای سیال را با تقریب خوبی برابر با دمای هیتر در نظر گرفت. علاوه بر این، می‌توان انتقال گرما را یک بعدی فرض نمود. در آخرین لایه، آب شهر جریان می‌یابد. در مسیر آب شهر نیز یک ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما قرار داده شده است و دمای آب روی نمایشگر دستگاه نشان داده می‌شود.

۱-۵- روش آزمایش

در این آزمایش ضریب هدایت گرمایی هوا اندازه‌گیری می‌شود. قبل از انجام هر آزمایش باید دستگاه را کالیبره کرد. برای این منظور شیر ورودی و خروجی هوا را باز کنید. از پمپ‌باد 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 هرگونه ناخالصی می‌تواند تأثیر بسیار زیادی در نتیجه آزمایش داشته باشد.

حال شیر خروجی هوا را ببندید، سپس شیر ورودی هوا را بسته تا هوا درون استوانه حبس شود. شیر آب شهر را باز کنید تا آب درون سیستم جریان داشته باشد. کلید on دستگاه را زده و گرمکن را روشن کنید. ولتاژ دستگاه را روی حداقل ۶۰ ولت تنظیم کنید و به سیستم حدود ۲۰ دقیقه زمان دهید تا به حالت پایدار برسد و دما ثابت گردد. حال دمای هوا (T_{heater}) و دمای آب (T_{cooler}) را از دستگاه یادداشت کنید. با توجه به این‌که مقداری اتلاف گرما وجود دارد و تمام انرژی بین آب و هوا منتقل نمی‌گردد، باید مقدار گرمای خالص انتقال یافته را به دست آورد. برای این منظور اختلاف دمای بین آب و هوا را محاسبه کرده و با استفاده از شکل ۱-۳ میزان گرمای هدر رفته (Q_{loss}) محاسبه می‌شود. حال با داشتن مقدار گرمای خالص انتقال یافته و با استفاده از قانون فوریه مقدار ضریب هدایت گرمایی هوا محاسبه می‌گردد. مساحت خارجی استوانه بین آب و هوا ۰/۰۱۷ مترمربع و مقاومت گرمکن ۹۵۰ اهم می‌باشد.



شکل ۳-۱ نمودار کالیبراسیون

۱-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- برای بررسی تأثیر دما بر ضریب هدایت گرمایی هوا آزمایش شرح داده شده در بخش ۱-

۵- را برای چند ولتاژ دیگر نیز تکرار کنید. نتایج را در جدول ۱-۱ وارد کنید.

جدول ۱-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال

$P_{gage}(psi) =$								
ولتاژ (V)	دمای آب ($^{\circ}C$)	دمای گرمکن ($^{\circ}C$)	اختلاف دمای آب و گرمکن ($^{\circ}C$)	گرمای هدررفته (W)	گرمای خالص (W)	K محاسبه شده از آزمایشات	K موجود در منابع	درصد خطا

۲- با افزایش توان مقدار ضریب هدایت گرمایی هوا افزایش می‌یابد یا کاهش؟ چرا؟

۳- به کمک پمپ هوا فشار را افزایش داده و برای چند ولتاژ، آزمایش را تکرار نمایید. تأثیر

فشار بر ضریب هدایت گرمایی هوا چگونه است؟

جدول ۲-۱ ثبت داده‌های آزمایش هدایت سیال

$P_{gage}(psi) =$								
ولتاژ (V)	دمای آب ($^{\circ}C$)	دمای گرمکن ($^{\circ}C$)	اختلاف دمای آب و گرمکن ($^{\circ}C$)	گرمای هدررفته (W)	گرمای خالص (W)	K محاسبه شده از آزمایشات	K موجود در منابع	درصد خطا

۴- چرا با وجود این که سیستم استوانه‌ای است می‌توان از قانون فوریه در سیستم کارترین

برای محاسبات استفاده کرد؟

تشعشع گرمایی (قانون استفان-بولتزمن)

۲-۱- هدف

مطالعه رابطه استفان بولتزمن، ضریب دید و بررسی رابطه معکوس شدت گسیل با مجذور فاصله از منبع تشعشع.

۲-۲- مقدمه

در انتقال گرمای تشعشعی، برخلاف سازوکار هدایت و جابه‌جایی که انتقال انرژی از طریق ماده واسط صورت می‌گیرد، گرما می‌تواند از ناحیه‌ای که خلأ کامل وجود دارد نیز عبور نماید. بسیاری از فرآیندهای گرمایش، سرمایش، خشک کردن صنعتی و همچنین روش‌های تبدیل انرژی نظیر احتراق سوخت فسیلی با فرآیند تشعشع سروکار دارند. از طرفی تابش سهم مهمی در تولید و یا جذب انرژی دارد، خورشید به‌عنوان یک منبع انرژی، در سال‌های اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته است. ساخت وسایل و ابزارهایی که به‌توانند انرژی خورشید را جذب کرده و به صورت‌های متعارف تبدیل کنند نیازمند شناخت کامل پدیده تابش است.

۲-۳- تئوری

جسمی را در نظر بگیرید که ابتدا در دمای T_s که از دمای اطراف (T_{surr}) بیش‌تر است قرار دارد و پیرامون آن خلأ می‌باشد. وجود خلأ مانع دفع انرژی از طریق سازوکار رسانش و یا جابه‌جایی است. به تدریج جسم سرد می‌شود و سرانجام با اطراف به تعادل گرمایی می‌رسد. این سرمایش باعث کاهش انرژی داخلی ذخیره شده در جسم و کاهش دمای آن می‌گردد.

تشعشع گرمایی را آهنگ گسیل انرژی از ماده بر اثر دمای آن می‌دانیم. سازوکار گسیل به انرژی آزاد شده ناشی از نوسان‌ها یا انتقال الکترون‌های بسیاری که ماده را تشکیل می‌دهند مربوط می‌شود. این نوسان‌ها ناشی از دمای ماده هستند. در تمام حالت‌های ماده، تشعشع ایجاد می‌شود. در گازها و اجسام نیمه شفاف مانند شیشه و بلورهای نمک‌دار در دماهای زیاد، گسیل تشعشع یک پدیده حجمی است.

هر جسم جامد، کسری از تابش فرودی بر سطح خود را جذب کرده و بقیه این تابش‌ها را بازتاب می‌کند. یک جسم سیاه ایده‌آل به ماده‌ای اطلاق می‌شود که تمامی تابش فرودی را، بدون هیچ بازتابشی دریافت می‌کند.

واکاوی‌های ترمودینامیکی نشان می‌دهد که یک جسم گسیلنده ایده‌آل یا جسم سیاه، انرژی را با نرخی متناسب با توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم و نیز متناسب با سطح آن منتشر می‌سازد:

$$Q = \sigma AT^4 \quad (1-2)$$

که در آن σ ثابت استفان بولتزمن برابر $5.674 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{k}^4\text{)}$ است.

در سطوحی نظیر یک سطح رنگ شده براق یا صفحه فلزی پرداخت شده، به اندازه یک جسم سیاه تشعشع صورت نمی‌گیرد بنابراین، ضریب دیگری در معادله انتقال گرما وارد می‌شود که موسوم به ضریب انتشار (ϵ) است که تشعشع جسم خاکستری را به جسم سیاه ایده‌آل مربوط می‌سازد.

علاوه بر این باید این حقیقت را هم در نظر داشت که تمام تشعشع خروجی از یک سطح به یک سطح دیگر نمی‌رسد زیرا تشعشعات الکترومغناطیسی در خط مستقیم حرکت کرده و قسمتی از آن‌ها در محیط پراکنده می‌شوند. لذا دو ضریب جدید دیگر برای محاسبات هر دو موقعیت مذکور در معادله انتقال گرما وارد می‌شود به طوری که:

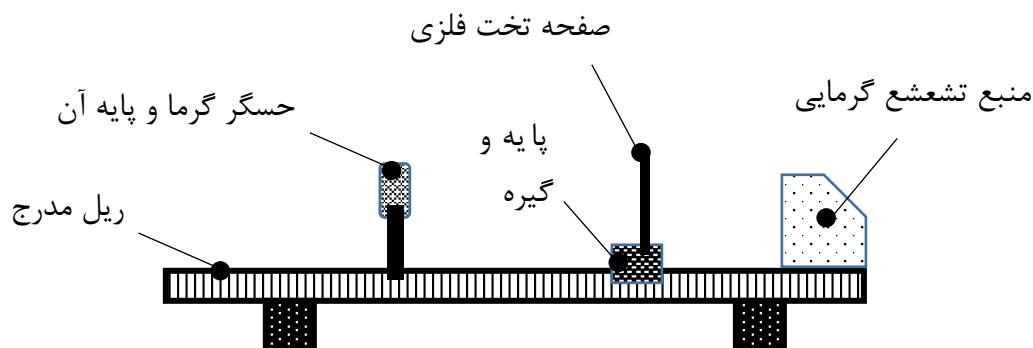
$$Q = F_s \sigma \epsilon A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-2)$$

در معادله فوق F_s ضریب دید است. ضریب دید را برای محاسبه تبادل تشعشع بین دو سطح (که به آن ضریب وضعیت یا ضریب شکل نیز می‌گویند) تعریف می‌کنیم.

۲-۴- شرح دستگاه

این دستگاه شامل دو بخش اصلی است که یکی مربوط به آزمایش تشعشع نوری و دیگری مربوط به تشعشع گرمایی است. در این آزمایش از بخش مربوط به تشعشع گرمایی استفاده

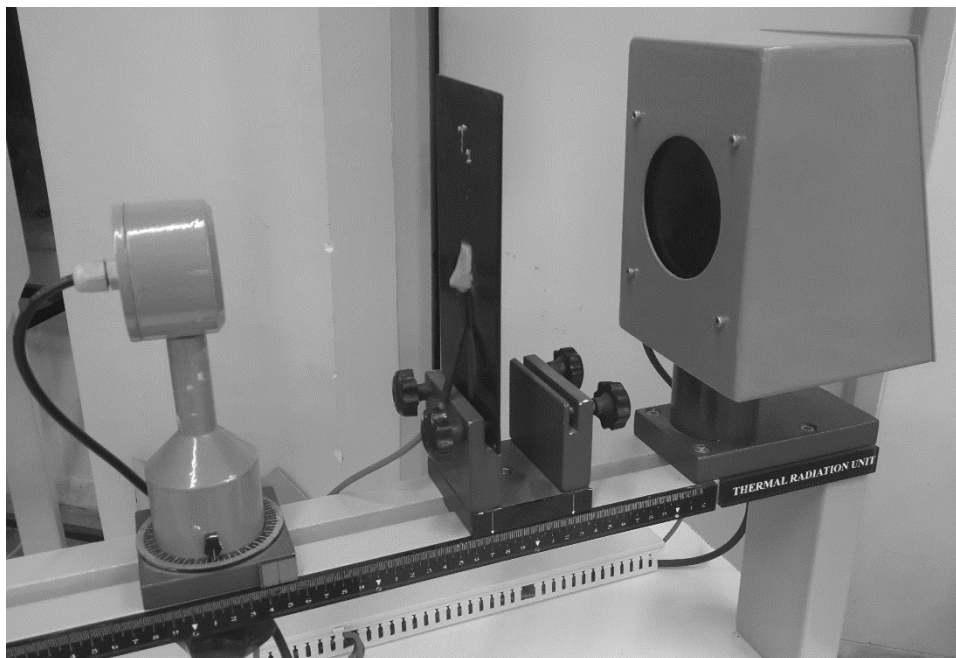
می‌شود. منبع تشعشع گرمایی، ریل مدرج، حسگر شار گرمایی، دو صفحه تخت فلزی همراه با دو حسگر دما متصل به آن دو، صفحه کنترل و گزارش داده‌ها، پایه و گیره قسمت‌های اصلی این بخش از دستگاه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲ شماتیک دستگاه آزمایش تشعشع گرمایی

صفحات تخت فلزی توسط گیره بر روی پایه استقرار یافته و این مجموعه، بر روی ریل مدرج، بین منبع تشعشع گرمایی و حسگر قرار می‌گیرد. پایه حسگر علاوه بر امکان جابه‌جایی بر روی ریل مدرج، قابلیت چرخش در زوایای مختلف را نیز داراست. توان گسیل شده توسط منبع گرما، توسط صفحه کنترل قابل تنظیم بوده و دمای منبع قابل مشاهده است. حسگرهای نصب شده بر روی صفحات تخت فلزی، دمای آن‌ها را در هر لحظه گزارش می‌کنند. حسگر گرمایی، شار رسیده به حسگر را بر حسب w/m^2 گزارش می‌کند.

لازم به ذکر است که دستگاه به کمک دانگل، قابلیت اتصال به رایانه را داشته و توسط نرم‌افزار مربوطه، امکان کنترل و داده‌برداری وجود دارد.



شکل ۲-۲ از راست به چپ: منبع گرمایی، صفحه تخت فلزی و حسگر شار تشعشع گرمایی

۲-۵- روش آزمایش

۲-۵-۱- بررسی رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

در این آزمایش، هدف بررسی رابطه شار تشعشع رسیده به یک سطح با فاصله آن سطح از منبع گسیل کننده تشعشع گرمایی است. دستگاه را کالیبره کرده و توان دستگاه را بر روی عددی مشخص و ثابت (بالای ۵۰٪) قرار داده و چند دقیقه منتظر بمانید تا دمای منبع تشعشع گرمایی به حالت پایا برسد. حسگر گرما را در فاصله‌ای مشخص تنظیم نموده و شار گرمایی رسیده به آن را در جدول ۲-۱ درج نمایید. سپس حسگر را جابه‌جا کرده و شار گرما را یادداشت نمایید. این کار را برای چند فاصله مختلف انجام دهید. عملیات فوق را برای توان دیگری نیز تکرار کرده و جدول ۲-۱ را کامل نمایید.

توجه داشته باشید که حسگر گرمایی و منبع تشعشع با یکدیگر زاویه نداشته باشند.

۲-۵-۲- بررسی رابطه استفان بولتزمن

این مرحله از آزمایش به بررسی قانون استفان-بولتزمن اختصاص دارد. ابتدا دستگاه را با توانی بیش از ۵۰٪ روشن کرده و یکی از صفحات تخت فلزی را در فاصله نسبتاً کوتاه نسبت به منبع، بر روی ریل تنظیم نمایید. حدود ۳۰ دقیقه زمان لازم است تا مجموعه به حالت پایا برسد. دمای منبع تشعشع گرمایی (T_s)، صفحه تخت (T_{plate})، شار گرمایی منبع و مکان صفحه تخت نسبت به آن را در جدول ۲-۲ یادداشت نمایید. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری شار توسط سنسور گرمایی، ابتدا باید آن را به مکان صفحه تخت منتقل کرد و سپس مقدار شار را اندازه گرفت. عملیات اخیر را برای مکان دیگر صفحه تخت و توان گرمایی دیگری نیز تکرار نمایید.

توجه شود که پیش از انجام مراحل آزمایش لازم است شار رسیده به سنسور گرمایی، جهت کالیبراسیون دستگاه، یادداشت شود.

۲-۶- خواسته‌های آزمایش

۲-۶-۱- آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

۱- تکمیل جدول ۱-۲ مطابق با دستورالعمل شرح داده شده در بخش ۲-۵-۱-.

جدول ۱-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه عکس مجذور فاصله در تشعشع گرمایی

شار اولیه اندازه‌گیری شده توسط سنسور گرمایی، پیش از شروع مراحل آزمایش (w/m^2):			
توان منبع حرارتی (°)	$q'' (w/m^2)$	$r (m)$	$1/r^2 (1/m^2)$

۲- مطلوبست رسم منحنی شدت تابش بر حسب عکس مجذور فاصله و خط برازش مربوطه.

۳- چگونه می‌توان منحنی را خطی کرد؟ پس از خطی کردن آن را رسم کرده و از روی شیب

نمودار صحت نتایج را ارزیابی نمایید.

۲-۶-۲- آزمایش رابطه استفان-بولتزمن

۱- مطابق دستورالعمل ذکر شده در بخش ۲-۵-۲، جدول زیر را کامل نمایید.

جدول ۲-۲ ثبت داده‌های آزمایش رابطه استفان-بولتزمن

توان دستگاه (W)	$T_s (K)$	$T_{plate} (K)$	$q'' (W/m^2)$	$r (m)$

۲- منبع حرارتی و صفحه تخت را جسم سیاه فرض نموده و شار رسیده از منبع گرمایی به

صفحه تخت را به کمک دماهای اندازه‌گیری شده، با توجه به رابطه استفان-بولتزمن ($q'' =$

$\sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{plate}^4)$) محاسبه کنید. این مقدار را با شار گرمایی اندازه‌گیری شده توسط سنسور

گرمایی مقایسه نمایید.

۳- عملیات فوق را تکرار کرده ولی این‌بار در رابطه استفان-بولتزمن ضریب دید بین منبع و

صفحه تخت را نیز دخالت دهید ($q'' = F_{12} \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{plate}^4)$). نتیجه را با شار گرمایی

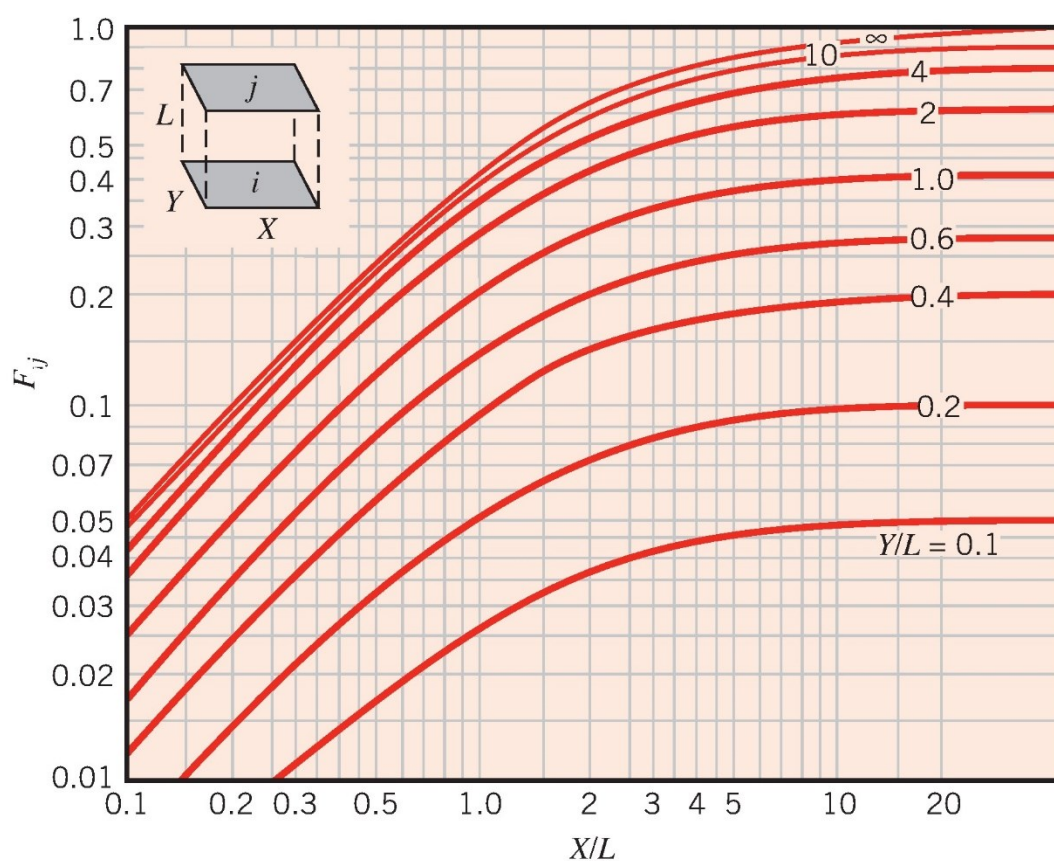
اندازه‌گیری شده توسط سنسور گرمایی مقایسه نمایید. کدامیک از دو حالت اخیر خطای کمتری

دارد؟ لازم به ذکر است که برای محاسبه ضریب دید می‌توان از ابعاد میانگین صفحه تخت و منبع حرارتی استفاده نمود و به کمک روابط و یا نمودارهای موجود برای ضریب دید دو صفحه مستطیل شکل، بهره جست.

۴- خواسته‌های فوق را برای توان دیگر منبع و مکان دیگر صفحه تخت نیز انجام داده و داده‌ها را مقایسه نمایید..

۵- چرا شار گرمایی اندازه‌گیری شده توسط حسگر، با شار خروجی از صفحه گرم برابر است؟

۶- چرا لازم است صفحه تخت را به عنوان جسم سیاه پخشنده فرض نمود؟



شکل ۲-۳ نمودار محاسبه ضریب دید [۱]

جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی

۳-۱- هدف

هدف از انجام این آزمایش، به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله برای هوا به دیواره و هوا به آب می‌باشد.

۳-۲- مقدمه

انتقال گرمای جابه‌جایی از دو مکانیزم حرکت تصادفی مولکولی (پخش) و حرکت توده‌ای (ماکروسکوپیک) سیال تشکیل می‌شود. این انتقال گرما میان سیالی متحرک و سطحی محدودکننده، که در دماهای مختلف‌اند، روی می‌دهد. در واقع، گرمایی که با هدایت در فصل مشترک سطح و سیال، به سیال انتقال می‌یابد توسط جابه‌جایی در فرودست روبیده می‌شود [۱]. جریان سیال ممکن است به صورت اجباری و یا در حضور میدان‌های گرانشی توسط نیروهای رانشی ایجاد شود. در مورد اول، سیال با استفاده از پمپ، توربین یا وسایل مکانیکی دیگر برای جریان یافتن تحت اجبار قرار می‌گیرد.

۳-۳- شرح دستگاه

دستگاه مورد استفاده در این آزمایش به منظور انجام طیف وسیعی از آزمایش‌های مربوط به دینامیک سیالات و پدیده‌های انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری برای یک گاز (هوا) که در داخل یک لوله جریان دارد، طراحی شده است. این دستگاه همچنین امکان تحلیل انتقال حرارت بین آب و هوا را فراهم می‌کند.

مطابق شکل ۱-۱، دستگاه از اجزاء زیر تشکیل شده است:

۱- دمنده گریز از مرکز با مشخصات: نرخ جریان $5 \text{ m}^3/\text{min}$ و هد فشاری 1000 Pa .

۲- تعدیل‌کننده^۱ نصب‌شده در ورودی هوا به منظور کنترل نرخ جریان هوا.

^۱ Damper

۳- جریان سنج (صفحه اوریفیس) و مانومتر دیفرانسیلی مربوط به آن.

۴- لوله فولادی با قطر داخلی $64/2 \text{ mm}$.

۵- لوله مسی با قطر داخلی 32 mm که در طول تقریبی 1200 mm با گرم کن الکتریکی گرم می‌شود.

۶- تعداد هجده المنت (مقاومت) الکتریکی به منظور گرم کردن (با توان کل 2 kW).

۷- تعداد دوازده ترموکوپل برای اندازه‌گیری دمای هوا، دیواره گرم شده و آب که در موقعیت‌هایی که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، نصب شده‌اند. شماره‌گذاری ترموکوپل‌ها بر این اساس است:

T_1 : دمای دیواره دقیقاً قبل از بخش گرم کن.

T_2 الی T_6 : دمای دیواره در داخل بخش گرم کن.

T_7 : دمای دیواره بلافاصله بعد از بخش گرم کن.

T_8 : دمای هوا در خروجی بخش گرم کن و در ورودی مبدل حرارتی هوا-آب.

T_9 : دمای هوا در خروجی مبدل حرارتی.

T_{10} : دمای آب در مبدل حرارتی.

T_{11} : دمای هوا در ورودی دمنده.

T_{12} : دمای هوا در خروجی دمنده و ورودی به بخش گرم کن.

۸- لوله پیتوت و مانومتر دیفرانسیلی مربوط به آن به منظور اندازه‌گیری مقادیر محلی سرعت هوا. لوله پیتوت می‌تواند در جهت شعاعی نسبت به محور تقارن لوله در بازه $\pm 10 \text{ mm}$ جابه‌جا شود.

۹- مانومتر دیفرانسیلی به منظور اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک در بخش مسی لوله که طول آن 1700 mm می‌باشد.

۱۰- مبدل حرارتی هوا-آب که شامل یک لوله مسی داخلی (با قطر داخلی 32 mm) و یک پوسته خارجی استوانه‌ای عایق می‌باشد. ظرفیت مبدل حرارتی برابر با یک کیلوگرم آب

می باشد که عملیات پر کردن و تخلیه آن از طریق دو شیر انجام می شود.

۱۱- صفحه کنترل که شامل موارد ذیل می باشد:

11a: کلید برقراری اتصال مقاومت های الکتریکی.

11b: کلید برقراری اتصال دمنده.

11c: کلید انتخاب ترموکوپل.

11d: نمایشگر سه رقمی دما (با دقت یک درجه سانتی گراد).

11e: ولت سنج و آمپرسنج به منظور اندازه گیری ولتاژ و شدت جریان تولیدشده توسط مقاومت های الکتریکی.

11f: پیچ تنظیم مقدار توان اعمال شده توسط مقاومت های الکتریکی.

۱۲- صفحه مانومتر که شامل موارد ذیل می باشد:

12a: اندازه گیری فشار نسبی خروجی دمنده بر حسب میلی متر جیوه (ΔP_m).

12b: اندازه گیری افت فشار در طول صفحه اوریفیس بر حسب میلی متر آب (ΔP_d).

12c: اندازه گیری افت فشار در طول لوله مسی (با قطر داخلی 32 mm و طول 1700 mm) بر حسب میلی متر آب (ΔP_t).

12d: اندازه گیری اختلاف فشار کل (فشار استاتیک + فشار دینامیک) و فشار استاتیک، اندازه گیری شده توسط لوله پیتوت بر حسب میلی متر آب (ΔP_p).

۳-۴- روش آزمایش

در این دستگاه ضرایب انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله برای هوا به دیواره و هوا به

آب اندازه گیری می شوند. بدین منظور مراحل ذیل را به ترتیب انجام دهید:

۱- دمنده دستگاه را با استفاده از کلید START روشن کنید.

۲- حدود ۳۰ ثانیه پس از زدن کلید START و پس از پایا شدن شرایط دمنده، دماهای T_1 تا

T_{12} را به عنوان دماهای اولیه در جدول ۳-۱ ثبت داده های آزمایش جابه جایی اجباری برای جریان

داخلی یادداشت کنید.

۳- گرم کن را با استفاده از کلید اتصال آن روشن کنید و همزمان، زمان سنج خود را روشن

- کنید و با فواصل زمانی ۳ دقیقه، به ترتیب دماهای T_1 تا T_{12} را در جدول ۱-۳ ثبت داده‌ها ثبت کنید. دقت کنید که مقدار ولتاژ دستگاه حدود V ۱۴۰ الی V ۱۵۰ باشد.
- ۴- مقادیر ولتاژ، شدت جریان و همچنین ارتفاع مانومترها را در جدول ۱-۳ ثبت داده‌ها یادداشت کنید.
- ۵- مرحله ۳ را ادامه دهید تا زمانی که شرایط به حالت پایا برسد و دماها تغییر نکنند.
- ۶- پس از پایا شدن شرایط، گرم کن را خاموش کنید. دقت داشته باشید که این آخرین دماهای یادداشت شده برای مرحله گرمایش، شرایط اولیه برای حالت سرمایش می‌باشند.
- ۷- باز هم با فاصله زمانی ۳ دقیقه دماها را یادداشت کنید تا تمام دماها به شرایط پایا برسند.
- ۸- پس از پایا شدن دماها در حالت سرمایش، دمنده را خاموش کنید.

۳-۵- تئوری

در این بخش روابط حاکم و فرضیات استفاده‌شده جهت محاسبه ضرایب انتقال حرارت همرفت اجباری ارائه می‌شود.

۳-۵-۱- اندازه‌گیری دبی جریان هوا با استفاده از صفحه اوریفیس

نرخ جریان جرمی هوا با اندازه‌گیری اختلاف فشار ΔP_d بین دو نقطه بالادست و پایین‌دست صفحه اوریفیس (با استفاده از مانومتر $12b$)، به دست می‌آید. دبی جرمی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m} = 0.67 A_d \sqrt{2\rho \Delta P_d} \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه:

A_d : مساحت بخش محصورشده صفحه اوریفیس که برابر با $\pi d^2/4$ می‌باشد که d قطر داخلی صفحه اوریفیس می‌باشد که در مورد اوریفیس استفاده‌شده در این دستگاه برابر با 40 mm است.

ρ : چگالی سیال بر حسب kg/m^3 .

برای به دست آوردن چگالی هوا، از معادله حالت گاز ایده آل استفاده می‌شود:

$$\rho = \frac{P_m}{RT} \quad (2-3)$$

که در این رابطه:

P_m : فشار مطلق هوا در ورودی صفحه اوریفیس (Pa).

R : ثابت گازها برای هوا ($287 J/kg^\circ C$).

T : دمای مطلق هوا (K).

به منظور به دست آوردن فشار مطلق P_m ، می‌توان با اندازه‌گیری فشار جو، P_{atm} و هد

فشاری در خروجی دمنده، ΔP_m (با استفاده از مانومتر $12a$)، فشار مطلق را محاسبه کرد:

$$P_m = P_{atm} + \Delta P_m \quad (3-3)$$

۳-۵-۲- اندازه‌گیری افت فشار ناشی از اصطکاک

در واقع اختلاف فشار استاتیک ΔP_t در لوله مسی به طول $1700 mm$ ، به دلیل اصطکاک

جریان است که از لزجت هوا ناشی می‌شود. با استفاده از افت فشار ΔP_t (اندازه‌گیری شده توسط

مانومتر $12c$) و دبی جریان هوا (اندازه‌گیری شده توسط صفحه اوریفیس)، می‌توان ضریب

اصطکاک f را مطابق رابطه زیر به دست آورد:

$$f = \frac{\Delta P_t}{(L/d)\rho(u^2/2)} \quad (4-3)$$

که در این رابطه:

L : طول لوله ($1700 mm$).

d : قطر لوله ($32 mm$).

ρ : چگالی هوا.

u : سرعت متوسط هوا.

چگالی هوا بر اساس معادله (۲-۳) و با توجه به مقدار میانگین دماهای اندازه‌گیری شده T_{12}

و T_8 ، به دست می‌آید. همچنین میانگین سرعت هوا بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$u = \frac{4\dot{m}}{\pi d^2 \rho} \quad (5-3)$$

همچنین، روش دیگر برای به دست آوردن ضریب اصطکاک، استفاده از دیاگرام مودی (شکل

۲-۳ دیاگرام مودی) است که در آن ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از عدد رینولدز و زبری نسبی

است. در مورد لوله‌های صاف (که یک فرض منطقی برای لوله‌های مسی است)، ضریب اصطکاک را

می‌توان با استفاده از معادله (۶-۳) به دست آورد:

$$f = 0.316 Re_d^{-0.25} \quad (6-3)$$

۳-۵-۳- تحلیل انتقال حرارت گذرا در دستگاه

اندازه‌گیری‌های جریان سیال گرم باید در شرایط پایا (دماهای ثابت با گذشت زمان) انجام

شوند. به منظور رسیدن به شرایط پایای گرمایش، یک انتقال حرارت گذرا باید انجام شود. یک

روش مناسب برای تحلیل انتقال حرارت گذرا، رسم دما بر حسب زمان است (شکل ۳-۳ نمای

ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش). توزیع دما با تغییرات زمان رفتار نمایی دارد:

$$T(t) = T_f + (T_0 - T_f) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (7-3)$$

که در این رابطه:

$T(t)$: دما در زمان t .

T_f : دمای نهایی و پایا ($t \rightarrow \infty$).

T_0 : دمای اولیه ($t = 0$).

τ : ثابت زمانی.

از این رابطه می‌توان ثابت زمانی را محاسبه کرد.

همچنین ثابت زمانی دستگاه را می‌توان با استفاده از روش ترسیمی (مطابق شکل ۳-۳ نمای

ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش) محاسبه نمود:

- یک خط مماس بر منحنی گرمایش در زمان $t = 0$ رسم کنید.

- نقطه تقاطع خط مماس رسم شده در مرحله قبل و مجانب افقی برای T_f را بیابید.
- مقدار زمان نقطه تقاطع به دست آمده، نشان‌دهنده ثابت زمانی τ می‌باشد.

برای هر دستگاهی (به طور مثال برای دماهای دیواره لوله متفاوت) مقدار ثابت زمانی تقریباً ثابت است. همچنین ثابت زمانی برای موادی با ظرفیت گرمایی بیشتر، مقدار بزرگ‌تری است.

۳-۵-۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به دیواره

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب، قانون پایستگی انرژی برای بخشی از لوله که شامل المنت‌های گرم کن می‌باشد، باید بررسی شود. با در نظر گرفتن قانون اول ترمودینامیک برای دستگاه، معادله زیر برای تعادل انرژی حاصل می‌شود:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} C_p (T_{12} - T_8) \quad (۸-۳)$$

که در این رابطه، $\dot{Q}_c(W)$ ، نشان‌دهنده توان گرمایی مبادله شده از طریق جابه‌جایی از دیواره به هوا است. مقدار ضریب C_p را می‌توان با توجه دمای میانگین هوا، $(T_{12} + T_8)/2$ ، به دست آورد. مقدار \dot{Q}_c را همچنین می‌توان با توجه به قانون سرمایش نیوتن، طبق رابطه زیر، به دست آورد:

$$\dot{Q}_c = h_{ap} S \Delta T_{ap} \quad (۹-۳)$$

که در این رابطه:

S : مساحت سطح انتقال حرارت استوانه‌ای با قطر d و طول L ($S = \pi dL$).

h_{ap} : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

ΔT_{ap} : اختلاف دمای میانگین دیواره و هوا.

در این آزمایش از آن جایی که انتقال حرارت بیشتر در بخش گرم کن رخ می‌دهد (دماهای

دیواره از T_2 تا T_6 ، می‌توان اختلاف دمای میانگین دیواره و هوا را به صورت زیر تعریف نمود:

$$\Delta T_{ap} = \frac{(T_2 - T_{12}) + (T_6 - T_8)}{2} \quad (۱۰-۳)$$

با جاگذاری معادله (۸-۳) در معادله (۹-۳)، می‌توان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به

آب را از رابطه زیر به دست آورد:

$$h_{ap} = \frac{\dot{m} C_p (T_8 - T_{12})}{\pi d L \Delta T_{ap}} \quad (۱۱-۳)$$

۳-۵-۵- بررسی صحت تشابه رینولدز-کلبرن

با استفاده از تشابه رینولدز می‌توان یک رابطه کمی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، h و ضریب اصطکاک f ، بیان نمود. این تشابه بر اساس ارتباط فیزیکی بین دو پدیده انتقال حرارت (جابه‌جایی) و انتقال اندازه حرکت (اصطکاک جریان) برای یک سیال لزج در جابه‌جایی اجباری در داخل یک لوله پایه‌گذاری شده است. بخش از یک لوله با قطر d و طول L را در نظر بگیرید. حال فرض کنید که دو مقدار زیر برای کل این بخش از لوله برابر می‌باشند: (۱) کسری از مقدار انرژی حرارتی سیال که توسط انتقال حرارت جابه‌جایی مبادله شده است و (۲) کسری از اندازه حرکت سیال که توسط اصطکاک از بین رفته است. با نشان دادن تغییرات دما با ΔT ، افت فشار با ΔP و همچنین با نمایش دمای میانگین سیال و لوله به ترتیب با T_s و T_f و نمایش مساحت سطح مقطع لوله با A ، می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\dot{m} C_p (T_s - T_f)} = \frac{A \Delta P}{\dot{m} u} \quad (۱۲-۳)$$

که در این رابطه \dot{m} و u به ترتیب دبی جرمی و سرعت می‌باشند. صورت کسر سمت چپ معادله (۱۲-۳)، بیان‌کننده کاهش آنتالپی سیال است، درحالی‌که، صورت کسر سمت راست نشان‌دهنده اعمال نیروهای فشاری روی سیال در حجم کنترل مورد نظر است. با استفاده از روابط $\dot{m} C_p \Delta T = h_{ap} (\pi d L) (T_s - T_f)$ و $\Delta P = f \left(\frac{L}{d} \right) \rho \left(\frac{u^2}{2} \right)$ و جاگذاری این روابط در معادله (۱۲-۳)، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{h}{\rho C_p u} = \frac{f}{8} = St \quad (۱۳-۳)$$

که در این رابطه، St ، نشان‌دهنده عدد استانتون^۱ است. معادله (۱۳-۳) را می‌توان به شکل بدون

^۱ Stanton number

بعد معادله (۱۴-۳) نوشت.

$$Nu_d = \left(\frac{f}{8}\right) Re_d Pr \quad (14-3)$$

کاربرد معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) به سیالاتی با عدد پرانتل حدود یک (مانند هوا که برای آن: $Pr = 0.7$) محدود می‌شود.

۳-۵-۶- محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی هوا به آب

انتقال حرارت بین هوا و آب در مبدل حرارتی (بخش شماره ۱۰ در شکل ۱-۳) از طریق سه پدیده متمایز رخ می‌دهد:

۱- انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوا و سطح داخلی لوله

۲- هدایت گرمایی در داخل جداره لوله

۳- انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح خارجی لوله و هوا

در شرایط پایا، با توجه به بقای انرژی، سه شار حرارتی هوا به دیواره، هدایت داخل جداره و دیواره به آب با یکدیگر برابرند و می‌توانند در شکل عمومی زیر ظاهر شوند:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L \Delta T}{R} \quad (15-3)$$

که در این رابطه، R ، نشان‌دهنده مقاومت گرمایی (m^2C/W) است. بنابراین برای انتقال حرارت جابه‌جایی بین هوا و سطح داخلی جداره لوله رابطه زیر برقرار است:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_a - T_{p,i})}{R_{ap}} \quad (16-3)$$

که در این رابطه:

T_a : دمای هوا.

$T_{p,i}$: دمای سطح داخلی لوله.

R_{ap} : مقاومت گرمایی جابه‌جایی بین هوا و دیواره که برابر است با $\frac{1}{h_{ap}}$.

برای هدایت گرمایی در داخل جداره لوله نیز می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_{p,i} - T_{p,e})}{R_p} \quad (۱۷-۳)$$

که در این رابطه:

$T_{p,e}$: دمای سطح خارجی لوله.

R_p : مقاومت هدایت گرمایی دیواره که برابر است با $\frac{s}{k}$ ، ضخامت دیواره که $0.002 m$ است

و k ، ضریب هدایت گرمایی برای مس است که $386 W/m^{\circ}C$ می باشد.

برای انتقال حرارت جابه‌جایی بین دیواره و آب نیز رابطه‌ای مشابه برقرار است:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_{p,e} - T_w)}{R_{pw}} \quad (۱۸-۳)$$

که در این رابطه:

T_w : دمای آب.

R_{pw} : مقاومت گرمایی جابه‌جایی بین دیواره و آب که برابر است با $\frac{1}{h_{pw}}$ و ضریب انتقال

حرارت جابه‌جایی بین دیواره و آب است.

با توجه به معادلات (۱۶-۳)، (۱۷-۳) و (۱۸-۳) می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$\dot{Q} = \frac{\pi d L (T_a - T_w)}{R} = \pi d L H (T_a - T_w) \quad (۱۹-۳)$$

که در این رابطه R ، $(R = 1/H)$ مقاومت گرمایی کل است که برابر است با $R_{ap} + R_p + R_{pw}$ و

H نیز ضریب انتقال حرارت کل بین هوا و آب است. مقدار $T_a - T_w$ را می‌توان از رابطه زیر به

دست آورد:

$$T_a - T_w = \frac{T_8 + T_9}{2} - T_{10} \quad (۲۰-۳)$$

از آن جایی که در دستگاه این آزمایش، آب داخل مبدل حرارتی مقدار ثابتی است، مقدار کل

گرمایی که بین آب و هوا مبادله شده است از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = M C_w (T_{10,final} - T_{10,initial}) \quad (۲۱-۳)$$

که در این رابطه:

M : جرم آب که یک کیلوگرم است.

C_w : ظرفیت گرمای ویژه آب که مقدار آن برابر $4186 J/kg^{\circ}C$ است.

میانگین نرخ انتقال حرارت کل بین هوا و آب را می‌توان با تقسیم معادله (۳-۲۱) به زمان کل

مرحله گرمایش به دست آورد:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (۳-۲۲)$$

با توجه به مقدار به دست آمده برای \dot{Q} ، می‌توان ضریب انتقال حرارت کل بین هوا و آب را به

دست آورد:

$$H = \frac{\dot{Q}}{\pi d L (T_a - T_w)} \quad (۳-۲۳)$$

همچنین مقاومت گرمایی بین دیواره و آب را می‌توان با استفاده از مقدار محاسبه‌شده برای

H (از معادله (۳-۲۳))، به صورت زیر محاسبه کرد:

$$R_{pw} = \frac{1}{H} - R_p - \frac{1}{h_{ap}} \quad (۳-۲۴)$$

که در این رابطه، مقدار h_{ap} از معادله (۳-۱۱) به دست آمد.

۳-۶- خواسته‌های آزمایش

۳-۶-۱- خواسته‌های آزمایش برای حالت گرمایش

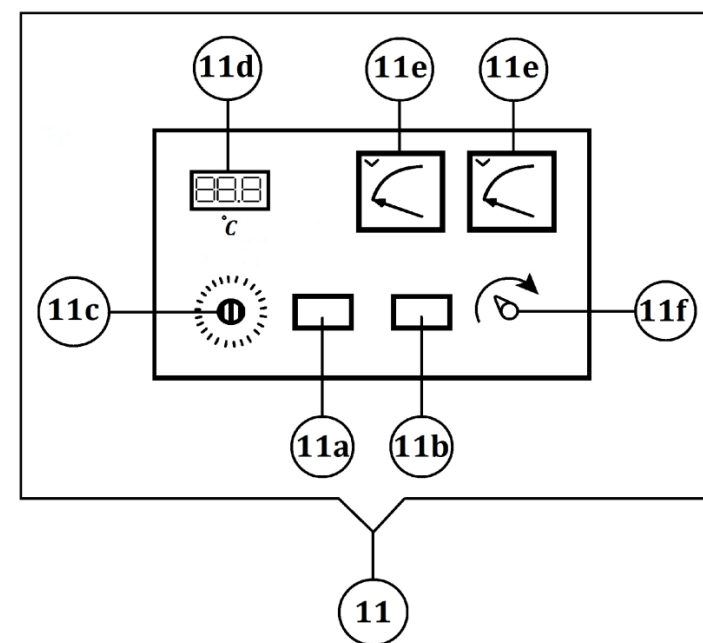
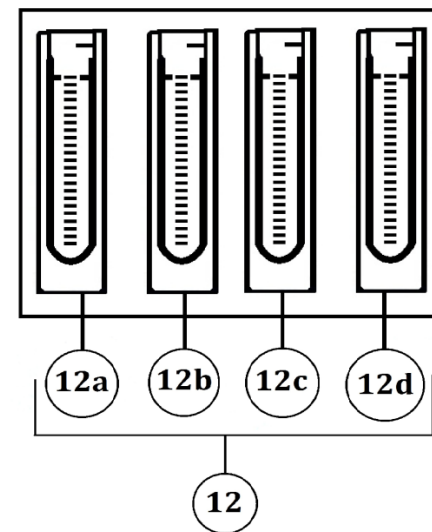
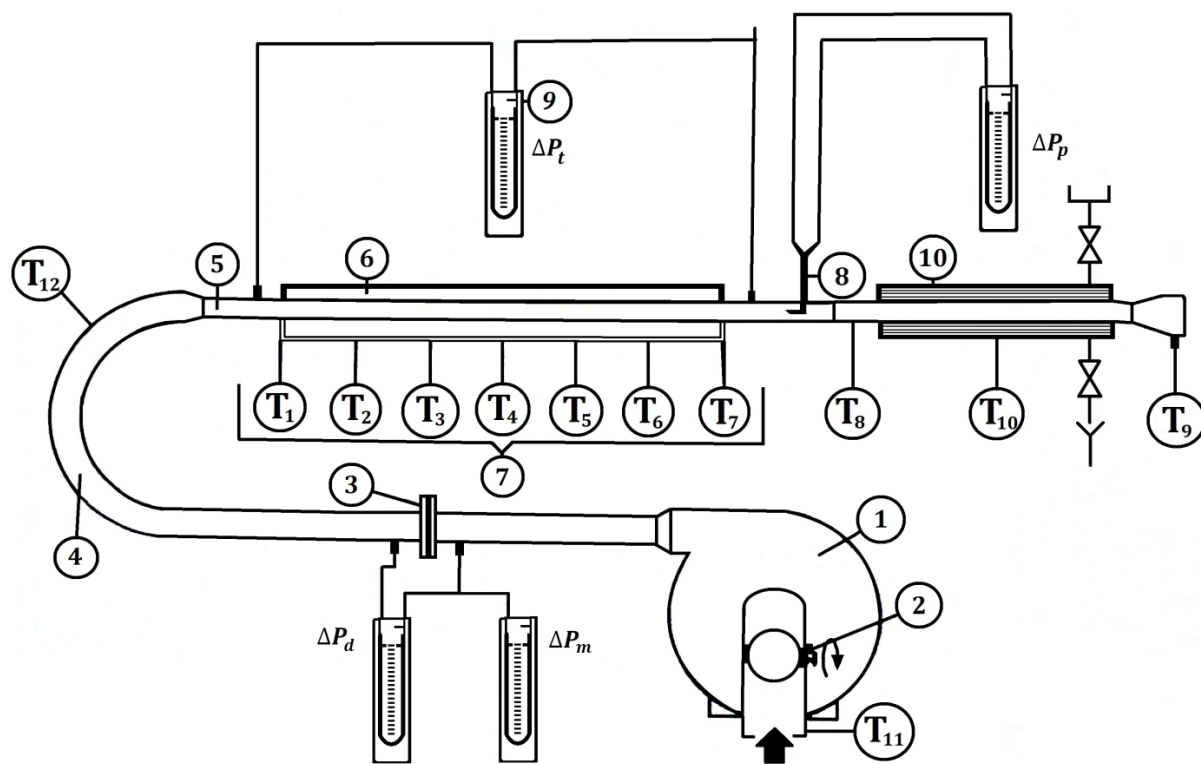
- ۱- ضریب اصطکاک لوله را به دست آورید.
- ۲- زبری نسبی لوله را به دست آورید.
- ۳- ضریب اصطکاک لوله را با توجه به این که جنس لوله مسی است ($\varepsilon = 0.05 \text{ mm}$)، با استفاده از دیاگرام مودی به دست آورید و با ضریب اصطکاک لوله صاف (با توجه به معادله موجود در دستور کار) و مقدار به دست آمده از آزمایش مقایسه کنید.
- ۴- ضریب انتقال حرارت هوا به دیواره را به دست آورید.
- ۵- ضریب انتقال حرارت هوا به آب را به دست آورید.
- ۶- صحت تشابه رینولدز را در آزمایش انجام‌شده بررسی نمایید.
- ۷- منحنی‌های T_8 ، T_9 و T_{10} را بر حسب زمان رسم کنید (بر روی یک محور) و در مورد آن‌ها بحث نمایید.
- ۸- منحنی‌های T_{11} ، T_{12} ، T_1 ، T_2 ، T_4 و T_6 را بر حسب زمان رسم کنید (بر روی یک محور) و در مورد آن‌ها بحث نمایید.
- ۹- در حالت پایدار، منحنی‌های T_1 الی T_6 را بر حسب طول لوله رسم و روی آن بحث کنید.
- ۱۰- ثابت زمانی سیستم را از دو روش ذکرشده در دستور کار (ترسیمی و استفاده از روابط) به دست آورید.

۳-۶-۲- خواسته‌های آزمایش برای حالت سرمایش

- تمامی خواسته‌های ۷ الی ۱۰ در بخش گرمایش را برای سرمایش نیز تکرار کرده و با آن‌ها مقایسه کنید.

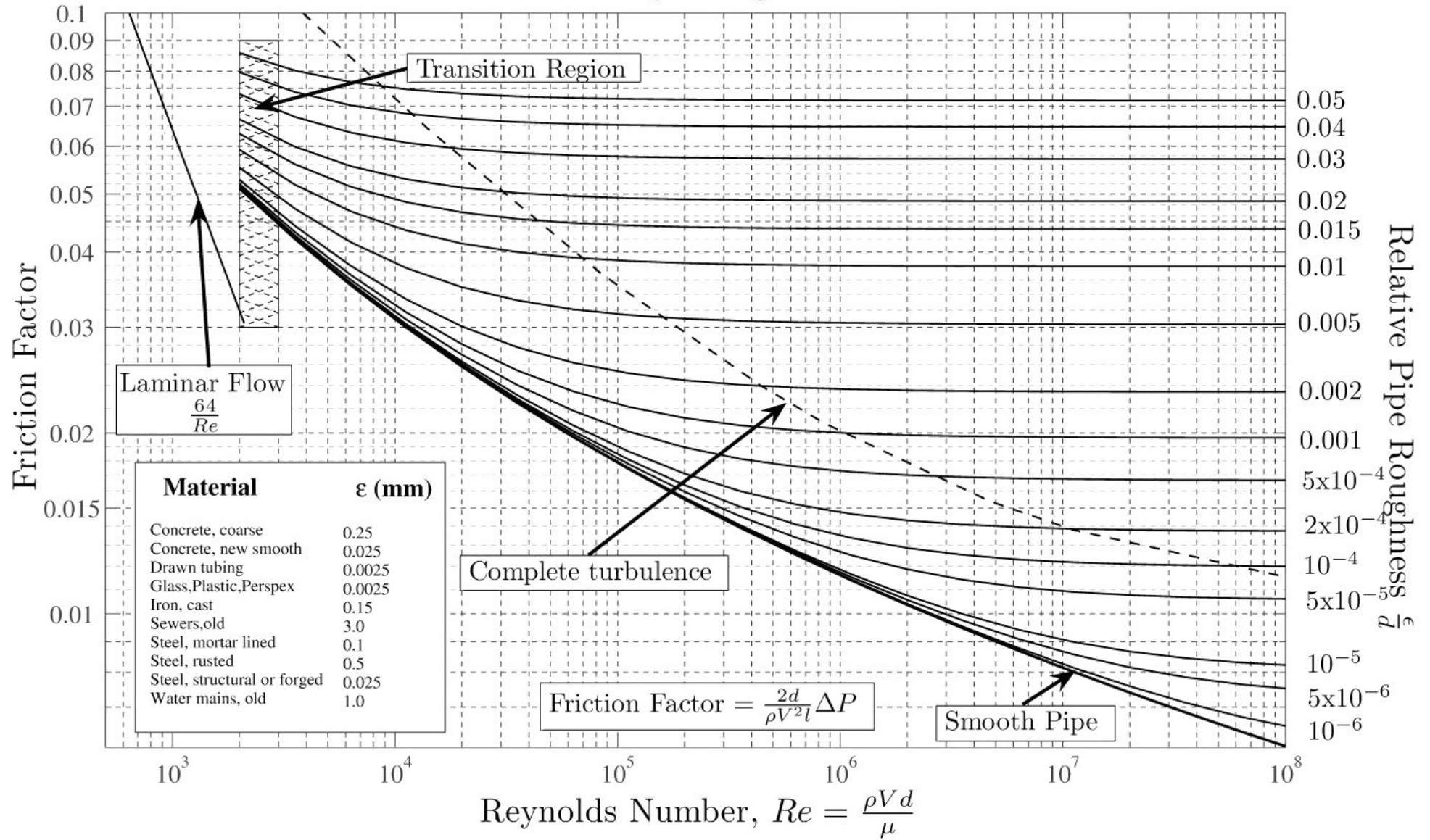
جدول ۱-۳ ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی اجباری برای جریان داخلی

t (min)	$T_1(^{\circ}C)$	$T_2(^{\circ}C)$	$T_3(^{\circ}C)$	$T_4(^{\circ}C)$	$T_5(^{\circ}C)$	$T_6(^{\circ}C)$	$T_7(^{\circ}C)$	$T_8(^{\circ}C)$	$T_9(^{\circ}C)$	$T_{10}(^{\circ}C)$	$T_{11}(^{\circ}C)$	$T_{12}(^{\circ}C)$
۰												
۳												
۶												
۹												
۱۲												
۱۵												
۱۸												
۲۱												
۲۴												
۲۷												
۳۰												
۳۳												
۳۶												
۳۹												
۴۲												
۴۵												
۴۸												
۵۱												
۵۴												
۵۷												
۶۰												
۶۳												
۶۶												
۶۹												
۷۲												
۷۵												
$\Delta P_{Fan}(mmHg) - 12a$												
$\Delta P_{Orifice}(mmH_2O) - 12b$									$\times 0.81 =$			
$\Delta P_{Tube}(mmH_2O) - 12c$									$\times 0.81 =$			
$I(A) =$						$V(V) =$						

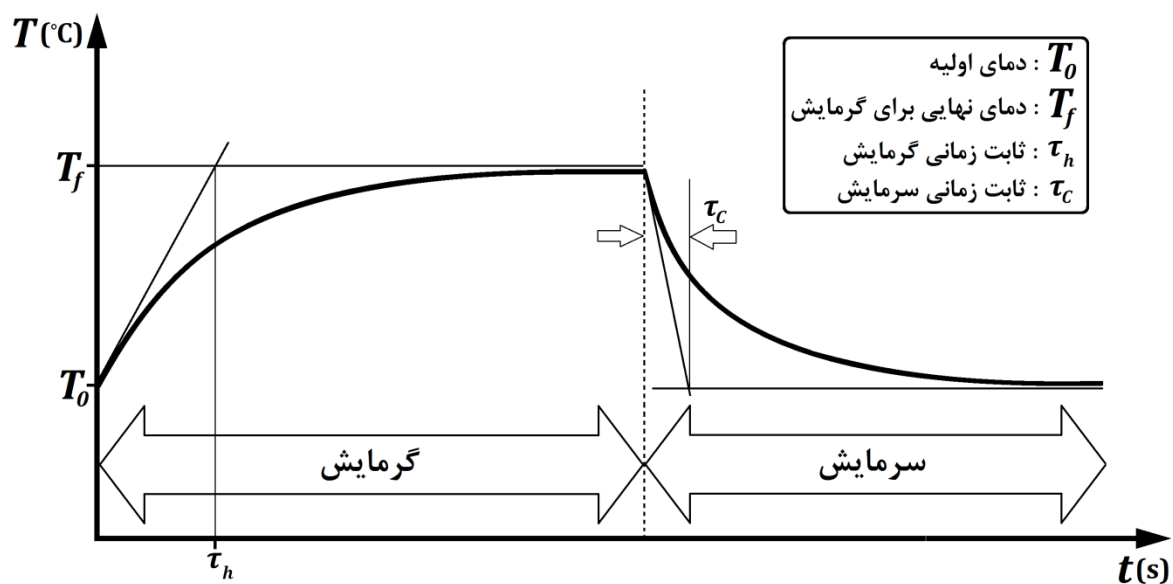


شکل ۳-۱ اجزاء تشکیل دهنده دستگاه

Moody Diagram



شکل ۲-۳ دیاگرام مودی



شکل ۳-۳ نمای ظاهری از تغییرات دما با زمان در طول آزمایش

هدایت گرمایی اجسام جامد

۴-۱- هدف

پی بردن به چگونگی انتقال حرارت به شیوه هدایت در اجسام جامد و نقش جسم جامد بر شدت انتقال حرارت در داخل آن.

۴-۲- مقدمه

انتقال گرما به شیوه هدایت به انتقال انرژی ناشی از شیب دما گفته می‌شود و سازوکار فیزیکی آن از نوع فعالیت اتمی یا مولکولی است [۱]. در اکثر موارد، انتقال گرما به شیوه هدایت با قانون فوریه^۱ بیان می‌شود که بیان‌کننده تناسب مقدار گرمای منتقل‌شده با گرادیان دما است. البته جهت این انتقال گرما در خلاف جهت گرادیان دما است و در واقع گرما از دمای بیشتر به دمای کمتر منتقل می‌شود. ضریبی که این تناسب را به تساوی تبدیل می‌کند، رسانندگی گرمایی^۲ ($W/m \cdot K$) نام دارد. این ضریب وابسته به نوع ماده بوده و در واقع رفتار ماده را می‌سنجد. در اکثر موارد این ضریب وابستگی ناچیزی به دما دارد که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد.

۴-۳- شرح دستگاه

این دستگاه برای تعیین رسانندگی گرمایی اجسامی که از نظر گرمایی هادی‌های به نسبت خوبی هستند، طراحی شده است. دستگاه شامل اجزاء اصلی زیر می‌باشد:

- ۱- گرم کن الکتریکی به عنوان منبع گرمایی.
- ۲- یک محفظه با سطح داخلی از جنس آینه به منظور جلوگیری از هدررفت گرما به شیوه‌های جابه‌جایی و تشعشع و در نتیجه یک بعدی نمودن گرمای منتقل‌شده.
- ۳- یک دبی سنج جهت تنظیم دبی آب خنک‌کننده.
- ۴- شش دماسنج برای اندازه‌گیری دما در نقاط سرد و گرم قطعات استوانه‌ای شکل فلزی و

^۱ Fourier's law

^۲ Thermal conductivity

دمای آب خنک کن در ورود و خروج با نام‌گذاری ذیل:

T_1 : دمای نقطه گرم نمونه بلند.

T_2 : دمای نقطه سرد نمونه بلند.

T_3 : دمای نقطه گرم نمونه کوتاه.

T_4 : دمای نقطه سرد نمونه کوتاه.

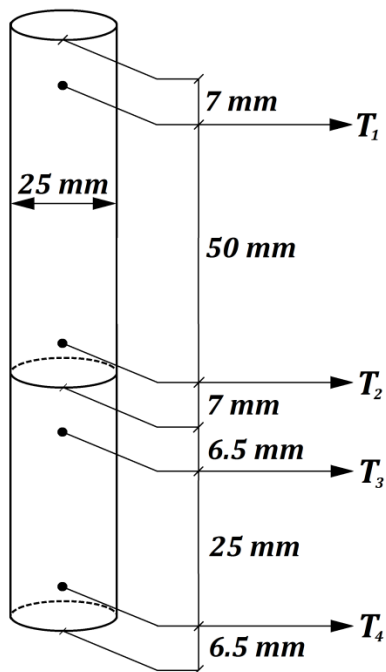
T_i : دمای ورودی آب خنک کن.

T_o : دمای خروجی آب خنک کن.

۵- پتانسیومتر برای خواندن دمای دو قطعه فلزی از طریق دماسنج‌ها.

۶- دو قطعه فلزی که به صورت عمودی روی هم و در تماس باهم قرار گرفته‌اند (شکل ۱-۴)

نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای (شکل) و انرژی حرارتی تولیدشده توسط گرم کن الکتریکی را به آب خنک کن منتقل می‌کنند.



شکل ۱-۴ نمای ظاهری از قطعات فلزی استوانه‌ای شکل

۴-۴- روش انجام آمایش

۱- محفظه آینه‌ای را روی قطعات فلزی قرار دهید.

۲- شیر آب را باز کنید و با استفاده از تنظیم‌کننده دبی، مقدار دبی آب خنک کن را روی یک دبی خاص مانند $6 L/h$ تنظیم کنید. توجه داشته باشید که با توجه به ثابت بودن مقدار انرژی تولیدشده در گرم کن الکتریکی، هرچه مقدار دبی جریان آب خنک کن کمتر باشد، اختلاف دمای ورودی و خروجی آب خنک کن بیشتر شده و در نتیجه آزمایش با دقت بیشتری انجام می‌شود.

۳- دوشاخه برق دستگاه را به برق شهر وصل کنید و با قرار دادن کلید اصلی دستگاه بر روی حالت ON، دستگاه را روشن کنید.

۴- پیچ ترانسفرمر متغیر را در جهت عقربه‌های ساعت به آرامی بچرخانید تا عقربه شدت جریان روی $300 mA$ قرار گیرد.

۵- در این حالت باید دستگاه حدود نود دقیقه کار کند تا حالت پایا برقرار گردد.

۶- پس از گذشت نود دقیقه، بافاصله زمانی بیست دقیقه دماهای T_1 تا T_4 را در جدول ۴-۱ یادداشت کنید و این عمل را چهار بار دیگر تکرار کنید تا از برقراری حالت پایدار در دستگاه اطمینان حاصل نمایید.

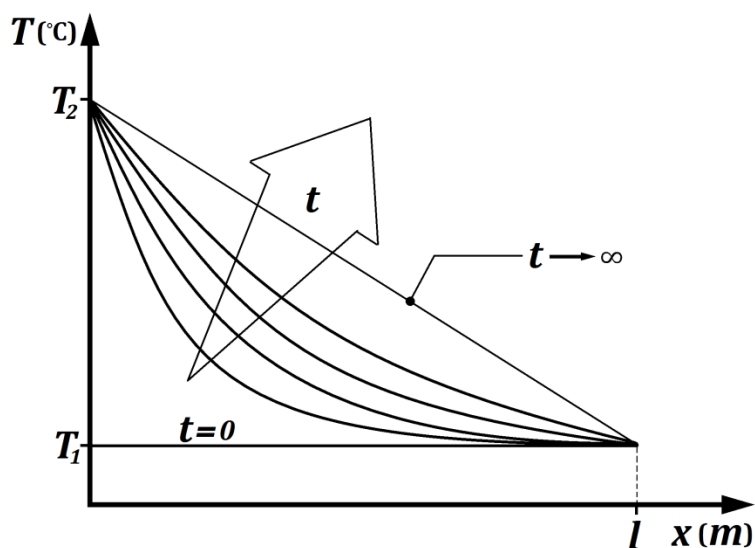
۷- مقدار دبی، شدت جریان و دماهای ورودی و خروجی جریان آب خنک‌کن را بخوانید و در جدول ۴-۱ یادداشت کنید.

جدول ۱-۴ ثبت داده‌های آزمایش هدایت گرمایی اجسام جامد

$t \text{ (min)}$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$
$\dot{q} \text{ (L/h)} =$		$I \text{ (A)} =$		
$T_i(^{\circ}\text{C}) =$		$T_o(^{\circ}\text{C}) =$		

۴-۵- تئوری

میله‌ای به طول L و سطح مقطع A را در نظر بگیرید که تمام نقاط آن دارای دمای T_1 می‌باشند. در یک لحظه سمت چپ میله را در تماس با منبعی با دمای T_2 (در آزمایشگاه این عمل با استفاده از برق شهری و گرم کن الکتریکی انجام می‌شود) قرار دهید. شکل ۲-۴ نمای ظاهری از منحنی تغییرات دما را در طول میله و در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ نمای ظاهری از تغییرات دما با مکان در داخل جسم

پس از گذشت زمان کافی ($t \rightarrow \infty$)، دمای تمام نقاط ثابت می‌ماند. در این حالت میله به

شرایط پایا رسیده است. با فرض یک بعدی بودن هدایت گرمایی در داخل جسم و در جهت محور تقارن آن، می‌توان مقدار حرارت انتقال یافته از سطح مقطع میله در واحد زمان را با استفاده از قانون فوریه به دست آورد:

$$\dot{Q} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (۱-۴)$$

که در این رابطه:

\dot{Q} : حرارت انتقال یافته از سطح مقطع میله در واحد زمان (W).

K : رسانندگی گرمایی ($W/m \cdot K$).

A : سطح مقطع میله (m^2).

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$: شیب منحنی دما بر حسب طول میله در شرایط پایا (K/m).

همچنین با توجه به اینکه این مقدار گرما توسط آب خنک کن دفع می‌شود، می‌توان مقدار

آن را از رابطه زیر نیز به دست آورد:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (۲-۴)$$

که در این رابطه:

\dot{m} : دبی جرمی آب (kg/s).

C_p : ظرفیت گرمایی ویژه آب ($۴۱۸۶ J/kg \cdot K$).

با جاگذاری معادله (۲-۴) در معادله (۱-۴) و استفاده از دماهای T_1 تا T_4 جهت محاسبه

شیب منحنی دما بر حسب طول در دو قطعه فلزی، می‌توان به روابط زیر جهت محاسبه ضرایب

رسانندگی گرمایی دو قطعه دست یافت:

$$K_1 = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A \frac{(T_1 - T_2)}{l_1}}, \quad K_2 = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A \frac{(T_3 - T_4)}{l_2}} \quad (۳-۴)$$

که در این رابطه:

l_1 : فاصله بین دو دماسنج در قطعه بلند ($۰/۰۵ m$).

l_2 : فاصله بین دو دماسنج در قطعه کوتاه ($۰/۰۲۵ m$).

لازم به ذکر است جهت برقراری انتقال گرما به صورت یک بعدی، تمهیدات ذیل در آزمایش لحاظ شده است:

در مرز جسم (در جهت شعاعی)، گرما از طریق دو سازوکار مجزا انتقال می‌یابد: (۱) جابه‌جایی و (۲) تشعشع. به منظور داشتن هدایت گرمایی در جسم به صورت یک بعدی، این دو سازوکار انتقال گرما در مرز جسم (در راستای عمود بر محور تقارن جسم) باید حذف شوند. در این آزمایش به منظور حذف جابه‌جایی، باید اختلاف دما بین سطح جسم و محیط اطراف حذف شود. این عمل با قرار دادن محفظه‌ای در اطراف جسم و با گذشت زمان لازم جهت هم دما شدن سطح جسم و محیط اطراف انجام می‌شود. همچنین برای حذف تشعشع، سطح داخلی محفظه به صورت آینه طراحی شده است تا عمل جذب گرما از طریق تشعشع حذف شود.

۴-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- ضریب هدایت گرمایی دو نمونه بر حسب $W/m \cdot K$.

۲- منحنی دما را بر حسب مکان برای شرایط پایا رسم کنید و از روی آن دمای گرم‌ترین نقطه (T_h) و سردترین نقطه (T_c) در میله‌ها را به دست آورید. بر روی منحنی بحث کنید.

۳- ثابت کنید شدت انتقال حرارت در نمونه‌ها مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\dot{Q} = \frac{T_h - T_c}{\frac{L_1}{AK_1} + \frac{L_2}{AK_2}} \quad (۴-۴)$$

که در این رابطه:

L_1 : طول قطعه بلند.

L_2 : طول قطعه کوتاه.

۴- با استفاده از رابطه (۴-۴)، شدت انتقال حرارت را در نمونه‌ها پیدا کنید.

۵- چنانچه مقاومت گرم کن الکتریکی 1000Ω باشد، درصد اتلاف حرارتی چقدر است؟

۶- عوامل مؤثر در خطای این آزمایش کدام‌اند؟ پیرامون میزان تأثیر عوامل بحث کنید.

۷- علت وجود علامت منفی در قانون فوریه چیست؟

ضریب صدور

۵-۱- هدف

یافتن ضریب صدور میله تحت آزمایش با استفاده از قانون استفان بولتزمن و تعیین تأثیر اثرات فشار گاز در انتقال حرارت بطریق تشعشع.

۵-۲- مقدمه

تشعشع حرارتی آن تشعشع الکترومغناطیسی می‌باشد که توسط یک جسم در نتیجه دمای آن منتشر می‌شود. انتقال حرارت هدایتی و جابجایی نیاز به گرادیان دما در یک ماده دارد ولیکن انتقال حرارت توسط تشعشع حرارتی به فضای مادی نیاز ندارد. این نوع انتقال حرارت فرآیند بسیار مهمی است و از نظر فیزیکی جالب‌ترین مکانیزم انتقال حرارت به شمار می‌آید. انتقال حرارت تشعشعی در فرآیندهای گرمایش، سرمایش، خشک کردن در صنعت و در صنایع تبدیل انرژی مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و تشعشع خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۳- تئوری

جسم جامدی را در نظر بگیرید که ابتدا در دمای T_s (که نسبت به دمای محیط T_∞ زیادتر است) قرار گرفته و فشار محیط صفر مطلق می‌باشد (وجود خلاء باعث جلوگیری از انتقال حرارت بطریق هدایت و جابجایی می‌شود) تجربه نشان داده است که جسم پس از مدتی سرد شده و سرانجام به دمایی برابر با دمای تعادل حرارتی با محیط خود می‌رسد. این سرد شدن ناشی از کاهش انرژی داخلی ذخیره شده در جسم و در نتیجه صدور انرژی به صورت تشعشع از سطح جسم می‌باشد. بدین ترتیب تمام اجسام اطراف ما (هر جسمی که دمای آن از صفر مطلق بیشتر باشد) از خود تشعشع حرارتی صادر می‌کند.

منشأ تشعشع، صدور انرژی توسط ماده است و انتقال آن نیاز به ماده ندارد. پس طبیعت این انتقال چیست؟ یکی از تئوری‌های موجود، تشعشع را به عنوان انتشار مجموعه‌ای از ذرات بنام فوتون تعبیر می‌کند. تئوری دیگر این پدیده را به عنوان انتشار امواج الکترومغناطیسی در نظر گرفته است. در هر صورت تشعشع بدون توجه به نوع آن با سرعت نور که برابر $3 \times 10^{10} \text{ Cm/s}$ است انتشار می‌یابد.

۵-۳-۱- تشعشع جسم سیاه:

برای تشریح مشخصات تشعشعی سطوح واقعی، باید ابتدا جسم سیاه را معرفی نمائیم جسم سیاه سطح ایده‌آلی است که دارای خواص زیر باشد.

۱- بدون توجه به طول موج و جهت، تمام تشعشع ورودی را جذب می‌کند.

۲- در یک دما و طول موج معین، هیچ سطحی نمی‌تواند بیش از جسم سیاه انرژی صادر کند.

۳- جسم سیاه یک صادرکننده پخشنده (diffuse) می‌باشد.

موادی که دارای خواص فوق بوده و از قانون استفان بولتزمن تبعیت کند را جسم سیاه می‌نامیم. طبق رابطه استفان بولتزمن مقدار تشعشع جسم سیاه از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$E_b = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4 \quad (۱-۵)$$

که در آن E_b انرژی تشعشع یافته در واحد سطح (W/m^2) یا توان پخش و σ ثابت استفان بولتزمن و T دمای مطلق جسم برحسب کلوین می‌باشد.

زیرنویس b در معادله معرف آن است که تشعشع از یک جسم سیاه صورت گرفته است. موادی که از این قانون تبعیت کنند سیاه به نظر می‌رسند. در اینجا ذکر این مسئله حائز اهمیت است که سیاهی یک جسم می‌تواند از نظر مشاهدات بصری کاملاً گمراه‌کننده باشد. سطحی که با دوده چراغ پوشیده شده به نظر سیاه می‌رسد و برای طیف تشعشع حرارتی نیز سیاه خواهد بود. از طرف دیگر برف و یخ کاملاً روشن به نظر می‌رسند، لکن برای تشعشع حرارتی طول موج بلند اساساً سیاهند. بسیاری از رنگ‌های سفید نیز اساساً برای طول موج بلند سیاه هستند.

۵-۳-۲- صدور انرژی از سطوح واقعی:

تا بحال رفتار یک جسم سیاه را به عنوان سطح ایده‌آل مورد بررسی قرار دادیم. اکنون رفتار سطوح واقعی را در نظر می‌گیریم. قبلاً گفتیم که جسم سیاه صادرکننده ایده‌آلی است که هیچ سطحی نمی‌تواند در همان دما بیش از جسم سیاه تشعشع داشته باشد. بنابراین مناسب است اگر جسم سیاه را بعنوان مرجعی برای

اندازه‌گیری صدور انرژی از یک جسم حقیقی در نظر بگیریم. زمانی که انرژی تشعشع یافته به یک جسم مادی اصابت کند، بخشی از تشعشع بازتاب شده، برخی جذب و برخی عبور می‌کند، در شکل مقابل حالات ذکر شده نشان داده شده است.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2-5)$$

ضریب بازتاب بصورت کسری که بازتاب یافته است. ρ

ضریب جذب بصورت کسری که جذب شده است. α

ضریب عبور شده بصورت کسری که عبور کرده است. τ

یک خاصیت تشعشعی سطح ضریب صدور نام دارد و به عنوان نسبت تشعشع توسط سطح به صدور تشعشع توسط یک جسم سیاه در همان دما تعریف می‌گردد.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (3-5)$$

وقتی که ضریب صدور مصالح را اندازه‌گیری می‌کنیم مواد واقعی کمتر از سطح سیاه واقعی تشعشع گسیل می‌دارند. در واقع ضریب گسیل یک ماده با دما و طول موج تشعشع و شرایط سطحی تغییر می‌کند.

در نهایت با توجه به توضیحات بالا، رابطه‌ای که می‌توان توسط آن انتقال گرمای تشعشعی از یک جسم به محیط اطراف را محاسبه نمود، به صورت زیر بیان شده است که به رابطه‌ی استفن-بولتزمن معروف می‌باشد:

$$q_{rad} = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4-5)$$

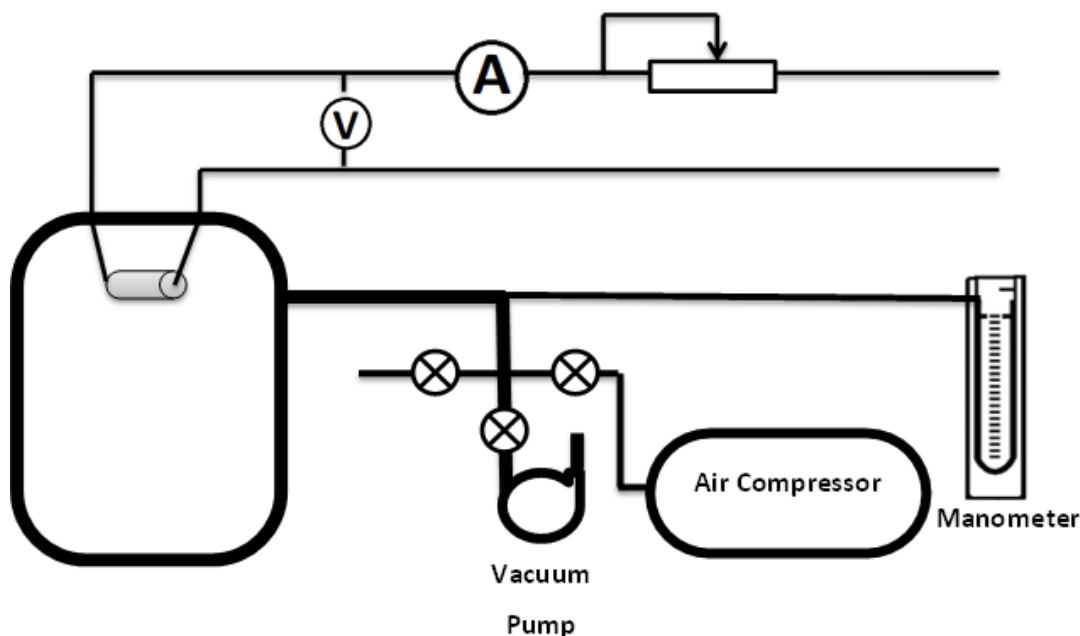
۵-۴- شرح دستگاه

دستگاه مورد آزمایش تشکیل شده است از آلومان استوانه‌ای شکل مسی که سطح آن صیقل داده شده است و بطور افقی در یک مخزن تحت فشار مطابق شکل آویزان شده است، قطر آن 6.35mm و طول آن 160 mm می‌باشد. مخزن فشار روی کف آزمایشگاه مستقر است و بوسیله یک لوله مسی با قطر داخلی نسبتاً زیاد به پانل کنترل متصل می‌شود، مخزن را می‌توان توسط پمپ خلاء که در کنار مخزن قرار گرفته از هوا

تخلیه کرد. مخزن 64cm قطر و 76cm طول دارد

المان را می‌توان بوسیله یک مقاومت الکتریکی که در داخل آن قرار دارد گرم کرده و درجه حرارت سطح آن را بوسیله ترموکوپلی که به آن متصل شده است اندازه گرفت. ماگزیمم درجه حرارت المان حدود 200 C است. یک عدد کمپرسور یا مخزن مربوطه جهت ایجاد فشار در درون مخزن فشار در مجاورت دستگاه قرار گرفته است. همچنین یک پمپ خلاء جهت ایجاد فشار منفی در مخزن بکار گرفته شده است. کمپرسور و پمپ خلاء از طریق چند لوله و شیر به مخزن راه دارند. شیرهای کنترل جهت تنظیم فشار در مخزن بکار رفته‌اند فشار مخزن می‌تواند از فشار مطلق 0.05 mmHg تا 1600 mmHg تغییر کند.

پانل کنترل شامل ادوات کنترل و اندازه‌گیری از قبیل اتصالات، شیرهای تغییر مسیر و کنترلی، ولت‌متر، آمپر‌متر، پتانسیومتر جهت تنظیم توان ورودی به المان، مانومتر جیوه‌ای (U شکل) فشار سنج Mclead (جهت اندازه‌گیری فشار مطلق داخل مخزن)، کلیدهای کنترل و دستگاه نشان‌دهنده درجه حرارت که ترموکوپل‌ها به آن متصل هستند می‌باشد، المان توسط یک ترانس 12V یا یک باتری 12V که در خارج دستگاه قرار دارد گرم می‌شود. ترکوکوپل دستگاه از جنس آلیاژ نیکل - کروم - آلومینیوم است و به نشان‌دهنده متصل می‌باشد، این نشان‌دهنده قادر است دمای مخزن و المان را توسط یک کلید نشان دهد. رنج فشار از مقدار ماگزیمم تا 150 mmHg بوسیله یک مانومتر جیوه‌ای اندازه‌گیری می‌شود، برای فشارهای خیلی کم از یک فشارسنج مک لود استفاده می‌شود. یک شیر خروجی برای راه‌یابی مخزن به فشار اتمسفر نیز تعبیه شده است، این شیر برای حالتی که بخواهیم مخزن را از گاز دیگری غیر از هوا پر کنیم نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵-۱ شماتیک دستگاه آزمایش ضریب صدور و جابه‌جایی آزاد

در دستگاه مورد آزمایش، با توجه به اینکه حرارت تولیدی توسط هیتر از طریق تشعشع و جابه‌جایی آزاد هوا به محیط اطراف هیتر منتقل می‌شود و همچنین بخشی از آن نیز از طریق اتصالات نگهدارنده و اتصالات الکتریکی از طریق رسانش از هیتر دفع می‌گردد، رابطه‌ی پایستگی انرژی در هیتر به صورت زیر خواهد شد:

$$q_{heater} = q_{conv} + q_{rad} + q_{loss} \quad (5-5)$$

می‌دانیم که رابطه‌ی ولتاژ و جریان الکتریکی با حرارت تولیدی در یک هیتر به صورت زیر است:

$$q = V.I \quad (6-5)$$

اما آمپرسنج و ولت سنج نصب شده بر روی دستگاه دارای اندکی خطا می‌باشد. لذا رابطه‌ای که در این

آزمایش برای محاسبه حرارت تولیدی در هیتر استفاده می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

$$q_{heater} = 0.96 V.I \quad (7-5)$$

همچنین رابطه‌ی اتلاف گرما از طریق اتصالات نگهدارنده‌ی هیتر و سیم‌ها به صورت زیر فرض می‌شود:

$$q_{loss} = 0.00167(T_s - T_{\infty}) \quad (8-5)$$

از طرفی اگر هوای داخل مخزن به طور کامل تخلی گردد، عامل انجام انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی

آزاد حذف شده و $q_{conv} = 0$ می‌گردد. بنابراین با توجه به روابط بالا در صورت وجود خلاء در مخزن، رابطه‌ی

زیر به دست خواهد آمد:

$$0.96 V.I = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) + 0.00167 (T_s - T_\infty) \quad (9-5)$$

فرضیات و ضرایب تصحیح:

۱. توترانس ولتمتر در انحراف کامل عقربه 1% و توترانس ترموکوپل 2 C+ است که می‌توان از این مقادیر صرف‌نظر کرد.

۲. المان بقدر کافی از دیوارهای مخزن فاصله دارد که بتوان تبادل حرارت به طریقه جابجایی آزاد را انجام دهد.

۳. انتقال حرارت از طریق مخزن به بیرون قابل صرف‌نظر است و دمای هوای مخزن را می‌توان برابر دمای مخزن فرض نمود که با ترموکوپل نصب شده در دیواره مخزن اندازه‌گیری می‌شود.

۴. سطح المان در مقایسه با سطح مخزن کوچک است.

۵-۵- روش آزمایش

میله با محیط از طریق تشعشع و جابجایی آزاد تبادل حرارت می‌کند. برای اینکه انتقال حرارت فقط به صورت تشعشع انجام گیرد، باید انتقال حرارت بصورت جابجایی حذف گردد. چون عامل انتقال حرارت بصورت جابجایی آزاد، وجود فضای مادی و مولکول‌های هوا می‌باشد بنابراین باید محیط داخل مخزن را از هوا تخلیه نمائیم. تئوری مولکولی انتقال حرارت جابجایی حتی در فشارهای خیلی کم که با دستگاه می‌توان ایجاد کرد قابل ملاحظه است. برای پیدا کردن مقدار واقعی انتقال حرارت خالص تشعشعی و در نتیجه مقدار ضریب صدور میله تحت آزمایش، در یک توان ورودی ثابت به میله، تغییرات اختلاف دمای میله و محیط را (θ) نسبت به تغییرات فشار مخزن تعیین می‌نمائیم و سپس با رسم منحنی و استفاده از آن با توجه به این موضوع که در فشارهای صفر مطلق انتقال حرارت فقط به صورت تشعشع صورت می‌گیرد، مقدار ضریب صدور قابل محاسبه است. برای انجام آزمایش مراحل زیر را انجام دهید.

۱. ترانس (یا باطری) را از طریق کلید به المان ارتباط داده و با چرخاندن پتانسیومتر ولتاژ ثابتی (بنا به تشخیص مدرس آزمایشگاه) به آن اعمال نمائید. (توان ورودی ضمن آزمایش ثابت بماند).
۲. حال ابتدا چک کنید که شیر هوای خروجی به اتمسفر و نیز شیر هوای ورودی از کمپرسور به مخزن بسته باشد. سپس پمپ خلاء را روشن نمائید و پس از آن شیر بالای پمپ را (شیر باید ابتدا حتماً بسته باشد) باز نمائید تا هوای داخل مخزن مکیده شده و خلاء ایجاد گردد. تا زمانی که حداقل فشار (مثلاً 600-mmHg) در داخل مخزن بوجود آید. سپس اول شیر پمپ را بسته و بعد پمپ را خاموش کنید.
۳. با باز کردن شیر هوای خروجی به اتمسفر، فشار را بطور پله‌ای (هر بار 100 mmHg) افزایش داده و پس از به تعادل رسیدن سیستم (تقریباً ۷ دقیقه)، در شرایط پایدار فشار مخزن، دمای میله و دمای مخزن را یادداشت نمائید. این عمل را تا رسیدن فشار مخزن به فشار اتمسفر ادامه دهید.
۴. مرحله ۲ و ۳ را برای ولتاژ دیگری تکرار نمائید.

۵-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- با توجه به داده‌های خوانده شده، جدول زیر را تکمیل نمایید.

جدول ۵-۱ ثبت داده‌های آزمایش ضریب صدور

$V (V) =$		$I (A) =$		$V (V) =$		$I (A) =$	
$T_s(^{\circ}C)$	$T_{\infty}(^{\circ}C)$	$P_g(mmHg)$	$P_{ab}(mmHg)$	$T_s(^{\circ}C)$	$T_{\infty}(^{\circ}C)$	$P_g(mmHg)$	$P_{ab}(mmHg)$

۲- داده‌های آزمایش را برای هر ولتاژ و جریان جداگانه، به صورت اختلاف دما برحسب $P_{ab}^{1/4}$ و خط برازش آن‌ها را رسم کنید.

۳- ضریب صدور میله تحت آزمایش را با استفاده از منحنی شماره ۱ و قانون استفان بولتزمن محاسبه کنید.

۴- منحنی‌های P_{ab} را برحسب q_{rad} و q_{conv} بر روی یک محور رسم کنید و در مورد چگونگی تغییرات آن‌ها بحث نمایید.

۵- خطاهای آزمایش را توضیح دهید.

جابه‌جایی آزاد

۶-۱- هدف

محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد برای استوانه افقی و نیز تعیین پارامترهای رابطه تجربی انتقال حرارت جابجایی آزاد.

۶-۲- مقدمه

جابجایی آزاد یا طبیعی در نتیجه حرکت سیال به علت تغییرات چگالی، ناشی از فرآیند گرمایش مشاهده می‌شود. این نوع انتقال حرارت ناشی از بوجود آمدن گرادیان جرم مخصوص می‌باشد. اثر خالص این پدیده نیروی ارشمیدس است که جریان‌های جابجایی آزاد را بوجود می‌آورند، لازم به توضیح است که گرادیان جرم مخصوص ناشی از گرادیان دما می‌باشد. چون سرعت جریان‌های جابجایی آزاد بطور کلی کمتر از جابجایی اجباری می‌باشد، لذا نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد نیز کمتر خواهد بود.

۶-۳- تئوری

یک صفحه عمودی گرم شده غوطه‌ور در یک سیال ساکن را در نظر بگیرید و فرض کنید که دمای صفحه بیشتر از دمای سیال باشد $T_s > T_\infty$ جرم مخصوص سیال مجاور صفحه کمتر از سیال دورتر می‌باشد، بنابراین نیروهای ارشمیدس با بالا بردن سیال گرم که سیال واقعی در ناحیه سکون را نیز به دنبال خود می‌کشد باعث تولید لایه مرزی جابجایی آزاد می‌شوند. توزیع سرعت در این لایه مرزی کاملاً متفاوت با لایه مرزی جابجایی اجباری است. سرعت در دیواره به علت شرایط غیر لغزشی برابر صفر است. سرعت ابتدا به مقدار ماکزیمم افزایش یافته و سپس در لبه لایه مرزی چونکه در سیستم جابجایی آزاد شرایط «جریان آزاد» حاکم است ($U=0$) به صفر کاهش می‌یابد. لایه مرزی نخست به صورت آرام بوده و لیکن در فاصله‌ای از لبه بالا رونده بسته به خواص سیال و تفاوت دمای بین دیواره و سیال گرداب‌های ناآرام تشکیل می‌شوند و گذار به لایه مرزی ناآرام شروع می‌شود. بطوریکه در قسمت بالاتر صفحه مذکور ممکن است لایه مرزی کاملاً ناآرام تشکیل شود. اگر $T_s < T_\infty$ باشد لایه مرزی جابجایی آزاد نیز رشد می‌کند ولیکن در این حالت حرکت سیال روبه پائین است. برای تحلیل مسئله انتقال حرارت نخست باید معادله دیفرانسیل حرارت را برای لایه مرزی مذکور بدست

آورد، و سپس آن را حل نموده و معادله توزیع دما را بدست آورد، برای صفحه مذکور روابط توزیع دما و توزیع سرعت بصورت زیر می‌باشند.

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_s - T_{\infty}} = \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2, \quad \frac{U}{U_x} = \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2 \quad (۱-۶)$$

۶-۳-۱- عدد گراشف (Gr)

اینک در اینجا به یک عدد بدون بعد مهم در انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌پردازیم، عدد گراشف را از نظر فیزیکی می‌توان نسبت نیروهای شناوری به نیروهای لزجت تعریف کرد. این عدد همان نقشی را در جابجایی آزاد بازی می‌کند که عدد رینولدز در جابجایی اجباری. این پارامتر مهمترین متغیری است که برای تعیین گذار از جریان آرام مورد استفاده قرار می‌گیرد. عدد گراشف بحرانی برای هوا روی صفحه تحت عمودی تقریباً برابر 4×10^8 می‌باشد. رابطه عدد گراشف برای صفحه قائم عبارت از:

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_s - T_{\infty}) X^3}{\mu^2} \quad (۲-۶)$$

برای استوانه قائم X طول استوانه بوده و برای استوانه‌ای افقی بعد مشخصه X به d (قطر) تبدیل می‌شود.

۶-۳-۲- رابطه تجربی جابجایی آزاد:

محققان پس از تجربیات زیادی دریافته‌اند که ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد متوسط را می‌توان برای استوانه‌های افقی به شکل تابع زیر نشان داد.

$$Nu_f = C Ra_f^n, \quad Nu = \frac{hd}{K}, \quad q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (۳-۶)$$

که در آن نماد f نشان‌دهنده خواص سیال در دمای فیلم می‌باشد.

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (۴-۶)$$

و عدد رایلی، یک عدد بدون بعد دیگر در جابه‌جایی آزاد بوده که به صورت حاصلضرب گراشف در پرانتل تعریف می‌شود.

$$Ra = Gr.Pr \quad (5-6)$$

ضرایب ثابت n , C را می‌توان از جداول مربوط در کتاب‌های انتقال حرارت بدست آورد. همچنین محققان دریافته‌اند که تغییرات منحنی $\log(Nu)$ برحسب $\log(Ra)$ تقریباً خطی است. بنابراین می‌توان با رسم این منحنی $\log(C)$ (عرض از مبدا نمودار) و n (شیب نمودار) را محاسبه نمود.

۴-۶- شرح دستگاه

با توجه به اینکه دستگاه استفاده شده در این آزمایش همان دستگاه آزمایش ضریب صدور است، شرح دستگاه را از همان بخش مطالعه بفرمایید. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه در این آزمایش هوای داخل مخزن تخلیه نمی‌گردد، رابطه‌ی نهایی پایداری انرژی در دستگاه به صورت زیر خواهد بود:

$$0.96 V.I = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) + hA(T_s - T_\infty) + 0.00167(T_s - T_\infty) \quad (6-6)$$

در رابطه‌ی بالا برای ضریب صدور سطح، می‌توان از نتایج آزمایش ضریب صدور استفاده نمود. اما برای کاهش خطای این آزمایش و عدم تاثیر خطای آزمایش ضریب صدور بر نتایج این آزمایش مقدار $\varepsilon = 0.98$ در نظر بگیرید.

۵-۶- روش آزمایش

این آزمایش در فشار ثابت انجام می‌شود. برای انجام آزمایش اعمال زیر را انجام دهید:

- ۱- ابتدا کمپرسور را روشن کنید تا مخزن کمپرسور پر از هوای فشرده گردد سپس آن را خاموش کنید.
- ۲- شیر ورودی به مخزن را باز کنید تا فشار مخزن به مقداری معین (مثلاً 400 mmHg) برسد.
- ۳- ولتاژ هیتر را روی مقدار تعیین شده توسط مدرس آزمایشگاه (مثلاً 3 V) قرار دهید. سپس بطور پله‌ای انرژی ورودی را افزایش دهید. (در هر مرحله یک ولت) و زمانیکه سیستم به تعادل رسیده و شرایط پایدار حکمفرما شد (تقریباً ۷ دقیقه)، دمای المان، دمای مخزن، ولتاژ و آمپر ورودی را یادداشت کنید.

۴- مرحله ۳ را تا هفت مرحله ادامه دهید.

۵- مرحله ۲ تا ۴ را برای یک فشار دیگر تکرار کنید.

۶-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- با توجه به داده‌های آزمایش، خواص هوا در دمای فیلم و روابط موجود، جدول زیر را

تکمیل نمایید.

جدول ۱-۶ ثبت داده‌های آزمایش جابه‌جایی آزاد

$P_g(mmHg)$	$V(v)$	$I(A)$	$T_s(^{\circ}C)$	$T_{\infty}(^{\circ}C)$	$h(\frac{W}{m^2}^{\circ}C)$	Nu	Ra	Log(Nu)	Log(Ra)

- ۲- مقادیر $Log(Nu)$ را برحسب $Log(Ra)$ برای هر فشار به صورت جداگانه در یک محور مختصات رسم کرده و معادله خط برازش بین داده‌ها را بدست آورید.
- ۳- با توجه به معادله خط برازش داده‌ها، مقادیر ثابت C و n را به دست آورده و با تئوری مقایسه نمایید.
- ۴- بر روی تاثیر فشار در مقدار C و n در حالت ایده آل و واقعی بحث کنید.
- ۵- منحنی q_{conv} برحسب اختلاف دما $(T_s - T_\infty)$ را رسم نمایید (برای دو فشار مختلف بر روی یک محور مختصات) و در مورد تغییرات منحنی بحث کنید.
- ۶- خطاهای آزمایش را توضیح دهید.

مبدل حرارتی

۷-۱- هدف

بررسی اصول انتقال گرما به منظور پیش‌بینی عملکرد مبدل حرارتی

۷-۲- مقدمه

در بسیاری از کاربردهای مهندسی فرآیند تبادل گرما بین دو سیال با دماهای مختلف که به وسیله یک دیوار جامد از هم جدا شده‌اند، وجود دارد. به وسیله‌ای که این تبادل را انجام می‌دهد مبادله‌کن گرمایی می‌گویند که کاربردهای خاص آن را می‌توان در سیستم‌های گرمایش ساختمان‌ها و تهویه مطبوع، نیروگاه‌ها، بازیابی گرمای تلف شده و فرآیندهای شیمیایی یافت.

۷-۳- تئوری

مبادله‌کن‌های گرمایی معمولاً بر اساس آرایش جریان و یا نوع ساختمان دسته‌بندی می‌شوند. ساده‌ترین نوع آنها مبادله‌کن دولوله‌ای است، که در آن دو سیال گرم و سرد، همسو و یا ناهمسو جریان دارند. نوع متداول دیگر، مبادله‌کن گرمایی پوسته و لوله است که بسته به تعداد مسیری که سیال در پوسته و لوله طی می‌کند، دسته‌بندی می‌شود. ساده‌ترین آنها مبادله‌کن‌هایی هستند که شامل یک مسیر سیال در پوسته و یک مسیر در لوله است.

۷-۳-۱- ضریب انتقال گرمای کلی:

تعیین ضریب انتقال گرمای کلی یکی از مراحل اصلی در تجزیه و تحلیل مبادله‌کن‌های گرمایی است. این ضریب برحسب مقاومت‌های هدایتی و جابجایی بین دو سیال که به وسیله دیوار استوانه‌ای از یکدیگر جدا شده‌اند، بیان می‌شود. سطوح مبادله‌کن‌های گرمایی در عمل در معرض رسوبات ناشی از ناخالصی‌های سیال، زنگ زدن و سایر واکنش‌های شیمیایی بین سیال و ماده سطح هستند. لایه رسوب ایجاد شده در روی سطح، مقاومت گرمایی بین دو سیال را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد. این اثر با معرفی یک مقاومت گرمایی به نام ضریب رسوب R_f ملحوظ می‌شود، که مقدار آن بستگی به دمای کارکرد، سرعت سیال و مدت زمان استفاده

از مبادله کن گرمایی دارد.

ضریب انتقال گرمای کلی برای مبادله کن‌های لوله‌ای بی پره از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + R_w + \frac{1}{h_o A_o} \quad (۱-۷)$$

که در آن i و o به ترتیب بیان‌کننده سطوح داخلی و خارجی می‌باشند که هر یک ممکن است در معرض سیال گرم یا سرد باشند و R_w بیان‌کننده مقاومت حرارتی جداره لوله می‌باشد. مقدار ضریب جابجایی در داخل لوله از روابط موجود در کتاب‌های انتقال گرما به دست می‌آید. نحوه تعیین مقدار ضریب جابجایی در خارج لوله بستگی به نوع مبادله کن (دو لوله یا پوسته لوله) دارد. در مبادله کن‌های دو لوله نیز می‌توان ضریب جابجایی در خارج لوله را از روابط موجود در کتاب‌های انتقال گرما تعیین کرد. جهت تعیین ضریب جابجایی در خارج لوله در مبادله کن‌های گرمایی پوسته و لوله نیاز به محاسبه عدد رینولدز می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_0}{\mu} \quad (۲-۷)$$

که در آن \bar{V} سرعت متوسط سیال در سمت پوسته می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{V} = \frac{\text{دبی حجمی جریان در سمت پوسته}}{\text{سطح مقطع موثر بین لوله ها}} \quad (۳-۷)$$

سطح مقطع عبور جریان بین دو بفل در این آزمایش برابر $4.35 \times 10^{-3} m^2$ می‌باشد. سطح موثر عبور جریان به علت جدایش جریان در بفل‌ها تنها نصف این مقدار است.

در مبدل پوسته و لوله مورد استفاده، ضریب جابجایی روی لوله‌ها را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$Nu = 0.2 Re^{0.6} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (۴-۷)$$

۷-۳-۲- موازنه انرژی در مبدل‌های حرارتی

در یک مبدل حرارتی اگر از انتقال گرما به محیط و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف‌نظر شود، باید همه‌ی حرارت خارج شده از سیال گرم به سیال سرد وارد شود. پس می‌توان گفت:

$$q_h = q_c \quad (5-7)$$

با فرض آنکه تغییر فازی در هیچیک از سیالات رخ ندهد و نیز با فرض ثابت بودن گرمای ویژه دو سیال، می‌توان نوشت:

$$q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (6-7)$$

$$q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (7-7)$$

دماهای ظاهر شده در این معادلات، دماهای متوسط در مقاطع مربوطه‌اند. باید توجه کرد که این روابط مستقل از آرایش جریان و نوع مبادله‌کن گرمایی می‌باشند.

۳-۳-۷- اختلاف دمای متوسط لگاریتمی

در این روش که از روش قبل دقت بیشتری دارد، میزان انتقال گرمای کل q برحسب دماهای ورودی و خروجی دو سیال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q_{LMTD} = UA \Delta T_{LM} \quad (8-7)$$

که در آن ΔT_{LM} اختلاف دمای متوسط لگاریتمی می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (9-7)$$

که در آن ΔT_1 و ΔT_2 برای مبدل‌های همسو به صورت:

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i} \quad , \quad \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o} \quad (10-7)$$

و برای مبدل‌های ناهمسو به صورت:

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \quad , \quad \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \quad (11-7)$$

تعریف می‌شود.

برای دماهای ورودی و خروجی مشابه، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی آرایش جریان ناهمسو بزرگ‌تر از آرایش جریان همسو است. در نتیجه برای مقادیر مساوی U و q ، سطح مورد نیاز در آرایش جریان ناهمسو کوچک‌تر از آرایش جریان همسو خواهد بود.

۷-۳-۴- روش ε - NTU

بازده یک مبادله‌کن گرمایی عبارت است از نسبت انتقال گرمای واقعی به حداکثر انتقال گرمای مجاز که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (۷-۱۲)$$

از طرفی q_{max} به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (۷-۱۳)$$

که در این رابطه C ، حاصلضرب دو کمیت m و c_p برای هر سیال بوده و زیرنویس \min بیان‌کننده مقدار کوچکتر C است. برای هر یک از انواع مبادله‌کن‌های گرمایی می‌توان اثبات نمود که:

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \quad (۷-۱۴)$$

که در آن NTU کمیت بی بعدی است که در تجزیه و تحلیل مبادله‌کن‌های حرارتی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (۷-۱۵)$$

روابط مورد نظر جهت تعیین مقدار ε برای انواع مبادله‌کن‌های گرمایی در کتاب‌های انتقال گرما و کتاب‌های مبادله‌کن‌های گرمایی موجود است. بنابراین در این روش ابتدا مقدار NTU محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از روابط و یا نمودارهای کتاب مقدار ε به دست آمده و پس از آن مقدار q محاسبه می‌گردد.

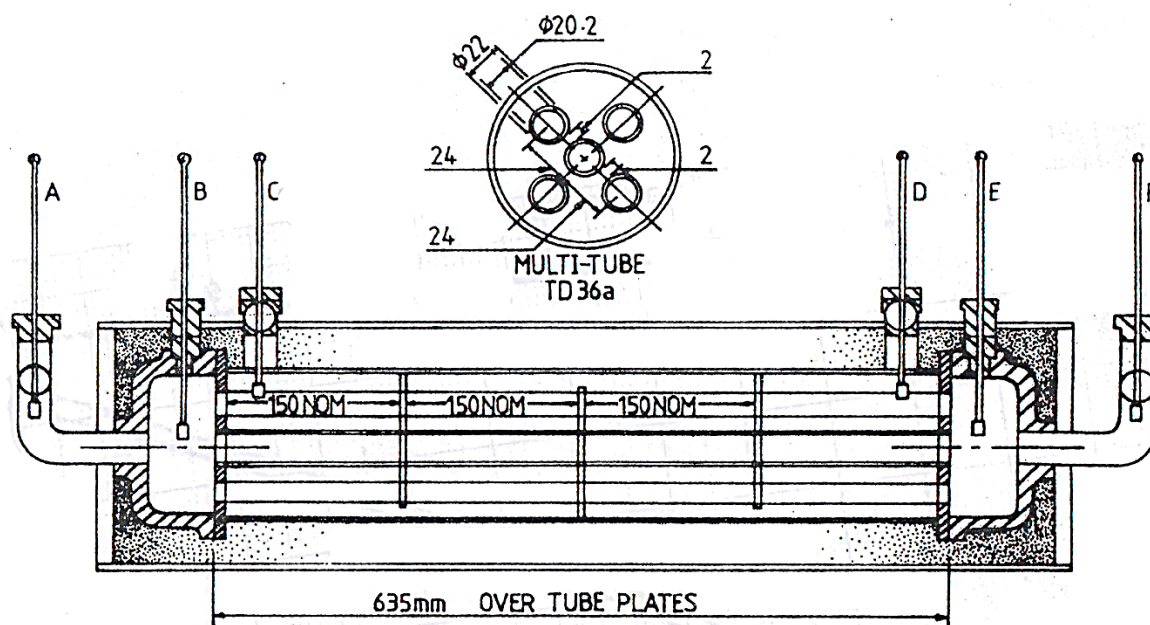
۷-۴- شرح دستگاه

دستگاه مبادله‌کن TD36 به منظور انجام آزمایش‌های لازم در محدوده مبادله‌کن‌های گرمایی آزمایشگاهی، طراحی شده است. این دستگاه از دو قسمت سیکل گرم و سیکل سرد تشکیل شده است. هر قسمت دارای تجهیزات کنترلی و وسایل اندازه‌گیری مربوط به خود می‌باشد.

اجزاء تشکیل‌دهنده سیکل گرم عبارتند از تانک آب گرم، پمپ آب گرم، رتامت و ترموستات. تانک به

خوبی عایق‌بندی شده است و حجم آن ۱۴۰ لیتر می‌باشد. در داخل تانک سه المان الکتریکی نصب شده است که ظرفیت هر کدام 3kW می‌باشد. دمای آب گرم توسط یک ترموستات دستی تنظیم می‌گردد. علاوه بر آن یک عدد ترموستات اتومات بر روی المان گرمایی مرکزی نصب شده است. چنانچه دمای آب تانک گرم از ۸۰°C تجاوز کند، این ترموستات عمل خواهد کرد. پمپ آب گرم از نوع گریز از مرکز با قدرت ۰/۷۵hp می‌باشد که با سرعت ۲۹۰۰rpm کار می‌کند. ظرفیت پمپ ۱/۵lit/s می‌باشد. از یک رتامتر جهت اندازه‌گیری دبی سیال استفاده شده است. برای به دست آوردن دبی، می‌توان از روی فلومتر آن را مستقیماً خواند و یا از منحنی کالیبره مربوط به آن استفاده نمود.

اجزاء تشکیل‌دهنده سیکل سرد عبارتند از: تانک آب سرد، واحد تبرید، پمپ آب سرد، رتامتر و قطع‌کن دمای سرد. تانک آب سرد که لوله‌های اوپراتور واحد تبرید داخل آن قرار گرفته‌اند، به خوبی عایق‌بندی شده است. حجم تانک ۷۰ لیتر می‌باشد. در واحد تبرید که ظرفیت آن 5kW می‌باشد از فریون ۱۲ استفاده شده است و کندانسور آن به کمک دو فن خنک می‌شود. از یک شیر انبساط ترموستاتیکی به منظور کنترل دبی جریان استفاده می‌شود.



شکل ۷-۱ شکل شماتیک مبدل حرارتی موجود و ابعاد آن

۷-۵- روش آزمایش

وجود آب و یخ در مخزن سرد دستگاه باعث می‌شود که دمای ورودی سرد در مبدل حرارتی همواره ثابت بماند. همچنین وجود ترموستات در سیکل گرم نیز خود موجب ثابت بودن دمای ورودی گرم در مبدل می‌شود. ثابت بودن دماهای ورودی می‌تواند به افزایش دقت مبدل کمک کند. اما در صورتی که مدت زمان انجام آزمایش زیاد شود، با توجه به افزایش دمای آب در سیکل سرد، یخ موجود در مخزن سرد آب شده و دمای ورودی سرد به تدریج افزایش خواهد یافت. لذا در این آزمایش سرعت عمل آزمایش کنندگان می‌تواند به افزایش دقت نتایج کمک کند. برای انجام آزمایش مراحل زیر را انجام دهید:

۱- واحد تبرید دستگاه را دو ساعت قبل از انجام آزمایش روشن کنید تا در اطراف لوله‌ها و اپراتور یک لایه

یخ ایجاد شود.

۲- برای تنظیم مبدل بر اساس آرایش جریان (همسو یا ناهمسو)، مسیر عبور جریان‌های گرم و سرد (به

عنوان مثال جریان گرم طرف پوسته و جریان سرد طرف لوله) را با تعیین محل درست اتصالات، مشخص نمایید.

۳- شیرهای تنظیم دبی آب گرم و سرد را به طور کامل ببندید.

۴- پمپ تغذیه سیکل گرم را روشن کنید و توسط شیر، دبی آب گرم را تنظیم نمایید.

۵- پمپ تغذیه سیکل سرد را روشن کنید و توسط شیر، دبی آب سرد را تنظیم نمایید.

۶- حدود ۵ دقیقه صبر کنید تا سیستم نسبتاً به حالت یکنواخت برسد. شرایط تعادل هنگامی به دست

می‌آید که تغییرات دمای خروجی بیش از $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ نباشد. دماهای ورودی و خروجی و دبی جریان سرد و گرم را یادداشت کنید.

۷- دو دقیقه‌ی بعد دماهای ورودی و خروجی و دبی جریان سرد و گرم را مجدداً یادداشت کنید.

۸- مرحله ۷ را تکرار نمایید.

۹- دبی را افزایش داده و مراحل ۶، ۷ و ۸ را تکرار کنید. این کار را برای ۷ حالت دبی سرد و

گرم انجام دهید.

۷-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- با توجه به داده‌های خوانده شده، جدول زیر را تکمیل نمایید.

جدول ۷-۱ ثبت داده‌های آزمایش مبدل حرارتی

$Q_h(lit/min)$								
$Q_c(lit/min)$								
$T_A(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							
$T_B(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							
$T_C(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							
$T_D(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							
$T_E(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							
$T_F(^{\circ}C)$	5min							
	7min							
	9min							

۲- برای جریان داخل لوله، نسبت طول ورودی حرارتی به طول کل لوله را برحسب دبی جریان رسم کنید.

۳- ضریب انتقال حرارت کلی را برای این مبدل محاسبه کنید و بیان کنید به نظر شما مقاومت حرارتی غالب در میزان انتقال گرما بین دو سیال چیست و چگونه می‌توان انتقال گرما بین دو سیال را بهبود بخشید.

۴- با توجه به روابط موازنه انرژی در مبدل، بیان کنید از بین تغییر انرژی در پوسته و لوله، کدام یک قابل استنادتر است؟ در کدام یک اتلاف گرما وجود دارد؟

۵- برای هر مرحله q_c ، q_h ، q_{LMTD} و $q_{\varepsilon-NTU}$ را محاسبه نمایید.

جدول ۲-۷ محاسبه دبی جرمی و حرارت منتقل شده بر اساس روابط ترمودینامیکی

مرحله آزمایش	$Q_h \times 10^3$ (m^3 /sec)	$Q_c \times 10^3$ (m^3 /sec)	\dot{m}_h (kg/sec)	\dot{m}_c (kg/sec)	q_h (kJ/sec)	q_c (kJ/sec)	درصد خطا
۱							
۲							
۳							
۴							
۵							
۶							
۷							

جدول ۳-۷ میزان حرارت منتقل شده بر اساس اختلاف دمای متوسط لگاریتمی

مرحله آزمایش	ΔT_{LM} (°C)	Re_i	Nu_i	h_i $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$	\bar{V} $(\frac{m}{s})$	Re_o	Nu_o	h_o $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$	U $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$	q_{LMTD} (kW)
۱										
۲										
۳										
۴										
۵										
۶										
۷										

جدول ۴-۷ میزان حرارت منتقل شده بر اساس روش ε -NTU

مرحله آزمایش	C_h	C_c	C_{min}	C_{max}	q_{max}	$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$	NTU	ε	q_{act}
۱									
۲									
۳									
۴									
۵									
۶									
۷									

۶- تغییرات q_c ، q_h ، q_{LMTD} و $q_{\varepsilon-NTU}$ را برحسب دبی جریان سرد در یک نمودار رسم و بر روی

نتایج به دست آمده بحث نمایید. (دقت روش‌های مختلف را مقایسه کنید).

مراجع

- [1] Bergman, T.L., F.P. Incropera, and A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 2011: Wiley.