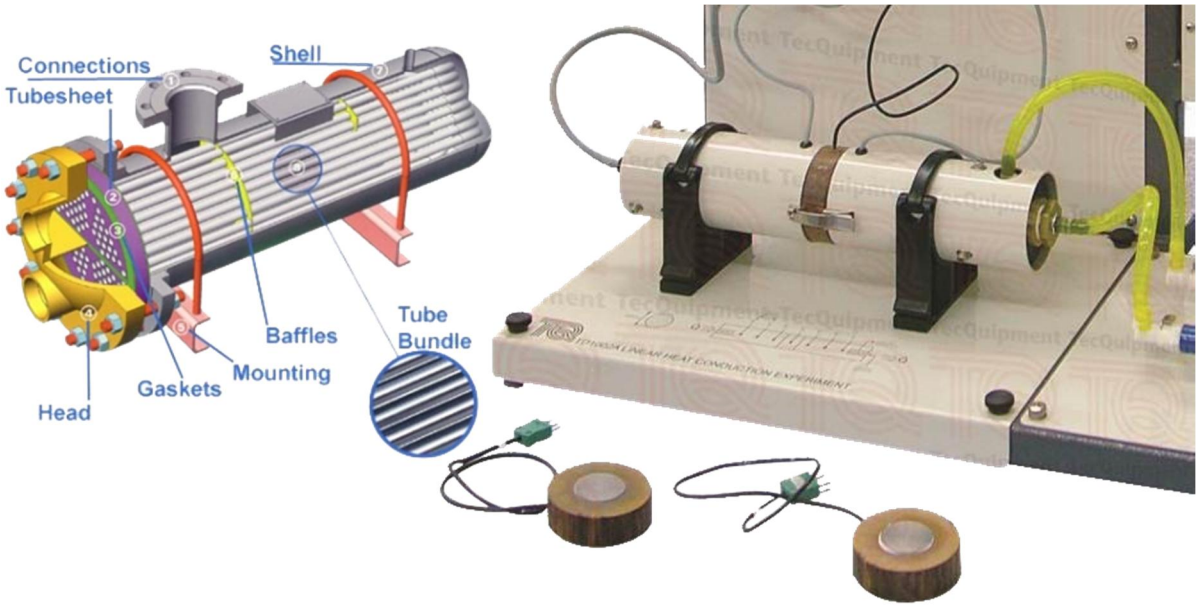
دانشگاه صنعتی سهند

دانشکده مهندسی شیمی

دستور کار

آزمایشگاه انتقال حرارت



تهیه و گرد آوری:

دکتر جواد رهبر شهروزی

ویرایش دوم

مهر ۱۳۹۶

فهرست مطالب

اصول آزمایشگاه انتقال حرارت ۱
اندازهگیری ضریب انتقال حرارت هدایتی جامدات ۳
اندازهگیری ضریب هدایت حرارتی سیالات ۷
برج خنک کننده ۱۱
مبدل حرارتی پوسته و لوله ۱۷
حرارت دادن مایعات در مخزن ۲۳
انتقال حرارت جابجایی اجباری ۲۷
جابجایی آزاد ۳۱
آزمایش بررسی انتقال حرارت از طریق تشعشع ۳۶
دستگاه چگالش ۴۴

اصول آزمایشگاه انتقال حرارت

برای کلاس آزمایشگاه انتقال حرارت رعایت اصول زیر الزامی است:

- حضور به موقع در هر جلسه و عدم غیبت و تاخیر
- آمادگی قبلی لازم و حضور فعال در انجام آزمایش
- مشارکت همه‌ی افراد گروه در نوشتن گزارش
- دقت در کار کردن با ابزار و دستگاهها
- رعایت تمام نکات ایمنی
- پوشیدن روپوش آزمایشگاهی

برای هر آزمایش لازم است که یک گزارش‌کار نوشته شود. گزارش کار باید به صورت دستنویس باشد و برای رسم نمودارهای خواسته شده از نرم افزار استفاده گردد. گزارش کار هر آزمایش حداکثر تا دو هفته پس از انجام آزمایش باید به استاد درس تحویل گردد در غیر این صورت به ازای هر روز تأخیر ۵٪ از نمره مربوط به آن گزارش‌کار کم خواهد شد. برای نگارش درست یک گزارش‌کار باید به نکات زیر توجه کرد:

صفحه اول گزارش کار: که باید شامل موارد زیر باشد: عنوان آزمایش، شماره آزمایش، نویسنده گزارش، اعضای گروه، شماره گروه، تاریخ انجام آزمایش و تاریخ تحویل گزارش

هدف آزمایش: در این قسمت اهداف کلی انجام آزمایش باید ذکر گردد.

تئوری آزمایش: در این بخش به اختصار به تئوری آزمایش و به کلیات بحث پرداخته می شود. کتابهای مرجع برای نوشتن این قسمت بسیار مفید می‌باشند؛ در عین حال باید توجه داشت که از ذکر مطالب اضافی و غیر ضروری اجتناب کرد. بخش مقدمه در عین جامعیت باید مختصر و کوتاه باشد.

شرح دستگاه و وسایل اندازه‌گیری و روش آزمایش: در این بخش، دانشجو با مراجعه به کتابها و بروشورهای مربوطه به توصیف دستگاه و ابزارهای لازم برای انجام آزمایش می‌پردازد. ممکن است دستگاهی برای چندین آزمایش مختلف طراحی شده باشد، در این صورت توصیف دستگاه باید بر روی آزمایش و سوال مطرح شده متمرکز گردد و از توضیح اضافی در مورد سایر قسمتهای نامرتبط دوری شود. توضیحات باید شامل موارد زیر باشد:

- نوع دستگاه
- طرز کار دستگاه
- شماتیک دستگاه
- نحوه کاربرد صحیح دستگاه
- مشخص کردن نقاط اندازه‌گیری
- منابع خطا

ارائه نتایج اندازه‌گیری: موارد اندازه‌گیری شده عیناً و با دقت در جداول مربوطه ثبت گردیده و واحدها و علایم به کار رفته معرفی شوند.

محاسبات: در این قسمت، بر اساس سوالات مطرح شده محاسبات لازم انجام شده و نتایج مربوطه اخذ می‌گردد. برای تحلیل داده‌ها معمولاً از روابط تئوریک موجود در مراجع استفاده می‌شود. رسم نمودار و یا جدول برای بسیاری از موارد باعث سهولت در درک مطلب و نشان دادن بهتر نتایج می‌شود که در اینصورت این نمودارها باید دارای توضیحات کافی باشد. تحلیل ارائه شده برای خطای احتمالی از نتیجه گیری تجربی با نتایج تئوریک جزو موارد مهم یک گزارش کار خوب می‌باشد. برای رسم نمودار حتما از نرم افزارهایی مانند Excel یا MATLAB بهره گرفته شود تا جوابها دقیق باشند.

نتیجه‌گیری: با توجه به سوالات مطرح شده در هر آزمایش و نتایج حاصل از محاسبات و نیز با در نظر گرفتن موارد مطرح شده به عنوان اهداف کلی آزمایش، در این بخش یک نتیجه گیری کلی برای آزمایش ارائه می‌شود.

منابع: در انتهای گزارش لازم است تا منابع استفاده شده اعم از کتاب، مقاله، جزوه و یا بروشور دستگاهی به عنوان مرجع ذکر گردد.

نحوه توزیع نمره برای هر گزارشکار: در جدول زیر بارم بندی گزارش کار آورده شده است.

جدول توزیع نمره برای هر قسمت گزارش کار

قسمت	٪ نمره
هدف	۵
تئوری	۱۰
شرح دستگاه و روش آزمایش	۱۰
ارائه نتایج اندازه‌گیری و انجام آزمایش	۲۰
محاسبات و جوابگویی به سوالات	۵۰
نتیجه‌گیری کلی و مراجع	۵
جمع	۱۰۰

افراد یک گروه در ترتیب نوشتن ترتیب گزارشهای خود به صورت توافقی مختار هستند ولی هر دانشجو باید به تعداد گزارش کار تعیین شده در نوشتن گزارشکار مشارکت داشته باشد. در صورتی که دانشجویی در نوشتن گزارشکار مربوط به خود کوتاهی نماید، نمره مربوط به سایر گزارشکارهای نوشته شده توسط سایر اعضای گروه به ایشان تعلق نمی‌گیرد.

برای کار با دستگاههایی که به کامپیوتر نیاز دارند ابتدا با استفاده از کابل، دستگاه را به USB کامپیوتر متصل کرده و برنامه USB-setup را اجرا کنید، سپس برنامه مربوط به هر آزمایش را اجرا کنید. برای اینکه دستگاه بتواند به کامپیوتر وصل شود ابتدا در دکمه port setting (علامت کامپیوتر) با رمز datis پورت شناسایی شده را مشخص کنید و سپس دکمه connect را بزنید تا اعداد مربوط به دما نشان داده شود.

آزمایش شماره ۱

اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت هدایتی جامدات

هدف:

اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت، تعیین گرادیان درجه حرارت و حرارت منتقل شده در طول انواع مختلف نمونه‌های استوانه‌ای شکل با ضریب هدایت حرارتی نسبتاً بالا نظیر فلزات

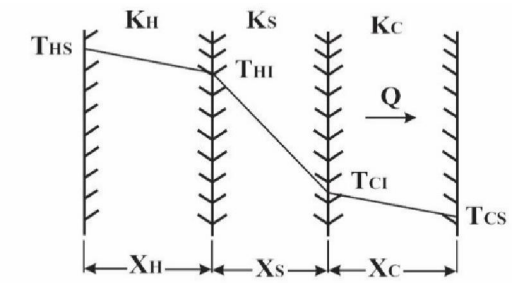
تئوری آزمایش:

مقدار گرمای منتقل شده در حالت پایا از طریق هدایت گرمایی بر طبق قانون فوریه قابل محاسبه می‌باشد:

$$Q = kA\frac{dT}{dz} \qquad (۱-۱)$$

که در این رابطه Q گرمای منتقل شده، k ضریب هدایت گرمایی نمونه جامد، A سطح مقطع انتقال حرارت که همیشه عمود بر جهت انتقال گرماست و $\frac{dT}{dz}$ که گرادیان دما می‌باشد. برای جریان حرارتی ثابت در داخل نمونه، مقدار حرارت انتقالی در سطح مقطع نمونه در تمام قسمت‌های مختلف میله مورد نظر در واحد زمان مقداری ثابت است و لذا قانون فوریه را می‌توان با توجه به شکل ۱-۱ برای قسمت‌های مختلف میله به صورت زیر نوشت:

شکل (۱-۱) شماتیک یک میله با جنس مرکب



$$\frac{Q}{A} = k_H\frac{T_{HS}-T_{HI}}{X_H} = k_S\frac{T_{HI}-T_{CI}}{X_S} = k_C\frac{T_{CI}-T_{CS}}{X_C} \qquad (۱-۲)$$

اگر رابطه کلی انتقال حرارت با ضریب کلی هدایت حرارتی (U) را بصورت زیر بنویسیم:

$$\frac{Q}{A} = U(T_{HS}-T_{CS}) \qquad (۱-۳)$$

می‌توان با استفاده از دو رابطه اخیر نشان داد که:

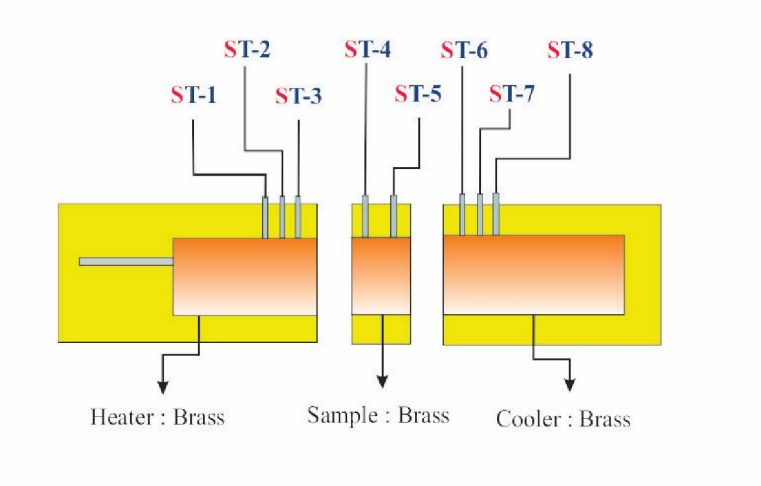
$$\frac{1}{U} = \frac{X_H}{k_H} + \frac{X_S}{k_S} + \frac{X_C}{k_C} \qquad (۱-۴)$$

که مقدار $\frac{1}{U}$ را مقاومت حرارتی جسم می‌نامند.

مشخصات دستگاه

دستگاه آزمایش دارای ترموکوپل‌هایی است که درجه حرارت را در نقاط مختلف نشان می‌دهد. یک المان حرارتی جهت تولید حرارت در قسمت گرم (پایین) به کار رفته است و جهت خنک نمودن قسمت سرد (بالا) از آب شهر استفاده می‌شود. توان مصرفی دستگاه توسط یک مدار برقی که قدرت خروجی آن بین صفر تا ۲۵۰ وات تغییر می‌کند تأمین می‌شود. این دستگاه طوری طراحی شده که با عایق دور کردن استوانه‌های فلزی، خطاهای آزمایش مربوط به انتقال حرارت راستای شعاعی را به حداقل رسانده و از اتلاف حرارتی جابجایی شعاعی و تشعشع جلوگیری کند.

این دستگاه تشکیل شده از قسمت گرم کننده که از برنج ساخته شده و یک هیتر برقی در آن جاسازی شده است، توان مصرفی هیتر توسط یک دیمر قابل تنظیم بوده و روی برد دستگاه یک ولت‌متر و یک آمپرمتر برای اندازه‌گیری توان مصرفی هیتر موجود است. سه عدد ترموکوپل روی این قسمت با فاصله‌های برابر از یکدیگر قرار گرفته‌اند که درجه حرارت را در جهت محوری میله برنجی به قطر ۳۰ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌کنند $\mathrm{ST}_1, \mathrm{ST}_2, \mathrm{ST}_3$. دمای نقطه‌ی اول به عنوان دمای تنظیم $ST_1 = T_{set\ point}$ است که با تنظیم آن روی برد دستگاه می‌توان دمای هیتر را تنظیم کرد. سمت دیگر یک میله برنجی که توسط جریان آب خنک می‌شود، قسمت سرد را تشکیل می‌دهد و روی این قسمت ترموکوپل‌هایی تعبیه شده است که دمای قسمت سرد میله را اندازه‌گیری می‌کنند ST_7, ST_8, ST_9. بین قسمت گرم با قسمت سرد، از المان‌های واسطه استفاده می‌شود. دستگاه آزمایش دارای المان واسطه از سه جنس برنج، فولاد ضد زنگ و آلومینیم است. دمای المان واسطه در جهت محوری توسط سه ترموکوپل $\mathrm{ST}_4, \mathrm{ST}_5, \mathrm{ST}_6$ اندازه میشود. در هنگام وصل کردن سوکت سنسور المان میانی به محل مربوطه، بایستی دقت لازم به عمل آید تا سوکت به درستی در محل خود قرار گیرد. در هنگام انجام آزمایش بایستی دقت کرد که وقتی نمونه مورد آزمایش بین دو قسمت گرم و سرد قرار می‌گیرد، دقت لازم به عمل آید تا نمونه بین دو محفظه پلاستیکی تنظیم شود. همچنین باید مطمئن شد که نقاط اندازه‌گیری درجه حرارت در یک محور نصف النهاری روی نمونه مورد آزمایش قرار گیرند. شکل ۱-۲ شماتیکی از دستگاه را نشان می‌دهد. فاصله بین هر ترمومتر ۱۳ میلیمتر می‌باشد.



شکل (۲-۱) شماتیک دستگاه برای هدایت حرارتی در طول یک میله ساده

روش آزمایش

۱. نمونه برنجی را در قسمت میانی بین قسمت سرد و گرم قرار داده و دستگاه را روشن کنید و چک کنید که چراغ سیگنال روشن شود.

۲. سیم ترموکوپل‌ها را به آرامی در سوراخ های مربوطه قرار دهید، ترتیب شماره ترموکوپل از پایین به بالا است.

۳. با استفاده از دیمـر توان مصرفی هیتـر را در محدوده ۳۰ تا ۵۰ وات تنظیم کنید (ولتاژ ضربدر آمپراژ). به وسیـله نمایشـگر $ST_1 = T_{set\ point}$ را نیز روی مقدار ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم کنید.

۴. شیر آب را باز کنید تا آب در قسمت بالایی جریان داشته باشد.

۵. برای اندازه گیری k در هر نمونه، بایستی درجه حرارت به حالت پایا برسد که حدود ۴۰ دقیقه طول می‌کشد. در طول این مدت دمای هر چهار نقطه را در فاصله زمانی ۵ دقیقه به ۵ دقیقه یادداشت نمایید تا زمانی که سیستم به حالت پایا رسیده باشد؛ یعنی با گذشت زمان تغییری در دمای هر نقطه دیده نشود و دماها ثابت شوند.

۶. مراحل ۱ تا ۵ را برای نمونه‌های آلومینیومی و استیل انجام دهید.

خواسته های آزمایش

۱) برای هر نمونه جدول زیر را تکمیل کنید.

جنس نمونه: ولتاژ = آمپراژ =												
شماره	زمان (دقیقه)	Q=V×A (وات)	T_1, ℃	T_2, ℃	T_3, ℃	T_4, ℃	T_5, ℃	T_6, ℃	T_7, ℃	T_8, ℃	T_9, ℃
۱	۰										
۲	۵										
۳	۱۰										
۴	۱۵										
۵	۲۰										
۶	۲۵										
Steady State	۳۰										

۲) منحنی $T - x$ را در زمان های مختلف برای هر نمونه را بر روی یک نمودار نشان دهید.

۳) تغییرات درجه حرارت را نسبت به طول مجموعه هر نمونه (گرادیان دما) را در زمانهای مختلف بر روی یک منحنی رسم کرده و از روی آن چگونگی توزیع دما در حالت گذرا را توضیح دهید.

۴) ضریب هدایت حرارتی هر نمونه را تعیین کنید و با مقدار داده شده در مراجع مقایسه کنید، در صورت اختلاف توضیح دهید.

۵) ثابت کنید شدت انتقال حرارت در نمونه ها مطابق فرمول مقابل است:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A}}$$

(فاصله بین ترموکوپل ها L_1، L_2، L_3 می‌باشد.)

۶) عوامل مؤثر در خطای این آزمایش کدامند؟

آزمایش شماره ۲

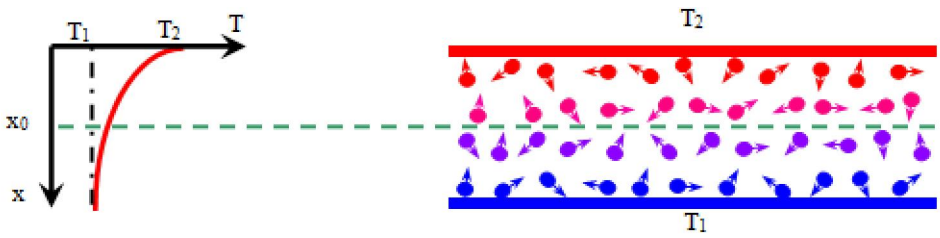
اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات

هدف

هدف از انجام این آزمایش اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات (هوا) و بررسی اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی می باشد.

تئوری

هنگامی که در جسمی گرادیان دمایی وجود داشته باشد، انتقال انرژی از ناحیه دارای دمای بالا به ناحیه دارای دمای پایین‌تر صورت می‌گیرد. انتقال حرارت توسط سه مکانیزم هدایت (conduction)، جابجایی (convection) و تشعشع (radiation) صورت می‌گیرد. انتقال حرارت به شیوه هدایت توسط مولکول‌های سازنده جسم صورت می‌گیرد. برای بررسی هدایت در گازها، گازی را درنظر بگیرید که درآن 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. این انتقال در شکل زیر مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۲) گرادیان دما در گازها

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. انتقال حرارت در جامدات توسط فعالیت اتمی به شکل ارتعاش شبکه‌ها صورت می‌گیرد. در هادی‌ها علاوه بر مکانیزم فوق، حرکت انتقالی الکترون‌های آزاد نیز در انتقال حرارت نقش دارد. انرژی انتقال یافته به ازای واحد سطح متناسب با تغییرات دما در مسیر انتقال حرارت می‌باشد:

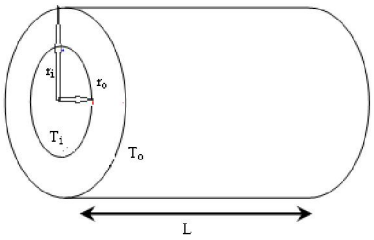
$$Q = kA\frac{dT}{dz} \qquad (۲-۱)$$

در واقع $\frac{dT}{dx}$ شیب نمودار تغییرات دما بر حسب طول است. k ضریب هدایت حرارتی نامیده می‌شود. علامت منفی بیانگر قانون دوم ترمودینامیک است که نشان می‌دهد انتقال حرارت در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. ضریب هدایت حرارتی از

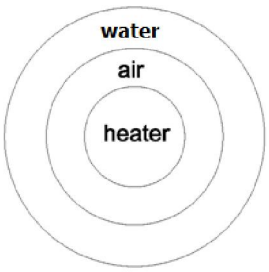
خصوصیات جسم بوده و نشان‌دهنده سرعت انتقال گرما می‌باشد. هر چه این مقدار بیشتر باشد انتقال حرارت در جسم سریع‌تر صورت می‌گیرد. ضریب انتقال حرارتی برای بعضی مواد نظیر کریستال‌های غیرمکعبی، مواد فیبری و مایعات پلیمری تابع جهت انتقال حرارت می‌باشد. ضریب هدایت حرارتی در جامدات می‌تواند تابع صعودی از دما (مثل آلومینیوم)، تابع نزولی از دما (مثل مس) و یا مستقل از دما (مثل کربن‌استیل) باشد. در گازها با افزایش دما میزان ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد و رابطه دما با ضریب هدایتی به صورت زیر می‌باشد:

$$k \propto T^{0.5} \qquad (۲-۲)$$

حال به بررسی سیستم شعاعی می‌پردازیم. استوانه‌ای به شعاع داخلی r_i و دمای T_i و شعاع خارجی r_o و دمای T_o و طول L درنظر می‌گیریم.



شکل (۲-۲) انتقال حرارت در المان استوانه‌ای



شکل (۳-۲) استوانه‌ها از نمای بالا

معادله فوریه به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$Q_r = k_r(2\pi rL)\frac{\partial T}{\partial r} \qquad (۲-۳)$$

حال با انتگرال‌گیری از معادله بالا و با استفاده از دو شرط مرزی ذکر شده به معادله حاکم در سیستم شعاعی می‌رسیم:

$$Q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{Ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \qquad (۲-۴)$$

شرح دستگاه

این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی انواع سیالات (گازها و مایعات) را دارا می‌باشد. دستگاه شامل ۳ لایه استوانه‌ای شکل است که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. درونی‌ترین لایه هیتری است توپرکه با توجه به توان تنظیم شده توسط کاربر، مقدار حرارت لازم را فراهم می‌سازد. در مرکز هیتر ترموکوپلی تعبیه شده است که امکان مشاهده دمای هیتر (T_{heater}) روی صفحه نمایشگر را میسر می سازد. 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 درنظر گرفت. در آخرین لایه استوانه‌ای نیز 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.

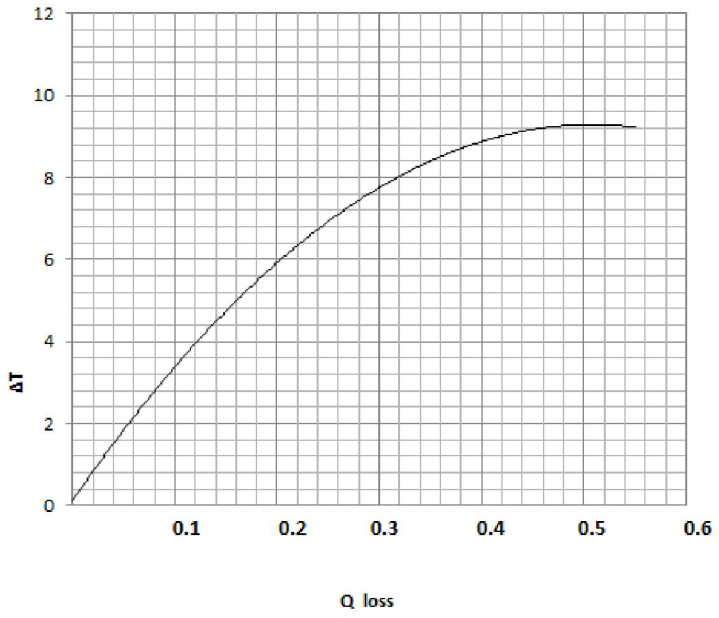
شرح آزمایش

در این آزمایش ضریب هدایت حرارتی هوا اندازه‌گیری می‌شود. قبل از انجام هر آزمایش شیر ورودی و خروجی هوا را باز کنید و از پمپ باد استفاده کنید تا هوا درون سیستم جریان داشته باشد. چند دقیقه صبر کنید تا از خروج هر گونه ناخالصی و یا سیال باقی مانده از آزمایش قبل مطمئن شوید.

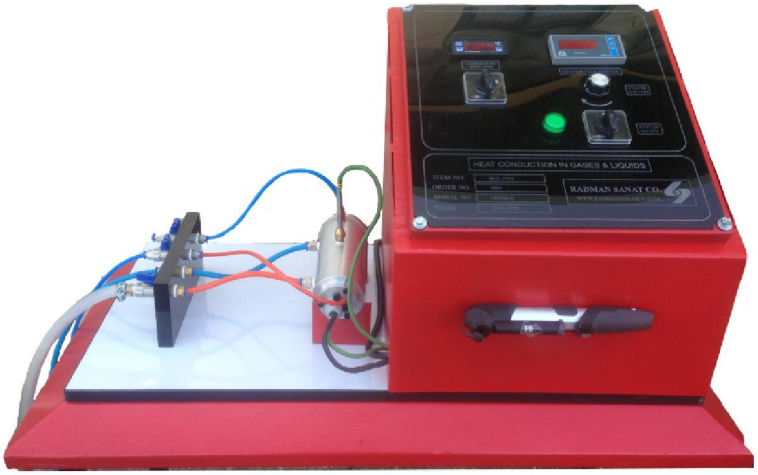
نکته: پاک بودن دستگاه از هر گونه آلودگی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا وجود مقادیر بسیار کم از هرگونه ناخالصی می تواند تأثیر بسیار زیادی در نتیجه آزمایش داشته باشد.

حال شیر خروجی هوا را ببندید و پس از چندین بار پمپ کردن هوا، سپس سریع شیر ورودی هوا را ببندید تا هوا درون استوانه حبس شود. شیر آب شهر را باز کنید تا آب درون سیستم جریان داشته باشد. هیتر را روشن کنید. ولتاژ دستگاه را روی ۶۰ ولت تنظیم کنید و به سیستم حدود ۱۵ دقیقه زمان دهید تا به حالت پایا 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 حرارتی داریم و تمام انرژی بین آب و هوا منتقل نمی‌گردد، باید مقدار حرارت خالص انتقال یافته را بدست آورید. برای این منظور اختلاف دمای بین آب و هوا را محاسبه کرده و با استفاده از شکل (۴-۲) میزان حرارت هدر رفته (Q_{loss}) را محاسبه کنید. حال با داشتن مقدار حرارت خالص انتقال یافته و با استفاده از قانون فوریه مقدار ضریب هدایت حرارتی هوا را محاسبه کنید. مساحت خارجی استوانه بین آب و هوا ۰/۰۱۷ مترمربع و مقاومت هیتر ۱۱۰۵ اهم می باشد.

برای بررسی تأثیر دما بر ضریب هدایت حرارتی هوا آزمایش را برای چند ولتاژ دیگر ۸۰ و ۹۰ ولت نیز تکرار کنید.



شکل (۴-۲) نمودار کالیبراسیون



شکل (۵-۲) نمایی از دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات

خواسته‌های آزمایش

۱) برای هر آزمایش جدول زیر را تکمیل کنید.

درصد خطا	k موجود در منابع	k محاسبه شده از آزمایشات	Q خالص	Q_{loss} (حرارت اتلافی)	Q (وات)	اختلاف دمای آب و هوا	دمای هوا (°C)	دمای آب (°C)	V (ولت)

۲) با افزایش توان مقدار ضریب هدایت حرارتی هوا افزایش می‌یابد یا کاهش؟ چرا؟

۳) چرا برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی هوا لازم است از پمپ‌باد برای فشرده کردن هوا استفاده کنیم؟

۴) چرا با وجود اینکه سیستم استوانه‌ای است می‌توان از قانون فوریه در سیستم کارتزین برای محاسبات استفاده کرد؟

آزمایش شماره ۳

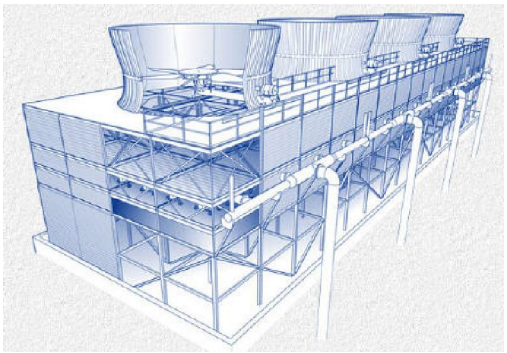
برج خنک‌کننده (Cooling Tower)

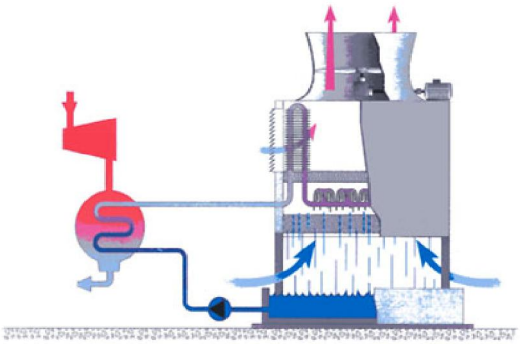
هدف:

بررسی نحوه عملکرد برجهای خنک کننده و مطالعه ارتباط بین دمای خشک و مرطوب

تئوری آزمایش:

برای صرفه‌جویی در مصرف آب که برای خنک کردن فرآیندهای مختلف در صنایع تولیدی و یا کندانسور نیروگاه بخار یا سیستم‌های تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرد، معمولاً از برج خنک‌کننده استفاده می‌گردد. وظیفه برج خنک‌کننده، خنک کردن آب گرم از طریق دفع حرارت از آن به هوای محیط می‌باشد. جریان هوا در برج خنک‌کننده بصورت طبیعی و یا بصورت اجباری به کمک فنها می‌باشد. در ظرفیتهای بزرگ استفاده از جریان طبیعی هوا اقتصادی‌تر است ولی در ظرفیتهای کوچک‌تر (مثلاً نیروگاه‌های با تولیدکمتر از ۳۰۰ مگاوات) برجهای با جریان اجباری در حال رقابت با نوع جریان طبیعی می‌باشند. از لحاظ مکانیزم تبادل حرارت برج های خنک‌کننده به دو دسته خشک و مرطوب تقسیم می‌شود. در شکل زیر یک برج خنک کننده مرطوب با جریان مکشی دیده می شود.





شکل (۱-۳) برج خنک کننده مرطوب با جریان مکشی هوا

داخل برج از آکنه‌ها پر شده است تا سطح انتقال حرارت را افزایش دهند. آب گرم از بالا با فشار بر روی این سطوح پاشیده می‌شود و در اثر نیروی جاذبه به سمت پایین حرکت می‌کند. هوا هم از پایین برج وارد شده و توسط فنی که در بالای برج قرار گرفته، مکیده می‌شود. این نوع جریان هوا یعنی جریان مکشی بر جریان دمیدنی که در آن هوا توسط فن به داخل برج دمیده می‌شود ترجیح داده می‌شود علت این موضوع کم بودن جریان برگشتی در برج خنک کننده نوع برگشتی می‌باشد. همانطور که درشکل بالا ملاحظه می شود جریان آب و هوا در خلاف جهت هم بوده و در اثر تماس بین آب و هوا مقداری از آب تبخیر

می‌شود. بدین ترتیب این مقدارآب بخار شده که گرمای نهان تبخیر خود را عمدتاً از آب دریافت می‌کند منجر به کاهش درجه حرارت آب می‌گردد. علاوه بر آن مقداری گرمای محسوس هم به دلیل اختلاف دمای آب و هوا بین آن دو مبادله می شود. مقدار آب تبخیر شده معمولاً کمتر از یک درصد کل دبی آب می‌باشد. در شکل زیر نیز برج خنک‌کننده مرطوب با جریان مکشی دیده می شود که هر یک دارای ۴ برجک در بالای برج می باشد.

برجهای خنک‌کننده مرطوب بزرگ مسائل متعددی دارند که بیشتر آنها به آب مربوط است. از جمله اینها عبارتند از: پوسیدگی آکنه‌ها (مثل چوب)، خوردگی، تشکیل رسوب و رشد جلبکها روی سطوح. مساله دیگر در رابطه با برجهای خنک‌کننده مرطوب، رطوبت زیاد در هوای خروجی از برج و در نتیجه ایجاد مه‌گرفتگی در محیط آن می‌باشد. تقطیر و یا یخ زدن مقداری از بخار موجود در هوای خروجی در زمینها، ساختمانها و خطوط انتقال نیروی مجاور مشکلاتی را به همراه دارد به خصوص اگر آب شور باشد نمکهای پاشیده شده در اطراف روی محصولات کشاورزی مانند غلات و همین طور فلزات اثر سوء می‌گذارد.

شرح دستگاه

د ستگاه از نوع سی ستم های خنک کننده ب سته می با شد که قابلیت خنک کردن آب تو سط هوا را دارد و شامل قطعات زیر می‌باشد:

- ✓ برج از صفحات پلاک سی گلاس و به صورت زیگزاگ جهت افزودن سطح تماس پر شده ا ست ابعاد صفحات ۱۵ سانتی متر در ۵/۵ سانتی متر می‌باشد ضخامت آنها نیز ۳ میلی متر است.
- ✓ حجم مخزن آب ۲۲/۵ لیتر است
- ✓ هوا توسط یک دمنده سانتریفیوژ با توان ۸۵ وات وارد برج می شود.
- ✓ المان حرارتی ۲/۵ کیلو وات که آب مخزن را گرم می کند.
- ✓ ۵ عدد ترموکوپل جهت اندازه‌گیری دمای خشـــک (مخزن، ورودی و خروجی هوا از برج ، ورودی و خروجی آب از برج)
- ✓ پمپ تغذیه با توان ۳۷۰ وات که حداکثر ظرفیت آن ۳/۶ مترمکعب بر ســـاعت اســـت و هد ۱۴/۶ متر را می‌تواند تأمین کند.
- ✓ طول برج ۸۰ سانتی متر است.
- ✓ روتامتر با حداکثر اندازه گیری دبی آب ۶۰۰ L/h
- ✓ شیر سوزنی جهت تنظیم دبی روتامتر

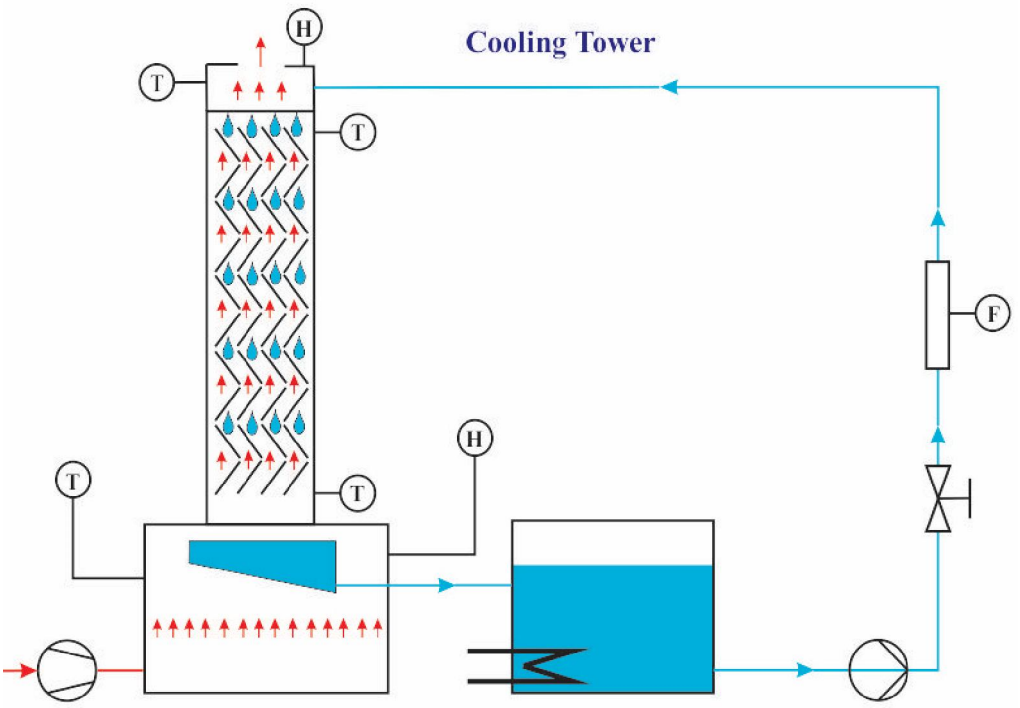
د ستگاه مورد ا ستفاده در این آزمایش جهت سرد کردن آب تو سط هوای اتمسفری می با شد. طبق شکل زیر، د ستگاه دارای مخزنی ا ست که آب مورد نیاز د ستگاه از آن تأمین می شود. با ا ستفاده از یک پمپ آب از مخزن پمپ شده و با گذ شتن از روتامتر که برای تنظیم دبی آب است در قسمت بالای برج به درون برج دوش می شود.

هوا توسط یک دمنده که در پایین برج خنک کننده قرار دارد به داخل برج دمیده می شود. هوا با عبور از رطوبت سنج و اندازه گیری دمای مرطوب و خشک (T_1, T_{H1}) از پایین وارد برج می شود و در مجاورت آب قرار می‌گیرد و پس از اندازه گیری درجه حرارت خشک و مرطوب (T_2, T_{H2}) از برج خارج می‌شود.

از دستگاه سرعت سنج (آنمومتر) جهت اندازه گیری دبی و سرعت هوا در خروجی برج استفاده می شود.

شکل (۳-۲) دستگاه سرعت سنج سیال (آنمومتر)

برای سرد کردن آب ابتدا تو سط المان حرارتی موجود در مخزن آب دمای آن را به حد لازم می ر سانیم و با ورود به برج آن را مجاور هوای محیط می نمائیم تا گرمای خود را از د ست بدهد در هر یک از مراحل یاد شده مقداری از آب تبخیر می شود که برای جبران آن از آب جبرانی MakeUp ا ستفاده می شود. مقدار این آب تو سط صفحه مدرج نصب شده بر روی مخزن سیستم قابل اندازه‌گیری است. همچنین کلید دماهای نقاط مختلف سیستم و تنظیم توان المان حرارتی موجود در مخزن آب بر روی تابلوی فرمان قرار دارد.



شکل (۳-۳) نمایی از برج خنک کننده

روش انجام آزمایش

۱) قبل از روشن نمودن پمپ، از بسته نبودن شیر روتامتر اطمینان حاصل کنید تا به پمپ آسیبی نرسد.
۲) به علت نوسانات ولتاژ برق و عملکرد پمپ لازم است که در طول آزمایش دبی آب توسط شیر روتامتر به طور مرتب تحت کنترل با شد تا از جریان دبی مورد نظر در طول آزمایش اطمینان حا صل شود. بدون شک این نظارت منجر به دقت در نتایج خواهد شد.
۳) هر آزمایش در یک فاصله زمانی انجام می‌شود. در ابتدای آن کرنومتر را روشن کرده و پس از رسیدن به دمای مورد نظر کرنومتر را متوقف کرده و اعداد مربوط به پارامترهای خوا سته شده را در جدول اعداد مربوطه یادداشت کنید.
۴) در فواصل بین هر دو آزمایش ارتفاع آب مخزن را با افزودن آب تقریبا در سطح مشخصی ثابت نگه دارید.
۵) قبل از آنکه پمپ آب را روشن کنید جریان هوا را باید برقرار کنید. عدم اجرای این بند باعث اعوجاج صفحات پلاکسی گلاس می شود.
۶) المان حرارتی آب را روشن کنید Set Point را بر روی مقدار ۶۰ درجه تنظیم کنید.
۷) دمنده را بر ا ساس جدول زیر تنظیم کنید و دبی دقیق آن را تو سط آنومتر اندازه گیری کنید. (دقت: دبی هوا را قبل از باز کردن شیر آب گرم اندازه بگیرید)
۸) دبی آب را بر اساس جدول زیر توسط شیر روتامتر تنظیم کنید.
۹) ازمایش را برای ۹ حالت مختلف تکرار کنید و موارد خواسته شده را یادداشت نمایید.

جدول (۱-۳) تنظیم حالات مختلف

دبی آب / سرعت هوا m/s	۱۰۰ lit/hr	۲۰۰ lit/hr	۳۰۰ lit/hr
۵	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
۸	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶
۱۱	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹

جدول (۲-۳) اندازه‌گیری داده‌ها

	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹
	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=	Q= u=
دمای آب مخزن، T_S									
دمای آب ورودی، T_{wi}									
دمای آب خروجی، T_{wo}									
دمای هوای ورودی، T_{ai}									
دمای هوای خروجی، T_{ao}									
رطوبت هوای ورودی، H_{ai}									
رطوبت هوای خروجی، H_{ao}									
ارتفاع آب جبرانی، $\Delta H, mm$									
بازه زمانی، $\Delta t, s$									

خواسته‌های آزمایش

۱) تاثیر افزایش شدت جریان آب گرم بر دمای هوای خروجی و رطوبت هوا را با رسم نمودار تحلیل کنید.

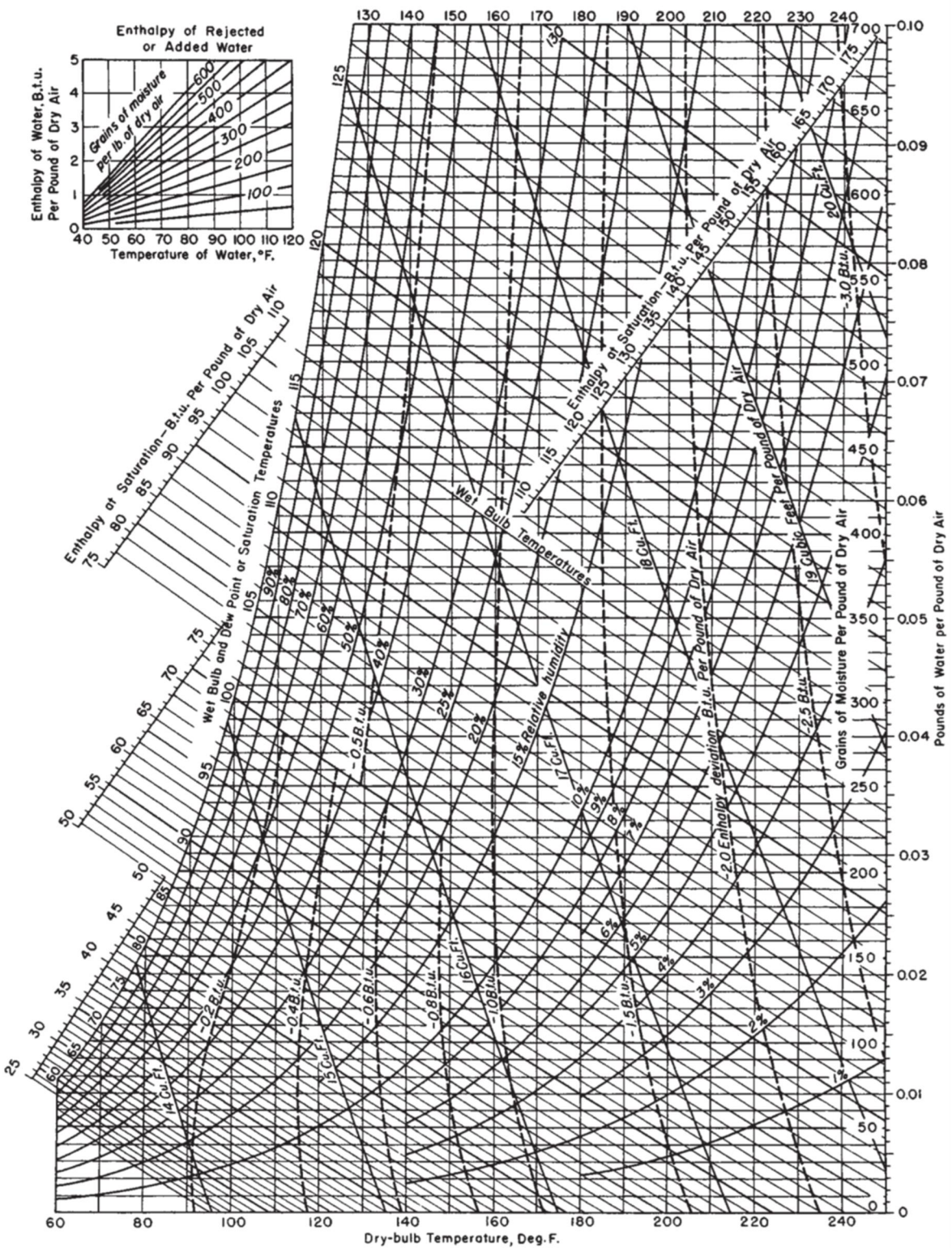
۲) نمودار دمای هوای خروجی و رطوبت هوا را برحسب شدت جریان هوا را رسم کرده و تحلیل کنید.

۳) موازنه جرم را برای هر آزمایش بنویسید.

۴) برای هر آزمایش موازنه انرژی را برای آب بنویسید.

۵) با استفاده از نمودارهای آنتالپی (صفحه بعد)، تغییر انرژی را برای هوا بدست آورید.

۶) خطاهایی که در این آزمایش مانع از رسیدن به نتیجه مطلوب می‌شوند از چه عواملی ناشی می‌گردند؟


Enthalpy of Rejected or Added Water
Enthalpy of Water, B.t.u. Per Pound of Dry Air
Grains of moisture Per lb. of dry air
Temperature of Water, °F.
Enthalpy at Saturation – B.t.u. Per Pound of Dry Air
Wet Bulb and Dew Point or Saturation Temperatures
Wet Bulb Temperatures
Relative humidity
Cubic Feet Per Pound of Dry Air
Enthalpy deviation – B.t.u. Per Pound of Dry Air
Grains of Moisture Per Pound of Dry Air
Pounds of Water per Pound of Dry Air
Dry-bulb Temperature, Deg. F.

آزمایش شماره ۴

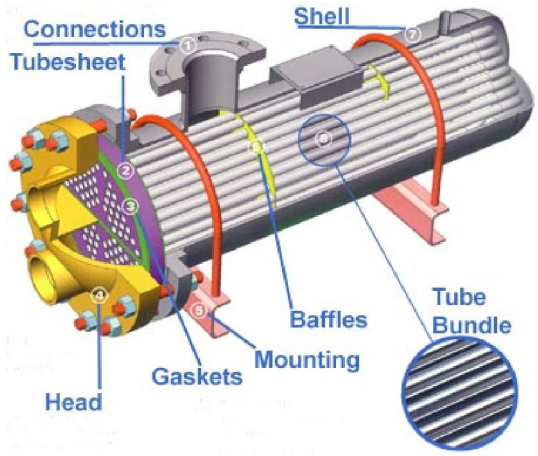
مبدل حرارتی پوسته و لوله

هدف:

بررسی اصول اساسی که مبدل های حرارتی بر مبنای آنها کار می‌کنند. همچنین بررسی موازنه انرژی و محاسبه افت و قابلیت کارایی و مقایسه میزان انتقال حرارت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله.

تئوری آزمایش:

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله که برای انتقال حرارت بین دو سیال بطور وسیعی در صنعت استفاده می‌شود، شامل یک یا چند لوله است که در آنها سیال اول از طریق ورودی‌ها بداخل لوله جریان می‌یابد و یک پوسته است که لوله‌ها درون آن قرار دارند و از آن سیال دوم یا سیال طرف پوسته عبور می‌کند. در یک مبدل حرارتی، حرکت دو سیال درون مبدل می‌توانند به صورت همسو (co-current) و یا به صورت غیر همسو (counter-current) تنظیم شوند.



شکل (۱-۴) شماتیک یک مبدل پوسته و لوله

در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، حرارت از سیال بوسیله جابجایی اجباری به دیواره لوله منتقل می‌شود، سپس حرارت از طریق هدایت از میان ضخامت لایه و بعد از آن بوسیله جابجایی اجباری به سیال دوم، در طرف دیگر لوله انتقال می‌یابد. قانونی که هدایت را بیان می‌کند، یک رابطه تجربی است که همان قانون فوریه می‌باشد. برای انتقال حرارت یک بعدی این قانون توسط رابطه مقابل بیان می‌شود:

$$Q = -kA\frac{dT}{dx} \qquad (۴-۱)$$

که Q شدت جریان حرارتی، A سطح مقطع انتقال حرارت و k ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله است. جابجایی دلالت بر حرکت سیال به منظور انتقال انرژی دارد. بنابراین مطالعه دینامیک سیالات اهمیت زیادی دارد. برای حل مسائل ساده جهت

تعیین ضریب انتقال از روش های تجربی استفاده می‌شود. نیوتون معادله عمومی انتقال حرارت جابجایی را به صورت زیر ارائه داده است:

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad (۴-۲)$$

که h ضریب انتقال حرارت جابجایی، T_w دمای دیواره، A سطح انتقال حرارت جابجایی و T_f دمای سیال درون لوله است.

از آنالیز ابعادی برای تعیین عدد بی‌بعد ناسلت جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت استفاده می‌شود. برای جریان درهم در داخل لوله ناسلت چنین است:

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.2Re^{0.6}Pr^{0.33} \quad (۴-۳)$$

همانطور که گفته شد در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، انتقال حرارت بوسیله جابجایی و هدایت اتفاق می‌افتد. استفاده از تشابه الکتریکی برای محاسبه گرما و مقاومت حرارتی چنین وضعیتی مناسب است. مقدار مقاومت انتقال حرارت بین دیواره و دو فیلم را می‌توان بوسیله سه مقاومت سری در نظر گرفت، در نتیجه:

$$R = \sum r = \frac{1}{h_i} + \frac{L_w}{k_w} + \frac{1}{h_o} \quad (۴-۴)$$

اگر ضخامت دیواره لوله نسبتاً زیاد باشد، یعنی سطح انتقال حرارت داخل و خارج لوله تفاوت قابل توجهی داشته باشد، آنگاه:

$$R = \sum r = \frac{1}{h_i\left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{L_w}{k_w} + \frac{1}{h_o} \quad (۴-۵)$$

که T_i و T_o دمای سیالهای دو طرف دیواره، L ضخامت لوله و D_i و D_o به ترتیب قطر داخلی و خارجی لوله می‌باشند.

در هنگام طراحی مقدار حرارت منتقل شده همراه با دماهای ورودی و خروجی دو سیال مشخص است. هدف طراحی مبدل است که این سطح لازم برای این مقدار تبادل گرما را محاسبه کند. چون مقدار گرما را می‌دانیم پس برای بدست آوردن سطح مورد نیاز لازم است که h_i ، h_o، k_w ، L_w و ΔT را بدانیم. آنگاه می‌توانیم مساحت را بدست آوریم:

$$A = \frac{Q}{\Delta T} \times R \quad (۴-۶)$$

یا

$$A = \frac{q}{U \times (T_i - T_o)} \quad (۴-۷)$$

که U ضریب کلی انتقال حرارت مبدل نامیده می‌شود. همانطور که اشاره شد، وقتی که اختلاف مساحت سطح حرارتی دو طرف قابل توجه باشد، همانند آنچه که در مورد یک لوله ضخیم اتفاق می‌افتد:

$$\frac{1}{U} = R = \left(\frac{1}{h_i\left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{L_w}{k_w} + \frac{1}{h_o}\right) \quad (۴-۸)$$

در معادله بالا A عبارتست از سطح کلی انتقال حرارت مبدل حرارتی، بنابراین میزان شار حرارتی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q = UA\Delta T \qquad (۴-۸)$$

دقت شود که در معادلات فوق با یک تقریب نسبتاً مناسبی جدار لوله همانند جدار یک دیوار تخت در نظر گرفته شده است. روش استفاده از مقدار U روش مفیدی است زیرا در این روش این امکان وجود دارد که آرایش های مختلفی برای مبدل‌های حرارتی مورد نظر فرض شود، سپس با محاسبه مقدار معادله و بررسی آن مشخص می‌گردد که آیا مبدل حرارتی مورد نظر برای انتقال گرمای لازم مناسب است یا نه.

در اکثر موارد عملی رسوب بر روی سطوح مبدل حرارتی تشکیل می‌شود و با ایجاد یک مقاومت اضافی انتقال حرارت را کم می‌کند. فاکتور رسوب را می‌توان بشکل زیر در ضریب انتقال حرارت کلی دخالت داد.

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_i} + R_{fi} + \frac{L_w}{k_w} + \frac{A_i}{A_o h_o} + R_{fo}\right) \qquad (۴-۹)$$

R_{fi} و R_{fo} مقاومتهای اضافی وابسته به رسوب در طرفین سطح انتقال حرارت می‌باشد. ضرایب رسوب برای سیالهای مختلف و سطوح متفاوت درکتابهای مربوط به مبدلهای حرارتی و انتقال حرارت موجود می‌باشد.

مقدار تغییرات دما در معادله‌ی $Q = UA\Delta T$ نیاز به توجه بیشتر دارد. درون مبدل حرارتی اختلاف دمای موضعی از یک سیال تا سیال دیگر به میزان ثابتی تغییر می‌یابد. بدین منظور یک آنالیز ساده یک اختلاف دمای ثابت را نشان می‌دهد. این اختلاف دمای ثابت معادل اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (ΔT_{LMTD}) نامیده می‌شود.

$$Q = UA\Delta T = UA\Delta T_{LMTD} \qquad (۴-۱۰)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{ln\frac{\theta_2}{\theta_1}} \qquad (۴-۱۱)$$

$\theta_1 = T_{h1} - T_{c1}$: اختلاف دمای سیال گرم و سرد در یک طرف مبدل

$\theta_2 = T_{h2} - T_{c2}$: اختلاف دمای سیال گرم و سرد در طرف دیگر مبدل

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش از قسمت های اصلی زیر تشکیل شده است:

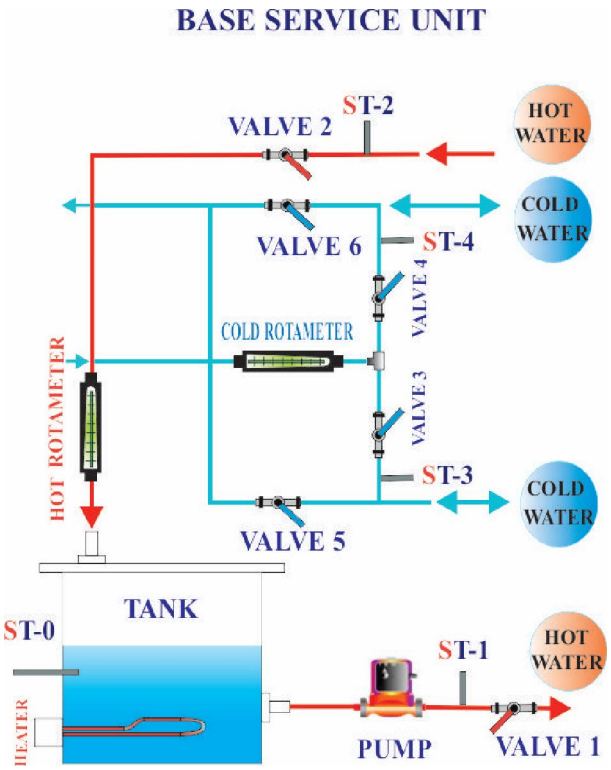
منبع تولید آب گرم: این قسمت شامل یک مخزن و یک گرمکن الکتریکی با قدرت ۲/۵ کیلووات که آب را تا دمای مورد نظر گرم می‌کند. برای کنترل درجه حرارت آب گرم ورودی $T_1 = T_{setpoint}$ از یک ترموستات استفاده می‌شود. دمای آب گرم ورودی را می‌توان توسط صفحه نمایشگر تنظیم کرد (بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتیگراد). مخزن بایستی با آب مقطر پر شود تا از

رسوب‌گرفتگی لوله‌ها جلوگیری شود. برای تنظیم دمای آب و توان مصرفی هیتر، از یک دیمر استفاده می‌شود که مقدار ولتاژ و آمپراژ جریان را توسط ولت‌متر و آمپرمتر تعبیه شده در روی دستگاه می‌توان مشاهده کرد.

لوله‌ها و شیرهای کنترل جریان: یک عدد پمپ آب گرم را در سیستم به گردش درمی‌آورد و شدت جریان آن توسط یک روتامتر قابل تنظیم است. از طرفی، آب سرد مورد نیاز آزمایش از آب لوله‌کشی تامین می‌گردد و می‌توان با استفاده از شیر ورودی و روتامتر تعبیه شده در روی دستگاه، شدت جریان آب سرد را تنظیم نمود. جهت ایجاد جریان همسو و ناهمسو، مسیر حرکت آب سرد با استفاده از ۴ شیر به کار رفته در سیستم تعیین می‌گردد.

مبدل حرارتی پوسته و لوله: این مبدل شامل یک پوسته و ۳۰ لوله از جنس استیل است. قطر داخلی لوله ۴ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۶ میلی‌متر و طول آن ۷۲ cm است. قطر داخلی پوسته ۷۴ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۸۰ میلی‌متر است.

سیستم اندازه گیری دما: برای اندازه‌گیری دما ۵ عدد ترمومتر تعبیه شده است که دمای مخزن آب گرم و دماهای ورودی و خروجی سیال سرد و گرم را بر روی برنامه مربوطه نشان می‌دهد.



شکل (۲-۴) شماتیکی از سیستم مبدل پوسته و لوله

نحوه انجام آزمایش

۱. کلید هیتر را بر روی کنترلر دستگاه روشن نموده و پس از اتصال دستگاه به برنامه کامپیوتری، دمای set point را حداکثر بر روی ۷۰ درجه سانتیگراد تنظیم کنید. در صورتی که دمای نمایش داده شده در نمایشگر در هنگام انجام آزمایش برای هر کدام از سنسورها، از ۹۰ درجه سانتیگراد تجاوز کرد، سریعا دستگاه را خاموش کنید.

۲. برای ایجاد جریان همسو، شیرهای ۳ و ۶ را باز کرده و شیرهای ۴ و ۵ را می‌بندیم.

۳. برای ایجاد جریان ناهمسو شیرهای ۳ و ۶ را بسته و شیرهای ۴ و ۵ را باز می‌کنیم.

۴. برای به جریان درآمدن آب گرم، کلید پمپ را روشن کرده و از شیر ۱ (ورود جریان آب گرم) و شیر ۲ (خروج آب گرم) برای کنترل شدت جریان آب گرم استفاده می‌کنیم. دقت کنید که قبل از انجام هر آزمایش و توسط پیچ تعبیه شده روی پمپ، عمل هواگیری را انجام دهید.

۵. در هر مرحله از آزمایش، پس از رسیدن سیستم به حالت پایا (عدم تغییر دما با زمان) دمای مد نظر را با استفاده از برنامه کامپیوتری بخوانید.

۶. برای ۴ حالت مختلف جدول زیر را تکمیل کنید:

الف) *جریان همسو و ناهمسو با پرانتل ثابت*

	$Q_h, lit/hr$	$Q_c, lit/hr$	T_{sp}, °C	$T_{\text{مخزن}}$, °C	T_{hi}, °C	T_{ho}, °C	T_{ci}, °C	T_{co}, °C
جریان همسو پرانتل ثابت	۲۰۰	۲۰۰	۵۰					
	۲۰۰	۳۰۰	۵۰					
	۳۰۰	۲۰۰	۵۰					
جریان ناهمسو پرانتل ثابت	۲۰۰	۲۰۰	۵۰					
	۲۰۰	۳۰۰	۵۰					
	۳۰۰	۲۰۰	۵۰					

الف) *جریان همسو و ناهمسو با رینولدز ثابت*

	$Q_h, lit/hr$	$Q_c, lit/hr$	T_{sp}, °C	$T_{\text{مخزن}}$, °C	T_{hi}, °C	T_{ho}, °C	T_{ci}, °C	T_{co}, °C
جریان همسو رینولدز ثابت	۲۰۰	۲۰۰	۵۰					
	۲۰۰	۲۰۰	۶۰					
	۲۰۰	۲۰۰	۷۰					
جریان ناهمسو رینولدز ثابت	۲۰۰	۲۰۰	۵۰					
	۲۰۰	۲۰۰	۶۰					
	۲۰۰	۲۰۰	۷۰					

خواسته های آزمایش

۱) با استفاده از نتایج بدست آمده، جدول صفحه بعد را تکمیل کنید.

۲) یک نمونه از محاسبات ضریب انتقال حرارت کلی UA واقعی و نظری دستگاه را بنویسید.

	$\dot{v}_h$ m^3/s	$\dot{v}_c$ m^3/s	T_{hi} °C	T_{ho} °C	T_{ci} °C	T_{co} °C	$\overline{T_h}$ °C	$\overline{T_c}$ °C	ρ_h $\frac{m^3}{kg}$	ρ_c $\frac{m^3}{kg}$	c_{p_h} $\frac{J}{kg.K}$	c_{p_c} $\frac{J}{kg.K}$	$\dot{m}_h$ kg/s	$\dot{m}_C$ kg/s	Q_h W	Q_c W	$\overline{Q}$ W	ΔT_{LMTD}	Actual (UA) $W/°C$	Theoret. (UA) $W/°C$
جریان همسو پرانتل ثابت																				
جریان ناهمسو پرانتل ثابت																				
جریان همسو رینولدز ثابت																				
جریان ناهمسو رینولدز ثابت																				

خواص فیزیکی آب در دماهای مختلف

Temp °C	Density $\frac{kg}{m^3}$	Dynamic Viscosity $\frac{kg}{ms}$	Specific Heat $\frac{j}{kg\ k}$	Thermal conductivity $\frac{w}{m\ k}$	Prandtel Number $\frac{c_p\ \mu}{k}$	Specific Entalphy $\frac{kj}{kg}$	Specific Entrophy $\frac{kj}{kg\ k}$
0	1029	2600	3750	0.554	18.00	0	0
10	1022	1850	3830	0.554	12.98	37.9	0.136
20	1025	1400	3895	0.554	9.96	76.4	0.260
30	1022	1100	3956	0.554	7.99	115.5	0.400
40	1018	980	4018	0.554	6.64	155.4	0.520
50	1014	780	4082	0.554	5.85	195.9	0.686
60	1010	610	4124	0.554	4.62	236.9	0.811

$k_{steel} = 45\ {}^{W}/_{m°c}$

آزمایش شماره ۵

حرارت دادن مایعات در مخزن

هدف آزمایش

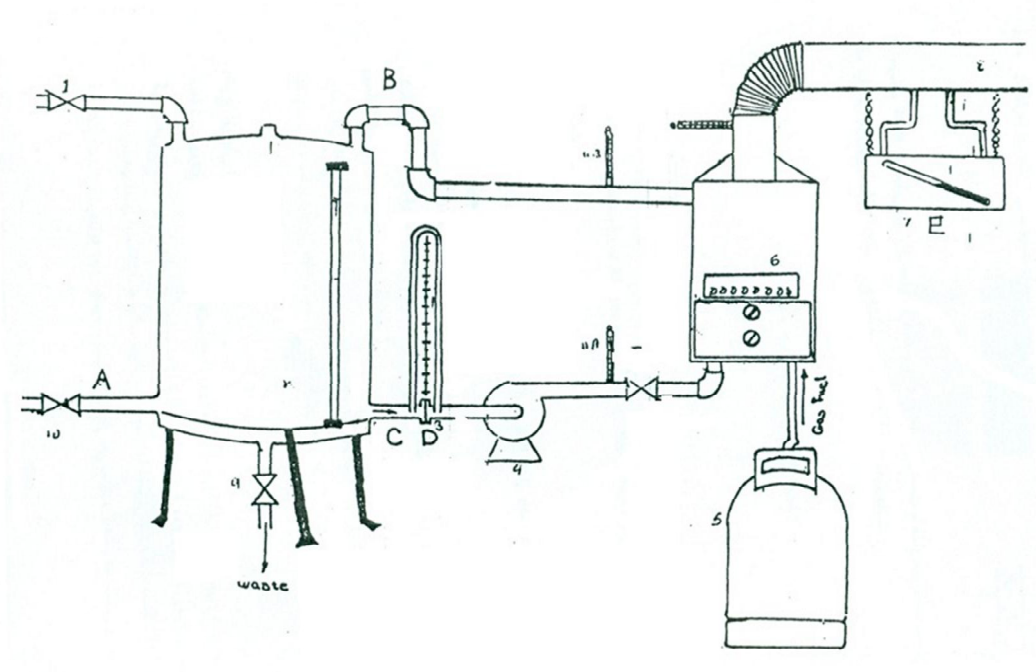
در این آزمایش با اصول کلی گرم کردن مایعات درون یک مخزن و برقراری موازنه کلی انرژی آشنا می‌شویم.

تئوری آزمایش

در هر واحد مسکونی یا تجاری به یک آبگرمکن جهت مصارف روزانه نیاز می‌باشد. همینطور در آزمایشگاه انتقال حرارت، دستگاههای مختلفی مثل مبدلهای حرارتی به آب گرم با دماهای مختلف نیازمندند. لذا از یک دستگاه آبگرمکن ساده برای تامین آب گرم لازم استفاده می‌شود. در این آزمایش آب سرد موجود در یک مخزن بوسیله احتراق گاز شهری (متان) گرم می‌شود. مقداری از گرمای حاصل از احتراق متان صرف افزایش دمای آب می‌شود اما قسمتی از آن نیز هدر می‌رود.

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل، از قسمتهای زیر نشان تشکیل است:



شکل (۱-۵) نمایی از دستگاه آزمایشگاهی

مخزن: مخزن آب موجود در این دستگاه یک مخزن استوانه‌ای است که دارای دو ورودی و سه خروجی می‌باشد. آب سرد مورد نیاز از بالای مخزن وارد می‌شود وآب گرم از مسیر A خارج می‌شود. از آب گرم شده برای راه‌اندازی دستگاههای دیگر استفاده می‌شود. از قسمت پایین مخزن خروجی به فاضلاب قرار دارد که در موارد نیاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. آب گرم شده نیز از مسیر B وارد مخزن می‌شود. از مسیر C نیز آب موجود در مخزن به طرف قسمتهای گرم کننده آب می‌رود. آبنمایی نیز در کنار مخزن تعبیه شده است که مقدار ارتفاع آب موجود در مخزن را نمایش می‌دهد. قطر داخلی مخزن ۵۷ سانتیمتر است.

لوله های انتقال: در این آزمایش لوله‌های انتقال آب گرم با رنگ قرمز و لوله های انتقال آب سرد با رنگ زرد مشخص شده‌اند.

اریفیس: اریفیس که دراینجا با D نشان داده شده، درست قبل از ورودی پمپ قرار دارد و برای اندازه‌گیری دبی آب ورودی به گرمکن به کار می‌رود.

پمپ: برای انتقال آب از مخزن به گرمکن به کار می‌رود. مشخصات پمپ به کار رفته به قرار زیر است: دور موتور پمپ ۲۸۵۰ دور بر دقیقه است. حداکثر ارتفاعی که آن پمپ می‌تواند ایجاد کند ۳۷/۵ متر می‌باشد. این پمپ می‌تواند ۵ تا ۳۵ لیتر بر دقیقه آب را پمپ کند.

کوره: کوره این دستگاه متشکل از یک کپسول گاز و یک لوله مارپیچی می‌باشد. لوله حاوی آب سردتر، تحت گرمای آزاد شده از احتراق متان گرمتر می‌شود.

لوله خروجی گاز: گازهای حاصل از سوختن متان توسط این لوله به خارج از آزمایشگاه منتقل می‌شود. قطر لوله دودکش ۶ اینچ و فاصله ۲ دماسنج نصب شده روی این لوله ۸۰ سانتی متر می‌باشد.

دماسنج‌ها: در این دستگاه سه دماسنج برای اندازه‌گیری دمای آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد: یکی برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی به گرمکن، یکی برای اندازه‌گیری دمای آب خروجی از گرمکن و دیگری برای اندازه‌گیری دمای آب درون مخزن. همچنین از دو دماسنج دیگر برای اندازه‌گیری دماهای گازهای خروجی از گرمکن در پایین و بالای دودکش استفاده می‌شود.

وسیله تنظیم درجه حرارت مورد نیاز مخزن: درجه تنظیم دمای آب را می‌توان روی هر دمای دلخواهی تنظیم کرد. بعد از تعیین دما، جریان گاز تا حصول به این دما برقرار می باشد و بعد از رسیدن به این دما به طور خودکار قطع می‌شود.

شرح آزمایش

ابتدا شیر ورودی آب سرد را باز می‌کنیم. بعد از ورود مقدار آب مورد نیاز درون مخزن، این شیر و شیر خروجی آب گرم را می‌بندیم. پمپ را روشن می‌کنیم. دمای مورد نیاز را تعیین کرده و کوره را روشن می‌نماییم.

بعد از رسیدن دمای آب مخزن به دمای مطلوب که ۶۰ تا ۷۰ درجه است می‌توان پمپ را خاموش کرد. (البته دستگاه کنترل دما به طور اتوماتیک بعد از رسیدن به دمای مطلوب، پمپ را خاموش می‌نماید و کاهش حد ناشی از خاموش شدن پمپ،

شیرهای فشار جریان گاز را می‌بندد و باعث می‌شود که شعله کوره موقتاً خاموش شود. اگر تغییر دمایی در آب مخزن ایجاد شود، دوباره پمپ روشن می‌شود و فرایند تکرار می‌گردد).

روش انجام آزمایش

برای انجام آزمایش ابتدا شیر شماره ۱ را باز می‌کنیم تا مخزن آب تا ارتفاع حدود ۶۰ سانتیمتر از آب سرد پر شود. پس از آنکه ارتفاع مخزن به حد مطلوب رسید، شیر شماره ۱ را می بندیم. پمپ را روشن می‌کنیم تا آب را به درون کوره آبگرمکن پمپ کند. دمای آب ورودی به پمپ وکوره توسط دماسنج ۱۱A مشخص می‌شود. آب پس از گرم شدن از کوره خارج می‌شود. دمای آب خروجی از کوره را می‌توان از طریق دماسنج ۱۱B مشخص نمود. این آب به آب داخل تانک افزوده شده و دمای آن را بالا می برد.

دبی آب ورودی به آب را می توان توسط اریفیس با استفاده از رابطه زیر تعیین کرد:

$$\dot{m} = \rho C_d A_0 \sqrt{2 \times \frac{\Delta h}{\rho}} \qquad (۵-۱)$$

C_d از مشخصات اریفیس بوده و مساوی ۰/۴۲ بوده و قطر اسمی لوله ورودی اوریفیس $\frac{3}{4}$ اینچ است. ρ چگالی آب و Δh اختلاف ارتفاع سیال دو سر اریفیس می‌باشد. میزان حرارت داده شده به آب در گرمکن بر واحد زمان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \qquad (۵-۲)$$

اگر فرض کنیم جرم آب در داخل مخزن M باشد، تغییر انرژی آب درون مخزن در مدت یک ثانیه برابر خواهد بود با:

$$Q = [M - \Delta m] C_p (T_{2M} - T_{1M}) \qquad (۵-۳)$$

که Q میزان حرارت اضافه شده به آب درون مخزن، T_{1M} و T_{2M} دمای آب درون مخزن در قبل و بعد از یک زمان مشخص، M جرم آب کل درون مخزن و Δm مقدار آبی که درون لوله‌ها در جریان است.

همچنین می‌توان دبی گاز خروجی را با اندازه‌گیری دمای بالا و پایین دودکش محاسبه کرد. چون حرارت هدایت شده به بیرون (جابجایی آزاد) از جداره دودکش برابر تغییر انرژی محسوس گاز در عبور از دودکش است لذا با موازنه انرژی می‌توان دبی جرمی و حجمی گاز خروجی از دودکش و همچنین دبی گاز متان مصرفی را با فرض سوختن کامل محاسبه نمود.

خواسته‌های آزمایش

۱) برای آزمایش جدول زیر را کامل کنید.

ارتفاع آب مخزن: عدد اولیه کنتور گاز:					
زمان (دقیقه)	دمای مخزن	دمای آب ورودی به آبگرمکن	دمای آب خروجی از آبگرمکن	دمای پایین دودکش	دمای بالای دودکش
۰					
۵					
۱۰					
۱۵					
۲۰					
۲۵					
۳۰					
عدد ثانویه کنتور گاز: اختلاف ارتفاع مانومتر:					

۲) موازنه کلی انرژی را برای سیستم بنویسید.

۳) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و روابط لازم موجود در مراجع، مقدار ضریب جابجایی آزاد از دودکش و اتلاف گرما از دیواره دودکش را حساب نمایید.

۴) با فرض سوختن کامل متان و مقدار گرمای اتلافی از دیواره دودکش، مقدار دبی گاز خروجی از دودکش را تعیین کنید.

۵) مقدار کل گاز متان سوخته شده را محاسبه نمایید.

۶) با داشتن دبی آب پمپاژ شده مدت زمان لازم برای گرم شدن مخزن از دمای محیط به دمای ۹۰ درجه سانتی گراد را محاسبه کنید. (با در نظر گرفتن افت حرارتی از مخزن)

آزمایش شماره ۶

انتقال حرارت جابجایی اجباری

هدف آزمایش

آشنایی با جابجایی اجباری از سطوح فین دار و پین دار در کانال عمودی با جریان عرضی

تئوری آزمایش

انتقال حرارت جابجایی نوعی از انتقال حرارت در سیالات است که در آن حرارت بین لایه‌های مختلف سیال تبادل می‌شود. سیال می‌تواند ساکن یا متحرک باشد، اگر سیال ساکن باشد جابجایی را آزاد و اگر متحرک باشد، جابجایی را اجباری می‌گویند. در جابجایی اجباری عوامل خارجی نظیر فن، دمنده، و .... وجود دارد که باعث حرکت سیال می‌شود.

جسم جامدی با سطح جانبی A_s و دمای T_s را در محیط با دمای T_∞ در نظر بگیریم، مقدار حرارت انتقالی از جسم به محیط طبق معادله زیر به دست می آید:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \qquad (۶-۱)$$

که h ضریب انتقال حرارت می‌باشد. افت حرارت المان در مدت زمان dt برابر است با:

$$qdt = -mCdT \qquad (۶-۲)$$

q را از تلفیق دو معادله می‌توان حذف کرد:

$$\frac{dT}{T_s - T_\sigma} = -\frac{hAdt}{mC} \qquad (۶-۳)$$

انتگرال‌گیری از معادله بالا نتیجه می‌دهد:

$$\ln(T_s - T_\infty) - \ln(T_0 - T_\infty) = -\frac{hA}{mC}t \qquad (۶-۴)$$

که T_0 درجه حرارت المان در لحظه $t = 0$ است.

میزان انتقال حرارت نسبت مستقیم با میزان سطح تماس دارد. به عبارت دیگر با افزایش سطح تماس می‌توان میزان انتقال حرارت را افزایش داد، در عمل جهت افزایش سطح از اضافه کردن پره‌های عمود بر سطح از نوع صفحه‌ای که به اختصار آن را فین (Fin) می‌نامیم و یا میله‌های استوانه‌ای (Pin) که به بدنه متصل می‌شوند، استفاده می‌کنند. این سطوح جدید را اصطلاحاً سطوح گسترده یا افزایش یافته (Extended Surface) می‌گویند.

علاوه بر سطح، سرعت عبور سیال نیز تاثیر مستقیمی بر میزان انتقال حرارت دارد. معمولا رابطه بین عدد رینولدز با عدد ناسلت به صورت رابطه توانی می‌باشد:

$$Nu = ARe^B \qquad (۶-۶)$$

شرح دستگاه

این دستگاه شامل یک کانال عمودی است. این کانال طوری طراحی شده که دما و سرعت هوای ورودی و خروجی به آن را به سادگی می‌توان اندازه‌گیری کرد و با قرار دادن انواع سطوح گرم با ابعاد مشخص در جریان هوا، آنها را مورد مطالعه قرار داد. در قسمت بالای این کانال یک فن قرار دارد که به کمک آن می‌توان جریان هوای مورد نیاز در حالت جابجایی اجباری را تامین کرد. سرعت چرخش فن توسط یک دیمر قابل تنظیم است. یک هیتر برای گرم کردن صفحه وجود دارد که توان مصرفی آن را نیز می‌توان توسط یک دیمر کنترل کرد. دو سنسور دما برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند که توسط یک کلید سلکتوری به یک صفحه نمایشگر متصل شده‌اند. همچنین دو سنسور دما برای دمای پایه صفحه و دمای هوای عبوری از روی صفحه وجود دارند که دمای آنها را می‌توان از دو صفحه نمایشگر در نظر گرفته شده خواند. یک عدد ولت‌متر و یک عدد آمپرمتر نیز روی دستگاه تعبیه شده که توان مصرفی مجموعه فن و هیتر را نشان می‌دهد.

با استفاده از این سیستم می‌توانیم ضریب انتقال حرارت در حالت جابجایی آزاد و اجباری را برای سطوح زیر به دست آوریم:

۱)سطح پره‌دار از نوع پین (Pinned heat sink)

۲)سطح پره‌دار فین (Finned heat sink)

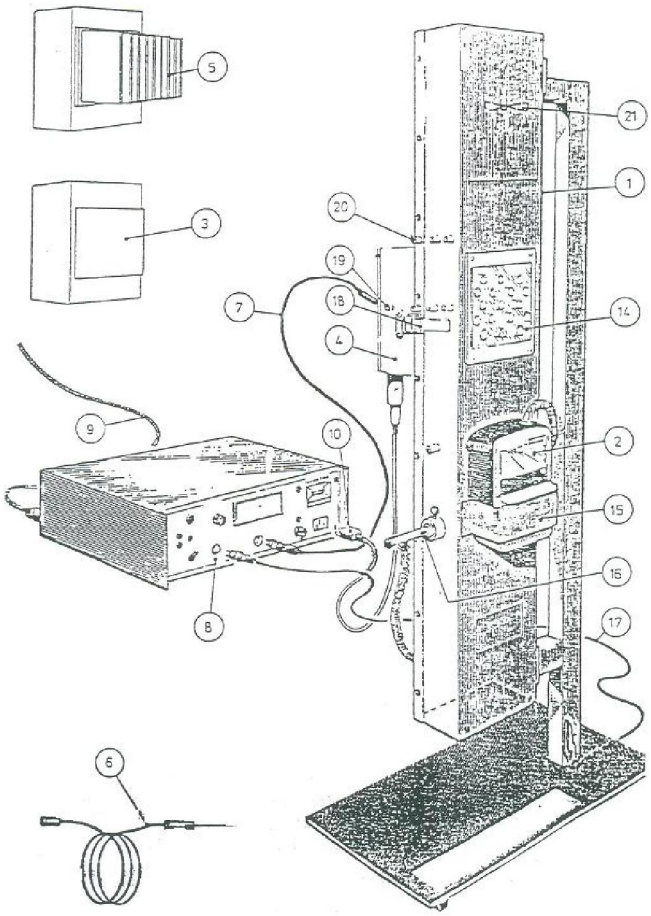
هر یک از این قطعات به طور مستقل توسط دو گیره داخل کانال در قسمتی خاص قرار می‌گیرند. به کمک آنها می‌توان ضریب انتقال حرارت در جابجایی آزاد و اجباری را در حالت عمودی به دست آورد.

درون هر یک از مبدل‌های ذکر شده (سطوح صاف یا پره دار) یک المان گرمایی قرار دارد که دمای ماکزیمم آنها توسط یک ترموستات که داخل آنها قرار دارد، کنترل می‌شود. در طول انجام آزمایش بایستی موارد زیر را مد نظر قرار داد:

۱- در آزمایش‌های مربوط به جابجایی آزاد، کنترل کنید که کلید فن خاموش باشد.

۲- در آزمایش‌های مربوط به جابجایی اجباری، امکان تغییر سرعت هوا به منظور انجام آزمایش در محدوده‌ی معینی از سرعت وجود دارد. برای رسیدن به حالت پایدار می‌توان در یک دمای ثابت سرعت را خواند و یا در یک سرعت معین دما را اندازه گیری کرد.

در این سری آزمایش‌ها، منظور از رسیدن به حالت پایدار زمانی است که تغییرات دما با زمان صفر است. یعنی دماسنج دیجیتالی دمای ثابتی را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۶) نمایی از دستگاه آزمایشگاهی جابجایی اجباری

روش آزمایش

۱. مبدل حرارتی پره‌دار نوع پین را در داخل کانال در جای مخصوص قرار دهید.

۲. دستگاه را روشن کرده و چک کنید که چراغ سیگنال روشن شود. دمای محیط T_A را یادداشت کنید.

۳. توسط دیمر جریان ورودی گرمکن را روی ۰/۷ آمپر تنظیم کنید و پس از رسیدن سیستم به شرایط پایدار، دمای سطح پره T_H را یاداشت کنید. حال فن را روشن کنید و سرعت هوا را با استفاده از آنومتر در پایین کانال اندازه بگیرید (سرعت را بین ۰/۴ تا ۱ متر بر ثانیه تنظیم کنید). مجددا به اندازهٔ کافی به سیستم فرصت دهید تا به شرایط پایا برسد و دمای سطح را یادداشت کنید. سرعت هوا را از طریق آنومتر می‌توان مشخص کرد.

۴. با استفاده از دیمر سرعت فن را افزایش داده و برای سه سرعت دیگر مرحله ۳ را تکرار کنید.

۵. نتایج آزمایش را یادداشت کرده و سرعت را برحسب اختلاف دما $T_A - T_H$ رسم کرده و نموداری که رسم کرده‌اید تفسیر کنید.

۶. مبدل حرارتی با پره فین را در کانال هوا در جای مخصوص قرار دهید و مراحل ۲ تا ۵ را تکرار کنید.

نتایج اندازه‌گیری برای پین

ولتاژ: آمپراژ:

Air velocity (m/s)	T_{H1}/℃	T_{H2}/℃	T_{H3}/℃	T_A/℃	$T_{air,in}$/℃	$T_{air,out}$/℃	$T_{air,sur}$/℃

نتایج اندازه‌گیری برای فین

ولتاژ: آمپراژ:

Air velocity (m/s)	T_{H1}/℃	T_{H2}/℃	T_{H3}/℃	T_A/℃	$T_{air,in}$/℃	$T_{air,out}$/℃	$T_{air,sur}$/℃

خواسته‌های آزمایش

۱) برای هر آزمایش، سرعت را برحسب اختلاف دما رسم کرده و نموداری را که رسم کرده‌اید، تفسیر کنید.

۲) مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی را در هر کدام از حالات محاسبه نمایید.

۳) با استفاده از خطی سازی، مقادیر A و B را برای رابطه‌ی $Nu = ARe^B$ تعیین کرده و با مقادیر مراجع مقایسه نمایید.

۴) منابع خطای موجود را بنویسید.

۵) با استفاده از نتایج بدست آمده توضیح دهید که احتمال جوش آوردن رادیاتور اتومبیل در جاده بیشتر است یا درون شهر؟

آزمایش شماره ۷

جابجایی آزاد (Free Convection)

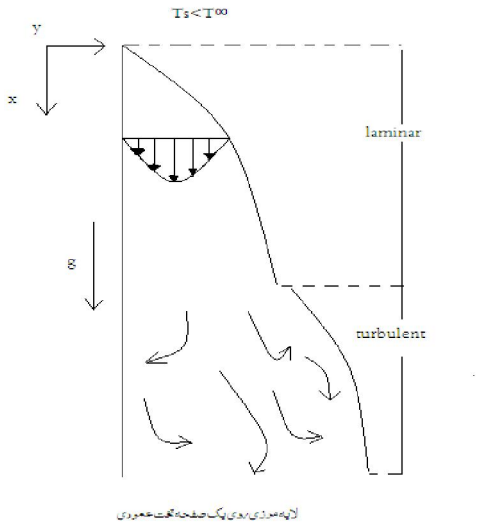
هدف

بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک صفحه که به صورت عمودی قرار گرفته باشد.

تئوری

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

یک صفحه عمودی سرد شده غوطه‌ور در یک سیال ساکن را در نظر بگیرید و فرض کنید که دمای صفحه کمتر از دمای سیال $T_s < T_\infty$ باشد. جرم مخصوص سیال مجاور صفحه بیشتر از سیال دورتر می باشد. بنابراین نیروهای ارشمیدس با پایین بردن سیال سرد که سیال واقعی در ناحیه سکون را نیز به دنبال خود می کشد باعث تولید لایه مرزی جابجایی آزاد می شوند.



شکل (۱-۷) لایه مرزی بر روی یک صفحه تخت عمودی

توزیع سرعت در این لایه مرزی کاملاً متفاوت با لایه مرزی جابجایی اجباری است. سرعت در این دیواره به علت شرایط غیرلغزشی برابر صفر می‌باشد. سرعت در ابتدا به مقدار بیشترین افزایش یافته و سپس در لبه لایه مرزی چون که در سیستم جابجایی آزاد شرایط جریان آزاد حاکم است، به صفر کاهش پیدا می‌کند. لایه مرزی نخست به صورت آرام بوده و لیکن در

فاصله‌ای از لبه بسته به خواص سیال و تفاوت دمای بین دیواره و سیال گرداب های نا آرام تشکیل می‌شوند. و گذار به لایه مرزی نا آرام شروع می شود. به طوریکه در قسمت پایین تر صفحه مزبور ممکن است لایه مرزی کاملا ناآرام تشکیل شود. اگر $T_s > T_\infty$ باشد لایه مرزی جابجایی آزاد رشد می‌کند ولیکن در این حالت حرکت سیال رو به بالاست. برای تحلیل مسئله انتقال حرارت نخست باید معادله دیفرانسیل حرارت را برای لایه مزبور به دست آورد و سپس آنرا حل نموده و معادله توزیع دما را به دست آورد. برای صفحه مذکور روابط توزیع دما و توزیع سرعت به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{T-T\infty}{Ts-T\infty}=\left(1-\frac{Y}{\delta}\right)^2 \qquad (۷-۱)$$

$$\frac{U}{Umax}=\frac{Y}{\delta}\left(1-\frac{Y}{\delta}\right)^2 \qquad (۷-۲)$$

عدد گراشف (Gr): 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 برای صفحه قائم عبارتست از:

$$Gr_f=\frac{g\,\beta\,(T_w-T_\infty)x^3}{\vartheta^2} \qquad (۷-۳)$$

برای استوانه قائم به جای x، طول استوانه و برای استوانه افقی بعد مشخصه x به قطر d تبدیل می‌شود.

رابطه تجربی جابجایی آزاد: پس از تجربیات زیادی دریافته‌اند که ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد متوسط را می‌توان برای انواعی از حالات به شکل تابع زیر نشان داد:

$$Nu=\frac{hx}{k}=C\,\left(Gr_f,Pr_f\right)^n \qquad (۷-۴)$$

$$T_f=\frac{T_w+T_\infty}{2} \qquad (۷-۵)$$

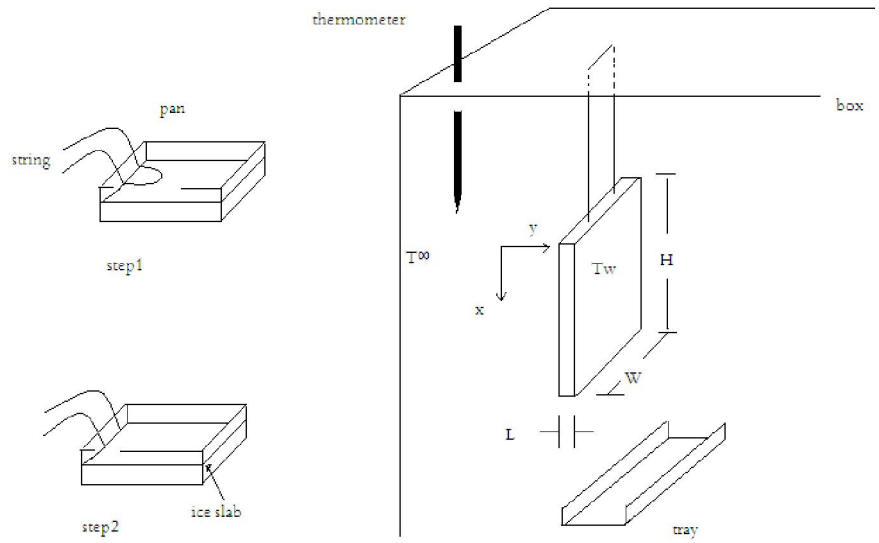
$$Ra=Gr_f\,.\,Pr_f \qquad (۷-۶)$$

$$q=h\,A\,(T_\infty-T_w) \qquad (۷-۷)$$

نماد f نشان دهنده خواص سیال در دمای فیلم می‌باشد. حاصل ضرب عدد گراشف در پرانتل را عدد رایلی گویند. ضرایب ثابت n و C را می‌توان از جداول مربوط به کتابهای انتقال حرارت به دست آورد. برای محدوده‌ای از عدد رایلی Ra می‌توان منحنی Nu را برحسب $\log Ra$ رسم نموده و از آن استفاده کرد.

موضوع تجربی جابجایی آزاد: اثر انتقال حرارت توسط لایه مرزی در جابجایی آزاد بر روی یک لایه نازک از یخ که بطور عمودی در هوای ساکن آویزان شده قابل مشاهده و اندازه گیری تجربی است. قلب دستگاه یک لایه یخ نازک است که بطور عمودی توسط نخ در هوا آویزان می‌باشد. ساخت لایه یخ و آویزان نمودن آن در محیطی با دمای ثابت و هوای ساکن اساسی‌ترین و مهمترین بخش کار است. آماده سازی یخ باید در دو مرحله باشد. ابتدا مقداری آب داخل قالب مورد نظر ریخته بطوریکه لایه یخ به ضخامت ۰/۵ سانتیمتر ایجاد شود. سپس توری یا نخ را بر روی لایه قرار داده و مجدداً مقداری آب اضافه شود تا ضخامت نهایی یخ به یک سانتیمتر برسد.

بدین ترتیب عامل نگهدارنده در بین یخ قرار می‌گیرد. این کار با قالبهای دیگر تکرار می‌شود. بدین ترتیب قطعات یخ به ضخامت یک سانتیمتر و عرض ۷ سانتیمتر و ارتفاع های مختلف تهیه می‌شود. در واقع فرآیند خیلی آرام ذوب یخ در اثر جابجایی آزاد با آویزان شدن قطعه یخ در هوا قابل بررسی خواهد بود. برای جلوگیری از تاثیر جابجایی اجباری، فرآیند ذوب یخ درون یک محفظه با در شیشه ای انجام می‌گیرد. ناودانی در زیر قالب یخ قرار گرفته است، این ناودان جهت جمع آوری قطرات یخ ذوب شده می‌باشد و با شیب اندکی نسبت به افق باعث می‌شود قطرات از درون آن عبور کرده و در انتهای پایینی درون بشر مدرج یا استوانه مدرج جمع آوری شود.



شکل (۲-۷) ساختار تجهیزات آزمایش

کمیتی که در طول این آزمایش اندازه‌گیری می‌شود شدت جریان ذوب یخ $\dot{m}$ می‌باشد. این امر نسبتا ساده است و با استفاده از یک بشر و اندازه‌گیری زمان انجام می‌گیرد. برای مثال اگر ابعاد یخ حدود ۳۰ سانتیمتر باشد؛ شدت جریان حجمی ذوب یخ در حدود $200\ {}^{cm^3}/_{hr}$ خواهد بود. برای اینکه از تاثیر حالت هدایت گذرا بین یخ و سطح آن صرفنظر شود پس از ۱۰ دقیقه شروع به اندازه گیری دبی $\dot{m}$ شود. اینکار باعث می‌شود تا تمام حجم یخ به دمای ذوب برسد. کمیت دیگری که مورد توجه است ثابت ماندن دمای محیط درون محفظه است. این هوا کاملاً مسدود نبوده و نشت آهسته هوا به داخل و خارج محفظه دارای تأثیر مثبتی در تنظیم و ثابت نگهداشتن دمای هوا نزدیک به دمای محیط را دارد. برای اطمینان از چند دماسنج شیشه ای در داخل و بیرون محفظه استفاده نمود.

از طرف دیگر اختلاف دمای محفظه و یخ $T_\infty - T_W$ با تقریب ۲٪ قابل اندازه‌گیری است. این اندازه‌گیری دما برای محاسبه عدد Ra رایلی بکار برده می‌شود.

$$Ra = \frac{g\,\beta\,(T_W - T_\infty)\,H^3}{\alpha\vartheta} \qquad (۷-۸)$$

که $T_W = 0\,^\circ C$ و β و α و ϑ از خواص هوا در دمای فیلم T_f می‌باشند. در نگاه اول مشاهده می‌شود که تغییر فاز در سطح یخ ناشی از انتقال حرارت موضعی از هوا با دمای T_∞ به سطح یخ در T_W در جهت عمود بر سطح از لایه مرزی هوای سرد نزدیک سطح یخ ایجاد شده که در طول لایه مرزی کاهش می‌یابد.

چون شکل قطعه یخ در طول آزمایش تا حدودی تغییر می‌کند، شار حرارتی جابجایی آزاد $q"(x)$ نیز متغیر است. شدت جریان ذوب یخ یعنی $\dot{m}$ را می‌توان از شکل هندسی قالب یخ پیش بینی کرد.

$$\dot{m} = \rho_{ice}\; H\, W\, [dL/dt] \qquad (۷-۹)$$

که $[dL/dt]$ شدت متوسط کاهش ضخامت یخ در میانگین ارتفاع H در طول آزمایش می‌باشد. شار حرارتی از یکی از سطوح $q" = h\,(T_\infty - T_W)$ و یا $q"\,(x) = \dot{m}\,.\,h_{sf}\,/\,2H\,W$. در این معادلات $\rho_{ice} = 1\,gr/cm^3$ و $h_{sf} =$ $333.4\;j/gr$ که گرمای نهان ذوب یخ در $0^{\circ c}$ است. در ناحیه آرام $q"\,(x)$ با $x^{1/4}$ کاهش می‌یابد.

از ترکیب این معادلات خواهیم داشت:

$$Nu_H = \frac{h\,H}{k} = \frac{\dot{m}\,.\;h_{sf}}{2\,W.k\,.\;(T_\infty - T_w)} \qquad (۷-۱۰)$$

در معادله فوق ضریب هدایت حرارتی هوا در دمای فیلم محاسبه می‌شود. همچنین می‌توان عدد ناسلت را از فرمولهای موجود در کتب درسی پیدا نمود. $Nu_H = f(Ra)$

برای جریان لایه مرزی بر روی یک صفحه عمودی تخت شدت جریان آب ذوب شده m° از طریق تجربی معمولا بیشتر از مقدار پیش بینی شده از طریق معادلات فوق می‌باشد. این مغایرت ممکن است چنین تفسیر شود که ناشی از عمل ذوب در چهار سطح باریک دیگر یخ و توسط تشعشع انتقال حرارت بین یخ و دیواره محفظه و دمای اتاق باشد. اثر تشعشع را می‌توان با استفاده از تئوری انتقال حرارت بین دو سطح خاکستری محاسبه نمود. $(\varepsilon = 0.8)$

آزمایش حاضر اطلاعاتی در مورد رابطه بین $\dot{m}$ و Ra را ارائه می‌دهد. در اینجا عدد رایلی بعنوان پارامتر متغیر انتخاب می شود که با تغییر ارتفاع یخ تغییر می‌کند. منحنی $\dot{m} = f(Ra)$ با ثبت شدت ذوب چند قطعه یخ با ارتفاع های متفاوت قابل ترسیم است. از یک قالب یخ می توان برای دو عدد رایلی مختلف استفاده نمود، بسته به آنکه کدام بعد آن در جهت عمودی قرار گرفته باشد. با استفاده از قالبهای یخ به ابعادی ۷– ۳۵ سانتیمتر تغییرات Ra بین دو مقدار $۱۰^۷$ تا $۱۰^۵$ خواهد بود.

روش آزمایش

قالبهای یخ را اندازه گرفته و به ترتیب آنها را درون محفظه قرار داده و درب آن را ببندید. سپس جدول پیشنهادی ذیل را پس از اندازه گیری شدت ذوب یخ $\dot{m}$ هر قطعه یخ تکمیل کنید. لازم به ذکر است که اندازه گیری $\dot{m}$ را پس از اینکه ۱۰ دقیقه از ذوب یخ گذشته باشد، شروع کنید تا از پایا شدن سیستم مطمئن شویم.

خواسته‌های آزمایش

۱) جدول نتایج زیر را تکمیل نمایید.

شماره نمونه یخ	ارتفاع یخ H	عرض یخ W	دمای محیط T	دبی آب $\dot{m}, gr/hr$	Nu	Ra
۱						
۲						
۳						

۲) منحنی $\dot{m}$ را برحسب Ra رسم کنید.

۳) منحنی Nu را برحسب Ra در مختصات لگاریتمی رسم کرده و شیب آن را به دست آورید و سپس در معادله $Nu = C\,Ra^n$، مقدار n و C را تعیین کنید.

۴) از روابط تجربی کتاب انتقال حرارت ابتدا مقدار Nu و h را حساب کرده و سپس مقدار $\dot{m} = f(Ra)$ را از طریق تئوری محاسبه نموده و با مقادیر تجربی اندازه‌گیری شده مقایسه کنید.

۵) عواملی را که در انتقال حرارت جابجایی آزاد موثرند شرح دهید.

۶) بر روی نتایج به دست آمده از روی منحنی‌ها بحث کنید.

۷) خطاهای آزمایش را توضیح دهید.

آزمایش شماره ۸

آزمایش بررسی انتقال حرارت از طریق تشعشع

هدف

هدف از انجام این آزمایش آشنایی با مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی و بررسی موارد زیر است:

۱. بررسی قانون عکس مجذور فاصله در تشعشع حرارتی (Inverse square law for heat)
۲. بدست آوردن ثابت استفان بولتزمن
۳. بدست آوردن ضریب صدور (Emissivity) برای صفحات مختلف
۴. بررسی اثر زاویه دید (shape factor)
۵. بررسی اثر دما در تشعشع حرارتی
۶. بررسی اثر رنگ در تشعشع حرارتی
۷. بررسی قانون کسینوس لامبرت (Lambert's cosine law)
۸. بررسی قانون جذب لامبرت

تئوری

تشعشع حرارتی یک از روش‌های انتقال حرارت است که با مکانیزم‌های دیگر انتقال حرارت (جابجایی و هدایت) کاملاً تفاوت دارد. انتقال حرارت به طریق تشعشع در محیط خلاء نیز صورت می‌گیرد و مانند دو مکانیزم دیگر احتیاج به محیط واسطه (media) ندارد. انتقال حرارت تشعشعی در صنایع به خصوص کوره‌ها و بسیاری از فرآیندهای گرمایش، سرمایش، خشک کردن صنعتی وهمچنین روش‌های تبدیل انرژی نظیر احتراق سوخت فسیلی وتشعشع خورشیدی رخ می‌دهد. در انتقال حرارت به روش تشعشع هر جسم با اجسام دیگر به علت تفاوت دما تبادل انرژی دارد. این تبادل انرژی از طریق تشعشع از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر صورت می‌گیرد و به هم‌دما شدن این دو جسم می‌انجامد. همین لحظه، تمامی اجسامی که در اطراف شما قرار دارند تشعشع گرمایی گسیل می‌کنند.

یکی از معروف‌ترین نظریه‌های موجود، تشعشع را به صورت انتشار مجموعه‌ای از ذرات به نام "فوتون" یا "کوانتا" می‌داند. نظریه دیگری نیز وجود دارد که تشعشع را انتشار امواج الکترومغناطیس می‌داند. بر اساس هر دو نظریه، می‌توان تشعشع را به دو خاصیت مهم امواج یعنی به فرکانس و طول موج ارتباط داد. بر اساس این رابطه حاصل تقسیم سرعت نور در محیط بر فرکانس برابر با طول موج است.

$$\lambda=\frac{c}{\nu} \qquad (۸-۱)$$

بخشی از طیف الکترومغناطیسی که از ۰/۱ میکرومتر شروع و تا ۱۰۰ میکرومتر ادامه می‌یابد و شامل قسمت UV و تمام امواج مرئی و مادون قرمز (IR) است، تشعشع گرمایی نام دارد و به بحث انتقال حرارت مربوط می‌شود.

جسم سیاه جسمی است که تمام تشعشع را بدون درنظر گرفتن طول موج یا جهت، جذب کرده و به صورت یکنواخت در همه جهات پخش می‌کند. در یک دما و طول موج معین هیچ سطحی توانایی صدور بیش از یک سطح سیاه را ندارد. سطح سیاه یک دفیوزر است و انرژی را به صورت یکنواخت در تمام جهات صادر می‌کند. یک تشعشع‌کننده ایده‌آل یا جسم سیاه، انرژی را با نرخی متناسب با توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم و نیز متناسب با سطح آن منتشر می‌سازد لذا:

$$q= \sigma AT^4 \qquad (۸-۲)$$

که σ ثابت تناسب است و ثابت استفان بولتزمن نامیده می‌شود که مقدار آن معادل $5.674\times10^{-8} W/m^2.K^4$ می‌باشد. معادله $q=\sigma AT^4$ را قانون استفان بولتزمن می‌نامند که تنها برای اجسام سیاه معتبر است. این معادله تنها برای تشعشع حرارتی سودمند است و برای سایر انواع تشعشعات الکترومغناطیسی رابطه به این سادگی نیست. معادله فوق تنها حاکم بر تشعشع منتشر شده از یک جسم سیاه است. تبادل تشعشعی خالص بین اجسام سیاه برابر است با:

$$q=\sigma A_1 F_{12}(T_1^4-T_2^4) \qquad (۸-۳)$$

برای به حساب آوردن ماهیت خاکستری سطوح، ضریب دیگری در معادله انتقال حرارت وارد می‌شود که موسوم به ضریب صدور ε است که تشعشع جسم خاکستری را به جسم سیاه ایده‌آل مربوط می‌سازد، بنابراین:

$$q= \varepsilon\sigma AT^4 \qquad (۸-۴)$$

ضریب صدور یا ضریب نشر یک سطح عبارت است از نسبت تشعشع صادر شده از سطح به تشعشع صادر شده توسط یک جسم سیاه در همان دما.ضریب صدور برای جسم سیاه $\varepsilon=1$ و برای اجسام دیگر بین صفر و یک است.

حال به بررسی پارامترهای دیگر تشعشع می‌پردازیم:

ضریب صدور طیفی (ε_θ): عبارت است از ضریب صدور سطحی یک سطح در یک طول موج معین

ضریب صدور جهتی (ε_λ): عبارت است از ضریب صدور سطحی یک سطح در یک جهت معین

ضریب صدور کلی عبارت است از میانگین ضرایب صدور در کلیه جهات

ضریب جذب (α): ضریب جذب کسری از انرژی تشعشعی ورودی به سطح است که جذب می‌شود.

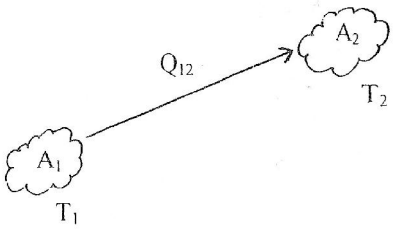
ضریب انعکاس (ρ): ضریب انعکاس کسری از انرژی تشعشعی ورودی به سطح است که منعکس می‌شود.

ضریب عبور (τ): ضریب عبور کسری از انرژی تشعشعی ورودی به سطح است که از آن عبور می‌کند.

$$\alpha+\rho+\tau=1 \qquad (۸-۵)$$

وقتی پرتوهای تشعشعی به یک سطح برخورد می‌کند دو نوع انعکاس داریم: انعکاس آیینه‌ای و انعکاس پخشی. در انعکاس آیینه‌ای زاویه برخورد با زاویه انعکاس برابر است اما در انعکاس پخشی تشعشع انعکاس یافته در کلیه جهات یکسان است.

ضریب شکل (F): ضریب شکل F_{ij} کسری از انرژی تشعشعی است که سطح i را ترک کرده و به سطح j برخورد می‌کند. از این پارامتر برای در نظرگیری اثرات جهت و موقعیت قرار گرفتن سطوح بر روی انتقال گرمای تشعشعی استفاده می‌شود.



شکل (۱-۸) ضریب شکل برای دو سطح

با در نظر گرفتن موارد فوق فرم کلی معادله انتقال حرارت به روش تشعشع به صورت زیر است:

$$Q_{12}=\sigma A\varepsilon F_{12}(T_1^4-T_2^4) \qquad (۸-۶)$$

شرح دستگاه:

این دستگاه دارای یک منبع حرارتی است که در یک طرف دستگاه قرار داده شده است. دو عدد ریل مناسب جهت نصب تجهیزات مورد لزوم در آزمایش‌های مختلف در این دستگاه در نظر گرفته شده که در روی آن یک خط‌کش مدرج برای تنظیم فاصله مناسب از منبع حرارتی قرار دارد. مهم‌ترین اجزای دستگاه برای انجام آزمایش‌های مختلف به شرح زیر می‌باشند:

- منبع تشعشعی حرارتی (Heat radiator source)
- تشعشع‌سنج (Radiometer)
- صفحه روزنه دید (Aperture)
- صفحات فلزی سیاه و کدر به ابعاد 20 cm × 12 cm
- تابلو کنترل
- نورسنج
- فیلترهای تیره و روشن از جنس پلکسی گلاس

روش آزمایش

آزمایش شماره ۱: بررسی قانون عکس مجذور فاصله در تشعشع حرارتی

هدف از انجام این آزمایش بررسی صحت این قانون است که تشعشع روی یک سطح با مجذور فاصله آن سطح تا منبع تشعشع نسبت عکس دارد. برای انجام این آزمایش ابتدا منبع را روشن کنید. جهت ثابت نگهداشتن دمای صفحات در طول آزمایش باید ولتاژ هیتر با استفاده از ولوم مربوطه روی ۱۲۰ ولت تنظیم شود.

تشعشع‌سنج (ترموپیل) را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از منبع گرما (هیتر) قرار داده و به سیستم زمان دهید تا به حالت پایا برسد سپس مقدار $\frac{q}{A}$ اندازه‌گیری شده توسط تشعشع‌سنج را از روی دستگاه یادداشت کنید. حال تشعشع‌سنج را در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از هیتر قرار دهید و مراحل ذکر شده را تکرار کنید. این آزمایش را تا رسیدن تشعشع‌سنج به فاصله ۲۰ سانتی‌متری ادامه داده و نتایج را در جدول زیر وارد کنید.

شکل (۲-۸): شماتیک آزمایش شماره ۲

جدول (۱-۸) نتایج آزمایش اول

فاصله	۱۰ cm	۱۵ cm	۲۰ cm
q_{rad}			
$\log(q_{rad})$			
$\log(x)$			

آزمایش شماره ۲: بدست آوردن ثابت استفان بولتزمن

هدف از این آزمایش بدست آوردن مقدار ثابت استفان بولتزمن می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم انتقال حرارت تشعشعی با توان چهارم دما ارتباط مستقیم دارد. مقدار انرژی تشعشعی منتشر شده از جسم سیاه بر واحد سطح با فرمول زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{q}{A}=\sigma(T_s^4-T_\infty^4) \qquad (۸-۷)$$

در این آزمایش مقدار $\frac{q}{A}$ توسط تشعشع‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. T_s دمای صفحه بر حسب کلوین و T_∞ دمای محیط بر حسب کلوین می‌باشد.

برای محاسبه ثابت استفان بولتزمن، صفحه سیاه را در فاصله ۵ سانتی‌متری منبع و تشعشع‌سنج را در فاصله ۵ سانتی‌متری از صفحه سیاه قرار دهید. ولتاژ را روی عدد ۱۲۰ ولت تنظیم کنید، به سیستم زمان دهید تا به حالت پایا برسد. سپس دمای صفحه سیاه و مقدار عدد اندازه‌گیری شده توسط تشعشع‌سنج را یادداشت کنید. حال مقدار عدد استفان بولتزمن را از فرمول مربوطه محاسبه کرده، با مقدار واقعی مقایسه نمایید.

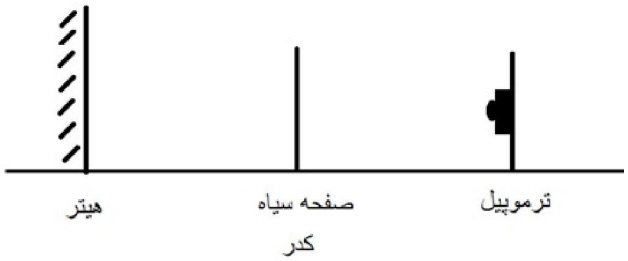
آزمایش شماره ۳: بدست آوردن ضریب صدور (Emissivity) برای صفحات مختلف

در این قسمت از آزمایش هدف بدست آوردن ضریب صدور (Emissivity) به ترتیب برای دو صفحه سیاه و کدر می‌باشد. مقدار انرژی تشعشعی منتشر شده از جسم خاکستری بر واحد سطح از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{q_{rad}}{A}=\varepsilon\sigma(T_s^4-T_\infty^4) \qquad (۸-۸)$$

که در آن ε ضریب صدور جسم، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.674\times10^{-8} w/m^2k^4$)، T_s دمای صفحه و T_∞ دمای محیط می‌باشد.

مراحل انجام آزمایش مشابه آزمایش قبل می‌باشد. با گذاشتن صفحه براق در فاصله ۵ سانتیمتری منبع و قراردادن ترموپیل در فاصله ۵ سانتیمتری این صفحه، ضریب صدور را محاسبه کنید.



شکل (۳-۸) شماتیک آزمایش شماره ۳

آزمایش شماره ۴: بررسی اثر زاویه دید

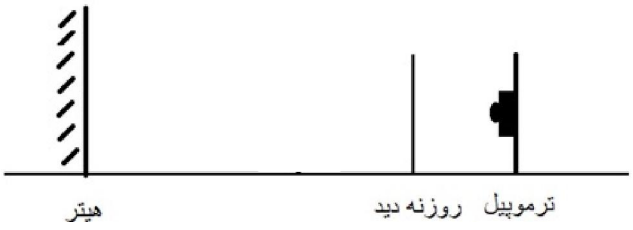
همان طور که گفته شد مقدار حرارت منتقل شده از یک سطح به سطح دیگر بستگی به زاویه دید دو سطح نسبت به یکدیگر دارد. در این آزمایش از جسم سیاه استفاده می‌کنیم.

$$\frac{q_{12}}{A}=F_{12}\sigma(T_s^4-T_\infty^4) \qquad (۸-۹)$$

برای انجام این آزمایش روزنه دید را در فاصله ۵ سانتی‌متری از صفحه داغ و تشعشع‌سنج را در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از صفحه داغ قرار دهید. منبع را روشن کرده و به سیستم زمان دهید تا به حالت پایا برسد سپس عدد اندازه‌گیری شده توسط تشعشع‌سنج و دمای صفحه سیاه را یادداشت کنید. حال فاصله بین دو صفحه روزنه دید را طبق جدول زیر تغییر دهید و پس از پایا شدن، مقدار q/A را یادداشت کنید. هنگام تغییر فاصله دقت کنید که صفحات به صورت عمودی قرارگرفته باشند و فاصله آنها نسبت به خط تقارن برابر باشد. همچنین باید خط واصل ترموپیل و صفحه داغ دقیقا از وسط روزنه دید رد شود. در هر مرحله F را از رابطه $F_{12}=\frac{q_{\text{با مانع}}}{q_{\text{بدون مانع}}}$ بدست بیاورید. همچنین نمودار q بر حسب فاصله بین صفحات روزنه دید رسم کنید.

جدول (۲-۸) نتایج آزمایش چهارم

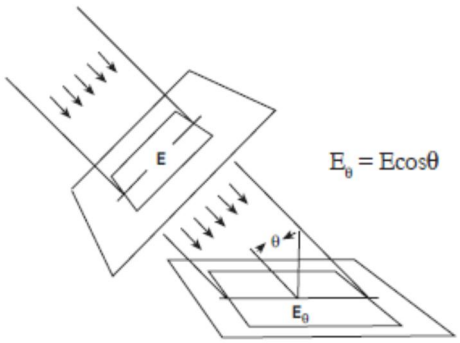
فاصله صفحات روزنه از یکدیگر (میلیمتر)	بدون مانع	۲۰	۳۰	۴۰
$\frac{q}{A}$				



شکل (۴-۸) شماتیک آزمایش شماره ۴

آزمایش شماره ۵: تأثیر زاویه در تبادل تشعشع حرارتی

طبق قانون کسینوس لامبرت مقدار تشعشعی که به هر سطح برخورد می‌کند به کسینوس زاویه (θ) بین تشعشع ورودی و خط عمود بر صفحه بستگی دارد.



شکل (۵-۸) بررسی اثر زاویه

که منظور از E شدت تشعشع در جهت عمود و منظور از E_θ شدت تشعشع در جهتی است که با خط عمود بر صفحه زاویه θ را می‌سازد.

برای انجام این آزمایش نورسنج ($LUX\ meter$) را در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از منبع نور (لامپ) قرار دهید. توجه داشته باشید که فاصله محل سنسور نور از وسط پایه آن ۱۲ سانتیمتر می‌باشد. طبق جدول زیر منبع نور را در زاویه‌های ذکر شده، یک بار در جهت مثبت و یک بار در جهت منفی بچرخانید و در هر مرحله مقدار نور اندازه‌گیری شده توسط نورسنج را بر حسب واحد LUX یادداشت کنید. LUX واحد اندازه‌گیری نور در سیستم SI می‌باشد که نشان‌دهنده شدت نوری است که به یک سطح برخورد می‌کند. شدت نوری که در زاویه صفر درجه اندازه‌گیری می‌شود برابر با E_0 می‌باشد. مقادیر شدت نور اندازه‌گیری شده توسط نورسنج در زاویه‌های مختلف برابر با E_θ آزمایشگاهی می‌باشد.

جدول (۳-۸) نتایج آزمایش ششم

زاویه (درجه) در جهت منفی	۰	۱۵	۳۰	۴۵	۶۰
شدت نور (LUX)					
زاویه (درجه) در جهت مثبت					
شدت نور (LUX)					

آزمایش شماره ۶: بررسی قانون جذب لامبرت

هدف از انجام این آزمایش بررسی اثر ضخامت و قدرت جذب جسم بر شدت نور می‌باشد. بر اساس قانون جذب لامبرت چنانچه نور خروجی از منبع با شدت اولیه E_o به مانعی با قدرت جذب α به ضخامت x قرار گرفته برخورد کند شدت آن به صورت تابع نمایی از ضخامت و قدرت جذب مانع کاهش می‌یابد:

$$E = E_0 e^{-\alpha x} \qquad (۸-۱۰)$$

در قسمت اول به بررسی فاکتور تیرگی اجسام می‌پردازیم:

نورسنج را در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از منبع نور قرار دهید. ابتدا بدون قرار دادن فیلتر لامپ را روشن کرده، شدت نور بر حسب LUX یادداشت کنید. حال فیلترهای تیره و روشن را به صورت جداگانه بین منبع نور و نورسنج، در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از منبع قرار داده وشدت نور را یادداشت کنید. سپس با استفاده از فرمول $E = E_0 e^{-\alpha x}$ مقادیر α را برای فیلترهای مختلف بدست آورده، درباره اثر α بر شدت نور بحث کنید.

جدول (۳-۸) نتایج آزمایش هفتم

نوع فیلتر	بدون فیلتر	فیلتر تیره	فیلتر روشن
شدت نور (LUX)			

در قسمت دوم به بررسی فاکتور ضخامت جسم می‌پردازیم:

نورسنج را در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از منبع نور قرار داده و لامپ را روشن کنید. جهت بررسی فاکتور ضخامت جسم ابتدا یکی از فیلترهای روشن، سپس دو فیلتر روشن و نهایتاً سه فیلتر روشن را به صورت جداگانه در محلهای مخصوص بین منبع نور و نورسنج و در فاصله ۱۰ سانتیمتری از منبع نور و نورسنج قرار دهید. در هر مرحله شدت نور بر حسب LUX را یادداشت کنید.

ضخامت هر فیلتر ۳ میلیمتر می‌باشد.

جدول (۴-۸) نتایج بررسی فاکتور ضخامت آزمایش هفتم

تعداد فیلترها	یک فیلتر	دو فیلتر	سه فیلتر
شدت نور (LUX)			

خواسته‌های آزمایش

۱) نمودار $\log(q_{rad})$ بر حسب $\log(x)$ را رسم کنید و شیب نمودار را بدست آورید. با توجه به شیب نمودار، قانون عکس مجذور فاصله را بررسی کنید.

۲) ثابت استفان بولتزمان را از نتایج آزمایش ۲ بدست آورده و با مقدار واقعی مقایسه کنید. دلیل اختلاف چیست؟

۳) مقدار ضریب صدور جسم خاکستری را حساب کنید.

۴) ضرایب دید را برای هر سه حالت محاسبه و گزارش کنید.

۵) مقادیر E_θ را از طریق تئوری با استفاده از فرمول $E_\theta=E\cos\theta$ بدست آورده و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه نمایید. سپس نمودار شدت نور تئوری و آزمایشگاهی را بر حسب زاویه از ۶۰- درجه تا ۶۰+ روی یک نمودار رسم کنید.

۶) مقدار ضریب جذب α را برای جسم کدر و شفاف بدست آورید.

۷) با رسم نمودار و مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده جذب جسم شفاف در ضخامتهای مختلف با مقادیر نظری، صحت قانون جذب لامبرت را نشان دهید.

آزمایش شماره ۹

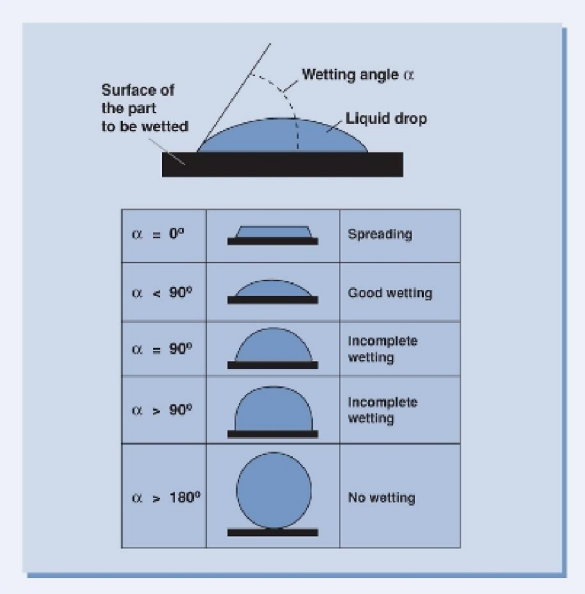
دستگاه چگالش

هدف

هدف از انجام این آزمایش آشنایی با انواع میعان قطره‌ای (dropwise condensation) و فیلمی (film condensation)، مقایسه ضرایب انتقال حرارت آنها و بررسی اثر این مکانیسم‌ها بر میزان انتقال حرارت می‌باشد.

تئوری

زمانی که بخار در تماس با سطحی قرار بگیرد و دمای سطح کمتر از دمای اشباع بخار باشد، بخار میعان پیدا کرده، سطح را خیس می‌کند و میعانات در اثر نیروی وزن به سمت پایین جاری می‌گردند. با توجه به خاصیت تر شوندگی سطح، میعان به دو صورت قطره‌ای یا فیلمی رخ می‌دهد. اگر مایع سطح جامد را کاملاً خیس کند و یک لایه از مایع روی سطح را کاملاً بپوشاند، میعان فیلمی رخ می‌دهد. اما اگر مایع ایجاد شده روی سطح به صورت یکنواخت نبوده و تنها قطراتی روی سطح به صورت پراکنده به وجود بیاید میعان قطره‌ای رخ می‌دهد. برای درک بهتر مفهوم تر شوندگی به شکل زیر دقت کنید.

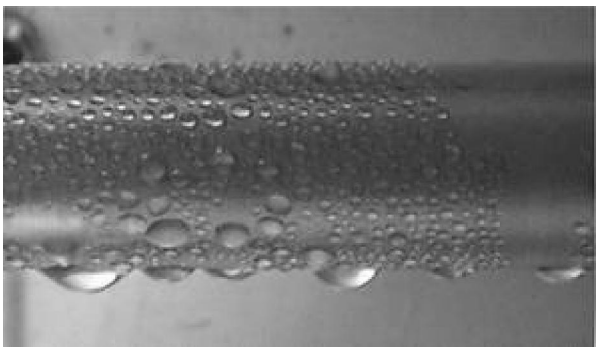


شکل (۱-۹) حالات مختلف تماس مایع با سطح

در شکل بالا در حالت اول زاویه بین میعان و سطح صفر درجه است و اصطلاحاً مایع سطح را کاملاً خیس می‌کند. با افزایش زاویه تماس قابلیت تر کنندگی قطره کاهش یافته تا نهایتاً زمانی که زاویه تماس بین مایع و سطح بیشتر از ۱۸۰ درجه گردد میعان به صورت قطره‌ای رخ می‌دهد. مکانیسم میعان بر میزان انتقال حرارت بسیار مؤثر است.

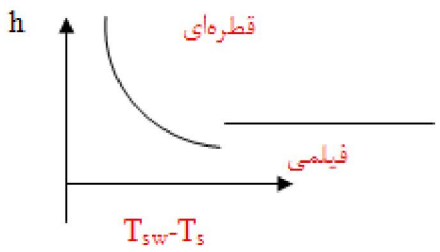
در میعان فیلمی بر روی یک سطح عمود، سطح با یک لایه از مایع پوشیده شده که هرچه به سمت پایین صفحه برویم ضخامت این لایه افزایش پیدا می‌کند. درون این لایه از مایع گرادیان دما وجود دارد، این لایه مانند یک مقاومت حرارتی عمل می‌کند و مانع از انتقال حرارت بین سطح و بخار می‌گردد.

در میعان قطره‌ای، قطرات تنها بخش کوچکی از سطح را اشغال کرده و بخش قابل توجهی از سطح در تماس مستقیم با بخار قرار خواهد داشت بنابراین مقاومتی در برابر انتقال حرارت وجود نداشته و انتقال حرارت بیشتر و بهتری رخ خواهد داد.



شکل (۲-۹) میعان قطره‌ای

برای یک جنس مشخص از مواد، ضریب انتقال حرارت قطره‌ای حدود ۱۰ برابر ضریب انتقال حرارت فیلمی است. اکثر مایعات غیر فلزی سطوح فلزی تمیز را کاملاً خیس می‌کنند که در این موارد میعان فیلمی رخ می‌دهد. به منظور ایجاد میعان قطره‌ای نیاز است که روی سطوح فلزی با ماده‌ای پوشانیده شود که معمولاً برای این منظور از طلا یا کروم استفاده می‌شود تا یک سطح کاملاً صاف و صیقلی را ایجاد کنند. همچنین در بعضی موارد سطح را توسط اسیدهای چرب یا روغن‌های مختلف پوشش می‌دهند. با توجه به انتقال حرارت بیشتر در میعان قطره‌ای، این مکانیسم به میعان فیلمی ترجیح داده می‌شود اما با توجه به اینکه اکثر سطوح پس از قرار گرفتن در معرض بخار در مدت زمان طولانی کاملاً خیس می‌شوند نگه داشتن سیستم در حالت میعان قطره‌ای بسیار دشوار است. در طراحی سیستم‌هایی که در آنها میعان به ورت فیلمی رخ می‌دهد بهتر است از سطوح عمودی کوتاه یا استوانه‌های افقی استفاده گردد تا از افزایش ضخامت لایه مایع مقاوم در برابر انتقال حرارت جلوگیری شود. به همین دلیل اکثر کندانسورها از یک سری لوله‌های افقی درست می‌شوند که سیال سرد در داخل لوله و بخار خارج از لوله جریان دارد. برای مقایسه کیفی ضریب انتقال حرارت در میعان قطره‌ای و فیلمی به شکل زیر توجه کنید:



شکل (۳-۹) تغییرات ضریب هدایت حرارتی برای میعان قطره‌ای و فیلمی

همانگونه که از شکل مشخص است با افزایش اختلاف دمای بین بخار و سطح، ضریب انتقال حرارت قطره‌ای کمتر شده و سیستم کم‌کم از حالت میعان قطره‌ای به میعان فیلمی تبدیل می‌گردد. علت این امر در این است که با افزایش اختلاف دما، نرخ تولید مایع میعان یافته، روی سطح بیشتر می‌شود و توانایی مایع جهت پوشش دادن سطح بیشتر گشته و سیستم به سمت میعان فیلمی پیش می‌رود.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان مزیت‌های میعان قطره‌ای در برابر میعان فیلمی را به صورت زیر بیان کرد:

۱. سطح انتقال کمتر در حالتی که اختلاف دما و سرعت انتقال حرارت یکسان باشد.
۲. اختلاف دمای کمتر در حالتی که سطح و سرعت انتقال حرارت یکسان باشد.
۳. سرعت انتقال حرارت بیشتر در حالتی که سطح و اختلاف دما یکسان باشد.

حال به محاسبه ضریب انتقال حرارت در میعان روی صفحه عمودی می‌پردازیم:

در صورتی که نیروهای وارد بر المان را در نظر بگیریم نیروی وزن به سمت پایین و نیروی بویانسی و نیروی تنش ویسکوزیته به سمت بالا به المان وارد می‌شوند. با درنظر گرفتن x از بالای صفحه به سمت پایین، δ به عنوان ضخامت لایه مایع ایجاد شده، T_g به عنوان دمای گاز و T_w به عنوان دمای دیواره، بعد از اعمال موازنه نیروها به رابطه زیر می‌رسیم.

$$\delta = \left[\frac{4\mu k x(T_g - T_w)}{\varphi(\varphi - \varphi_v) g h_{fg}}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۹-۱)$$

که μ ، k و φ به ترتیب ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و چگالی فاز مایع و h_{fg} آنتالپی تغییر فاز گاز به مایع می‌باشند. با توجه به اینکه $h=\frac{k}{\delta}$ می‌باشد ضریب انتقال حرارت موضعی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$h_x = \left[\frac{\varphi(\varphi - \varphi_v) g h_{fg} k^3}{4\mu k(T_g - T_w)}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۹-۲)$$

برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت متوسط از رابطه h_x موضعی روی کل سطح انتگرال می‌گیریم و نهایتاً رابطه به فرم زیر تبدیل می‌شود.

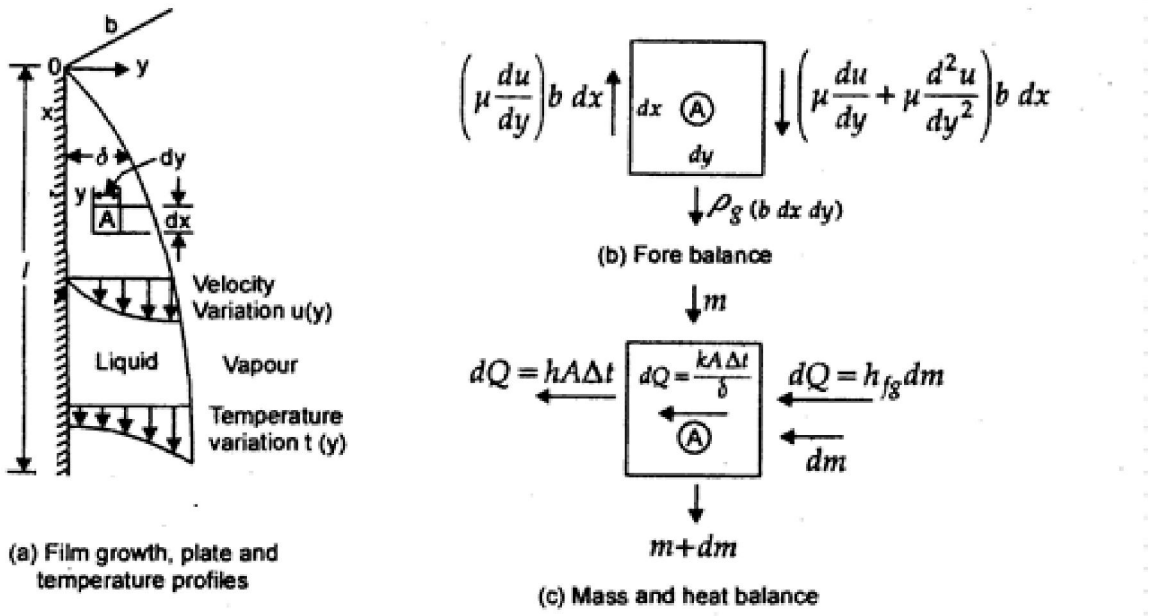
$$\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h_x dx = \frac{4}{3} h_{x=1} \qquad (۹-۳)$$

$$\bar{h} = 0.943\left[\frac{\varphi(\varphi - \varphi_v) g h_{fg} k^3}{L\mu(T_g - T_w)}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۹-۴)$$

توجه داشته باشید که در رابطه فوق از میانگین دمای دیواره و گاز برای محاسبه پارامترهای k وμ و φ استفاده می‌شود، به منظور تصحیح اثر غیرخطی بودن پروفایل دما در لایه مایع از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68C_p(T_g - T_w) \quad (۹-۵)$$

که C_p ظرفیت گرمایی ویژه مایع می‌باشد.



شکل (۴-۹) میعان فیلمی بر روی صفحه عمودی

شرح دستگاه

این دستگاه به گونه‌ای طراحی شده است که کار با آن بسیار ساده بوده و امکان مشاهده هم‌زمان میعان فیلمی و قطره‌ای روی کندانسورهای عمودی را ممکن می‌سازد. این دستگاه از محفظه شیشه‌ای به قطر داخلی۱۴۰ و ارتفاع ۳۵۰ میلی‌متر تشکیل شده است. یک هیتر ۱۰۰۰ واتی درون محفظه قرار دارد و سیال مورد نظر (آب مقطر) بوسیله محفظه شفاف، درون مخزن شیشه‌ای ریخته می‌شود. به منظور مشاهده میعان قطره‌ای و فیلمی دو کندانسور به طول ۱۲ سانتی متر به صورت عمودی در محفظه تعبیه شده است که از کندانسور پوشانیده شده با کروم برای مشاهده میعان قطره‌ای و از کندانسور پوشانده شده با مس برای مشاهده میعان فیلمی استفاده می‌گردد. آب سرد شهری درون کندانسورها به صورت جداگانه جریان می‌یابد، بخار آب تولید شده ، در تماس با لوله‌های سرد میعان یافته و به سطح مایع برمی‌گردد. دبی آب شهر ورودی به کندانسورها، توسط دو عدد روتامتر تنظیم می‌گردد. آب جاری درون کندانسورها پس از جریان یافتن، از سمت دیگرکندانسورها خارج می‌گردد. توجه داشته باشید که برای انجام آزمایش دبی آب در هر دو کندانسور یکسان باشد تا شرایط حاکم در هر دو سیستم مشابه یکدیگر باشد. دمای آب سرد ورودی به کندانسور پوشیده شده با کروم T_1 و دمای خروجی آن برابر T_2 و دمای آب سرد ورودی به کندانسور پوشیده شده با مس برابر T_3 و دمای خروجی آن برابر خروجی T_4می‌باشد که این دماها توسط ترموکوپل های تعبیه شده در سیستم و نمایشگر سمت چپ تابلو کنترل قابل اندازه‌گیری می‌باشند. دمای بخار نیز توسط ترموکوپل T_5 و دمای مایع توسط ترموکوپل T_6 قابل اندازه‌گیری است. دمای سطح کندانسور دارای پوشش کروم و دمای سطح کندانسور دارای پوشش

مسی نیز به ترتیب توسط ترموکوپل‌های T_7 و T_8 اندازه‌گیری می‌شود که با نمایشگر قابل مشاهده‌اند. برای مشاهده فشار بخار یک فشارسنج بوردون در محفظه تعبیه شده و برای ممانعت از افزایش بیش از حد فشار یک شیر اطمینان و نیز سوئیچ فشار مناسب روی دستگاه نصب می‌باشد. برای تخلیه آب درون محفظه نیز می‌توان از شیر پایین محفظه استفاده نمود.

روش آزمایش

درون محفظه تا ارتفاع حدود ۱۵ سانتی‌متر آب مقطر بریزید و دقت نمایید که المنت کاملاً درون آب قرار گرفته باشد. هیتر را روشن کنید (ولتاژ حدود ۱۲۰) و به آن زمان دهید تا بخار در محفظه جمع شود؛ حال مدتی صبر کنید تا میعان صورت پذیرد. سپس شیر بالای محفظه را باز کرده تا هوای اضافی موجود در محفظه خارج شود و دوباره شیر را ببندید. سپس آب کندانسور را باز کرده و دبی آن ها را برابر و در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ لیتر بر ساعت تنظیم کنید، به دستگاه زمان دهید تا میعان قطره ای و فیلمی تشکیل شود حال با تنظیم دبی آب ورودی به هرکندانسور و تنظیم توان هیتر روی مقدار مورد نیاز (نمایشگر ولتاژ حدود ۱۳۰ ولت را نشان دهد)، فشار سیستم را روی یک عدد معین تنظیم کنید. توجه داشته باشید که دبی آب جاری در کندانسورها یکسان باشد تا شرایط هر دو سیستم برابر باشد. حال می‌توانید به صورت چشمی میعان فیلمی و قطره‌ای را مشاهده کنید. دماهای ورودی و خروجی آب هر دو کندانسور و دمای سطح هر دو کندانسور را یادداشت کنید. سپس توان حرارتی المنت را افزایش داده و یا دبی آب ورودی به کندانسورها را کاهش دهید تا سیستم در فشار بالاتری قرار بگیرد. سپس در این حالت بعد از پایدار شدن سیستم مجدداً دماهای ورودی و خروجی آب و دمای سطح هر دو کندانسور را یادداشت کنید. اطلاعات مربوطه را ثبت نمایید.

پس از یادداشت نمودن دماها و فشار شیر بالای محفظه را مجددا باز نمایید تا با خارج شدن بخار آب میعان فیلمی و قطره ای بهتر مشاهده شوند. توجه داشته باشید که آزمایشات را در فشارهای نسبی مثبت کمتر از ۱ بار (مثلاً ۰/۲ barg و ۰/۵ barg) و همچنین در فشار اتمسفر (با باز گذاشتن شیر هوای بالای دستگاه) انجام دهید. توصیه می‌شود آزمایش در فشار منفی (خلا نسبی) انجام نشود.

توان الکتریکی مصرفی سیستم را می‌توانید از رابطه $p=\frac{V^2}{R}$ بدست آورید. در این رابطه R (مقاومت الکتریکی هیتر) برابر ۴۸ اهم می‌باشد و ولتاژ بوسیله نمایشگر ولتاژ قابل مشاهده است. مقادیر تجربی ضریب جابجایی را می‌توان از موازنه حرارت برای میله‌ای که بر روی آن میعان صورت می‌گیرد با داشتن سطح انتقال حرارت جابجایی ($A = 2\pi rL=75\ cm^2$) بدست آورد.

محاسبات و جداول

جدول (۲-۹) ثبت نتایج و محاسبات آزمایش

شماره آزمایش	ولتاژ هیتر (ولت)	فشار (kPa)	دبی آب ورودی (لیتر بر ساعت)		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
			کندانسور مسی	کندانسور کرومی	$T_{wi,Cr}$	$T_{wo,Cr}$	$T_{wi,Cu}$	$T_{wo,Cu}$	T_{steam}	$T_{hot,w}$	T_{Cr}	T_{Cu}
۱												
۲												
۳												

شماره آزمایش	توان هیتر (وات)	فشار (kPa)	h آزمایشگاهی میعان قطره‌ای	h تئوری میعان قطره‌ای	h آزمایشگاهی میعان فیلمی	h تئوری میعان فیلمی
۱						
۲						
۳						

خواسته‌های آزمایش

۸) مقادیر h برای میعان فیلمی و قطره‌ای در فشارهای یکسان را با یکدیگر مقایسه کنید.

۹) نمودار شار انتقال حرارت برحسب اختلاف دمای بخار و سطح را برای میعان فیلمی و قطره‌ای در دو فشار مختلف روی یک نمودار رسم کنید.

۱۰) با افزایش اختلاف دما بین بخار و سطح سیستم به سمت میعان قطره‌ای میل می‌کند یا فیلمی؟ توضیح دهید.

۱۱) نمودار مقادیر تئوری و آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت میعان فیلمی را برحسب اختلاف دمای سطح و بخار را روی یک نمودار در یک فشار معین رسم کنید.

۱۲) مقادیر h آزمایشگاهی و تئوری در میعان فیلمی را با یکدیگر مقایسه کرده، دلیل تفاوت را بیان کنید.