



آزمایشگاه ترمودینامیک و انتقال حرارت

دانشکده مهندسی مکانیک

(۱۵۱۰۶۱)

فهرست

۲.....	انتقال حرارت هدایتی (۱)
۹.....	مبدل حرارتی با جریان متعامد (۲)
۱۶.....	آزمایش پایداری شعله (۳)
۲۱.....	آزمایش کمپرسور (۴)
۳۲.....	آزمایش انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری (۵)
۴۳.....	آزمایش تبرید (۶)
۵۴.....	آزمایش تهویه مطبوع (۷)
۶۸.....	آزمایش تشعشع حرارتی و جابجایی آزاد (۸)
۷۵.....	آزمایش برج خنک کننده Colling Tower (۹)

انتقال حرارت هدایتی (۱)



۱- مقدمه

انتقال حرارت در جامدات معمولاً از طریق هدایت صورت می‌گیرد. اما قابلیت هدایت این نوع انرژی در اجسام متفاوت است و به جنس جسم بستگی دارد. اجسام را از نظر میزان قابلیت هدایت حرارتی درجه‌بندی می‌کنند و به هر کدام عددی به نام ضریب هدایت حرارتی^۱ نسبت داده می‌شود. در این آزمایش میزان تأثیر این ضریب در شدت انتقال حرارت معلوم می‌گردد. انتقال حرارتی که در این آزمایش انجام می‌گیرد یک‌بعدی و برای حالتی است که جسم به ثبات دمایی^۲ رسیده باشد.

¹ Thermal conductivity

² Steady state

۲- هدف

هدف از انجام این آزمایش پی بردن به چگونگی انتقال حرارت به طریق هدایت در اجسام و همچنین نقش جنس جسم در شدت انتقال حرارت از آن است.

۳- تئوری

بین دو نقطه با دماهای مختلف، جریانی به وجود می‌آید که نوعی انرژی است و این نوع انرژی را انرژی گرمایی می‌نامند. معمولاً انتقال حرارت به سه روش انجام می‌شود:

۱. رسانش^۳

۲. جابه‌جایی^۴

۳. تابش^۵

میله‌ای به طول L و سطح مقطع A که دمای تمام نقاط آن T_1 است را در نظر بگیرید. در یک لحظه طرف سمت چپ میله را به منبعی با دمای T_2 تماس دهید و فرض کنید سطح جسم با عایقی پوشانیده شده است. به طوری که هیچ‌گونه تبادل حرارتی با خارج نداشته باشد (چنین فرضی صحیح نیست چون هر جسمی به هر حال گرما را هدایت می‌کند و عایق مطلق وجود ندارد). حال فرض کنیم در چند نقطه بدنه عایق را سوراخ کرده و با ترموکوپل‌های کوچکی دمای چند نقطه آن را در زمان‌های t_1 ، t_2 و t_3 پس از آزمایش اندازه بگیریم. شکل ۱ منحنی تغییرات دما در طول میله را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در هر زمان معین، درجه حرارت در نقاط مختلف به کمک یک منحنی نمایش داده شده است. پس از گذشت زمان کافی $t = \infty$ دمای تمام نقاط ثابت می‌شود. در این حالت می‌گوییم میله به حالت ثبات دمایی^۶ رسیده است.

گرمایی که در واحد زمان از سطح مقطع عبور می‌کند، جریان گرمایی یا شدت انتقال حرارت نامیده شده و با Q نشان داده می‌شود.

³ Conduction

⁴ Convection

⁵ Radiation

⁶ Steady state

آزمایش نشان داده است که مقدار حرارت انتقال یافته در واحد زمان در یک جسم به نوع جسم بستگی مستقیم دارد، بنابراین اجسام را باید از لحاظ هدایت حرارتی درجه بندی کرد و به هر کدام یک عدد نسبت داد. این عدد را ضریب هدایت حرارتی می گویند که با k نشان داده می شود.

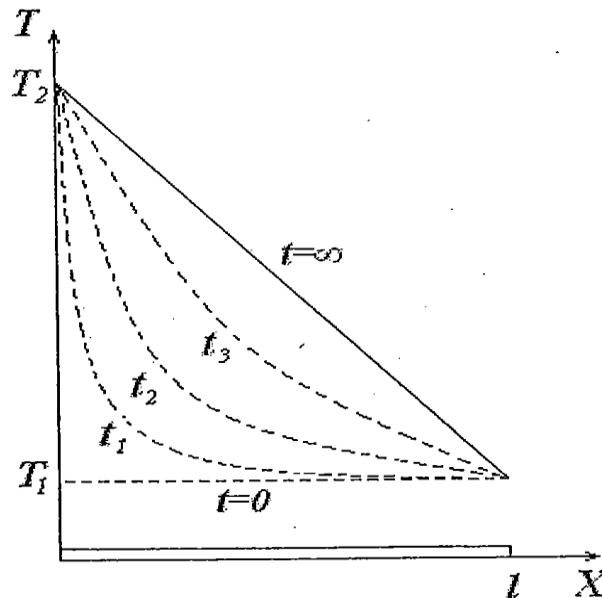
بنابراین $\dot{Q} \propto k$ است. هم چنین مشخص شده است که جریان گرمایی با اختلاف درجه حرارت نسبت مستقیم و با ضخامت (مسیری که حرارت باید طی کند) نسبت معکوس و با سطح مقطع نسبت مستقیم دارد. زمانی که جسم به ثبات دمایی رسیده باشد می توان نوشت:

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

و در حالت کلی داریم:

$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2)$$

این رابطه به قانون فوریه مشهور است.



شکل ۱- منحنی های تغییر دما در طول لوله در زمان های مختلف

ضریب هدایت حرارتی اکثر اجسام با دما تغییر می کند اما این تغییرات جزئی و تقریباً قابل چشم پوشی است. ضریب هدایت گرمایی فلزات از شبه فلزات و گازها بیشتر است.

۴- شرح دستگاه

این دستگاه برای تعیین ضریب هدایت حرارتی اجسامی که از نظر حرارتی نسبتاً هادی خوبی هستند طراحی شده است. دستگاه شامل اجزاء زیر است:

- ✓ یک گیره جهت خوب جا دادن نمونه‌ها در محفظه زیر گرمکن الکتریکی
- ✓ گرمکن الکتریکی به‌عنوان منبع حرارتی
- ✓ کالری متر (قسمت تحتانی و پشت دستگاه) جهت اندازه‌گیری حرارت
- ✓ یک ظرف آینه‌ای که برای جلوگیری از اتلاف حرارت روی گرمکن، نمونه‌ها و کالری متر قرار می‌گیرد.
- ✓ یک منبع آب نسبتاً کوچک برای ثابت نگه‌داشتن ارتفاع آب ورودی دستگاه
- ✓ سویچ ترموکوپل‌ها
- ✓ دو دماسنج جیوه‌ای برای اندازه‌گیری دماهای ورودی و خروجی آب
- ✓ چهار ترموکوپل از نوع $\frac{NiCr}{NiAl}$ (K-Type Thermocouple)
- ✓ ترانسفورمر متغیر برای کنترل شدت جریان
- ✓ پتانسیومتر برای خواندن دمای فلزهای مورد آزمایش از طریق ترموکوپل‌ها

چهار فلز نمونه از جنس مس، آلومینیوم، چدن و فولاد نرم برای آزمایش منظور شده است. دو قطعه کوتاه و دو قطعه بلند. دو سطح مقطع بالا و پایین هر نمونه با دقت کاملی تهیه شده است و به‌هیچ‌وجه نباید آسیبی به این ناحیه وارد آورد. در هر نمونه دو سوراخ برای جا دادن ترموکوپل‌ها تعبیه شده است.

لازم به ذکر است به دلیل محدودیت در مدت‌زمان هر جلسه آزمایشگاه و همچنین طولانی بودن زمان انجام این آزمایش، تنها از یک جفت قطعه در آزمایش استفاده می‌شود.

۵- روش انجام آزمایش

دستگاه در یک‌زمان با یک نمونه کوتاه در قسمت پایین و یک نمونه بلند در قسمت بالا کار می‌کند. پس‌ازاینکه نمونه‌های مورد آزمایش انتخاب شدند، آن‌ها را به‌وسیله پارچه نرم یا پنبه به‌خصوص در سطح مقطعی که اتصال انجام

می‌گیرد، کاملاً تمیز نموده و سپس به محل اتصال نمونه‌ها مقدار کمی سیلیکون گریس^۷ بزنید تا اتصال حرارتی به‌خوبی برقرار گردد.

دسته‌ای که در جلوی دستگاه قرار دارد به‌طرف پایین هدایت کنید تا بتوانید نمونه‌ها را کاملاً روی هم و به‌طور سری بین گرمکن و گیره قرار دهید. دقت کنید که سوراخ‌های محل ترموکوپل‌ها به‌طرف شما باشد. حال چنانچه نمونه‌ها کاملاً روی هم قرار گرفته‌اند دسته را رها کنید و ترموکوپل‌ها را روی نمونه قرار دهید.

ظرف آینه‌ای را روی نمونه‌ها قرار دهید.

دماسنج‌های جیوه‌ای را در قسمت‌های مخصوصی که روی دستگاه در نظر گرفته شده قرار دهید.

شیر آب ورودی را طوری تنظیم کنید که میزان آب ورودی دستگاه یکنواخت باشد و این وقتی است که ارتفاع آب در مخزن استوانه‌ای ثابت گردد. سعی کنید میزان دبی آب ورودی به دستگاه کمترین مقدار باشد، چون در این حالت اختلاف دمای ورودی و خروجی آب قابل ملاحظه خواهد بود و در نتیجه دقت آزمایش بالا می‌رود.

پتانسیومتر را به دو ترمینالی که در جلوی دستگاه قرار دارد وصل کنید.

دوشاخه دستگاه را به برق شهر وصل کنید. پیچ ترانسفورمر متغیر را روی صفر نگه‌دارید. (کاملاً در جهت عکس عقربه‌های ساعت چرخانده شود)

دکمه دستگاه را فشار دهید، چراغ دکمه باید روشن شود.

پیچ ترانسفورمر متغیر را در جهت عقربه‌های ساعت به آرامی بچرخانید تا عقربه آمپر متر روی ۰/۳ آمپر قرار گیرد. در این حالت دستگاه باید تقریباً یک ساعت و نیم کار کند تا حالت تعادل برقرار گردد. پس از حصول تعادل، برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نمونه‌های داخل دستگاه به روش زیر عمل کنید:

برای مدت‌زمانی حدود ۱۰ دقیقه آب خروجی دستگاه را به داخل یک ظرف برای تعیین جرم آن هدایت کنید.

در این مدت دماهای زیر را بخوانید:

T_1	درجه حرارت نقطه سرد نمونه کوتاه
T_2	درجه حرارت نقطه گرم نمونه کوتاه

⁷ Silicone Grease

T_3	درجه حرارت نقطه سرد نمونه بلند
T_4	درجه حرارت نقطه گرم نمونه بلند
T_1'	درجه حرارت ورودی آب
T_2'	درجه حرارت خروجی آب

چهار یا پنج بار عمل فوق (خواندن درجه حرارت‌ها) را به ترتیب تکرار کنید و از درجه حرارت متوسط به دست آمده برای هر کدام، در محاسبات استفاده کنید.

جرم آب داخل ظرف را پس از اتمام مرحله ۲ تعیین کنید (M)

شدت جریان را بخوانید.

چنانچه مدت زمان آزمایش فوق برابر t ثانیه باشد ضریب هدایت حرارتی هر نمونه را می‌توانید مطابق فرمول زیر محاسبه کنید:

$$k_1 = \frac{JM_1L_1(T_2' - T_1')}{At(T_2 - T_1)} \quad k_2 = \frac{JM_2L_2(T_2' - T_1')}{At(T_4 - T_3)} \quad (۳)$$

که در این رابطه:

k_1	ضریب هدایت حرارتی نمونه کوتاه
k_2	ضریب هدایت حرارتی نمونه بلند
$J=4186(J/(kg.K))$	ظرفیت حرارتی آب
M	جرم آب
$A=4.9 \times 10^{-4} m^2$	سطح مقطع نمونه‌ها
$L_1=0.025 m$	فاصله بین دو سوراخ نمونه کوتاه
$L_2=0.05 m$	فاصله بین دو سوراخ نمونه بلند

۶- خواسته‌های آزمایش

۱. ضریب هدایت حرارتی دو نمونه مورد آزمایش را به دست آورید.

۲. تغییرات درجه حرارت را نسبت به طول مجموعه دو نمونه (گرادیان دمایی) رسم کنید و از روی آن گرم‌ترین نقطه مجموعه (X_1) و سردترین نقطه مجموعه (X_2) را به دست آورید. بر روی نمودارهای به دست آمده بحث کنید.

۳. ثابت کنید شدت انتقال حرارت در نمونه‌ها مطابق رابطه زیر است:

$$Q = \frac{X_1 - X_2}{\frac{L_1}{Ak_1} + \frac{L_2}{Ak_2}}$$

۴. با استفاده از فرمول شدت انتقال حرارت در نمونه‌ها پیدا کنید.

۵. چنانچه مقاومت گرمکن ۱۰۰۰ اهم باشد درصد اتلاف حرارتی چقدر است؟

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

۷. علت وجود علامت منفی در قانون فوریه چیست؟

مبدل حرارتی با جریان متعامد (۲)



۱- مقدمه و هدف آزمایش:

مبدل‌های حرارتی وسایلی هستند که در آن‌ها تبادل حرارت بین دو ماده‌ی گرم و سرد انجام می‌گیرد. در تعداد زیادی از مبدل‌ها دو ماده از مسیرهای مستقل و عمود بر هم عبور داده می‌شود و بین آن‌ها انتقال حرارت صورت می‌گیرد. در دستگاه مربوط به این آزمایش جریان هوای سرد در امتداد عمود بر محور از روی یک سری لوله‌های افقی عبور می‌کند و در این حین تبادل حرارت انجام می‌شود.

منظور از این آزمایش آشنایی با عملکرد سیستم و بررسی پارامترهای مؤثر در انتقال حرارت و تغییرات آن‌ها است.

۲- شرح دستگاه و وسایل اندازه‌گیری:

دستگاه آزمایش عبارت است از یک کانال هوا که توسط یک موتور الکتریکی و پمپ گریز از مرکز قرار گرفته در انتهای آن، هوا در داخلش جریان می‌یابد. بعد از پمپ دریچه‌ای قرار گرفته که توسط آن می‌توان دبی هوا را تغییر داد. نیاز به اندازه‌گیری دمای هوای ورودی به کانال را داریم. با اندازه‌گیری دمای محیط آزمایشگاه و با تقریب مهندسی نسبتاً صحیحی آن را با دمای ورودی کانال یکسان در نظر بگیرید.

در قسمتی از مسیر کانال یک محفظه‌ی مکعب شکل شیشه‌ای قرار دارد که در دیواره‌های دو طرف آن سوراخ‌هایی تعبیه شده است. با استفاده از این سوراخ‌ها می‌توان تعدادی میله‌ی شیشه‌ای را به صورت عمود بر امتداد جریان در چهار ردیف در داخل محفظه قرار داد که وجود این میله‌ها سبب افت فشار هوا در کانال می‌شود (به شکل ۱ مراجعه کنید). علاوه بر آن یک میله‌ی مسی که از نظر شکل ظاهری شبیه میله‌های شیشه‌ای است، همراه دستگاه است که این میله را می‌توان توسط یک گرمکن الکتریکی حرارت داده و به‌جای هر یک از میله‌های شیشه‌ای در محفظه قرار داد. از این میله به‌عنوان المان حرارت دهنده استفاده می‌شود. در وسط این میله یک ترموکوپل تعبیه شده که به‌وسیله آن دمای میله اندازه‌گیری شده و با استفاده از یک پتانسیومتر نشان داده می‌شود.

در روی محفظه در نقاط قبل و بعد از محل قرار گرفتن میله‌ها سوراخ‌هایی تعبیه شده که با استفاده از یک لوله پیتوت و یک مانومتر مایل می‌توان فشار استاتیکی، فشار کل و هد سرعت را در بالادست و پایین دست جریان و نیز افت فشار را به دست آورد.

توجه: ترموکوپل از نوع Copper-Constantan است.

اطلاعات لازم:

عرض محفظه: 12.5cm

ارتفاع محفظه: 12.5cm

قطر المان و میله‌های شیشه‌ای: $d=12.5\text{mm}$

طول المان حرارت دهنده: $l=9.51\text{cm}$

$$l_1 = 1 + 0.84 = 10.35$$

طول مؤثر المان:

$$A = 0.0037 \text{ m}^2$$

سطح المان

$$A_1 = 0.00404 \text{ m}^2$$

سطح مؤثر المان

$$m = 0.1093 \text{ kg}$$

جرم المان

$$C = 380 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

گرمای ویژه المان

برای یافتن مشخصات هوا در دمای مربوطه از جدول استفاده کنید.

۳- تئوری مختصر

شار انتقال حرارت از المان مسی به هوا از رابطه زیر به دست می آید:

$$\dot{q} = hA_1(T - T_A)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابجایی، A_1 سطح مؤثر المان، T دمای المان و T_A دمای هوا است.

پس از گذشت زمان dt افت درجه حرارت برابر dT است و داریم:

$$-\dot{q}dt = mcdT$$

m جرم المان و C گرمای ویژه مس است. از ترکیب روابط بالا داریم:

$$\frac{-dT}{(T - T_A)} = \frac{hA_1}{mc} dt$$

با انتگرال گیری از رابطه ی فوق:

$$\ln(T - T_A) - \ln(T_0 - T_A) = -\frac{hA_1 t}{mc}$$

که T_0 مقدار دما در زمان $t=0$ است.

این رابطه نشان می دهد که منحنی $\ln(T - T_A)$ نسبت به زمان یک خط مستقیم با شیب $-\frac{hA_1}{mc}$ است. پس با داشتن

شیب منحنی و با توجه به اینکه عوامل دیگر مقادیر ثابتی هستند، می توان h را محاسبه نمود.

برای اینکه رسم منحنی ساده تر باشد، می توان به جای لگاریتم نپرین، نمودار $\log(T - T_A)$ را نسبت به زمان رسم نمود. رابطه ی زیر برقرار است:

$$\ln N = \log_e N = 2.3026 \times \log_{10} N$$

اگر شیب نمودار $\log(T - T_A)$ نسبت به زمان را M بنامیم:

$$M = -\frac{hA_1}{2.3026mc}$$

$$h = -2.3026 \frac{mc}{A_1} M$$

در صورتی که سرعت در بالادست جریان مشخص باشد با توجه به مقدار کاهش سطح جریان در اثر وجود میله ها می توان مقدار سرعت متوسط هوایی را که از روی المان عبور می کند به دست آورد. سرعت در بالادست جریان (V_1) از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$\rho \frac{V_1^2}{2} = H_1$$

H_1 هد سرعت در بالادست جریان و ρ دانسیته ی هواست که با فرض اینکه هوا گاز ایده آل باشد، به راحتی قابل محاسبه است. (توجه: $1 \text{ CmH}_2\text{O} = 98.1 \text{ N/m}^2$)

دقت داشته باشید با توجه به قطر میله ها و سطح مقطع محفظه در صورتی که یک میله در مسیر باشد، سرعت متوسط برابر است با $V = \frac{10}{9} V_1$ و اگر پنج میله وجود داشته باشد به صورت $V = 2V_1$ خواهد بود.

دیگر پارامترهای مورد استفاده عبارت اند از:

$H_2(\text{CmH}_2\text{O})$

هد سرعت در پایین دست جریان

$H_3(\text{CmH}_2\text{O})$

افت فشار استاتیک هنگام عبور از میله ها

$P_A(\text{N/m}^2)$

فشار محیط آزمایشگاه

$T_A(\text{K})$

درجه حرارت هوا

$V_2(\text{m/sec})$ سرعت در پایین دست جریان

$C_p(\text{J/kg}^\circ\text{C})$ گرمای ویژه ی هوا در فشار ثابت

$\mu(\text{kg/m.sec})$ ضریب لزجت هوا

$Nu = \frac{hd}{k}$ عدد ناسلت (Nusselt Number)

$Pr = \frac{C_p\mu}{k}$ عدد پرانتل (Prandtl Number)

$Re = \frac{\rho Vd}{\mu}$ عدد رینولدز (Reynolds Number)

۴- روش انجام آزمایش:

قبل از هر چیز فشار و دمای آزمایشگاه را یادداشت کنید. درحالی که دریچه ی تنظیم تقریباً بسته است، دستگاه را روشن کنید و آزمایش های زیر را انجام دهید.

آزمایش اول

الف- دریچه ی تنظیم را بر روی ۲۰ درصد قرار دهید. المان مسی را داخل گرمکن قرار داده و گرمکن را روشن کنید. هنگامی که درجه حرارت المان حدود ۶۰-۷۰ درجه سانتی گراد (یا دمای تعیین شده توسط کارشناس آزمایشگاه) رسید، المان را از گرمکن خارج کرده و در سوراخ وسط اولین ستون قرار دهید. با استفاده از یک کرنومتر در زمان های مختلف درجه حرارت المان را یادداشت کرده و در جدولی بنویسید. هد سرعت در بالادست جریان (H_1) را نیز به دست آورید (تفاضل فشار کل و فشار استاتیک).

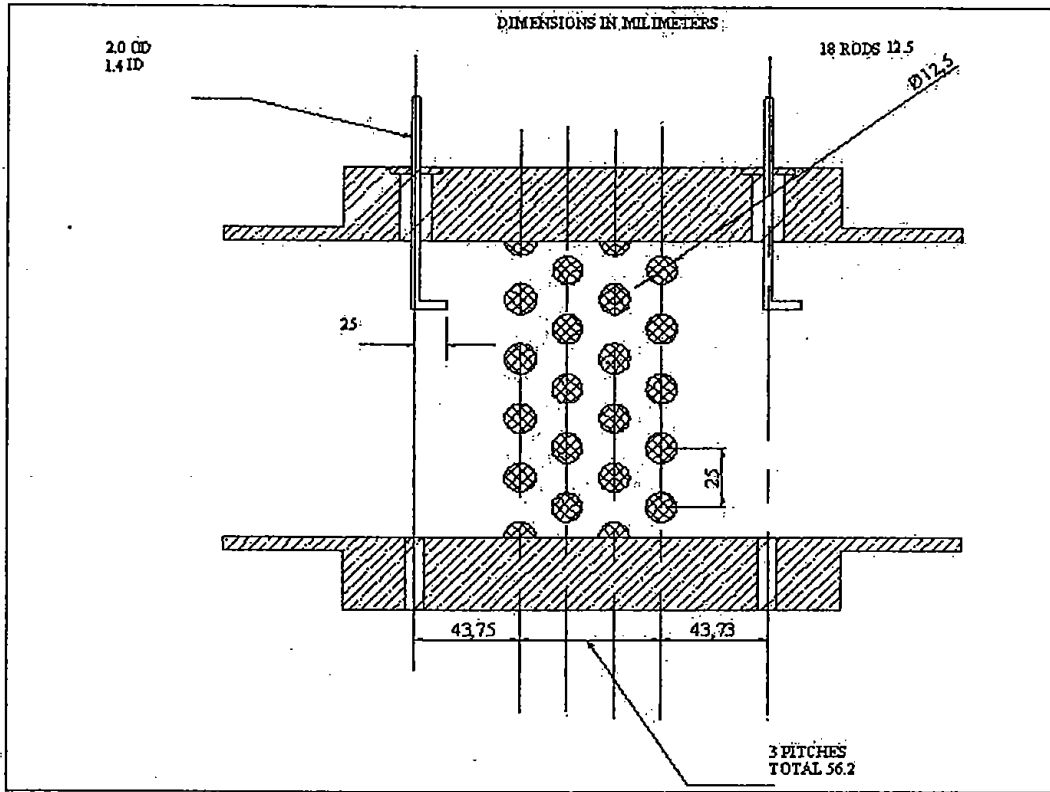
ب- دریچه ی تنظیم را بر روی ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ درصد قرار داده و مانند قسمت اول آزمایش را انجام داده مقادیر لازم را یادداشت کنید.

آزمایش دوم

در این آزمایش تمام میله‌های شیشه‌ای را در محل‌های خود قرار دهید. در پیچه‌ی تنظیم هوا را در ۵ حالت مختلف (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) قرار داده و در هر حالت مقادیر H_1 و افت فشار استاتیک هنگام عبور از محل میله‌ها (H_3) را یادداشت کنید.

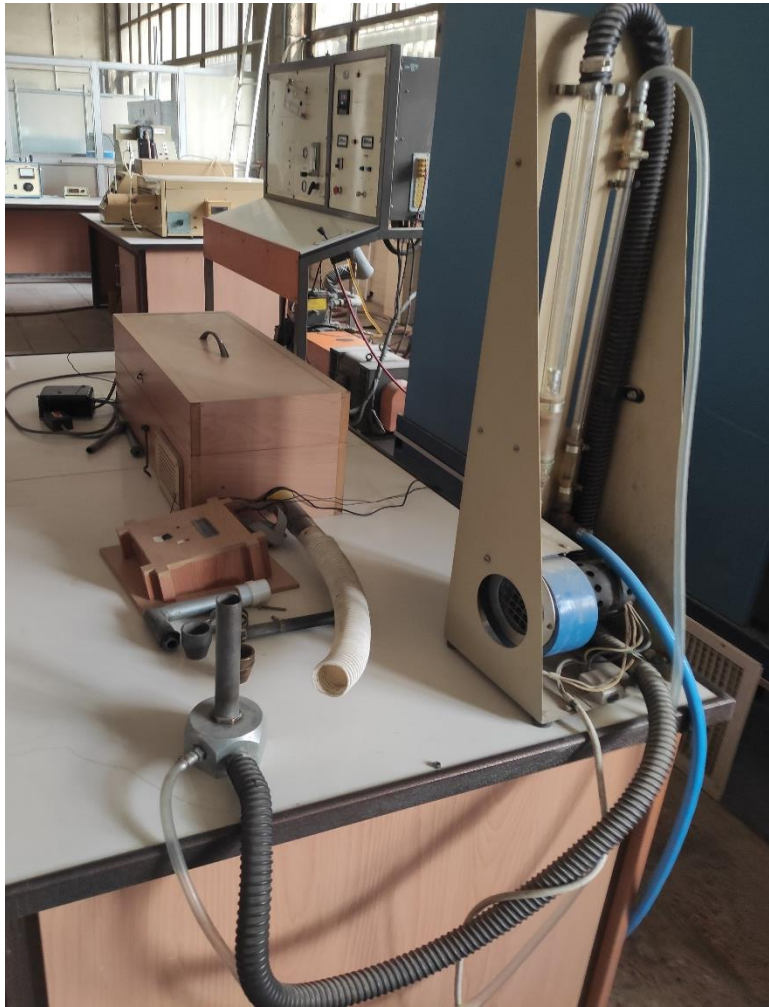
۵- خواسته‌های آزمایش:

۱. با استفاده از دما و فشار هوای آزمایشگاه مشخصات دیگر هوا را از جدول به دست آورید و مقادیر ρ و Pr را محاسبه کنید (برای هوا $K = 287 \text{ N.m/kg}$).
۲. نتایج هر یک از قسمت‌های آزمایش اول جدول زیر را تکمیل کنید و با استفاده از آن نمودار $\log_{10}(T - T_A)$ نسبت به زمان (منحنی سرد شدن را رسم کنید).
۳. از روی منحنی‌های رسم شده شیب (M) را به دست آورده مقدار h را محاسبه کنید.
۴. عدد ناسلت (Nu) و عدد رینولدز (Re) را در هر قسمت محاسبه کرده و نوع جریان را مشخص کنید.
۵. علل تغییرات h در حالات فوق را بیان کنید.
۶. منحنی‌های سرد شدن در حالات فوق را مقایسه کنید.
۷. با استفاده از نتایج آزمایش دوم منحنی H_1 بر حسب H_3 را رسم کرده و روی نتایج حاصل از منحنی فوق بحث نمایید.
۸. چند نمونه مبدل حرارتی مورد استفاده در صنعت را مثال بزنید و تعیین کنید در هر نمونه انتقال حرارت بیشتر به کدام یک از روش‌های هدایت، جابجایی و یا تشعشع انجام می‌شود.
(تمام محاسبات در سیستم متریک انجام شود).



شکل ۱ - موقعیت میله‌ها در محفظه

آزمایش پایداری شعله (۳)



۱- هدف:

هدف از انجام این آزمایش بررسی پایداری شعله و اندازه گیری سرعت شعله است.

۲- مقدمه:

امروزه کاهش ذخایر سوختی فسیلی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی، افزایش آلاینده‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی آن‌ها به‌ویژه بر سلامت انسان، نیاز به کنترل دمای شعله و دیگر پارامترهای احتراقی برای تولید محصولات با کیفیت

بهرتر و بسیاری مسائل دیگر بشر را به تلاش برای افزایش دانش خود نسبت به پدیده احتراق واداشته است. آزمایش احتراق چنان طراحی شده است که امکان نمایش کیفی و کمی زمینه‌های متنوع این دانش را فراهم می‌کند.

۳- شرح دستگاه:

یک دمنده کوچک، هوای موردنیاز را تأمین می‌کند. میزان هوای دمیده شده با یک شیر کنترل می‌شود و دبی حجمی آن توسط روتامتر قابل اندازه‌گیری است. سوخت گازی نیز از یک سیلندر تأمین و به روش مشابه کنترل و اندازه‌گیری می‌شود. هوا و گاز جداگانه وارد مخلوط کننده (Mixing Block) شده و مخلوط همگن هوا و سوخت از مخلوط کننده خارج می‌گردد. می‌توان به خروجی مخلوط کننده لوله‌هایی که دارای قطر متفاوتی است متصل نمود و پایداری شعله را بررسی کرد. برای اندازه‌گیری سرعت شعله از دستگاه اندازه‌گیری سرعت شعله که از اجزاء زیر تشکیل شده است استفاده می‌شود.

۱. لوله شفاف: این لوله از جنس کوارتز، قطر خارجی آن ۴ cm و ضخامت جدار آن حدود ۱ mm است. ابتدای این لوله به یک شلنگ خرطومی متصل است که قابل اتصال به دستگاه مخلوط کننده است. انتهای لوله نیز به وسیله یک شلنگ نسبتاً انعطاف پذیر به یک فندک متصل است.
۲. فندک: یک لوله فلزی به انتهای لوله شفاف متصل است. در این لوله یک جرقه زن (شمع) نصب شده است. ولتاژ موردنیاز برای جرقه به وسیله یک کویل که داخل یک جعبه سیاه‌رنگ قرار گرفته است تأمین می‌شود. با فشردن دکمه فندک، جرقه زده می‌شود.
۳. حس گرها: دو عدد حس گر حساس به نور روی لوله نصب شده‌اند. فاصله این حس گرها از یکدیگر ۵۰ cm است. خود حس گرها درون لوله‌هایی عایق به نور قرار داده شده‌اند تا شعله را فقط در صورتی که روبروی آنها باشد حس کنند.
۴. جعبه چوبی: چون در این آزمایش از حس گر توری استفاده شده است لازم است که محیط تاریک باشد. برای این منظور از یک جعبه چوبی استفاده شده است. علاوه بر قسمتی از لوله شفاف، حس گرها و مدار الکترونیکی نیز داخل این جعبه قرار دارند.
۵. جعبه نمایشگر: بر روی این صفحه یک نمایشگر چهاررقمی وجود دارد که سرعت شعله را با یک رقم صحیح و سه رقم اعشار نمایش می‌دهد. دو عدد چراغ نیز روی این صفحه قرار دارد که هر کدام مربوط به یکی از حس گرها است، چراغ شماره ۱ مربوط به حس گر اول و چراغ شماره ۲ مربوط به حس گر دوم است. با عبور

شعله از جلوی هر حس گر چراغ مربوط به آن روشن می شود. یک دکمه نیز روی این صفحه نصب شده است که به منظور Reset کردن سیستم الکترونیکی است، با زدن این دکمه سیستم الکترونیکی به حالت اولیه بازمی گردد.

۶. مدار الکترونیکی: با عبور شعله از روبروی حس گر اول، یک پیغام به ریزپردازنده موجود در مدار فرستاده می شود، شعله حرکت کرده و به حس گر دوم می رسد و باعث می شود که پیغام دیگری به ریزپردازنده فرستاده شود. در ریزپردازنده زمان بین دو پیغام برحسب ثانیه به دست آمده و فاصله دو حس گر که نیم متر است بر این زمان تقسیم می شود، بدین ترتیب سرعت شعله برحسب متر بر ثانیه به دست آمده و روی نمایشگر نمایش داده می شود.

دو مقاومت متغیر در داخل جعبه نمایشگر وجود دارد که با تغییر مقاومت آن ها می توان حساسیت حس گر ها را تنظیم کرد. اگر پیچ مقاومت ها ساعت گرد چرخانده شود، حساسیت زیاد و اگر پادساعت گرد چرخانده شوند، حساسیت کم می شود.

۴- روش انجام آزمایش:

قبل از انجام آزمایش درجه حرارت و فشار محیط آزمایشگاه را یادداشت نمایید.

الف: پایداری شعله

یکی از لوله های فلزی را به مخلوط کننده متصل کنید. دبی سوخت را روی ۰/۵ و دبی هوا را روی ۱۰ قرار دهید. با فندک مخلوط هوا و سوخت را مشتعل کنید. در این حالت شعله زردی مشاهده می شود. به تدریج دبی هوا را افزایش دهید تا زردی شعله از بین رفته و شعله آبی داشته باشید. کمترین دبی هوایی که شعله کاملاً آبی می شود را یادداشت کنید (حالت Yellow Tipping). اکنون دبی هوا را به تدریج افزایش دهید تا شعله خاموش شود. در این حالت نیز دبی هوا را یادداشت نمایید (حالت Lift off). همین عملیات را برای دبی سوخت ۱، ۱/۵ و ۲ انجام دهید و در هر مرحله دبی هوای مربوط به حالت Yellow Tipping و Lift Off را تعیین کنید.

ب: بررسی پدیده Flash Back

قطرترین لوله فلزی را به مخلوط کننده متصل کنید. دبی سوخت را روی ۰/۵ و دبی هوا را روی ۸ قرار دهید و با فندک مخلوط هوا و سوخت را مشتعل کنید. سپس به تدریج دبی هوا را افزایش دهید. با افزایش دبی هوا مشاهده می گردد که شعله به درون لوله کشیده می شود. به این پدیده Flash Back گویند. کمترین دبی هوایی که Flash

Back اتفاق می افتد را یادداشت کنید. همین عملیات را برای دبی سوخت ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و ۴ تکرار کنید و در هر مرحله دبی هوای مربوط به شروع Flash Back را یادداشت نمایید.

ب: اندازه گیری سرعت شعله و تعیین اثر نسبت هوا به سوخت

۱- مرحله اول (اندازه گیری دستی)^۱

لوله خرطومی سفیدرنگ را به مخلوط کننده متصل نمایید. اکنون دبی هوا را روی ۱۴ و دبی گاز را روی یک تنظیم کنید. حدود یک دقیقه صبر کنید، سپس هم زمان دو شیر گاز و هوا را ببندید. چند ثانیه صبر کنید تا مخلوط به طور کامل در لوله ساکن شود سپس کلید جرقه زن را فشار دهید. مشاهده می شود که شعله تشکیل شده و در لوله حرکت می کند. روی لوله شیشه ای در دو طرف جعبه چوبی، دو علامت فلش نصب شده اند. فاصله این دو علامت یک متر است. با استفاده از کرنومتر زمانی را که شعله این فاصله را می پیماید اندازه گیری کنید و با استفاده از آن سرعت شعله را محاسبه نمایید.

این آزمایش را برای دبی هوای ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ هم تکرار کنید.

۲- مرحله دوم (اندازه گیری به وسیله دستگاه)

دستگاه اندازه گیری را روشن کنید، مراحل گفته شده در بالا را برای دبی هوای ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۶ تکرار کنید، این بار به جای استفاده از کرنومتر، از دستگاه اندازه گیری سرعت شعله استفاده کنید. پس از جرقه زدن شعله در طول لوله حرکت کرده، ابتدا به حس گر (۱) و سپس به حس گر (۲) می رسد که باعث می شود چراغ های مربوطه، یکی پس از دیگری روشن شوند. بلافاصله پس از روشن شدن چراغ حس گر (۲)، سرعت شعله روی نمایشگر ظاهر می شود.

ممکن است نویز ایجاد شده به وسیله فندک که کلید Reset را بزنید تا حافظه پردازنده مربوطه خالی شود. بهتر است زدن فندک و دکمه Reset را یک نفر انجام دهد.

ج- تذکرات مهم:

۱- هرگز قبل از بستن شیرهای سوخت و هوا جرقه نزنید.

۲- دکمه Reset را نگه ندارید.

^۱ تنها در صورت بروز نقص فنی در دستگاه اندازه گیری اتوماتیک سرعت، سرعت را به صورت دستی اندازه گیری کنید.

۳- پس از انجام هر مرحله ۱۵ الی ۳۰ ثانیه فقط شیر هوا را باز کنید تا محصولات احتراق کاملاً خارج شوند و لوله خنک شود.

د- خواسته‌های آزمایش:

۱. نمودار Yellow Tipping و Lift Off را در دو حالت با و بدون پایدارکننده شعله روی یک دستگاه مختصات رسم کنید. در این نمودار محور افقی دبی سوخت و محور عمودی نسبت هوا به سوخت را نشان می‌دهد. روی نمودار بحث کرده و اثرات پایدارکننده شعله را بررسی کنید.
۲. نمودار Flash Back را رسم کنید. در این نمودار محور افقی دبی سوخت و محور عمودی نسبت هوا به سوخت را نشان می‌دهد. روی نمودار بحث کنید.
۳. نمودار تغییرات سرعت شعله را بر حسب تغییرات نسبت هوا به سوخت رسم نمایید و روی آن بحث کنید.
۴. نتایج به دست آمده از مرحله اول و مرحله دوم آزمایش سرعت شعله را مقایسه کنید و منابع خطا را ذکر کنید.

۴- سؤالات:

۱. دلیل پدیده Lift Off، Yellow Tipping و Flash back را از نظر تئوریک به طور کامل تشریح کنید.
۲. پایدارکننده چگونه به پایداری شعله کمک می‌کند. به طور کامل توضیح دهید.
۳. در آزمایش سرعت شعله مشاهده می‌شود که با وجود اینکه مخلوط هوا و گاز در لوله ساکن است، جبهه شعله دارای انحنا است. علت آن را توضیح دهید.
۴. چه عواملی بر سرعت شعله مؤثر است؟ تمامی این عوامل و نحوه تأثیر آن‌ها را توضیح دهید.
۵. در مورد علت تفاوت رنگ در نقاط مختلف شعله توضیح دهید. آیا رنگی که در آن احتراق به صورت بهینه انجام می‌گیرد برای سوخت‌های مختلف یکسان است؟
۶. یکی از زمینه‌هایی که اخیراً توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است احتراق در ابعاد نانومتری (Nano Combustion) است. در مورد کاربردها و مکانیسم‌هایی که برای ایجاد احتراق در این ابعاد طراحی شده تحقیق کنید.
۷. دانستن اطلاعاتی در مورد سرعت شعله چه کاربردی در صنعت دارد؟ حداقل سه مثال از کاربردهای عملی مطالعه سرعت شعله را ذکر کنید.

آزمایش کمپرسور (۴)



۱- هدف:

هدف از این آزمایش آشنایی و مطالعه چرخه فشار در یک کمپرسور سیلندر - پیستونی و به دست آوردن مشخصات کارکرد آن است.

۲- تئوری

الف- آنالیز مختصر کمپرسور هوا

کمپرسور رفت و برگشتی یک ماشین ساده‌ی مکانیکی است که یک حجم مشخص از هوا وارد سیلندر آن می‌شود. هوا در داخل سیلندر فشرده‌شده، فشار و درجه حرارت آن بالا می‌رود. هوا در این کمپرسور یک چرخه چهار مرحله‌ای را طی می‌کند که مراحل آن عبارت است از:

مکش، تراکم، تخلیه و انبساط

یک نمودار P.V ایده‌آل را برای کمپرسور به شرح زیر است:

d→a مرحله‌ی مکش

a→b مرحله‌ی تراکم

b→c مرحله‌ی تخلیه

c→d مرحله‌ی انبساط

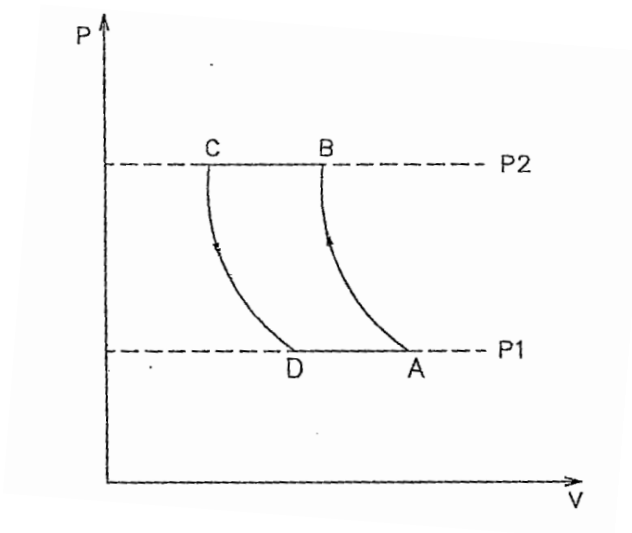
مرحله‌ی مکش و مرحله‌ی تخلیه پروسه‌های فشار ثابت هستند که به ترتیب در فشار محیط و فشار مخزن انجام می‌شوند که در مورد مرحله تراکم و انبساط اگر هوا را گاز ایده‌آل فرض کنیم برای یک فرآیند برگشت پذیر^۹ هم‌دما^{۱۰} داریم:

$$PV = \text{Const.}$$

و برای یک فرآیند آدیاباتی^{۱۱} برگشت پذیر (ایزنتروپیک):

$$PV^k = \text{Const.}$$

$$k = \frac{C_P}{C_V}$$



شکل (۱) - نمودار P.V ایده‌آل برای یک سیلندر

^۹. Reversible

^{۱۰}. Isothermal

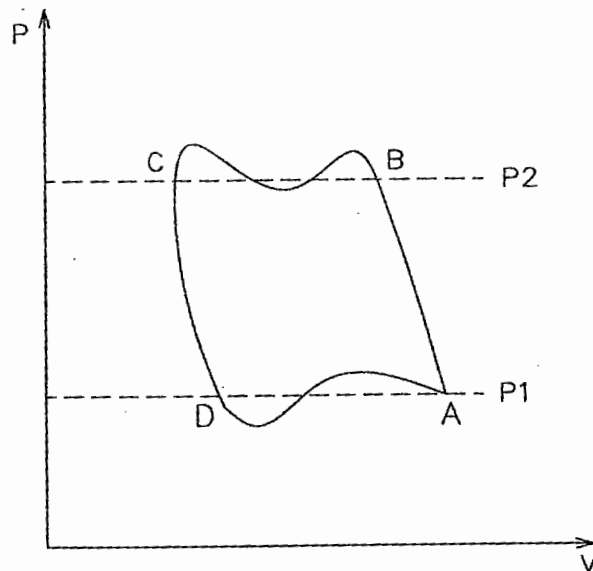
در مورد کمپرسور مخصوصاً در سرعت‌های نسبتاً پایین (۱۰۰۰ - ۵۰۰ دور در دقیقه) انتقال حرارت وجود دارد. بنابراین نمی‌توان فرآیند را آدیباتیک فرض کرد و از طرفی این انتقال حرارت در حدی نیست که دما را ثابت نگه دارد پس فرآیند را هم‌دما هم نمی‌توان در نظر گرفت. تجربه نشان داده است که فرآیند تراکم پلی‌تروپیک است.

$$PV^n = Const.$$

به نحوی که برای نمای پلی‌تروپیک (n) داریم:

$$1 < n < k$$

شکل شماره ۱ برای حالت واقعی اندکی متفاوت است و به آن نمودار اندیکاتوری می‌گویند که در شکل (۲) نشان داده شده است. نمودار اندیکاتوری با استفاده از داده‌های واقعی کمپرسور ترسیم میشود و میتوان با محاسبه مساحت داخل چرخه آن، میزان کار ورودی به کمپرسور را محاسبه نمود که به آن کار اندیکاتوری یا W_i می‌گویند. در گذشته آزمون کمپرسور مجهز به تجهیزاتی بود که نمودار چرخه کارکرد کمپرسور را ترسیم می‌کرد اما هم‌اکنون خراب شده است. آزمایشگاه انتقال حرارت از دانشجویان علاقه‌مند برای تعمیر سازوکار ترسیم نمودار چرخه کمپرسور در قالب پایان نامه کارشناسی استقبال می‌کند.



شکل (۲) - نمودار چرخه واقعی (اندیکاتوری)

روش دیگر محاسبه کار کمپرسور، در نظر گرفتن فرایند به صورت دایمی در ورودی و خروجی کمپرسور است. در این حالت کار پلی تروپیک برای یک فرایند دایمی بازگشت پذیر (reversible SSSF) برابر با منفی مساحت زیر نمودار V-P است:

$$W_c = -\dot{m} \int_i^e v dP = \frac{n}{n-1} (P_1 \dot{V}_1 - P_2 \dot{V}_2)$$

که در آن \dot{V} دبی حجمی هوا است و با استفاده از روابط ترمودینامیک داریم:

$$|W_c| = \dot{m}_a RT_1 \left(\frac{n}{n-1} \right) \left\{ r_p^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \quad (1)$$

که در آن r_p نسبت فشار کمپرسور $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$ ، \dot{m}_a دبی جرمی هوا و T_1 دمای مطلق هوای ورودی است. اگر فرایند تراکم، همدم (ایزوترمال) در نظر گرفته شود، مقدار کار لازم کمینه می شود. این مقدار کار برای یک کمپرسور به عنوان مبنا در نظر گرفته می شود.

کار کمپرسور در فرایند دایمی همدمای برگشت پذیر از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$W_{is} = \dot{m}_a RT_1 \log_e r_p$$

کار مکانیکی انجام شده توسط موتور الکتریکی که محرک کمپرسور است؛ از رابطه‌ی زیر به دست می آید:

$$W_{mech} = 2\pi NT_V$$

که در آن T_V گشتاور استاتور و N سرعت موتور الکتریکی است.

راندمان حجمی برای کمپرسور عبارت است از:

$$\eta = \frac{\text{دبی حجمی هوای ورودی به کمپرسور}}{\text{حجم هوای رودی به پیستون در هر چرخه}} = \frac{\text{دبی حجمی هوای جابجایی پیستون در همان شرایط ترمودینامیکی}}{\text{حجم جابجایی پیستون}}$$

راندمان ایزوترمال، راندمان کلی ایزوترمال و راندمان مکانیکی برای کمپرسور به ترتیب با روابط زیر تعریف می شوند:

$$\eta_{is} = \frac{W_{is}}{W_i}$$

$$\eta_{iso} = \frac{W_{is}}{W_{mech}}$$

$$\eta_{mech} = \frac{W_i}{W_{mech}}$$

برای اطلاعات بیشتر به کتب ترمودینامیک J.B.Jones، Van Vlyen و Rager and Meghew مراجعه کنید.

ب - تعاریف اصلی سایکومتري

هوای معمولی اتمسفر همیشه دارای مقداری بخار آب است و این مقدار با شرایط ترمودینامیکی هوا تغییر می کند. در یک فرایند تراکم در کمپرسور نیز مقدار بخار آب موجود در هوا تغییر می کند. رطوبت مطلق هوا با رابطه ی زیر تعریف می شوند:

$$\omega = \frac{\text{جرم بخار آب}}{\text{جرم هوای خشک}} = \frac{m_v}{m_a} = \frac{v_a}{v_v}$$

v_a و v_v حجم مخصوص هوای خشک و بخار آب است. اگر هوا را گاز ایده آل در نظر بگیریم:

$$W = \frac{P_v}{P_a} \times \frac{R_a}{R_v} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

$$W = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v}$$

P فشار هوا، P_v فشار جزئی بخار، P_a فشار جزئی هوای خشک و رطوبت نسبی نیز با رابطه زیر تعریف می شود:

$$\phi = \frac{\text{فشار جزئی بخار آب موجود در هوا}}{\text{فشار اشباع بخار آب در همان دما}}$$

$$\phi = \frac{P_v}{(P_v)_{sat}} = \frac{m_v}{(m_v)_{sat}} = \frac{(V_v)_{sat}}{V_v}$$

۳- شرح دستگاه و وسایل اندازه گیری:

دستگاه آزمایش عبارت است از یک کمپرسور رفت و برگشتی، دو سیلندر، تک مرحله ای و خنک شونده توسط هوا که به وسیله ی یک دینامومتر الکتریکی با سرعت متغیر کار می کند. جریان الکتریکی داده شده به موتور و در نتیجه سرعت آن توسط کلید بزرگ روی تابلو قابل کنترل است. (میدان موتور توسط یک جریان مستقیم ثابت تغذیه می شود). برای اندازه گیری توان اعمالی به موتور الکتریکی، موتور به یک نیروسنج فنی متصل شده است که نیروی وارد بر پوسته ی استاتور را اندازه گیری می کند. قدرت الکتریکی داده شده به موتور توسط ولت متر و آمپر متر اندازه گرفته می شود. سرعت دورانی کمپرسور نیز به وسیله ی یک تاکومتر الکتریکی قابل اندازه گیری است.

هوای فشرده شده وارد یک مخزن می شود و سپس از یک سوراخ (اوریفیس) عبور می کند که توسط افت فشار حاصله می توان دبی سیال را به دست آورد. در مسیر هوا یک شیر کنترل تعبیه شده است که به وسیله ی آن می توان دبی هوای خروجی و فشار داخل مخزن را تنظیم نمود. فشار ورودی و خروجی سیال و همین طور فشار مخزن قابل اندازه گیری است. دمای نقاط مختلف چرخه توسط ترموکوپل و یک اندیکاتور دمای چند نقطه ای اندازه گیری می شود.

برای محاسبه ی رطوبت هوا درجه حرارت خشک (Dry bulb) و درجه ی حرارت مرطوب (Wet bulb) هوا قبل و بعد از کمپرسور قابل اندازه گیری است

مشخصات دستگاه

موتور الکتریکی:

میدان ثابت 220V-0.4A جریان مستقیم

جریان ورودی تک فاز 220 – 240 V – 50/60 HZ

ماکزیمم قدرت ورودی 2.2 KW

طول بازوی استاتور 16 Cm

سرعت موتور الکتریکی 0-3000 R.P.M

کمپرسور:

تعداد سیلندر ۲ عدد

66.7 mm	قطر پیستون
63.5 mm	کورس پیستون
220 Cm ³	حجم جابه‌جایی پیستون
262 Lit/min	ماکزیمم دبی هوا
10.3 bar (150 psi)	ماکزیمم فشار ایجادشده
425-850 R.P.M	سرعت مجاز

تسمه:

نسبت کاهش 3.57

مخزن:

110 Lit	حجم مخزن
11 bar (160 psi)	کنترل شیر اطمینان

اوریفیس:

12.7 mm	قطر کوچک
25.4 mm	قطر بزرگ

۴- روش انجام آزمایش

ابتدا فشار و درجه حرارت آزمایشگاه را اندازه بگیرید.

آزمایش اول:

شیر کنترل را باز کنید تا مطمئن شوید که فشار مخزن برابر صفر است. درجه نیروسنج را روی صفر تنظیم کنید. سپس کلید اصلی را روشن کنید و توسط کلید بزرگ روی تابلو جریان ورودی موتور را اضافه کنید تا سرعت کمپرسور به ۶۰۰ دور در دقیقه برسد. شیر کنترل را ببندید تا فشار مخزن به حدود ۲ بار برسد. حال شیر را کمی باز کنید تا فشار ثابت

بماند. دوباره سرعت را روی ۶۰۰ تنظیم کنید و در این حالت مشخصه‌های نیروی نیروسنج، دما و فشار ورودی و خروجی هوا و همین‌طور دما و فشار مخزن و افت فشار در اوریفیس را یادداشت کنید. پس از آن فشار را به ترتیب به ۲، ۴، ۶ و ۸ بار برسانید و در هر مرحله مقادیر بالا را یادداشت کنید. (در هر مرحله ولتاژ و جریان ورودی را نیز یادداشت کنید).

حال سرعت را اضافه کنید تا به ۷۵۰ دور در دقیقه برسد و برای فشارهای ۲، ۴، ۶ و ۸ بار عملیات بالا را تکرار کنید. در این سرعت برای فشار ۸ بار علاوه بر مشخصه‌های ذکر شده، درجه حرارت (dry bulb) و درجه حرارت (Wet bulb) را نیز برای هوای ورودی و خروجی یادداشت نمایید. پس از پایان آزمایش نیز شیر زیر مخزن را باز کنید تا فشار به صفر برسد. کلید بزرگ را به سرعت برگردانید و کلید اصلی را خاموش کنید.

۵- خواسته‌های آزمایش:

۱. با استفاده از نتایج آزمایش اول و دوم برای سرعت ۷۵۰ دور در دقیقه و فشار ۸ بار محاسبات زیر را انجام دهید. (دقت کنید که فشارهای اندازه گرفته شده فشار نسبی است و در محاسبات از فشار مطلق استفاده کنید).

- دبی حجمی هوا \dot{Q}_a

دبی حجمی هوا از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\dot{Q}_a = 1.887 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{\Delta P \cdot T_3}{P_3}} \quad \text{lit/sec}$$

ΔP بر حسب میلی‌متر آب، P_3 بر حسب بار، T_3 بر حسب درجه‌ی کلوین

- دبی جرمی هوا \dot{m}_a

- نسبت فشار:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

- نسبت درجه حرارت‌ها:

$$r_t = \frac{T_2}{T_1}$$

- بین نسبت فشار و نسبت درجه حرارت‌ها رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

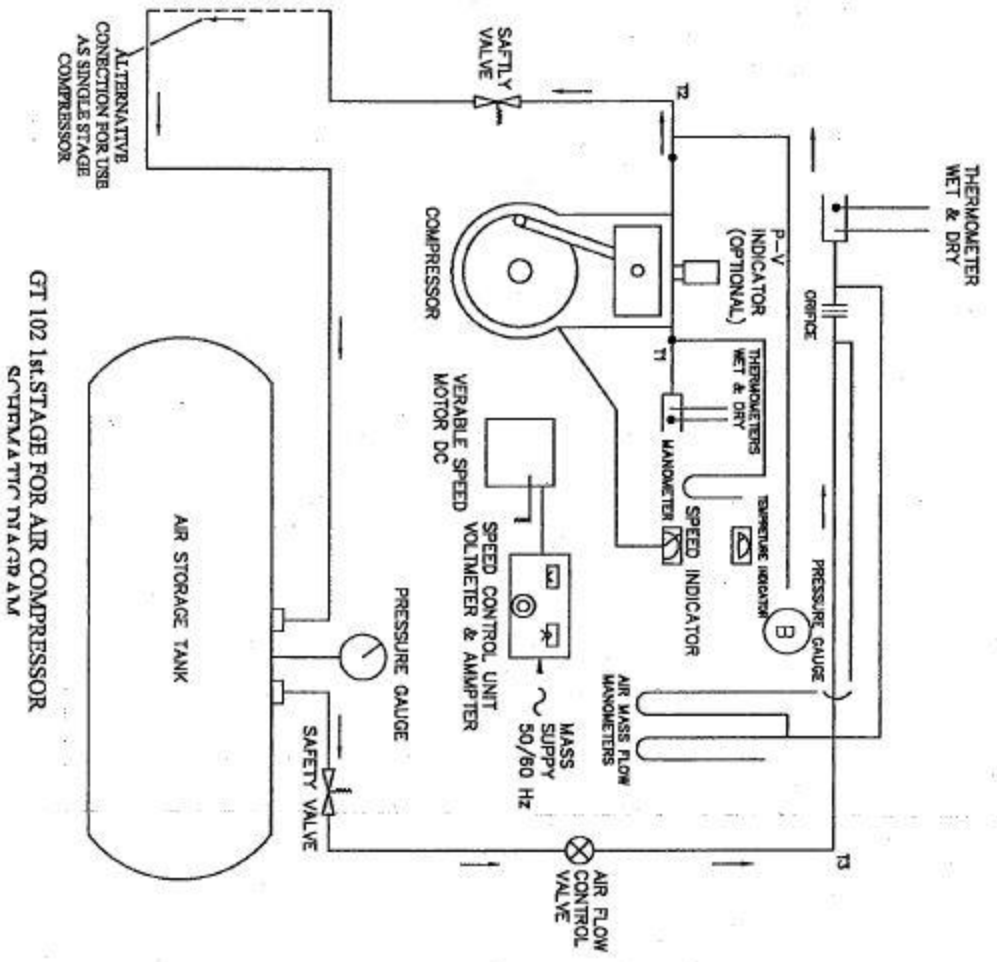
- کارپلی تروپیک: W_p
- کار ایزوترمال: W_{is}
- راندمان حجمی: η_v
- راندمان مکانیکی: η_{mech}
- راندمان ایزوترمال: η_{iso}
- راندمان کلی ایزوترمال: η_{iso}
- فشار جزئی بخار و رطوبت مطلق هوای ورودی و خروجی: w, P_v
- رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی (با استفاده از جدول ضمیمه): Φ
- قدرت داده شده به موتور الکتریکی (قدرت ورودی به اضافه ی قدرت میدان): P_e

۲. با استفاده از نتایج آزمایش اول برای سرعت های ۶۰۰ و ۷۵۰ دور در دقیقه

- ✓ منحنی نسبت فشار ما را برحسب I_p روی کاغذ تمام لگاریتمی رسم کنید و از روی شیب منحنی مقدار اندیس (n) را محاسبه نمایید.
- ✓ منحنی راندمان حجمی و راندمان کلی ایزوترمال را برحسب I_p روی کاغذ میلی متری رسم کنید و روی منحنی های به دست آمده، بحث نمایید.
- ✓ منحنی قدرت الکتریکی داده شده به ازای واحد جرم هوا را نسبت به I_p رسم کنید.

سوالات آزمایش

- ❖ در عمل کمپرسور برای چه مورد استفاده قرار می گیرد؟
- ❖ چرا در کمپرسور رفت و آمدی از راندمان ایزوترمال و در کمپرسور دورانی از راندمان ایزنتروپیک استفاده می شود؟



TDryC	WET BULB DEPRESSION ($T_D - T_W$) C									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
15	80	61	44	27	13	-	-	-	-	-
16	81	63	46	30	15	-	-	-	-	-
17	81	64	47	32	18	-	-	-	-	-
18	82	65	49	34	20	-	-	-	-	-
19	82	65	50	36	22	10	-	-	-	-
20	83	66	51	37	24	12	-	-	-	-
21	83	67	53	39	26	14	-	-	-	-
22	83	68	54	40	28	17	6	-	-	-
25	84	69	50	42	30	19	8	-	-	-
24	84	69	56	43	31	20	10	-	-	-
25	84	70	27	44	33	22	12	-	-	-
26	85	71	58	46	34	24	14	5	-	-
27	85	71	58	47	36	26	16	7	-	-
28	85	72	59	48	37	27	18	9	-	-
29	86	72	60	49	38	28	19	11	-	-
30	86	73	61	50	39	30	21	13	5	-
31	86	73	61	51	40	31	22	14	7	-
32	86	74	62	51	44	32	24	16	9	-
33	87	74	63	52	43	35	25	17	10	-
34	87	75	63	53	43	35	26	19	12	5
35	87	75	64	54	44	36	28	20	13	7

Vapour Pressurg P_s (bar)
0.017
0.01817
0.01936
0.02063
0.02200
0.02337
0.02486
0.02642
0.02808
0.02932
0.03166
0.03360
0.03564
0.03779
0.04004
0.04242
0.04491
0.04754
0.05029
0.05318
0.05622

RELATIVE HUMIDITY ϕ AND SATURATED VAPOUR PRESSURE

آزمایش انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری (۵)



۱- مقدمه :

داشتن یک آگاهی اساسی درباره‌ی نظریه انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری، در بسیاری از رشته‌های مهندسی حائز اهمیت است .

دانشجو قادر است با انجام این آزمایش ، تئوری و روابط مربوط به انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری را به‌طور عملی بررسی کند . مفروضات اندازه گرفته‌شده، دانشجو را قادر می‌سازد تا ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) ، ضریب اصطکاک لوله (f) و مشخصه‌های مختلف بدون بعد از قبیل عدد رینولدز (Re) ، عدد ناسلت (Nu) و

عدد استنتون (St) را محاسبه نماید. مقادیر به دست آمده را می توان با مقادیری که از فرمول های تجربی به دست می آیند مقایسه و صحت تشابه را بررسی نمود.

۲- هدف آزمایش :

هدف این آزمایش عبارت است از تعیین صحت اصل تشابه رینولدز ($St=f/2$) برای هوا و همچنین مقایسه مقادیر علمی St ، Nu و f با مقادیری که از فرمول های تجربی به دست می آیند.

۳- تئوری :

انتقال حرارت به طریق جابجایی شامل مبادله انرژی بین سطح جامد و سیال مجاور آن است که خود بر دو نوع تقسیم می شود:

یکی انتقال حرارت به طریق جابجایی اجباری که در آن سیال به وسیله ی یک عامل خارجی مثل پروانه یا تلمبه هوا مجبور به عبور از روی یک سطح جامد می گردد و دیگری انتقال حرارت به طریق جابجایی آزاد یا طبیعی که در آن سیال گرم تر (یا خنک تر) در مجاورت سطح جامد به علت وجود تغییرات درجه حرارت در یک ناحیه از سیال که باعث اختلاف چگالی می شود جریانی را به وجود می آورد..

رابطه انتقال حرارت به طریق جابجایی اولین بار در سال ۱۷۰۱ میلادی توسط نیوتن به صورت زیر بیان گردید:

$$\frac{q}{A} = h\Delta T$$

که در آن q نرخ زمانی انتقال حرارت به طریق جابجایی (W) و A مساحت قائم بر جریان حرارت (m^2) ، ΔT اختلاف درجه حرارت بین سطح و سیال (K) و h ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2.K$) است.

برای انجام محاسبات این آزمایش باید به موارد زیر اشاره کرد:

مقدار حرارت داده شده به دستگاه ، حرارتی است که توسط نوار حرارتی تولید می گردد. مقدار حرارت تلف شده در قسمت ایزولاسیون (عایق بندی حرارتی) از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$Q = \frac{2\pi kL}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \Delta T$$

که در اینجا :

k	ضریب هدایت گرمایی برای ماده ایزولاسیون
L	طول حرارت داده شده
r_i	قطر داخلی عایق
r_o	قطر خارجی عایق
ΔT	میانگین اختلاف درجه حرارت متوسط در دوسر ایزولاسیون

فلو حرارتی در داخل دیواره لوله از تقسیم مقدار حرارت خالص Q_{net} بر مساحت دیوار داخلی A به دست می آید :

$$\text{فلوی حرارتی} = \frac{Q_{net}}{A}$$

مقدار حرارت داده شده از طریق هدایت از رابطه‌ی زیر به دست می آید :

$$Q = \frac{2\pi r t k \Delta T}{\Delta X}$$

که در اینجا :

r	شعاع متوسط لوله مسی
t	ضخامت دیواره
k	ضریب هدایت گرمایی برای لوله (مسی)
$\frac{\Delta T}{\Delta X}$	گرادیان درجه حرارت در طول لوله

است .

باید توجه داشت که با انتخاب یک قسمت از لوله برای محاسبات انتقال حرارت ، کل حرارت داده شده به این طریق

به دست می آید :

$$Q_t = (Q_e - Q_w) \times \frac{b}{L} + Q_{cond}$$

که b طول حرارت داده شده تا قسمت انتخابی و L طول کل لوله حرارت داده شده است. همچنین Q_t کل حرارت داده شده تا قسمت انتخاب شده، Q_e حرارت داده شده به وسیله نوار حرارتی، Q_w حرارت تلف شده در قسمت ایزولاسیون و Q_{Cond} حرارت داده شده از طریق هدایت است.

درجه حرارت متوسط (Bulk mean temperature) هوا از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_b = T_i + \frac{Q_t}{mC_p}$$

که T_i درجه حرارت ورودی هوا و C_p گرمای ویژه هوا و m دبی جرمی هوا می باشد.

برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت جابجایی می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$h = (f \text{ (فلوی حرارتی)}) / (T_w - T_b)$$

که در آن T_w درجه حرارت دیواره لوله است. T_b دمای نقطه ای که در آن موازنه حرارتی انجام می گیرد و توسط ترموکوپل اندازه گرفته می شود.

برای به دست آوردن مقادیر علمی عدد ناسلت (Nu)، عدد استنتون (St) و ضریب اصطکاک (f) از روابط زیر استفاده می شود:

$$Nu = \frac{hd}{k}$$

$$St = \frac{h}{\rho v C_p}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{4fL\rho V^2}{2d}$$

رابطه مربوط به ضریب اصطکاک بر این فرض استوار است که تمام افت فشار، مربوط به اصطکاک است. این فرضیه برای جریان در یک لوله حرارت داده شده معتبر نیست؛ زیرا قسمتی از افت فشار به علت هد شتابی مربوط به انبساط هوایی است که هنگام عبور در طول لوله، حرارت داده شده است.

در این صورت با در نظر گرفتن تأثیر هد شتابی می توان ضریب اصطکاک را با یک دقت منطقی از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{\rho} \left(\frac{W}{A} \right)^2 \left[\frac{4fl}{2d} + \frac{T_2 - T_1}{T} + \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \right]$$

این رابطه به نام رابطه گاگنهایم (Guggenheim) معروف است.

(T_1 و T_2 به ترتیب درجه حرارت ورودی و خروجی لوله آزمایش هستند.)

برای محاسبه مقادیر تجربی Nu ، St و f می توان از روابط معمول و پذیرفته شده زیر استفاده کرد:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$St = 0.023 Re^{-0.2} Pr^{-0.6} = \frac{Nu}{Pr.Re}$$

$$f = 0.079 Re^{-0.25}$$

باید به این نکته توجه کرد که عدد پرانتل $Pr = \frac{\rho v D}{\mu}$ است و تقریباً برای تمام گازها مقدار ثابتی دارد و تغییرات آن با تغییرات فشار و درجه حرارت بسیار ناچیز است.

تشابه اصل رینولدز بر این فرضیه استوار است که $Pr=1$ و می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$Nu = \frac{f}{2} Re$$

از آنجائی که

$$St = \frac{Nu}{Re.Pr}$$

می توان نتیجه گرفت

$$St = \frac{f}{2}$$

با جایگزینی در رابطه ی تجربی

$$St = 0.023 Re^{-0.2} Pr^{-0.6}$$

و با در نظر گرفتن $Pr=1$ فرمول دیگری به دست می آوریم:

$$f = 0.046Re^2$$

شرح دستگاه به طور کامل در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک پروانه سانتریفیوژ (Centrifugal Fan) الکتریکی است که هوا را از یک شیر کنترل مکیده و آن را به درون لوله U شکل می فرستد. سرعت پروانه در طول آزمایش ثابت می ماند. یک سوراخ (Orifice) استاندارد برای اندازه گیری دبی هوا در لوله تعبیه شده است.

این لوله به لوله مسی آزمایشی متصل است، مقداری از آخر لوله آزمایش که قسمت خروجی آن به اتمسفر است توسط یک نوار حرارتی الکتریکی که بر سطح آن پیچیده شده گرم می شود، توان داده شده و به نوار حرارتی را می توان به وسیله یک ترانسفورمر متغیر که به دستگاه متصل است تغییر داد که مقدار این توان به وسیله ولت متر و آمپر متر بر روی صفحه دستگاه اندازه گیری می شود.

لوله آزمایش با پشم شیشه (Fiber Glass) از نظر حرارتی عایق بندی شده است، تمام لوله ها بر روی بلوک های چوبی که به وسیله تنه فولادی دستگاه نگهداری می شود قرار دارد. در دوسر طول مشخصی از لوله آزمایش که در قسمت حرارت داده شده قرار دارد، سوراخ های فشار قرار دارند که فشار خروجی پنکه و افت فشار در سوراخ را اندازه گیری می کنند.

هفت ترموکوپل (که از ۱ تا ۷ شماره گذاری شده اند) در نقاط مختلف دیواره ی لوله مسی در طول حرارت داده شده قرار دارند، شش ترموکوپل دیگر (۸ تا ۱۳) در نقاطی در داخل ایزولاسیون قرار دارند.

محل قرار گرفتن تمام ترموکوپل ها در شکلی که روی صفحه دستگاه قرار دارد مشخص شده اند (شکل ۲)، یک دماسنج جیوه ای، درجه هوای ورودی لوله آزمایش را اندازه گیری می کند.

خروجی هر ترموکوپل را می توان به وسیله یک کلید انتخاب کننده که بر روی صفحه دستگاه قرار دارد مشخص نمود، این خروجی توسط یک پتانسیومتر الکترونیکی (Electronic potentiometer) اندازه گیری می شود.

۴- مشخصات دستگاه :

قطر لوله U شکل	۷۶/۲ میلیمتر
ضریب خروجی سوراخ (Cd)	۰/۶۱۳
قطر سوراخ	۴۰ میلیمتر
طول لوله مسی	۳۰۴۸ میلیمتر
قطر داخلی لوله مسی	۳۲/۶ میلیمتر
ضخامت دیواره لوله مسی	۱/۲ میلیمتر
طول لوله حرارت داده شده	۱۷۵۳ میلیمتر
ضخامت ایزولاسیون (پشم شیشه)	۲۵ میلیمتر
طول لوله آزمایش بین سوراخ های فشار	۱۵۲۴ میلیمتر
ضریب هدایت گرمایی برای ماده لوله (مس)	$380.16 \text{ j/m-sec}^{\circ}\text{C}$
ضریب هدایت گرمایی برای ماده ایزولاسیون	$0.0415 \text{ j/m-sec}^{\circ}\text{C}$
ماده ترموکوپل ها	Copper Constantan

۵- روش انجام آزمایش :

در حالی که شیر ورودی پروانه کاملاً باز است ، آن را روشن کنید ، بعد از انجام این عمل در حالی که ترنسفورمر متغیر بر روی صفر قرار دارد ، هیتر روشن کنید (توجه کنید که این اعمال به همین ترتیب صورت گیرند) .

ولتاژ را زیاد کنید تا جریانی در حدود حداکثر ۴/۵ آمپر به دست آید ، در این حالت دستگاه باید حداقل به مدت ۳۰ دقیقه کار کند تا شرایط دائمی درجه حرارت به دست آید ، درجه حرارت لوله (ترموکوپل های ۱ تا ۷) نباید حداکثر از ۱۵۰ C تجاوز کند .

پس از به دست آمدن شرایط دائمی ، مقادیر زیر را یادداشت کنید :

۱- فشار هوا قبل از سوراخ (فشار پروانه)

۲- افت فشار در دو سر سوراخ

۳- درجه حرارت هوای ورودی لوله آزمایش

۴- درجه حرارت و فشار هوای آزمایشگاه

۵- افت فشار در طول لوله آزمایش

۶- درجه حرارت ترموکوپل های لوله آزمایش (۱ تا ۷)

۷- درجه حرارت ترموکوپل های داخل ایزولاسیون (ترموکوپل های ۸ و ۱۰ و ۱۲ روی لوله) و ترموکوپل های خارج

ایزولاسیون (ترموکوپل های ۹ و ۱۱ و ۱۳ روی ایزولاسیون)

۸- ولتاژ و جریان تولید شده به وسیله ی گرم کننده

پس از انجام آزمایش اول، آزمایش دوم را با فلو حرارتی و عدد رینولدز کمتری انجام دهید، برای انجام این عمل شیر ورودی پروانه را نیمه بسته و ولتاژ را کم کنید تا جریانی در حدود ماکزیمم ۲/۵ آمپر به دست آید. پس از انجام این تغییرات دستگاه دوباره باید به مدت ۳۰ دقیقه کار کند تا شرایط پایدار درجه حرارت به وجود آید.

هنگامی که این شرایط به وجود آمد، مقادیر بالا را برای آزمایش دوم یادداشت کنید.

باید توجه داشت زمانی که گرم کننده روشن است، شیر ورودی پروانه کاملاً بسته نباشد، پس از پایان آزمایش دوم گرم کننده را خاموش کرده و پروانه را برای مدت حداقل پنج دقیقه روشن نگه دارید و سپس آن را خاموش کنید.

۶- خواسته های آزمایش:

محل ترموکوپل ها در شکلی که بر روی صفحه است نشان داده شده است ، پس از یادداشت درجه حرارت ترموکوپل ها مشاهده خواهید کرد که قسمت بین ترموکوپل های ۲ تا ۵ از تأثیر جریان ابتدا و انتهای لوله محفوظ است.

لذا پیشنهاد می شود که محاسبات حرارت را در حوالی ترموکوپل ۴ انجام دهید (نیمه بین ترموکوپل های ۴ و ۵ برای قسمت موازنه حرارتی مناسب است).

پس از انجام آزمایش‌ها ، عملیات زیر را انجام دهید :

- ۱- منحنی توزیع درجه در طول دیواره لوله را رسم کرده و قسمت موازنه حرارتی را در آن نشان دهید .
 - ۲- منحنی اختلاف درجه حرارت در دو سر ایزولاسیون (در طول لوله مسی) را رسم کرده و قسمت موازنه حرارتی در طول لوله را در آن نشان دهید .
 - ۳- درباره هر یک از منحنی‌ها مختصراً بحث کنید .
 - ۴- محاسبات :
- الف - کل حرارت داده شده
- ب - مقدار حرارت تلف شده در قسمت ایزولاسیون
- پ- فلوی حرارتی
- ت- مقدار حرارت داده شده از طریق هدایت در قسمت انتخابی
- ث- مقدار حرارت خالص داده شده تا قسمت انتخابی
- ج- درجه حرارت متوسط هوا (bulk mean air temperature)
- چ- ضریب انتقال حرارت جابجایی
- ح- ضریب اصطکاک عملی بدون در نظر گرفتن شتاب
- خ- ضریب اصطکاک عملی با در نظر گرفتن شتاب
- د- ضریب اصطکاک تجربی
- ذ- عدد پرانتل در قسمت انتخابی
- ر- عدد رینولدز در قسمت انتخابی
- ز- عدد ناسلت عملی و تجربی

س- عدد استنتون عملی و تجربی

ش- عدد استنتون با استفاده از تشابه اصل رینولدز

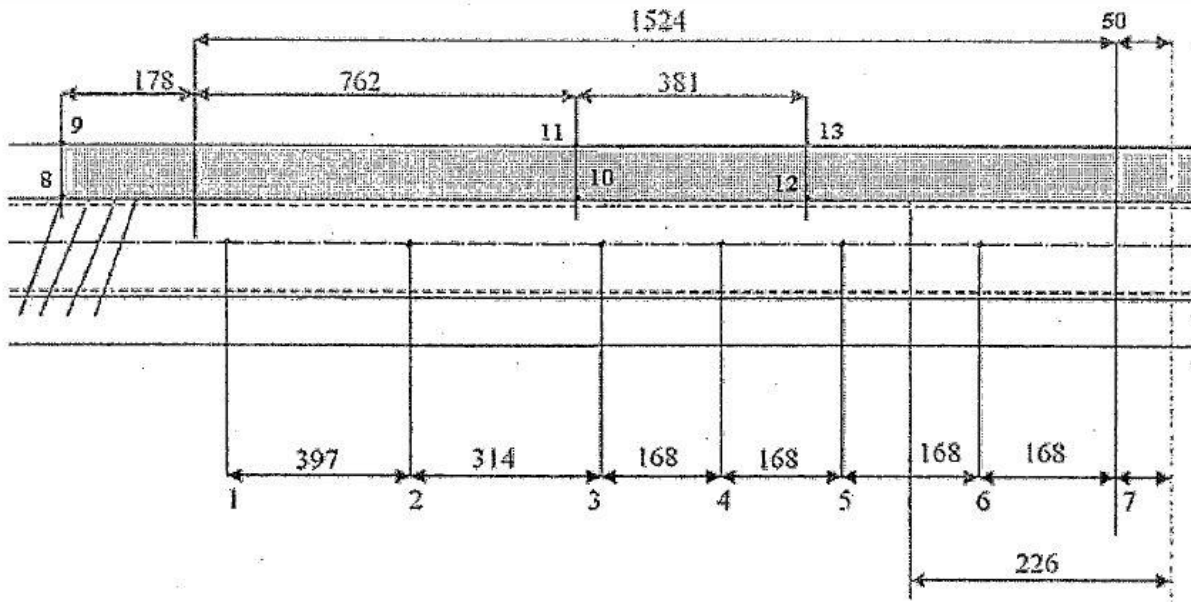
توجه داشته باشید که هر یک از اعداد به دست آمده را با واحد صحیح خود مشخص نمایید.

۵- اعداد به دست آمده عملی و تجربی را مقایسه کنید، سپس خطای آزمایش را محاسبه کرده و عوامل خطا را نام

ببرید.

$R_{air}=287 \text{ (N-m/kg-K)}$

$T=(T_1+T_2)/2$	C_p	μ	k	Pr
K	kJ/kg.K	kg/m.s	J/m.s.K	
247	1.002	$0.1603 \cdot 10^{-4}$	0.02331	0.719
274	1.002	$0.1743 \cdot 10^{-4}$	0.02457	0.711
302	1.003	$0.1875 \cdot 10^{-4}$	0.02664	0.705
330	1.006	$0.2007 \cdot 10^{-4}$	0.02872	0.704



شکل ۱- نمایش ترموکوپل ها در طول لوله

آزمایش تبرید (۶)



۱- هدف

هدف از انجام این آزمایش، آشنایی کامل با چرخه تراکم بخار (چرخه تبرید) و انجام محاسبات مربوطه در رابطه با تغییرات بار حرارتی ماده مبرد می باشد.

۲- تئوری مختصر

بسیاری از دستگاه‌های تبرید بر اساس چرخه تراکم بخار کار می کنند که دارای چهار عمل اساسی تبخیر، تراکم بخار، تقطیر و انبساط است که به ترتیب در چهار قسمت تبخیرکننده (evaporator)، کمپرسور (compressor)، چگالنده (condensor) و لوله فشار شکن انجام می شود.

در شکل (۱) قسمت‌های مختلف چرخه و در شکل (۲) نمودار تحول در یک نمودار فشار – آنتالپی نشان داده شده است.

ماده مبرد به صورت بخار در فشار P_e و درجه حرارت t_1 وارد کمپرسور می‌شود و سپس در فشار بالاتر P_c و درجه حرارت t_2 از داخل چگالنده عبور می‌کند. در چگالنده حرارت از مبرد به هوای اطراف منتقل شده و در همان فشار و با دمای t_4 به صورت مایع خارج می‌گردد. این مایع سپس وارد لوله موین فشارشکن شده و فشار و دمای آن کاهش می‌یابد و با فشار P_e و درجه حرارت t_5 وارد تبخیر کننده می‌گردد. در تبخیر کننده که همان محفظه خنک کننده دستگاه می‌باشد حرارت از هوای مجاور به ماده مبرد منتقل شده و مبرد از حالت بخار مرطوب تقریباً به بخار مافوق گرم (superheated vapor) درمی‌آید که دوباره وارد کمپرسور شده و چرخه تکرار می‌گردد.

با توجه به شکل (۲) در مورد تبخیر کننده و با فرض آدیاباتیک بودن فرایندی که در لوله موین رخ می‌دهد؛ روابط زیر صادق است:

$$q_e = h_1 - h_4$$

$$Q_e = m(h_1 - h_4)$$

از طرف دیگر Q_e که در واقع همان اثر تبرید است از دو قسمت تشکیل شده است: یکی انرژی حرارتی گرفته شده از لامپ‌ها Q_L و دیگری انرژی گرفته شده از محیط مجاور Q_{surr} .

$$Q_e = Q_L + Q_{surr}$$

انرژی گرفته شده از محیط مجاور تقریباً برابر است با 0.36 وات به ازای یک درجه اختلاف دما

$$Q_{surr} = 0.36(t_a - t_1)$$

اگر کمپرسور را به تنهایی در نظر بگیریم (شکل ۴) داریم:

$$Q_r = m(h_2 - h_1) + P$$

P توان ورودی به کمپرسور با علامت منفی در نظر گرفته می‌شود.

به همین ترتیب انتقال حرارت در چگالنده عبارت است از:

$$Q_c = m(h_4 - h_2)$$

در مورد چرخه تبرید، ضریب عملکرد (Coefficient of Performance) عبارت است از نسبت بار حرارتی منبع سرد تقسیم بر کار داده شده به کمپرسور:

$$(Cp)_r = \frac{Q_e}{P}$$

مشخصه‌های به کار برده شده عبارت‌اند از:

h(j/kg) آنتالپی مخصوص

m(kg/s) دبی جرمی ماده مبرد

P(W) توان داده شده به کمپرسور

h_c(j/kg) انتقال حرارت به ازای واحد جرم

Q_e(W) شار انتقال حرارت در تبخیرکننده (اثر تبرید)

Q_c (W) شار انتقال حرارت از چگالنده

Q_r(W) انتقال حرارت از کمپرسور

t_a(C) درجه حرارت محیط

t₁(C) درجه حرارت ورودی به کمپرسور

t₂(C) درجه حرارت بعد از کمپرسور

t₃(C) درجه حرارت چگالنده

t₄(C) درجه حرارت ورودی به لوله فشار شکن

t₅(C) درجه حرارت تبخیرکننده (محفظه خنک کننده)

نرخ انرژی حرارتی گرفته شده از لامپها $Q_L(W)$

نرخ انرژی گرفته شده از محیط $Q_S(W)$

۳- شرح دستگاه

دستگاه آزمایش عبارت است از یک سیستم خنک کننده شبیه یک یخچال خانگی که وسایل اندازه گیری و کنترل کننده های لازم به آن اضافه شده است .

یک چرخه تبرید (تراکم بخار) از یک کمپرسور و دو مبدل حرارتی (چگالنده و تبخیر کننده) که با هوا تبادل حرارتی دارند به همراه یک لوله فشار شکن، تشکیل شده است. در این چرخه بسته ، فرئون ۱۲ (R12) در جریان است.

در قسمت های مختلف چرخه، تعدادی حسگر دما (ترموکوپل) نصب شده است. به کمک حسگرها می توان درجه حرارت قبل و بعد از کمپرسور ، درجه حرارت چگالنده ، لوله فشار شکن و همین طور محفظه تبخیر کننده را به دست آورد.

برای خنک شدن سریع تر چگالنده از یک پروانه و برای گرم کردن تبخیر کننده از تعدادی لامپ الکتریکی استفاده شده است که بار حرارتی تولید شده توسط لامپها در واقع همان بار برودتی است که توسط یخچال جذب می شود . مقدار نامی این بار حرارتی توسط کنتوری که روی دستگاه نصب شده اندازه گرفته می شود. همچنین به کمک این کنتور می توان انرژی الکتریکی داده شده به کمپرسور را نیز اندازه گرفت.

روی صفحه دستگاه یک دمابان (ترموستات) قرار دارد که قادر به تنظیم درجه حرارت محفظه تبخیر کننده از ۵- تا ۳۵- درجه سانتی گراد می باشد. علاوه بر این دو سامانه کنترلی وجود دارد که اولی در صورتی که دمای محفظه خنک کن زیاد شود (حدود ۲۰ درجه سلسیوس) به طور خود کار تمام لامپها را خاموش می کند و دومی در صورتی که بار کمپرسور از حد مجاز بیشتر شود، کمپرسور را خاموش می کند و پس از مدتی وقتی کمپرسور خنک شد دوباره روشن می شود.

مشخصات دستگاه عبارت است از :

ماده مبرد : فریون ۱۲ (CF₂CL₂-R12)

حجم جابجایی کمپرسور : ۲۰۹۷ cm³

سرعت دورانی کمپرسور : ۲۸۵۰ rpm

سرویس لازم : برق تک فاز ۲۲۰.۷/۵۰ HZ

یک دور چرخش کنتور معادل است با ۲۱/۶ kJ

۴-روش انجام آزمایش

ترموستات را روی منفی ۳۵ درجه سانتی گراد قرار دهید (این عمل باعث کار مداوم کمپرسور می شود) سوئیچ اصلی دستگاه و پروانه را روشن کنید (مطمئن شوید که کمپرسور و پروانه کار می کند و کلید لامپها خاموش هستند). مدت نیم ساعت دستگاه را رها کنید تا به حالت پایدار برسد .

ابتدا برای بار تبخیرکننده برابر صفر (تمام لامپها خاموش) مقادیر زیر را یادداشت کنید :

الف -مدت زمان یک دور چرخش دیسک انرژی متر برای کمپرسور و همین طور برای لامپها (انرژی متر به وسیله یک کلید تبدیل در مدار کمپرسور و یا لامپها قرار می گیرد)

ب- درجه حرارت های t₁ تا t₅ با استفاده از پتانسیومتر الکتریکی .

سپس در چند مرحله بار حرارتی تبخیرکننده را اضافه نمایید (با افزودن تعداد لامپها) و در هر مرحله مقادیر بالا را یادداشت کنید .

(برای بارهای حرارتی مقادیر ۱۸۰ ، ۱۲۵ ، ۸۵ ، ۴۰ ، ۲۵ وات را انتخاب کنید و پس از هر انتخاب حدود پنج دقیقه صبر کنید تا دستگاه به حالت پایدار برسد)

۵- خواسته‌های آزمایش

الف- با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از آزمایش و بکار بردن منحنی P-h مربوط به R12 محاسبات زیر را انجام دهید و نتایج به‌دست آمده را در جدولی بنویسید .

- نرخ انتقال حرارت از لامپ‌ها (Q_L) بر حسب وات

- حرارت اضافه‌شده از محیط (Q_S) بر حسب وات

- اثر تبرید (Q_E) بر حسب وات

- توان داده‌شده به کمپرسور (P) بر حسب وات

- ضریب عملکرد کلی تبرید (COP) R

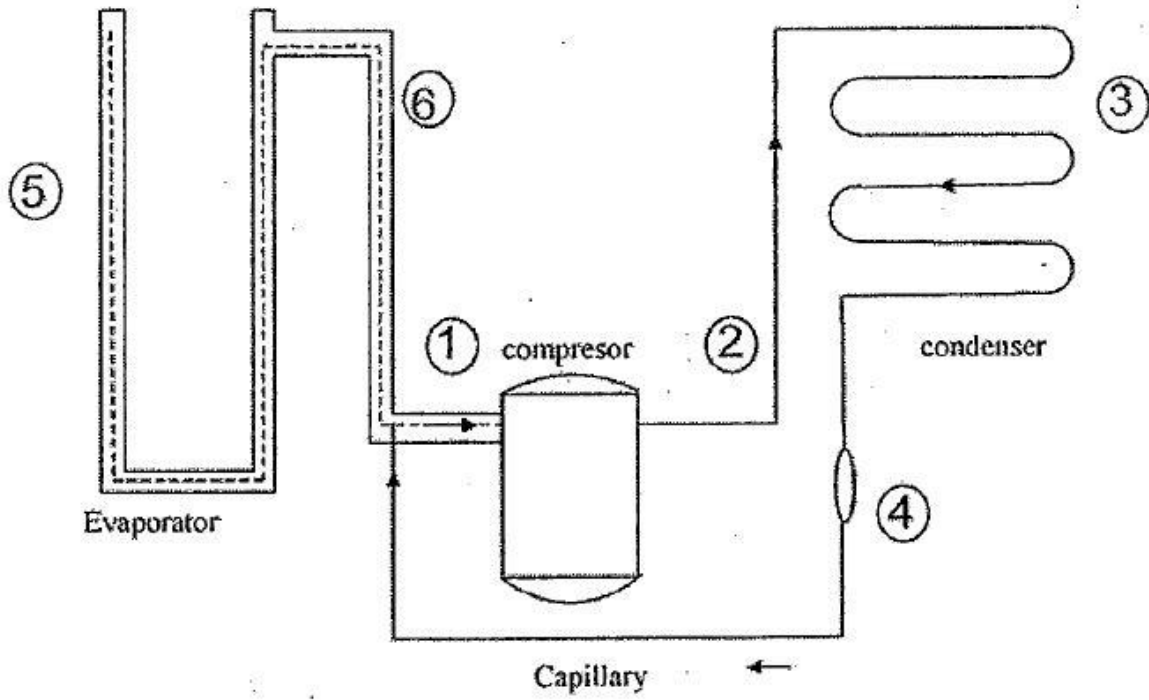
- (h_1-h_4)

- دبی جرمی ماده مبرد $M(\text{kg/s})$

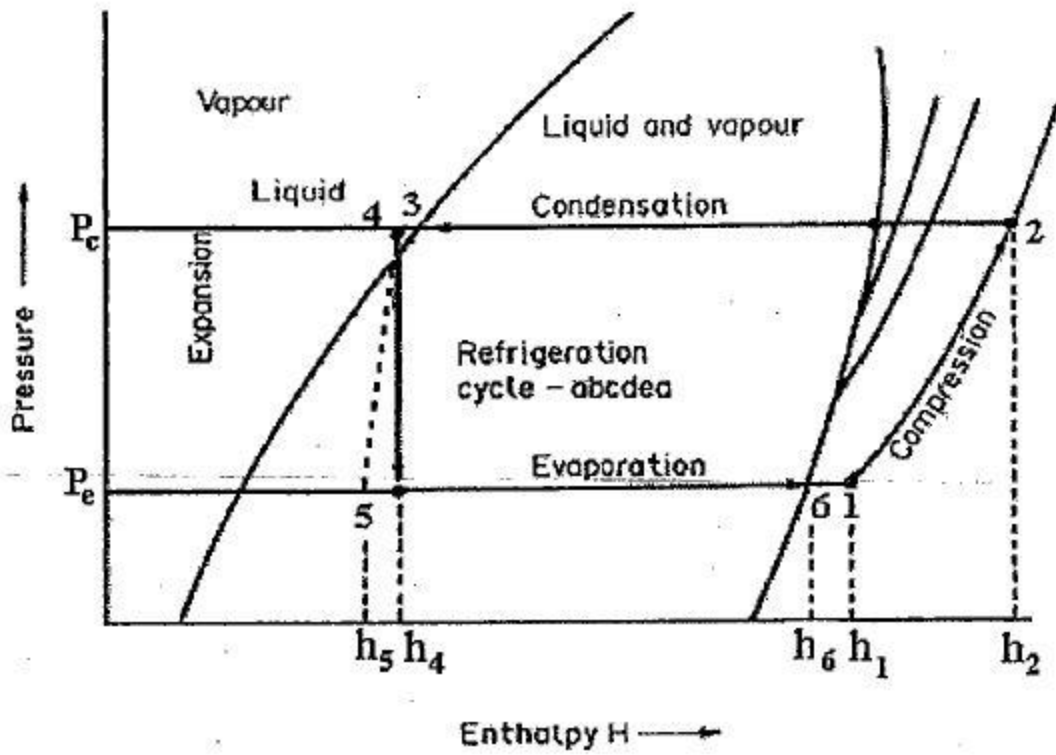
- فشار ورودی به کمپرسور $P_1(\text{kg/cm}^2)$

- درجه حرارت تبخیرکننده $t_5(\text{C})$

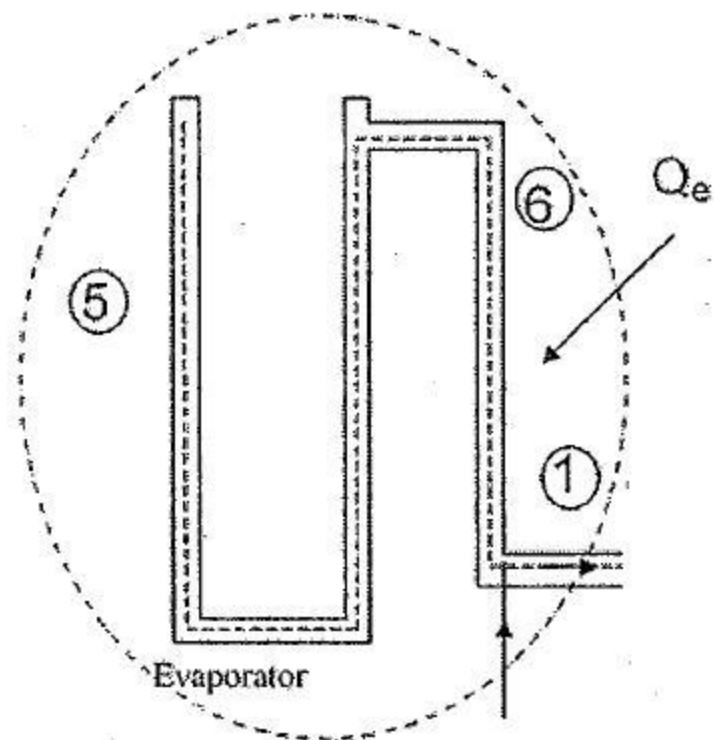
ب- با استفاده از مقادیر محاسبه‌شده منحنی تغییرات اثر تبرید ، توان داده‌شده به کمپرسور، ضریب کلی تبرید ، دبی جرمی ماده مبرد و درجه حرارت چگالنده را بر حسب درجه حرارت تبخیرکننده رسم کنید و روی منحنی‌های به‌دست آمده بحث کنید .



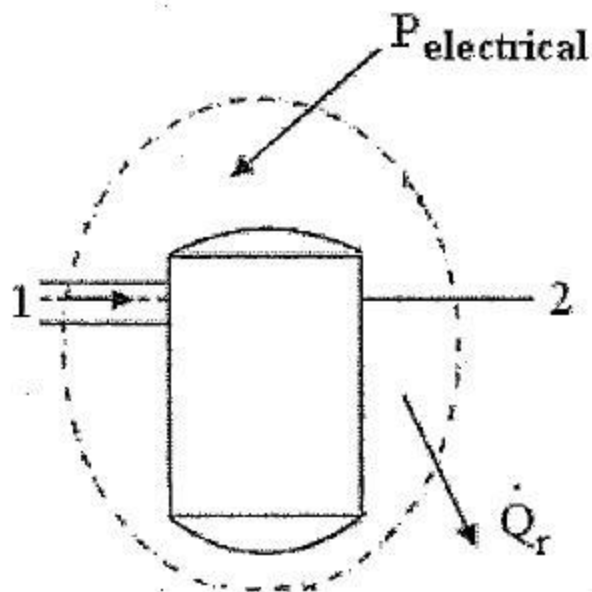
شکل (۱) - نمای کلی سیکل تبرید تراکمی



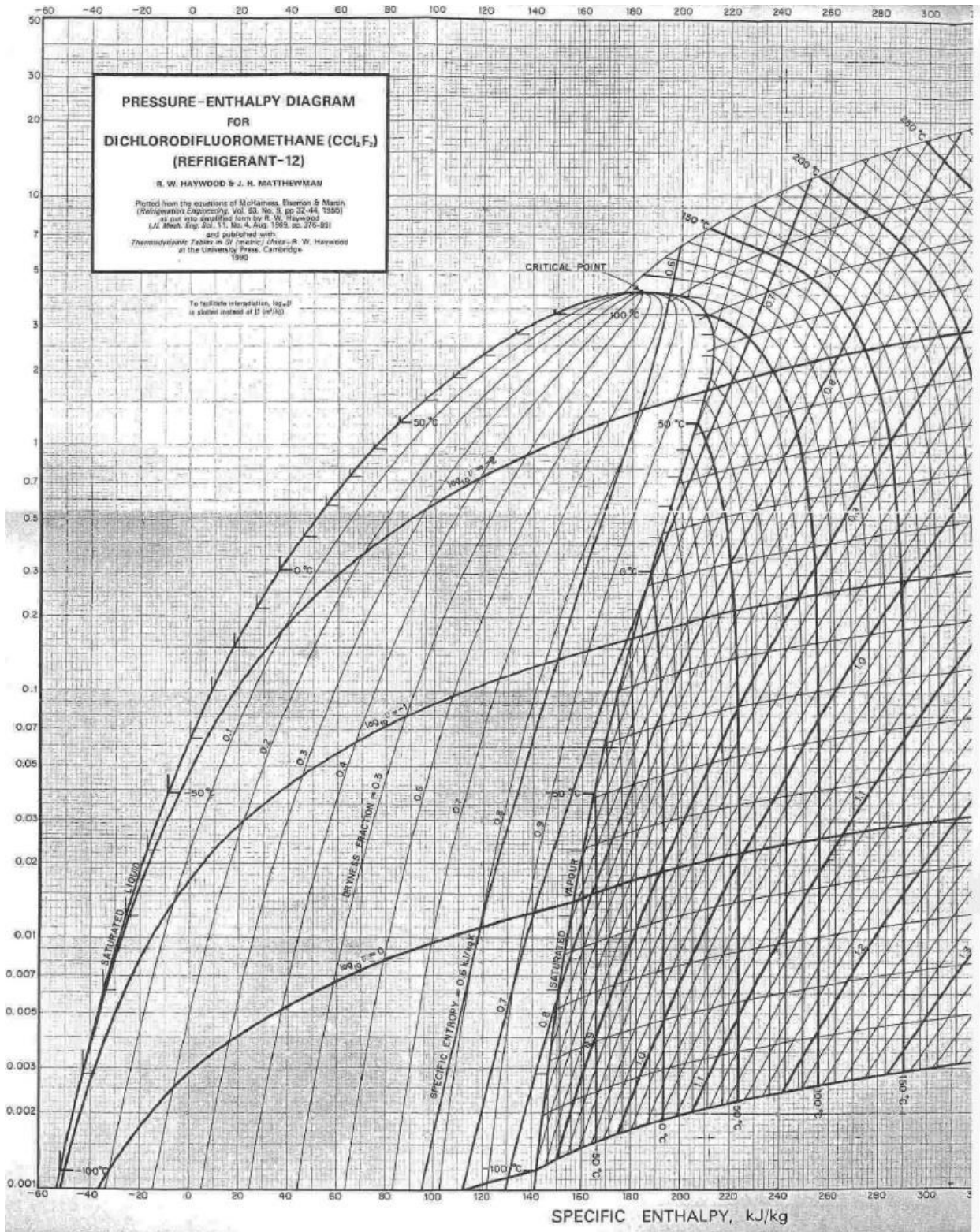
شکل (۲) - نمودار تحول سیکل تبرید تراکمی

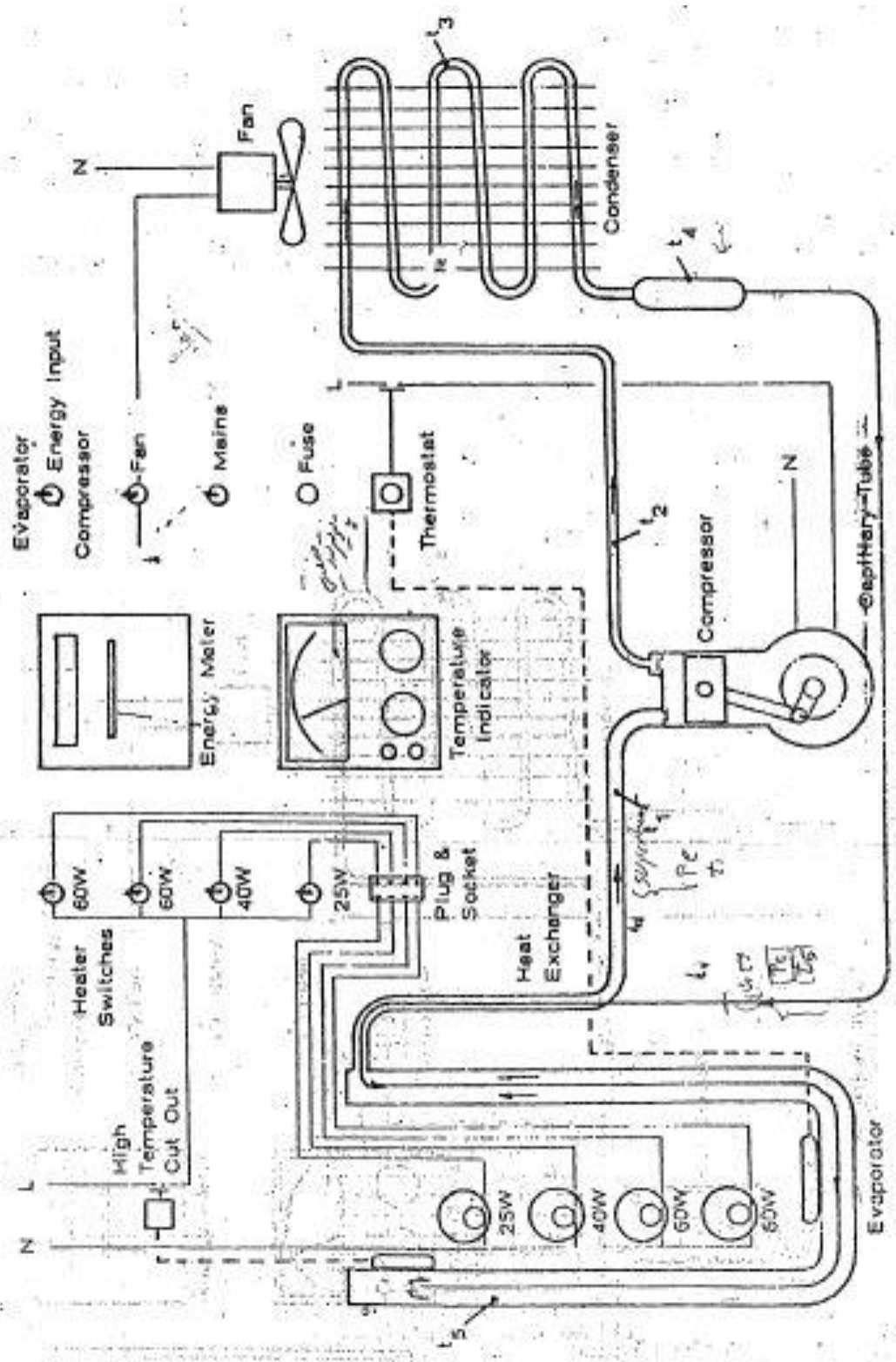


شکل (۳) - حجم کنترل برای اواپراتور

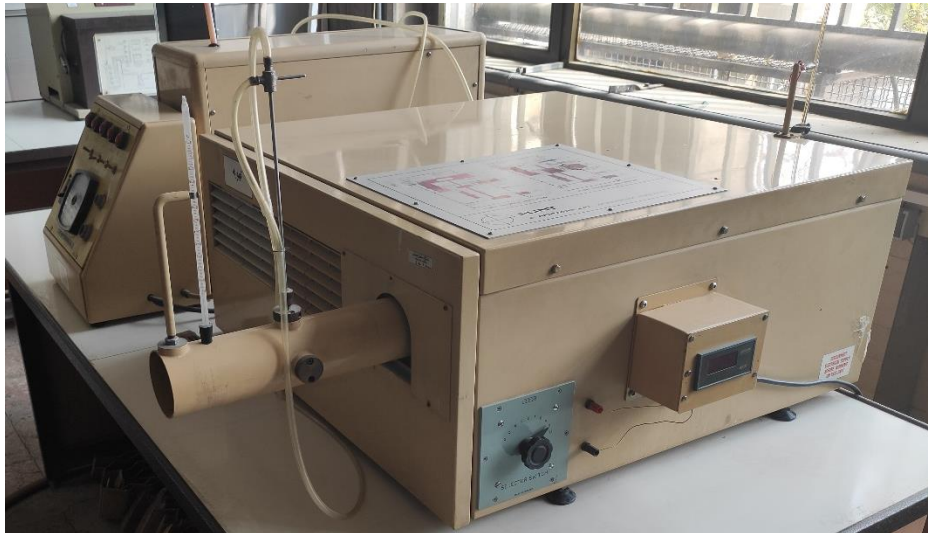


شکل (۴) - حجم کنترل برای کمپرسور





آزمایش تهویه مطبوع (۷)



۱- هدف آزمایش مطبوع

منظور از انجام این آزمایش مطالعه و بررسی یک دستگاه تهویه مطبوع است که یک بار به صورت پمپ حرارتی مکانیکی و بار دیگر با جریان معکوس به عنوان خنک کننده (cooler)، به ترتیب برای گرم کردن و خنک کردن هوا مورد استفاده قرار می گیرد .

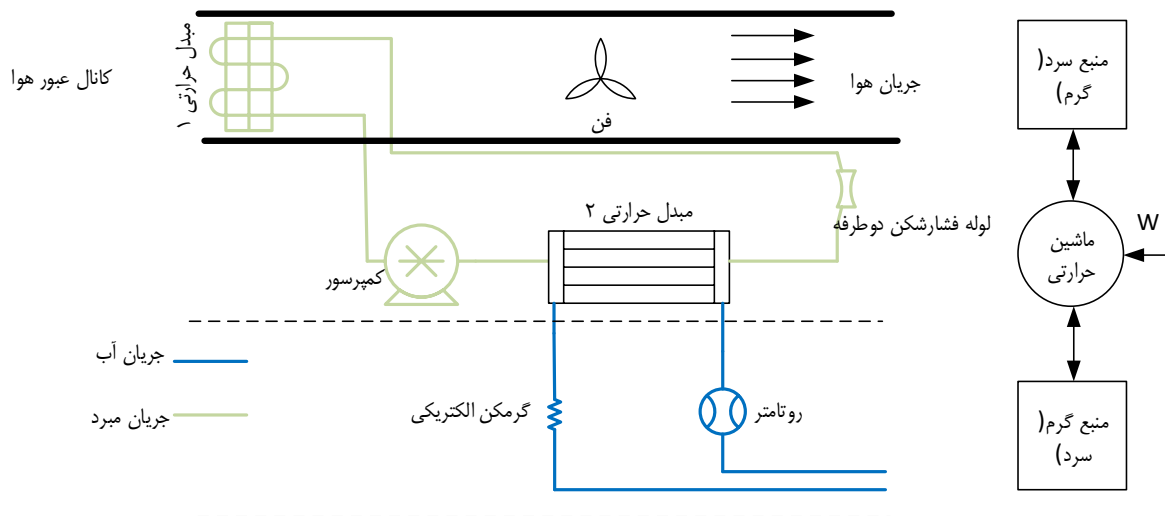
۲- شرح دستگاه و وسایل اندازه گیری

دستگاه آزمایش یک واحد تهویه مطبوع تجاری است که وسایل اندازه گیری و تنظیم کننده های لازم به آن اضافه شده است تا به صورت دستگاه آزمایشگاهی درآید.

واحد تهویه مطبوع مذکور از سه قسمت عمده تشکیل شده است :

قسمت اول عبارت است از یک کانال که هوا توسط یک پروانه در داخل آن جریان می یابد ، دمای هوای ورودی و خروجی این کانال و سرعت جریان هوا توسط یک لوله پیتوت و یک مانومتر قابل اندازه گیری است.

قسمت دوم یا مهم ترین قسمت عبارت است از یک ماشین حرارتی که از یک کمپرسور ، یک لوله فشارشکن دوطرفه و دو عدد مبدل حرارتی که داخل آن فرئون ۲۲ (R22) به صورت یک چرخه بسته جریان می یابد تشکیل شده است. جهت جریان مبرد در این سامانه قابل تغییر است .



شکل ۱: طرحواره دستگاه

مبدل های ذکر شده در نقش چگالنده (Condenser) و تبخیرکننده (Evaporator) در چرخه عمل می کنند و با تغییر جهت جریان ماده مبرد (R22) نقش خود را عوض می نمایند. مبدل شماره یک ۱ در داخل کانال هوا قرار دارد و بنابراین با هوا تبادل حرارتی می نماید. در مبدل شماره ۲ تبادل حرارت بین فرئون و آب انجام می شود.

در طول مدار جریان آب که سومین قسمت دستگاه محسوب می شود علاوه بر مبدل شماره ۲ وسایل زیر نیز قرار دارند:

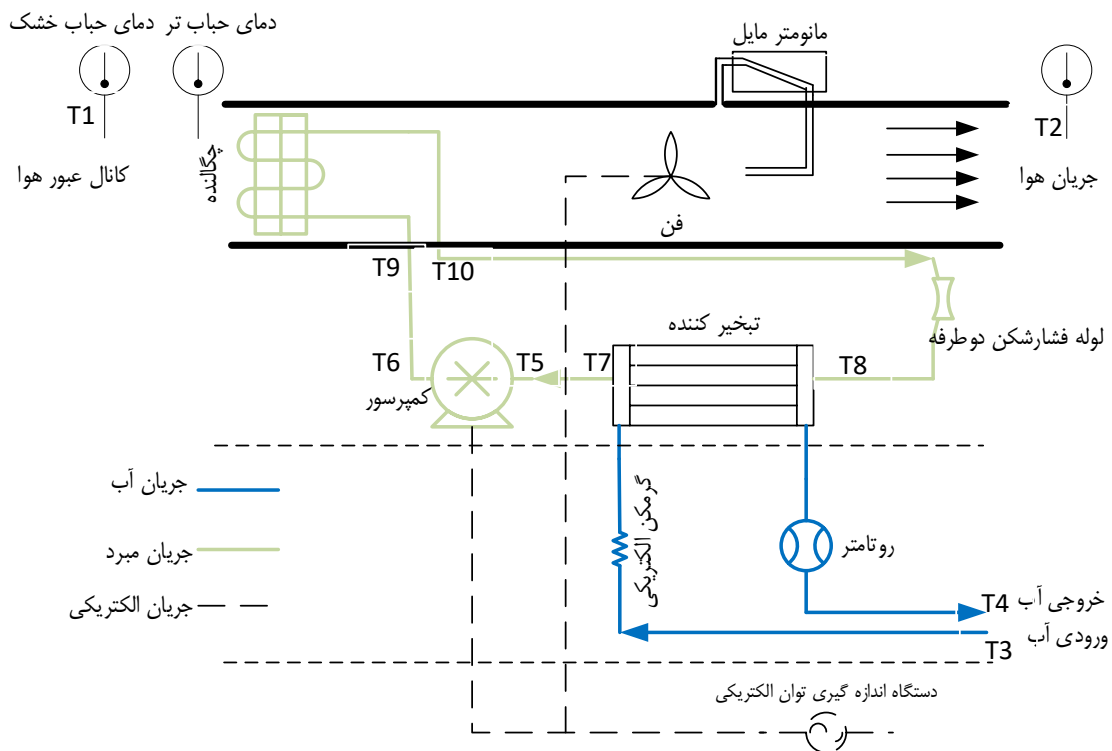
دماسنج برای اندازه گیری دمای جریان آب، دبی سنج برای اندازه گیری دبی جریان آب و یک گرم کن الکتریکی که در مواقع لزوم می توان آب ورودی را گرم کند.

بنابر آنچه گفته شد با تغییر جهت مبرد، دستگاه را می توان در دو حالت بکار برد. درحالتی که دستگاه بصورت پمپ حرارتی کار می کند، حرارت از آب گرفته میشود و به هوا انتقال می یابد. در این حالت مبدل شماره یک چگالنده و مبدل شماره ۲ تبخیرکننده است که بهتر است آب ورودی به آن گرم باشد.

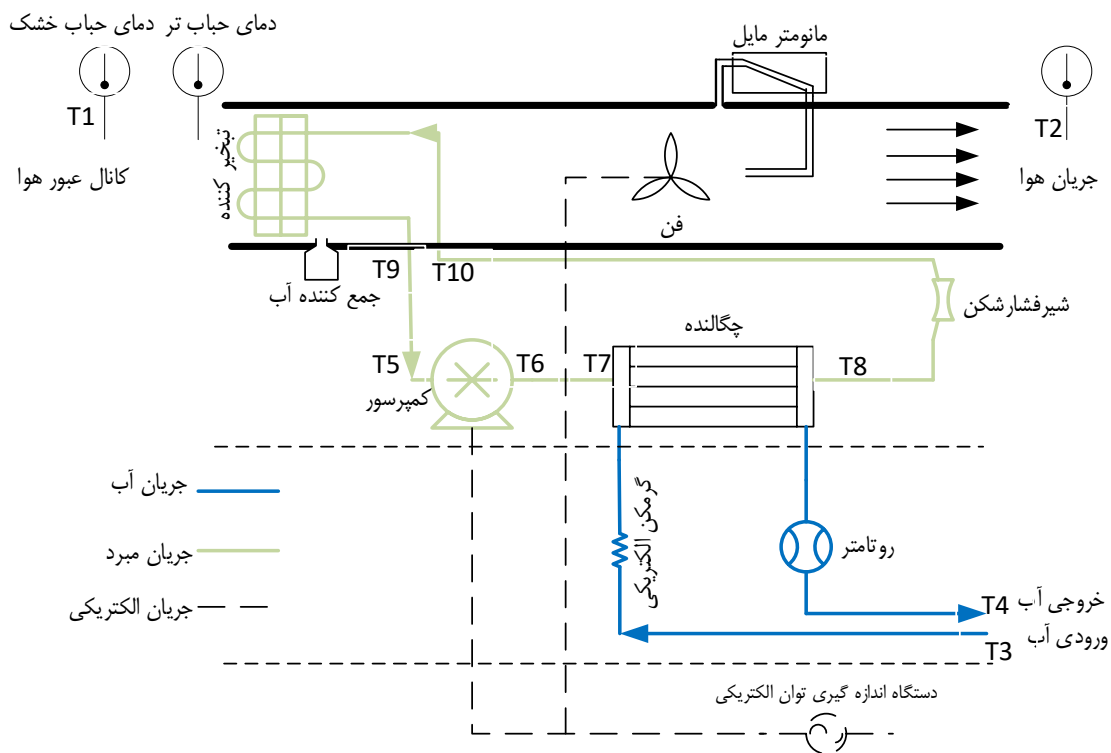
در حالت خنک کن هوا، دستگاه حرارت را از هوا گرفته و به آب انتقال می‌دهد. لذا مبدل شماره ۱ تبخیرکننده و مبدل شماره ۲ چگالنده است. در این شرایط در اثر خنک شدن هوا رطوبت نسبی آن زیاد گردیده و اگر به حد اشباع برسد قطرات آب روی مبدل ظاهر می‌گردد. این آب پس از جمع شدن توسط یک لوله از دستگاه خارج می‌شود و می‌توان مقدار آن را به وسیله یک ظرف مدرج اندازه گیری نمود.

در این دستگاه علاوه بر وسائل اندازه گیری ذکر شده، در مسیر فرئون ۶ عدد ترموکوپل قرار دارد که دمای ورودی و خروجی هریک از قسمت های کمپرسور، چگالنده و تبخیرکننده را به کمک یک پتانسیومتر اندازه گیری می‌کند.

گرم کن الکتریکی و تعدادی از وسائل اندازه گیری روی یک واحد مجزا قرار دارد که آنها را قسمت گرم کن می‌نامیم. کلیدهای قطع و وصل و وسایل تنظیم کننده روی واحد مجزا دیگری در کنار دستگاه اصلی قرار دارند که آن را صفحه کنترل می‌نامیم.



شکل ۲: طرحواره گرم شدن هوا در حالت موتور حرارتی



شکل ۳: طرحواره خنک شدن هوا

۳- مشخصات دستگاه

۱.۵ کیلووات	بیشینه توان مصرفی
۵ لیتر بر دقیقه	بیشینه دبی جریان آب
۲ کیلووات	توان مصرفی گرمکن الکتریکی
۹ مترمکعب بر دقیقه	مقدار دبی هوا
۱.۸ تا ۳.۵ کیلووات	ظرفیت حرارتی دستگاه
۰.۰۴۱ میلی ولت بر درجه سلسیوس	ضریب ثابت ترموکوپلها
۷۳ میلی متر	قطر لوله خروجی هوا

۴- علایم و نشانه‌ها

$T_9(K)$	دمای مبدل شماره ۱ (طرف منتهی به کمپرسور)
$T_{10}(K)$	دمای مبدل شماره ۱ (طرف منتهی به فشارشکن)

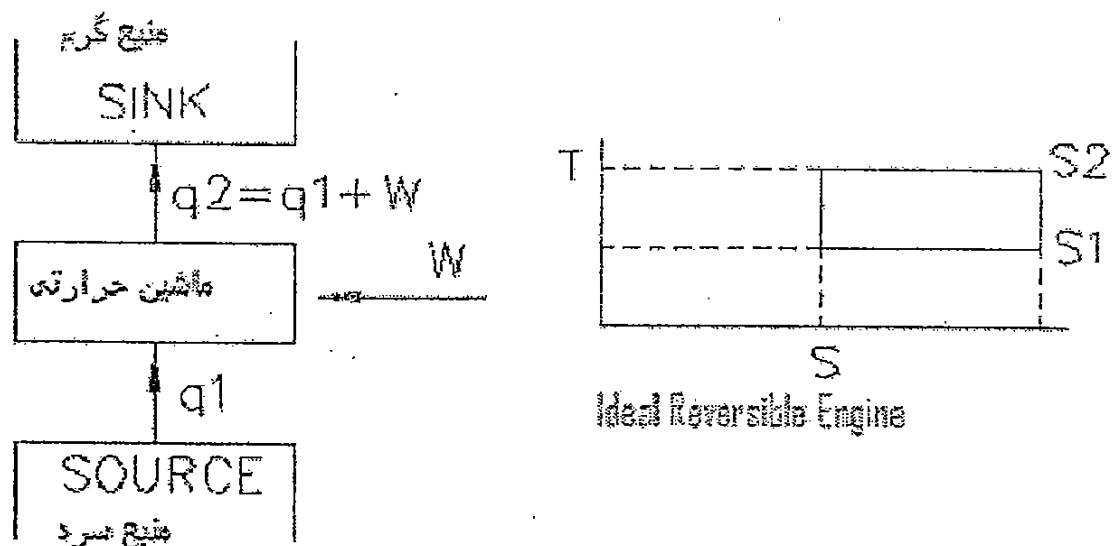
$m_1(\text{kg/s})$	دبی جرمی هوای خشک
$m_2(\text{kg/s})$	دبی جرمی آب تقطیر شده
$m_3(\text{kg/s})$	دبی جرمی آب در حال گردش
$C_w(\text{J/kgdeg}^\circ\text{C})$	گرمای ویژه آب
$C_p(\text{J/kgdeg}^\circ\text{C})$	گرمای ویژه هوا در فشار ثابت
$h_v(\text{J/kg})$	انتالپی بخار آب اشباع
$h_w(\text{J/kg})$	انتالپی آب در حالت مایع اشباع
ϕ	رطوبت نسبی هوای ورودی
$\rho_{a_1}(\text{kg/m}^3)$	دانسیته ی هوای ورودی
$\rho_w(\text{kg/m}^3)$	دانسیته ی بخار اشباع
γ	رطوبت مطلق هوای ورودی
$T_d(^\circ\text{C})$	درجه حرارت خشک
$T_w(^\circ\text{C})$	درجه حرارت مرطوب
$W(\text{J/s})$	کار داده شده به ماشین حرارتی در حالت ایده‌ال
$q_1(\text{J/s})$	انرژی حرارتی گرفته شده از منبع سرد در حالت ایده‌ال
$q_2(\text{J/s})$	انرژی حرارتی داده شده به منبع گرم در حالت ایده‌ال

الف) دستگاه تهویه مطبوع

به طور قراردادی دستگاه تهویه ی مطبوع هنگامی یک خنک کننده (cooler) نامیده می شود که حرارت را از هوای مجاور گرفته و به آب خنک کننده منتقل می کند و وقتی به آن پمپ حرارتی گفته می شود که انتقال حرارت در

جهت عکس یعنی از آب در حال گردش به هوا صورت گیرد. از نظر فنی دستگاه تهویه ی مطبوع در هر دو حالت ذکر شده به صورت موتور حرارتی معکوس یا پمپ حرارتی عمل می کند زیرا اثر نهایی انتقال حرارت از یک منبع به منبع دیگر در درجه حرارت بالاتر است که با صرف کار مکانیکی انجام می شود.

مدلی که چنین دستگاهی به منظور ارزیابی راندمانش با آن مقایسه می گردد ماشین برگشت پذیر کارنو است که در شکل (۴) همراه با نمودار درجه حرارت انتروپی (نمودار T-S) آن نشان داده شده است.



شکل (۴) - موتور ایده آل برگشت پذیر

چنین ماشینی، حرارت را در درجه حرارت θ_1 به صورت همدم گرفته و آن را به صورت همدم درجه حرارت بالاتر θ_2 انتقال می دهد و سایر مراحل به صورت ایزنتروپیک می باشند. هنگامی که ماشین به صورت پمپ حرارتی کار می کنند ضریب عملکرد آن $(COP)_H$ آن به صورت زیر تعریف می شود.

$$(COP)_H = \frac{q_2}{W} \quad (1)$$

و هنگامی که به صورت دستگاه خنک کننده کار می کند ضریب عملکرد آن عبارت است از:

$$(COP)_R = \frac{q_1}{W} \quad (2)$$

این روابط برای یک ماشین حقیقی که بین همان محدوده ی درجه حرارت عمل می کند نیز به کار می روند ولی مقادیر عددی آن ها کمتر از مقادیری است که برای موتور ایده ال برگشت پذیر از روابط زیر به دست می آید.

$$(COP)_H \max = \frac{\theta_2}{\theta_2 - \theta_1} \quad (۳)$$

$$(COP)_R \max = \frac{\theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (۴)$$

توجه شود که در تمام مراحل:

$$(COP)_H = (COP)_R + 1 \quad (۵)$$

روابط بالا نشان می دهد که با کاهش اختلاف درجه حرارت منبع سرد و گرم ضریب تبرید (ضریب عملکرد) افزایش می یابد. ولی در یک ماشین حقیقی کاهش اختلاف درجه حرارت اشکالات عملی ایجاد می کند. به دلیل غیر قابل برگشت بودن چرخه تبرید و تلفات انرژی ضریب تبرید (ضریب عملکرد) در ماشین حقیقی از ایده ال کمتر است. اکنون به تحلیل دستگاه مورد آزمایش می پردازیم. انرژی های تبادل شده در مرز سیستم به صورت زیر تعریف می شوند.

$$Q_1 = m_1 C_p T_1 (J / s) \quad \text{آنتالپی هوای خشک ورودی}$$

$$Q_2 = m_1 \gamma h v (J / s) \quad \text{آنتالپی بخار آب موجود در هوای ورودی}$$

$$Q_3 = m_1 C_p T_2 (J / s) \quad \text{آنتالپی هوای خشک خروجی}$$

$$Q_4 = (\gamma m_1 - m_2) h v (J / s) \quad \text{آنتالپی بخار آب موجود در هوای خروجی}$$

$$Q_5 = m_2 h_w (J / s) \quad \text{آنتالپی مایع حاصل از تقطیر}$$

$$Q_6 = m_3 T_3 C_w (J / s) \quad \text{آنتالپی آب خنک کننده ورودی}$$

$$Q_7 = m_3 T_4 C_w (J / s) \quad \text{آنتالپی آب خنک کننده خروجی}$$

$$Q_8 (J / s) \quad \text{نرخ انرژی تلف شده از طریق تشعشع و متفرقه}$$

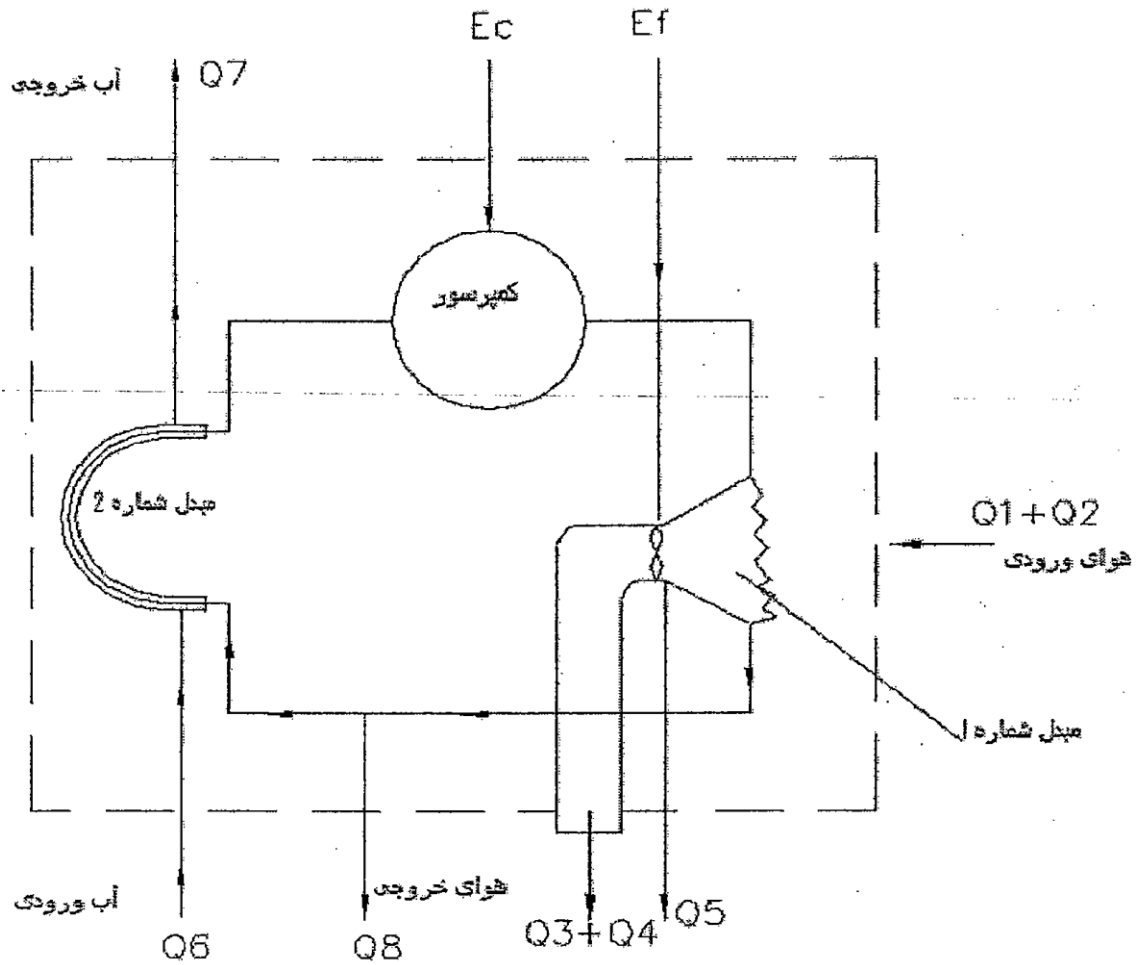
$E_F(W)$

توان الکتریکی داده شده به پروانه

$E_C(W)$

توان الکتریکی داده شده به کمپرسور

نمودار تبادل انرژی برای دستگاه در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) - نمودار شار انرژی

رابطه‌ی تعادل انرژی جریان دائمی برای این سیستم به صورت زیر نوشته می‌شود.

برای حالت پمپ حرارتی:

$$\text{انرژی تلف شده} + \text{افزایش آنتالپی هوا} = \text{انرژی الکتریکی داده شده} + \text{انرژی داده شده توسط آب به سیستم}$$

و بخار آب

$$(Q_6 - Q_7) + (E_c + E_f) = (Q_3 + Q_4 + Q_5) - (Q_1 + Q_2) + Q_8$$

برای حالت کولر نیز می توان همین رابطه را با تغییرات مناسب در علامت ها به کار برد. زمانی که دستگاه به عنوان پمپ حرارتی کار می کند ضریب عملکرد را می توان به دو صورت مختلف تعریف کرد. ضریب عملکرد کلی یا خارجی برابر است با:

$$(COP_H)_E = \frac{(Q_3 + Q_4 + Q_5) - (Q_1 + Q_2)}{E_c + E_f} = \frac{\Delta Q}{W} \quad (7)$$

مقدار این ضریب برای یک ماشین ایده آل که بین درجه حرارت های مشابه کار کند عبارت است از:

$$(COP_H)_{E_{max}} = \frac{\frac{1}{2}(T_2 + T_1)}{\frac{1}{2}(T_2 + T_1) - \frac{1}{2}(T_3 + T_4)} \quad (8)$$

ضریب عملکرد پمپ حرارتی داخلی (چرخه مبرد) مانند ضریب کلی نمی باشد، زیرا نباید انرژی داده شده به پروانه به حساب پمپ حرارتی گذارده شود. این انرژی در هوای خروجی که پروانه و موتور قرار دارند ظاهر می گردد. به این ترتیب ضریب عملکرد داخلی به صورت زیر تعریف می شود.

$$(COP_H)_I = \frac{(Q_3 + Q_4 + Q_5) - E_f - (Q_1 + Q_2)}{E_c} \quad (9)$$

و با این فرض برای ماشین ایده آل در درجه حرارت مشابه داریم:

$$(COP_H)_{I_{max}} = \frac{T_{10}}{T_{10} - T_8} \quad (10)$$

بر اساس مباحث بالا هنگامی که دستگاه به عنوان خنک کننده کار می کند نیز دو نوع ضریب عملکرد برای آن قابل تعریف است. ضریب عملکرد کلی (خارجی):

$$(COP_R)_E = \frac{(Q_1 + Q_2) - (Q_3 + Q_4 + Q_5)}{E_c + E_f} \quad (11)$$

که آن را با ضریب عملکرد ایده آل زیر می توان مقایسه کرد:

$$(COP_R)_{E_{max}} = \frac{\frac{1}{2}(T_2 + T_1)}{\frac{1}{2}(T_3 + T_4) - \frac{1}{2}(T_1 + T_2)} \quad (12)$$

و ضریب عملکرد داخلی (چرخه مبرد که با رنگ سبز در شکل ۳ نشان داده شده است):

$$(COP_R)_I = \frac{(Q_1 + Q_2) + E_f - (Q_3 + Q_4 + Q_5)}{E_c} \quad (13)$$

که آن را می توان با ضریب عملکرد داخلی ایده‌ال مقایسه کرد.

$$(COP_R)_{I_{max}} = \frac{T_{10}}{T_8 - T_{10}} \quad (14)$$

ب- وسائل اندازه‌گیری

اگر هوا را گاز ایده‌آل فرض کنیم چگالی آن در کانال خروجی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\rho_{a_2} = \frac{P_a}{RT_2} \quad (15)$$

سرعت هوا در مرکز کانال U (m/s) مطابق با هد سرعت H برحسب میلیمتر آب که به وسیله‌ی لوله‌ی پیتوت اندازه گرفته می‌شود از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\frac{\rho_{a_2} U^2}{2} = 9.81 \rho_w H \quad (16)$$

برای این دستگاه به خصوص سرعت متوسط هوا در کانال \bar{U} چنین محاسبه می‌شود.

$$\bar{U} = 0.96U \quad (17)$$

مقدار رطوبت مطلق هوای ورودی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\gamma = \frac{\phi \rho_w}{\rho_{a_1}} \quad (18)$$

مقدار ϕ را از جدول ضمیمه و ρ_w از جدول بخار آب در دمای T_1 به دست می‌آید، برای اطلاعات بیشتر به کتابهای ترمودینامیک کلاسیک مراجعه شود.

۵- روش انجام آزمایش

قبل از شروع آزمایش درجه حرارت و فشار محیط آزمایشگاه را یادداشت کنید. هم چنین با استفاده از دستگاه رطوبت سنج چرخشی، درجه حرارت خشک (Dry bulb) و مرطوب (Wet bulb) هوا را اندازه بگیرید. برای این کار لازم است که مخزن رطوبت سنج را پر از آب نموده و آن را برای مدت حدود یک دقیقه بچرخانید و بلافاصله درجه حرارت مرطوب و سپس درجه حرارت خشک را از روی آن یادداشت کنید.

قبل از این که ماشین را به کار بیندازید، شیر آب خنک کننده را باز کرده و آن را طوری تنظیم کنید که دبی حدود (۳/۵ Lit/min) وارد دستگاه شود. سپس کلید اصلی دستگاه را روشن کرده و پس از آن کلید های پروانه و کمپرسور را روشن نمایید و آزمایش های زیر را انجام دهید:

آزمایش اول – (حالت خنک کننده):

روی صفحه ی کنترل حالت خنک کننده (Cool) را انتخاب کنید. برای پدید آمدن شرایط پایدار حدود نیم ساعت تا یک ساعت صبر کنید. پس از به وجود آمدن شرایط پایدار، مقادیر زیر را یادداشت نمایید:

- درجه حرارت های T_1 تا T_4 توسط دماسنج های مربوطه
- درجه حرارت های T_5 تا T_{10} به کمک پتانسیومتر (برای آشنایی و طرز کار دستگاه پتانسیومتر به ضمیمه مراجعه کنید).
- هد سرعت لوله پیتوت توسط مانومتر (H)
- دبی جریان آب در حال گردش به کمک روتامتر
- انرژی الکتریکی داده شده به کمپرسور و پروانه E_C و E_F به کمک واتمتر (مقداری که واتمتر نشان می دهد کل انرژی داده شده به کمپرسور و پروانه است. برای اندازه گیری هر یک از لازم است دیگری برای یک لحظه خاموش شود).

در صورتی که رطوبت نسبی هوای ورودی زیاد باشد ممکن است این هوا در اثر خنک شدن در داخل دستگاه به حد اشباع برسد و مقداری از رطوبت آن جدا شود. در چنین صورتی که دبی آب تقطیر شده که توسط لوله از دستگاه خارج می شود باید توسط یک ظرف مدرج اندازه گیری شود.

آزمایش دوم - (حالت پمپ حرارتی):

روی صفحه ی کنترل حالت پمپ حرارتی (Heat) را انتخاب کنید. در این حالت اگر درجه حرارت آب ورودی کمتر از ۱۰ درجه سانتی گراد باشد، کلید گرم کن (heater) باید روشن شود تا در تبخیر یخ زدگی ایجاد نشود. در این جا لازم است برای رسیدن به حالت پایدار حدود نیم ساعت تا یک ساعت صبر کنید و پس از آن مقادیر زیر را یادداشت نمایید.

درجه حرارت های T_1 تا T_{10}

مقادیر H و هم چنین E_c و E_F

در این آزمایش به علت گرم شدن هوا، رطوبت نسبی آن کاهش می یابد و بنابراین هیچ رطوبتی از آن جدا نمی شود. پس از انجام آزمایش دستگاه را خاموش کرده و جریان آب ورودی را قطع کنید.

۶- خواسته های آزمایش

الف- با استفاده از نتایج به دست آمده در آزمایشات اول و دوم مقادیر:

$$Q_1, m_1, \rho_w, V, \bar{U}, U, \rho_{a_2}, \rho_{a_1} \text{ تا } Q_6$$

همین طور ضرایب عملکرد و ضرایب تبرید داخلی و خارجی را برای دو حالت محاسبه کرده و این ضرایب تبرید و عملکرد را با مقادیر پیشینه (ایده آل) مقایسه نمایید. برای به دست آوردن ϕ با داشتن T_d و T_w از جداول ضمیمه استفاده کنید. کلیه ی نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات را برای هر حالت در یک جدول جداگانه خلاصه نمایید.

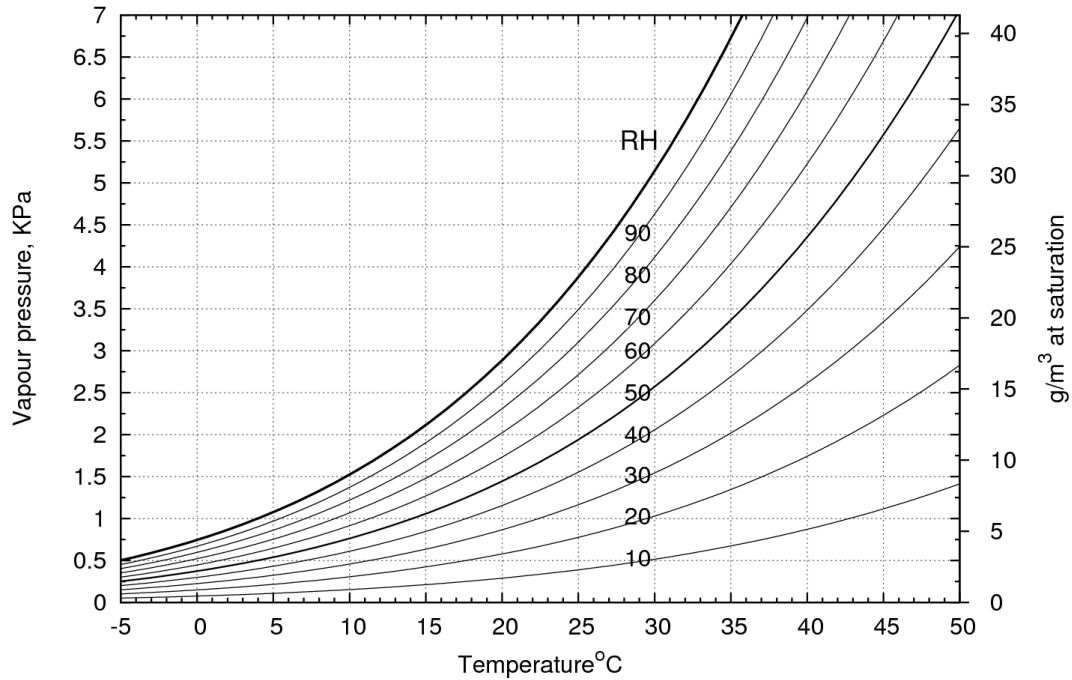
ب- با استفاده از رابطه ی شماره (۶)، موازنه انرژی را برای کل سیستم انجام داده و مقدار انرژی تلف شده (Q_8) را به دست آورید.

ج- به سؤالات زیر پاسخ دهید:

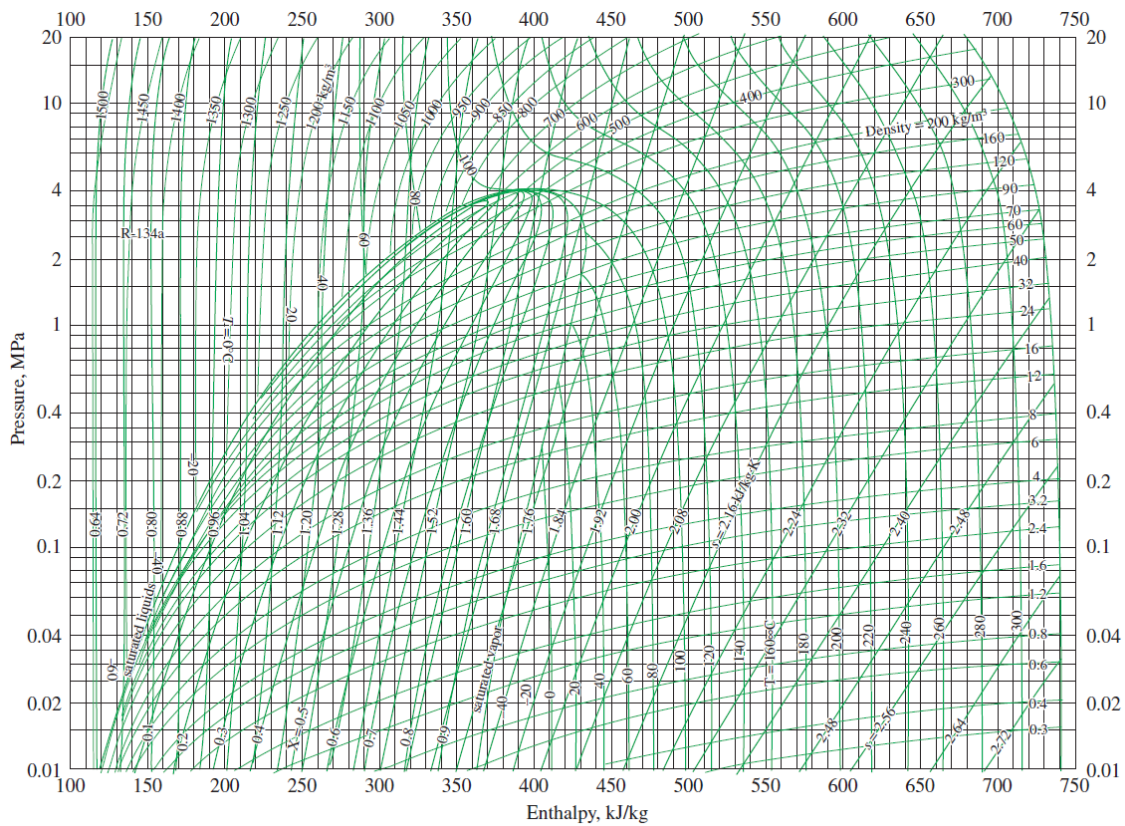
۱- ضریب عملکرد و ضریب تبرید برای ماشین های حرارتی چه مفهومی دارد؟ در چه حدودی است و آیا می تواند از یک بیشتر باشد؟

۲- سیال در ماشین حرارتی باید دارای چه خواصی باشد؟ چند نوع سیال که در عمل مورد استفاده قرار می گیرد نام ببرید.

۳- پمپ حرارتی الکتریکی چیست؟ آن را با پمپ حرارتی مکانیکی مقایسه کنید.



شکل (۶) - جدول رطوبت نسبی



شکل (۷) - چرخه پمپ حرارتی و کولر روی نمودار فشار - انتالپی

آزمایش تشعشع حرارتی و جابجایی آزاد (۸)



هدف:

در این آزمایش دو هدف دنبال میشود. ابتدا ضریب صدور یک قطعه مسی که بطور افقی داخل یک مخزن قرار گرفته است با حذف انتقال حرارت از طریق جابجایی هوا محاسبه می‌شود و سپس ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد هوا از اطراف یک استوانه افقی محاسبه و نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

تئوری:

انتقال حرارت از یک سطح که با محیط خود اختلاف دما دارد در اثر تشعشع، هدایت و جابجایی انجام می‌شود. نقش تشعشع حرارتی در درجه حرارت‌های کم وقتی قابل ملاحظه است که انتقال حرارت جابجایی اجباری وجود نداشته

باشد و در جابجایی اجباری از نقش تشعشع در دماهای کم می توان صرف نظر کرد. یکی از ویژگیهای انتقال حرارت تشعشعی این است که برای انتقال آن از یک سطح به سطح دیگر نیازی به وجود ماده نیست در حالیکه انتقال حرارت جابه جایی صرفاً در اثر حرکت سیال صورت میگیرد. برای پیدا کردن مقدار انتقال حرارت تشعشعی خالص از یک سطح بایستی مقدار انتقال حرارت جابجایی را حداقل نمود و برای این منظور بایستی جرم هوای اطراف سطح (یا فشار آن را) به حداقل رساند.

مقدار انتقال حرارت تشعشعی خالص که بین یک استوانه (سطح 0) و یک محفظه (سطح ∞) تبادل می شود را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

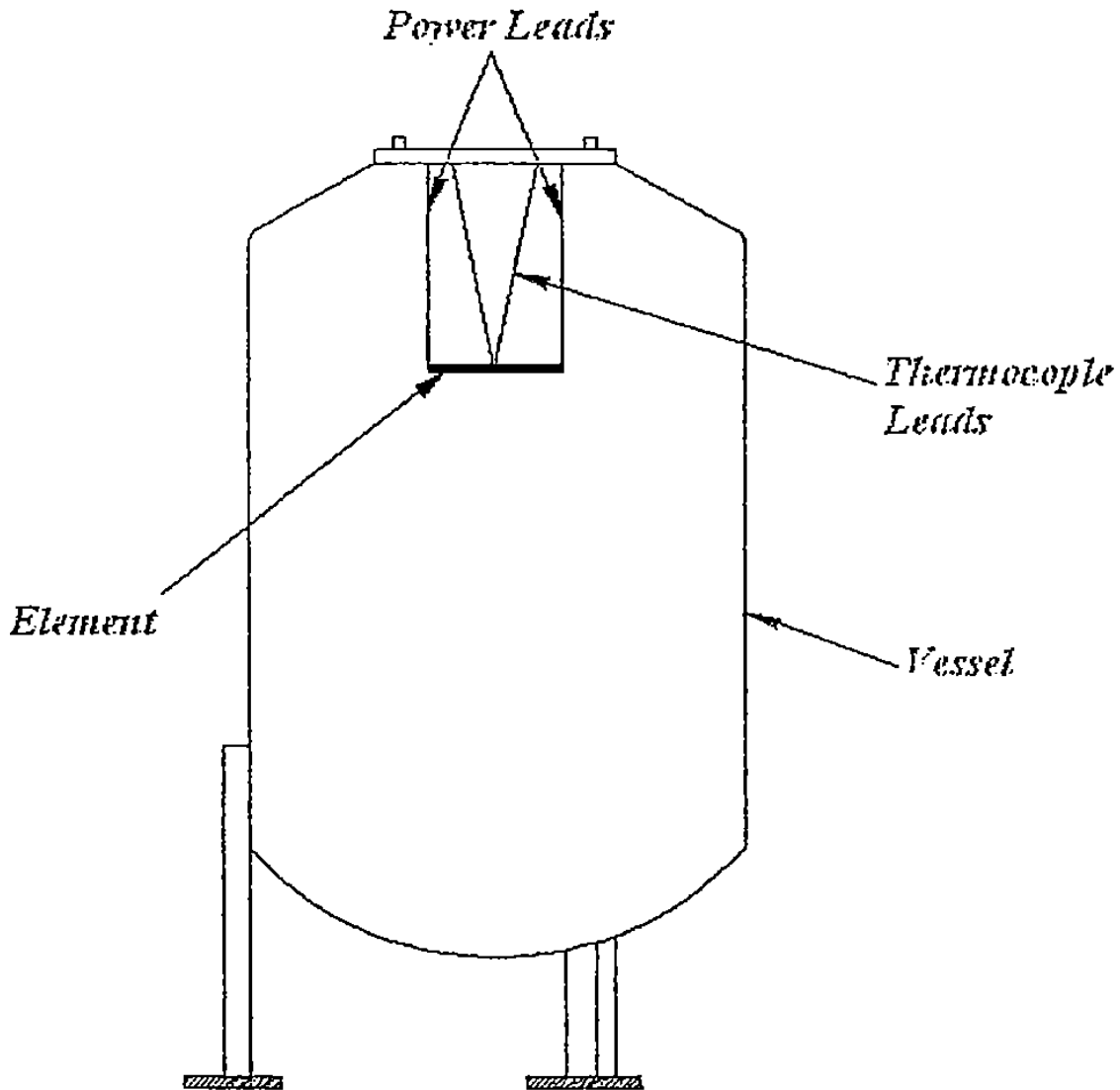
$$Q = \frac{\sigma(T_0^4 - T_\infty^4)}{\frac{1 - \varepsilon_0}{A_0 \cdot \varepsilon_0} + \frac{1}{A_0 \cdot F_{0\infty}} + \frac{1 - \varepsilon_\infty}{A_\infty \cdot \varepsilon_\infty}} \quad (1)$$

یا

$$q = \frac{Q}{A_0} = \frac{\sigma(T_0^4 - T_\infty^4)}{\frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} + \frac{1}{F_{0\infty}} + \frac{(1 - \varepsilon_\infty) A_0}{A_\infty \cdot \varepsilon_\infty}} \quad (2)$$

همانطوریکه در شکل یک مشاهده می شود مساحت سطح لوله خیلی کوچکتر از سطح محفظه می باشد. لذا با تقریب خوبی داریم:

$$\frac{(1 - \varepsilon_\infty) A_0}{A_\infty \cdot \varepsilon_\infty} \cong 0 \quad (3)$$



شکل ۱ - طرحواره مخزن دستگاه آزمایش تشعشع

از طرفی چون سطح لوله محدب است، در نتیجه $F_{0\infty}$ برابر یک است. لذا معادله ۲ بصورت زیر خلاصه می شود:

$$q = \epsilon_0 \sigma (T_0^4 - T_\infty^4) \quad (۴)$$

که در آن $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ثابت استفان بولتزمن و T_0 و T_∞ درجه حرارت‌های سطوح المان و محفظه بر حسب کلوین و ϵ_0 ضریب صدور سطح المان می باشد. در این رابطه نرخ انتقال حرارت (W) بر واحد سطح می باشد.

ملاحظه می‌شود برای وقتی که تبادل حرارت فقط بین دو سطح انجام گیرد، اگر مساحت یکی از سطوح خیلی بزرگتر از دیگری باشد؛ نرخ انتقال حرارت مستقل از خواص تشعشعی سطح بزرگتر میشود و فقط به خواص تشعشعی سطح کوچکتر و دماهای دو سطح بستگی دارد.

جابه‌جایی طبیعی نیز برای وقتی به وجود می‌آید که سیال به واسطه اختلاف جرم مخصوص در یک میدان نیرو مانند جاذبه زمین یا میدان نیروی گریز از مرکز قرار بگیرد. اختلاف جرم مخصوص در سیال، ناشی از اختلاف درجه حرارت آن در نقاط مختلف می‌باشد. سیالی که در مجاورت یک استوانه افقی داغ قرار می‌گیرد گرم شده و جرم مخصوص آن کاهش یافته و به بالا حرکت می‌کند.

مهم‌ترین عدد بدون بعدی که در جابجایی آزاد دخالت دارد، عدد گراشف است:

$$Gr = \frac{g\beta(T_0 - T_\infty)d^3}{\nu^2} \quad (5)$$

که در آن:

d قطر خارجی لوله:

g شتاب ثقل زمین:

ν لزجت سینماتیکی هوا:

T_0 درجه حرارت سطح المان:

T_∞ درجه حرارت هوای اطراف نمونه:

β ضریب انبساط حرارتی گاز:

می‌باشند.

برای گازها با تقریب خوبی می‌توان از $\beta = \frac{1}{T}$ استفاده نمود. ولی برای مایعات بایستی از جداول خواص فیزیکی β را به دست آورد.

پارامتر دیگر عدد بدون بعد پرانتل است که به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود.

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (6)$$

اگر $Gr.Pr < 10^9$ باشد لایه مرزی انتقال حرارت جایه‌جایی آزاد روی سطح، آرام خواهد بود ولی اگر بیشتر از آن باشد مغشوش است.

روابط تجربی متعددی برای پیش‌بینی نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد اطراف سطوح ارائه شده است که از میان آن‌ها به ذکر رابطه زیر می‌پردازیم:

$$Nu = 0.11(Gr.Pr)^{\frac{1}{3}} + (Gr.Pr)^{0.1} \quad (7)$$

این معادله با نتایج آزمایشات متعددی برای هوا، آب، الکل و روغن روی سطوح با وضعیت‌های افقی و قائم مقایسه و صحت‌گذاری شده است. معادله بالا برای بازه گسترده $10^7 < Gr.Pr < 10^{12}$ قابل استفاده است. در این معادله کلیه خواص بایستی در درجه حرارت متوسط بین سطح و سیال انتخاب یا محاسبه شوند.

شرح دستگاه:

دستگاه آزمایش از یک قطعه مسی، محفظه، تلمبه خلاء، حسگر دما و تعدادی وسایل کنترل و اندازه‌گیری دیگر تشکیل شده است. قطعه مسی مطابق شکل ۱ به صورت افقی در داخل محفظه فولادی قرار گرفته است. طول قطعه استوانه‌ای ۱۵/۲۴ سانتیمتر و قطر آن ۰/۶۳۵ سانتیمتر می‌باشند. سطح قطعه برای افزایش ضریب صدور، سیاه شده است. داخل قطعه، یک گرمکن قرار دارد که مقدار انرژی ورودی به آن را می‌توان با تنظیم ولتاژ مستقیم تا حداکثر ۱۰ وات افزایش داد. یک حسگر دما نیز در وسط قطعه مسی نصب شده است تا درجه حرارت آن را اندازه‌گیری نمود. حداکثر درجه حرارت قطعه مسی ۲۰۰ درجه سانتیگراد خواهد بود.

محفظه فولادی نیز به قطر ۴۶ سانتیمتر و ارتفاع ۷۶ سانتیمتر است. به علت کم بودن نرخ انتقال حرارت، درجه حرارت سطح محفظه با درجه حرارت هوای داخل محفظه (که توسط حسگر اندازه‌گیری می‌شود) برابر است. به وسیله یک پمپ تخلیه می‌توان فشار هوای داخل محفظه را تا ۰/۱ میلیمتر جیوه کاهش داد. فشار هوای داخل به وسیله یک مانومتر جیوه‌ای دو لوله‌ای و یک مانومتر حساس تر دیگر که روی دستگاه نصب شده است قابل اندازه‌گیری است (McLeod Gage). رو تابلوی کنترل سه عدد شیر هوا متصل است. شیر میانی برای ایزوله کردن مخزن از مدار هوای

فشرده (در صورت نیاز) و شیر سمت راست برای فرستان هوا یا گاز دیگر به داخل مخزن یا افزایش فشار هوای داخل مخزن در بیش از فشار محیط و شیر سمت چپ برای فرستادن هوای محیط به داخل مخزن است.

انرژی ورودی به المان مسی از یک منبع تغذیه شامل ترانس و یکسو کننده تأمین می‌شود که مقدار آن با یک رئوستا قابل تنظیم و شدت جریان و ولتاژ نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشند.

درجه حرارت های سطح المان مسی و هوای داخل محفظه توسط دو ترموکوپل جداگانه قابل اندازه‌گیری است و مقادیر آن‌ها به صورت دیجیتال روی دستگاه قابل قرائت است. شماره ۱ مربوط به المان و شماره ۲ مربوط به هوای داخل محفظه است.

فشارهای بیش تر از 150 mm Hg توسط یک مانومتر جیوه و کمتر از آن توسط یک فشار سنج Mcleod قابل قرائت است.

روش آزمایش:

الف) تشعشع:

۱. هر سه شیر هوا روی تابلوی دستگاه را ببندید.
۲. پمپ تخلیه را روشن نموده و شیر بین پمپ و مخزن را باز کنید.
۳. گرمکن را روشن کرده و رئوستا را طوری تنظیم کنید که ۹ ولت انرژی بر المان وارد شد.
۴. پس از اینکه فشار مخزن به 0.2 mm Hg رسید درجه حرارت های المان، هوای مخزن و ولتاژ و آمپر را یادداشت کنید.
۵. اندازه‌گیری های فوق را برای ۵ فشار دیگر (تا یک اتمسفر) انجام دهید. افزایش فشار به وسیله تغییر شیر هوای سمت چپ تابلو انجام می‌گیرد.

پس از هر بار تنظیم فشار بایستی مدتی صبر کنید تا سیستم به حالت تعادل برسد. تنظیم فشار بین ۰/۱ و ۶۴۰ میلیمتر جیوه را طوری انجام دهی که فاصله بین مقادیر $P^{0.25}$ نزدیک هم باشند.

ب) جابجایی

آزمایش فوق را برای ولتاژ های ورودی ۳، ۵ و ۷ ولت برای فشار اتمسفر انجام دهید.

خواسته‌های آزمایش

رسم منحنی تغییرات اختلاف دمای المان و هوا برحسب $P^{0.25}$ و یافتن میزان اختلاف دما وقتی $P \rightarrow 0$ ضریب صدور المان محاسبه شود و در مورد اساس علمی روش به کار رفته توضیح کامل داده شود.

رسم منحنی اختلاف دما برحسب قدرت تشعشع بحث روی آن

در مورد اساس کار فشار سنج Mcleod توضیح دهید.

رسم تغییرات عدد Nu برحسب $Gr.Pr$ روی منحنی $\log-\log$ به دو روش زیر و بحث

الف- با استفاده مستقیم از موازنه انرژی بین دو روش انتقال حرارت و توان الکتریکی داده شده

ب- با استفاده از معادله ۷

آزمایش برج خنک کننده (۹) Cooling Tower

هدف:

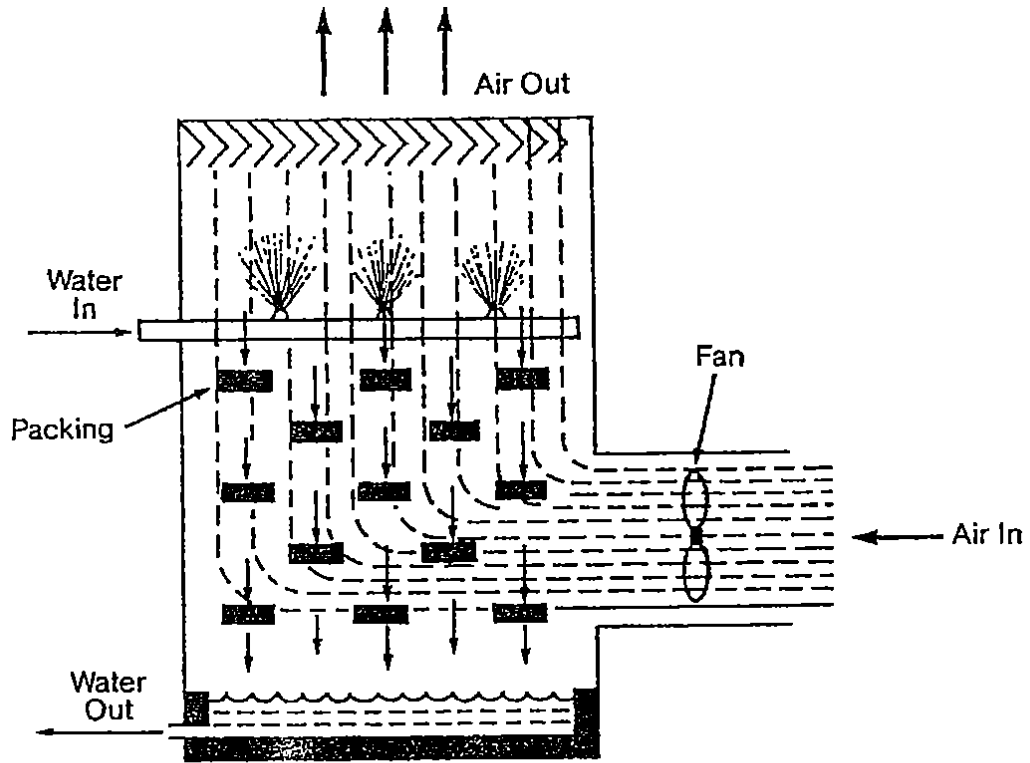
هدف از انجام این آزمایش بررسی عملکرد یک برج خنک کن از نوع وزش اجباری با جریان متضاد است. در این بررسی محاسبات موازنه ی جرم و انرژی برا برج انجام می گیرد و به ما امکان می دهد که تغییرات انرژی آب و هوا را با هم مقایسه نماییم.

مقدمه:

برج خنک کن محفظه ای است که در آن هوای خارج، از میان اسپری آب داغ ورودی که باید خنک شود، عبور می نماید. قسمتی از درجه حرارت آب توسط گرم شدن هوا و بقیه به وسیله ی تبخیر مقداری از آب کاهش می یابد. هوا تحت شرایط ورودی وارد برج خنک کن شده و با درجه حرارت بیشتر و معمولاً به حالت اشباع خارج می گردد.

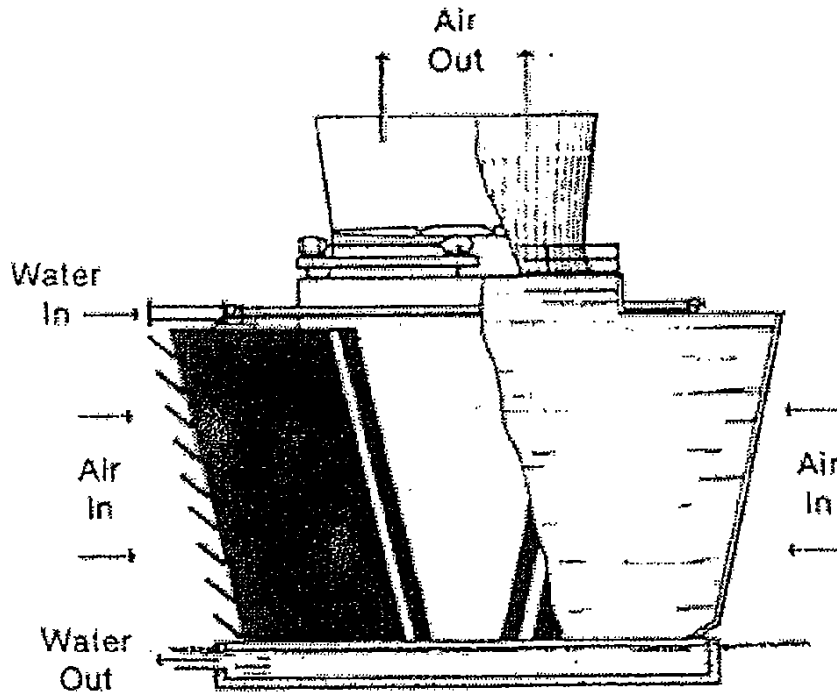
انواع مهم برج های خنک کن عبارتند از:

۱- برج وزش اجباری مکانیکی (Mechanical Forced-draft Tower)

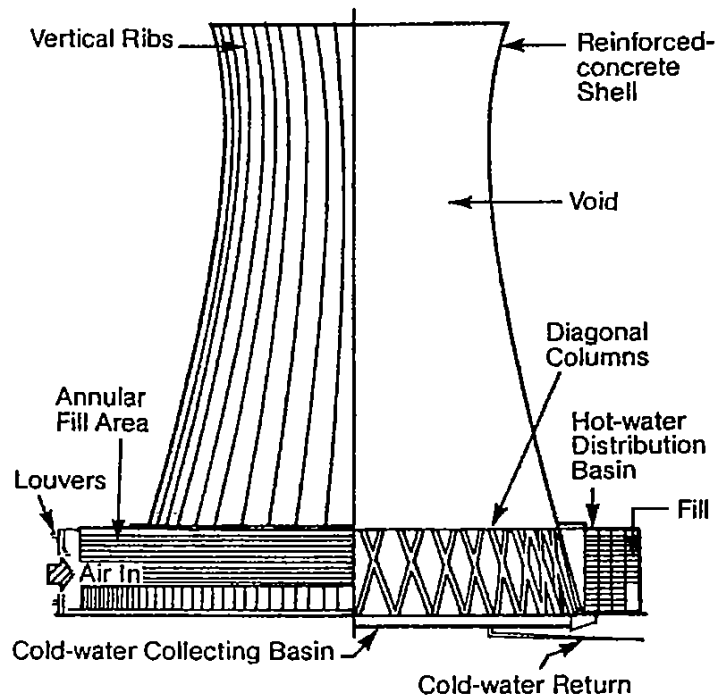


Reprinted with permission from POWER

٢- برج وزش القايي (Induced Draft Tower)



٣- برج هذلولي شكل (Hyperbolic Tower)



تئوری آزمایش

روابطی که برای محاسبات این آزمایش به کار می رود به قرار زیر است:

دبی حجمی هوا از رابطه‌ی زیر به دست می آید.

$$\dot{V} = 1643 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \frac{ft^3}{hr}$$

افت فشار (ΔP) در دو سوراخ Orifice برحسب inch H₂O

چگالی هوا (ρ) در بالادست سوراخ برحسب lb/ft³

این رابطه در سیستم متریک به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{V} = 1305 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \frac{m^3}{hr}$$

که در آن ΔP برحسب mm H₂O و ρ برحسب kg/m³

با تعیین خواص هوا و آب به هنگام ورود به برج خنک کن و خروج از آن و با استفاده از رابطه‌ی انرژی برای جریان یکنواخت (Steady Flow Energy) می توان موازنه ی انرژی و جرم را انجام داد. این ساده ترین روش برای بررسی عملکرد برج خنک کن است، بدون در نظر گرفتن مراحل پیچیده ی انتقال جرم و حرارت که در داخل برج به وقوع می پیوندد.

ماکزیمم فشار هوای پایین برج 20 mbar بالاتر از فشار محیط آزمایشگاه است. فشار آزمایشگاه را با راهنمایی استاد درس از مانومتر جیوه‌ای نصب شده در آزمایشگاه بخوانید.

پارامترها و واحدهای استفاده شده در روابط بیان شده در این آزمایش از قرار زیر است:

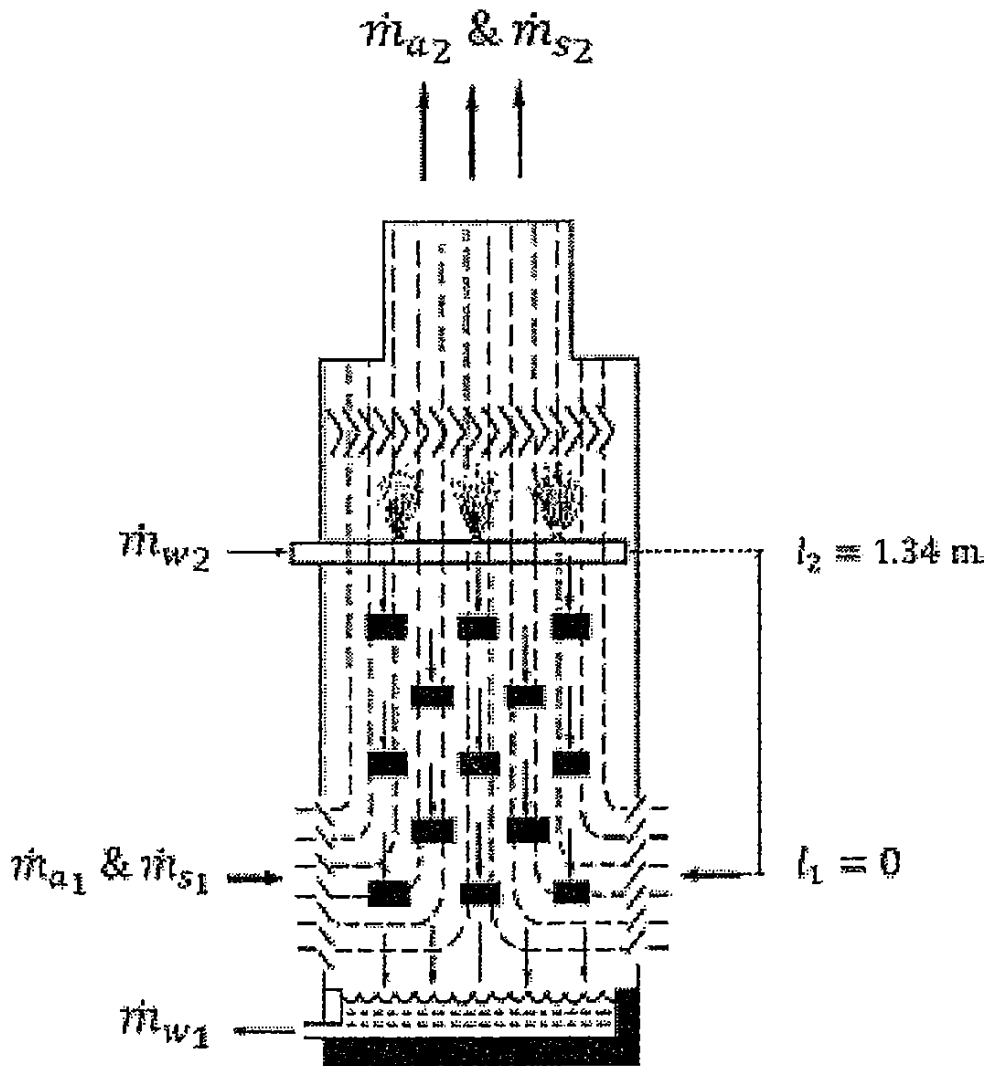
واحد	پارامتر
°C	t درجه حرارت
bar	P فشار مطلق

-	ϕ رطوبت نسبی
kg/kg	ω رطوبت مخصوص
m ³ /h	\dot{V} دبی حجمی
kg/h	\dot{m} دبی جرمی
kJ/kg.°k	R ثابت گاز
°k	T درجه حرارت مطلق
kJ/kg	h آنتالپی مخصوص
m/s	V سرعت
9.81 m/s ²	g ثابت ثقل
m ³ /kg	ν حجم مخصوص

هم چنین پسوند های مربوطه عبارتند از:

۱	شرایط در محل ۱
۲	شرایط در محل ۲
S	مربوط به یک خاصیت بخار مافوق گرم در درجه حرارت خشک (dry bulb)
SS	مربوط به یک خاصیت بخار اشباع در درجه حرارت خشک
t _d	درجه حرارت خشک
t _w	درجه حرارت تر
a	مربوط به یک خاصیت هوای خشک
\dot{m}_w	دبی جرمی آب

برای بررسی تئوری برج خنک کن به شکل زیر توجه کنید.



برای محاسبه ی فشار بخار مافوق گرم در درجه حرارت خشک از رابطه ی زیر استفاده می کنیم:

$$P_{s_1} = P'_{s_1} - 1000A(td_1 - tw_1)$$

فشار بخار مافوق گرم در درجه حرارت خشک در شرایط ۱: P_{s_1}

فشار بخار اشباع در درجه حرارت تر در شرایط ۱: P'_{s_1}

$$A = \text{عدد ثابت} = 6.66 \times 10^{-4} \text{mbar}/^{\circ}\text{C}$$

برای محاسبه ی درصد رطوبت نسبی رابطه ی زیر به کار می رود.

$$\phi = \frac{P_s}{P_{ss}} \times 100$$

قانون دالتون چنین نوشته می شود:

$$P_{at} = P_s + P_a$$

برای محاسبه ی رطوبت مخصوص از رابطه ی زیر استفاده می گردد:

$$\omega = 0.622 \frac{P_s}{P_a} (\text{kg} / \text{kg})$$

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a}$$

در اینجا می توان هوا را گاز کاملی فرض کرده از رابطه زیر استفاده نمود:

$$P_a \dot{V}_a = \dot{m}_a R_a T$$

که در اینجا $R_a = 0.287 (\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{K})$ است.

قانون بقاء ماده به صورت زیر نوشته می شود.

$$\dot{m}_{s_1} + \dot{m}_{w_2} = \dot{m}_{s_2} + \dot{m}_{w_1}$$

و بالاخره اتلاف تبخیری (Evaporation Loss) از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$\text{اتلاف تبخیری} = \dot{m}_{w_2} + \dot{m}_{w_1}$$

قانون اول ترمودینامیک برای یک حجم کنترلی با چند جریان ورودی و خروجی به صورت زیر است:

$$\frac{dE_{c.v.}}{dt} = \dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e \right)$$

اگر اندیس 1 و 2 را به ترتیب به خصوصیات ورودی و خروجی نسبت دهیم و همچنین با در نظر گرفتن شرایط پایا رابطه به صورت زیر تغییر می کند.

$$\dot{Q}_{c.v.} - \dot{W}_{c.v.} + \sum \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} V_1^2 + gZ_1 \right) - \sum \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 + gZ_2 \right) = 0$$

در این رابطه اندیس (۱) و (۲) به ترتیب نشانگر پرامتراها در نقطه ورود هوا در پایین برج و در نقطه ورود آب به برج از میله اسپری می باشند. کار انجام شده توسط فن دستگاه را این تجزیه و تحلیل به حساب نمی آید زیرا عملکرد خود برج خنک کن در درجه ی اول اهمیت قرار دارد. هیچ گونه کاری توسط هوا و آب و یا بر روی آن ها در این محدوده انجام نمی گیرد. و W و Q هر دو صفرند.

از آن جایی که سطح مقطع برج در این محدوده یکنواخت است، لذا $C_1 \cong C_2$ و می توان نوشت:

$$\frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) = 0$$

هوا توسط لوله های مخصوص به قسمت پایینی برج وارد می گردد و در این قسمت درجه حرارت های خشک و تر آن اندازه گیری می شود. مقدار هوای ورودی به پروانه توسط یک دریچه قابل تنظیم است.

آب ورودی به دستگاه وارد محفظه ای در بالای برج می شود و آن را پر کرده و مقدار اضافی آن از طریق لوله ای به فاضلاب می رود. این آب از محفظه پس از عبور از یک فلومتر برای اندازه گیری دبی آن، توسط چهار گرمکن که توان هر کدام 2 kj/sec است، گرم می شود. توسط شیری که بر روی صفحه ی کنترل نصب شده می توان دبی آب را تغییر داد. آب گرم شده به قسمت بالای برج منتقل شده و از آن جا بر روی صفحه ی کنترل نصب شده می توان دبی آب را تغییر داد. آب گرم شده به قسمت بالای برج منتقل شده و از آن جا به روی صفحات موجود در داخل برج اسپری می شود. این آب پس از عبور از صفحات و تماس با هوایی که از پایین دمیده می شود خنک شده و به قسمت پایینی برج می رسد. یک مخزن در پایین برج نصب شده که ظرفیت مقدار معینی آب را داراست. پس از پر شدن این مخزن آب اضافی به فاضلاب وارد می شود. توسط یک شیر خروجی می توان مخزن را از آب خالی نمود. درجه حرارت های ورودی و خروجی آب توسط دو دماسنج اندازه گیری می شود.

هوای ورودی به برج پس از تماس با آب و خنک نمودن آن به بالای برج رسیده و از آن خارج می گردد. در این قسمت نیز درجه حرارت های خشک و تر هوا اندازه گیری می شود. مخزن پایینی برج کالیبره شده است که از آن برای اندازه گیری دبی خروجی آب استفاده می گردد.

روش آزمایش:

شیر خروجی سیستم آب را که در طرف چپ مخزن زیرین برج قرار دارد ببندید.

شیر خروجی آب برج را ببندید.

شیر کنترل جریان آب را که به روی صفحه ی کنترل قرار دارد، ببندید.

توجه کنید که کلید های برق در پشت دستگاه به حالت OFF باشد.

توجه کنید که کلیدهای تمام گرم کن ها که به روی صفحه ی کنترل قرار دارند به حالت OFF باشند.

برای روشن نمودن دستگاه اعمال زیر را به ترتیب انجام دهید:

شیر ورودی آب را که به روی زمین نصب شده باز کرده سپس شیر ورودی آب به برج را که در پشت دستگاه قرار دارد، باز نمایید.

اجازه دهید که محفظه ی بالایی برج از آب پر شده و سرریز آن به فاضلاب رود.

شیر خروجی سیستم آب را باز کرده و اجازه دهید که هوای موجود در لوله آب ورودی خارج گردد و سپس شیر را ببندید.

شیر کنترل جریان آب را به طور کامل باز نموده و صبر کنید تا آب در داخل برج به جریان افتد. در همین حال مطمئن شوید که آب از سرریز محفظه ی بالای جریان داشته باشد. برای حصول اطمینان از وجود فشار ثابت در فلومتر تحت تمام شرایط، آب بایستی از سرریز محفظه ی بالایی برج به طور دائم جریان داشته باشد.

اجازه دهید که مخزن آب واقع در پایین برج پر شده و آب اضافه به فاضلاب برود.

کلید های برق را در پشت دستگاه را به حالت ON در بیاورید.

فن را توسط کلید مربوطه روشن کنید.

چهار گرمکن الکتریکی را روشن کنید.

آزمایش اول:

توسط دریچه فن، دبی هوا را روی $200 \text{ m}^3/\text{h}$ تنظیم کنید. برای کنترل دقیق هوا می‌توانید دریچه کوچک واقع در انتهای فن را باز و بسته کنید تا دبی دلخواه به دست آید. سپس توسط شیر کنترل آب واقع به روی صفحه ی دستگاه، ارتفاع آب را روی 15.5 cm تنظیم نمایید. این ارتفاع معادل دبی جرمی 151.5 Kg/h است. به آهستگی شیر خروجی برج را باز کرده و آب را در سطحی نگه دارید که دماسنج آب خروجی در آب غوطه ور باشد.

در این حالت، دستگاه باید حدود یک ساعت کار کند تا به حالت تعادل برسد. زمانی که دماسنج های خشک و تر دیگر تغییر نکنند در آن موقع شرایط تعادل به دست آمده است. گاه به گاه مخازن دماسنج های تر را آزمایش کنید و مطمئن شوید که آب مقطر دارند. در صورتی که آب مقطر به اندازه ی کافی نباشد به آن ها اضافه نمایید.

پس از حصول شرایط تعادل اعداد زیر را یادداشت کنید:

درجه حرارت ورودی آب

درجه حرارت خروجی آب

درجه حرارت های خشک و تر هوای ورودی (t_{d1} و t_{w1})

درجه حرارت های خشک و تر هوای خروجی (t_{d2} و t_{w2})

برای به دست آوردن دبی خروجی آب از برج از مخزن پایین برج استفاده می‌شود. این مخزن به دقت کالیبره شده است و ارتفاع آب بین نشانه های پایینی و بالایی دقیقا مقدار 4 kg را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن دبی خروجی آب با استفاده از یک کرومومتر به طریق زیر عمل نمایید:

شیر خروجی برج را باز کرده و اجازه دهید که مخزن پایینی خالی گردد.

شیر خروجی برج را کاملا ببندید و افزایش سطح آب را در لوله مجاور مخزن مشاهده کنید. به محض این که سطح آب به نشانه ی پایینی رسید، کرومتر را به کار اندازید.

زمانی که سطح آب به نشانه ی بالایی رسید، کرومتر را متوقف کرده و زمان طی شده را یادداشت کنید.

شیر خروجی برج را باز کرده و بگذارید مخزن خالی شود.

مراحل ۱ تا ۴ را سه بار دیگر انجام داده و میانگین آن ها را به عنوان زمان دقیق به دست آورید.

شیر خروجی برج را تنظیم کرده و آب را در سطحی نگه دارید که دماسنج آب خروجی در آب غوطه ور باشد.

آزمایش دوم:

پس از اتمام اندازه گیری های آزمایش اول، دبی حجمی هوا را تغییر داده و آن را روی $350 \text{ m}^3/\text{h}$ میزان کنید. سپس توسط شیر کنترل، ارتفاع آب را به 27 cm تغییر دهید. این ارتفاع آب برابر دبی جرمی $272/1 \text{ Kg/h}$ است. به آهستگی شیر خروجی را باز کرده و آب را در سطحی نگه دارید که دماسنج آب خروجی در آب ورودی غوطه ور باشد.

صبر کنید تا دستگاه به حالت تعادل برسد. (حدود نیم ساعت) قبل از شروع به اندازه گیری دماسنج های خشک و تر را کنترل کنید که تغییری نداشته باشند.

پس از به دست آمدن شرایط تعادل کلیه اعمال مانند آزمایش اول را انجام دهید و اعداد مربوطه را یادداشت نمایید.

پس از اتمام آزمایش دوم برای خاموش کردن دستگاه به طریق زیر عمل نمایید:

گرمکن های الکتریکی را خاموش کنید.

فن را خاموش نمایید.

کلیدهای برق در پشت دستگاه را به حالت OFF در بیاورید.

شیر ورودی آب برج را بسته و نیز شیر ورودی آب را که به روی زمین نصب است ببندید.

شیر خروجی سیستم آب را باز کنید.

شیر کنترل آب به روی صفحه ی دستگاه را به طور کامل باز نمایید.

شیر خروجی برج را کاملاً باز کنید.

مدتی صبر کنید تا آب دستگاه خارج شود.

شیر کنترل آب را ببندید.

خواسته‌های آزمایش:

برای هر یک از آزمایش‌های اول و دوم اعمال زیر را انجام دهید.

رطوبت‌های نسبی و مخصوص هوای ورودی و خروجی را محاسبه کنید.

دبی جرمی هوای خشک ورودی را حساب کنید.

دبی جرمی بخار ورودی و خروجی را محاسبه کنید.

اتلاف تبخیری و اتلاف حقیق اندازه گرفته شده آب را با هم مقایسه نمایید.

تغییر انرژی در هوا را محاسبه کنید.

تغییر انرژی آب را محاسبه نمایید.

این دو تغییر انرژی را با هم مقایسه کنید.