دانشگاه کرمان
دانشکدهٔ مهندسی

دستور کار

آزمایشگاه انتقال حرارت

۱- انتقال حرارت هدایتی(Conduction).....۲
۲- انتقال حرارت جابجایی روی سطح(Convection:External Flow).....۱۲
۳- انتقال حرارت جابجایی اجباری داخل لوله(Forced Convection:Internal Flow)....۱۹
۴- تشعشع حرارتی(Radiation).....۲۶
۵- اندازه‌گیری دما (Temperature Measurement).....۳۳
۶- مبدل حرارتی دو لوله ای (Double- Pipe Heat Exchanger).....۴۰

فرهاد طالبی
گروه مکانیک ۱۳۸۲

۱- آزمایش انتقال حرارت هدایتی

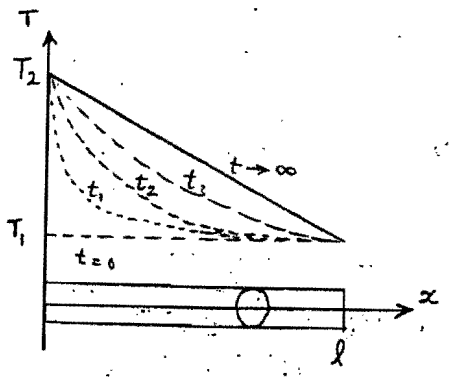
انتقال حرارت در جامدات اساساً از طریق هدایت انجام می‌شود. اما میزان هدایت حرارت در اجسام متفاوت است و بستگی به جنس جسم دارد. اجسام را از نظر قابلیت هدایت حرارت درجه بندی می‌کنند و به هر کدام عددی نسبت داده می‌شود که آنرا ضریب هدایت حرارتی می‌نامند. در کاربردهای عملی هدایت حرارتی در سه بعد صورت می‌گیرد و تحلیل آن نیازمند محاسبات پیچیده و گسترده است. اما آشنایی با پارامترهای مؤثر در هدایت حرارتی اجسام مانند جنس، نحوهٔ قرارگرفتن، سطح مقطع، مقاومت سطح تماس و رفتار عایقهای حرارتی با ایجادشرایط انتقال حرارت یک بعدی و دائم قابل بررسی است.

در آزمایشهای زیر مشاهده و نتیجه‌گیری قانون اصلی هدایت یعنی رابطهٔ نرخ انتقال حرارت با گرادیان دما و مساحت سطح تبادل حرارت، همچنین بررسی تأثیر سطح تماس و مواد عایق با انجام آزمونهای یک بعدی دائم و غیر دائم فراهم شده است.

۱-۱ تئوری

میله‌ای به طول ℓ و سطح مقطع A که دمای تمام نقاط آن T_1 است را درنظر بگیرید. در یک لحظه یک انتهای میله را به منبع حرارتی با دمای T_2 تماس می‌دهیم. سطح خارجی میله با عایقی پوشانده شده است به طوریکه تبادل حرارتی با خارج نداشته باشد. منحنی تغییرات دما در طول میله در زمانهای مختلف مطابق شکل زیر است.

در این شکل توزیع دمای میله در هر زمان معین توسط یک منحنی نشان داده شده است. پس از گذشت زمان کافی $(t \to \infty)$ دمای تمام نقاط ثابت می‌ماند. در این حالت می‌گوئیم میله به ثبات دمایی یا حال دائم رسیده است. گرمایی را که در واحد زمان از سطح مقطع عبور می‌کند جریان گرمایی یا نرخ انتقال حرارت می‌نامند و با q نشان داده می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در حالت دائم داریم:



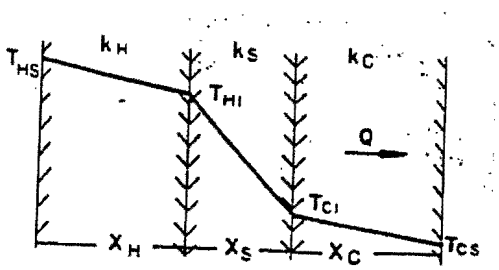
$$q \propto A\frac{\Delta T}{\Delta x} = A\frac{T_2 - T_1}{\ell} \qquad (۱-۱)$$

اگر میله از مادهٔ همگن باشد، طبق قانون فوریه:

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \qquad (۱-۲)$$

و k ضریب هدایت حرارتی میله است. ضریب هدایت حرارتی اغلب اجسام با دما تغییر می‌کند، اما این تغییر در محدودهٔ دمایی معیی جزئی و تقریباً قابل چشمپوشی است. ضریب هدایت حرارتی فلزات از غیرفلزات و گازها بیشتر است.

وقتی جریان گرما مطابق شکل زیر به ترتیب از چند جسم با ضریب هدایت متفاوت عبور می‌کند، در حالت دائم نرخ انتقال حرارت در لایه‌های مختلف یکسان است. بنابراین با استفاده از قانون فوریه داریم:



$$\frac{q}{A} = k_H\frac{T_{HS} - T_{HI}}{x_H} = k_S\frac{T_{HI} - T_{CI}}{x_S} = k_C\frac{T_{CS} - T_{CS}}{x_C} \qquad (۱-۳)$$

از رابطهٔ اخیر می‌توان نتیجه گرفت که:

$$\frac{q}{A} = U\left(T_{HS} - T_{CS}\right) \qquad (۱-۴)$$

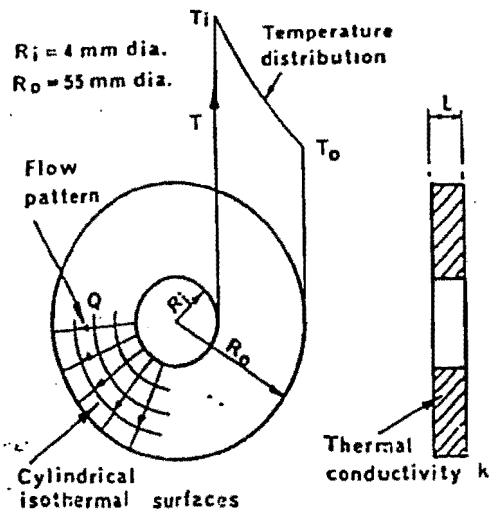
و U ضریب انتقال حرارت کلی دیواره برابر است با:

$$\frac{1}{U} = \frac{x_H}{k_H} + \frac{x_S}{k_S} + \frac{x_C}{k_C} \qquad (۱-۵)$$

هدایت حرارتی یک بعدی می‌تواند در مختصات استوانه‌ای و به صورت شعاعی بررسی شود. مطابق شکل سطحهای داخلی و خارجی یک استوانهٔ جدار ضخیم هر یک در دمای یکنواخت و متفاوت با یکدیگر نگهداشته شده است.

در حالت دائم می‌توان نشان داد :

$$q = 2\pi Lk \frac{T_i - T_o}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \qquad (۶-۱)$$



۱-۲ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل ۱-۱ شامل اجزاء زیر است:

۱ مجموعهٔ اجزائ آزمایش هدایت طولی و شعاعی با قطعات برنجی و تجهیزات اندازه‌گیری مربوطه،

۲ ، ۳ ، ۴ نمونه‌های برنجی و فولادی،

۵ سیمهای اتصال ترمو کوپل به مجموعهٔ منبع تغذیه و نشانگرها،

۶ مجموعهٔ منبع تغذیه و نشانگرهای دیجیتالی،

۸ مادهٔ پرکنندهٔ سیلیکونی،

۹ ، ۱۰ نمونه‌های عایق کاغذ و چوب‌پنبه‌ای

مدول طولی شامل سه قسمت است: بخش متصل به منبع گرم که توسط المان حرارتی گرم می‌شود، بخش میانی و بخش متصل به منبع سرد که توسط آب خنک‌کننده سرد می‌شود. بخش اول و سوم میله‌ای از جنس برنج به طول 30mm و قطر 25mm است که در سطح خارجی به خوبی عایق شده‌اندودر طول میله سه سنسور دما به فاصلهٔ 10mm از یکدیگر قرار دارند. برای بخش میانی سه نمونه پیش‌بینی شده‌است. اولین نمونه برنجی به طول 30mm و به قطر 25mm مشابه بخشهای اول و سوم که به همراه آنها یک میلهٔ بلند برنجی با نه(۹) سنسور دمای متساوی‌الفاصله را تشکیل می‌دهد. دومین نمونه نیز برنجی به طول 30mm به قطر 13 mm است. این نمونه فاقد سنسور برای اندازه‌گیری دما است و تنها به منظور بررسی اثر کاهش سطح مقطع استفاده می‌شود. نهایتاً نمونهٔ سوم فولادی در ابعاد نمونهٔ اول و بدون سنسور دما است و برای بررسی دیواره مرکب استفاده می‌شود. به منظور کاهش مقاومت تماس سه بخش فوق می‌توان از روغن سیلیکونی در سطح تماس استفاده کرد.

مدول شعاعی از یک دیسک برنجی به قطر خارجی110mm ، و ضخامت 3mm تشکیل شده است. این دیسک توسط یک گرمکن الکتریکی در وسط حرارت می‌گیرد و در محیط توسط لوله‌های مسی حاوی آب خنک‌کننده سرد می‌شود. شش(۶) سنسور دما به ترتیب در مرکز و به فاصلهٔ 10mm از هم در جهت شعاعی قرار دارند. تلفات حرارتی دیسک مرکزی توسط لایهٔ هوا و پوشش عایق به کمترین مقدار رسیده است.

مدول طولی و شعاعی و وضعیت سنسورهای دما در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

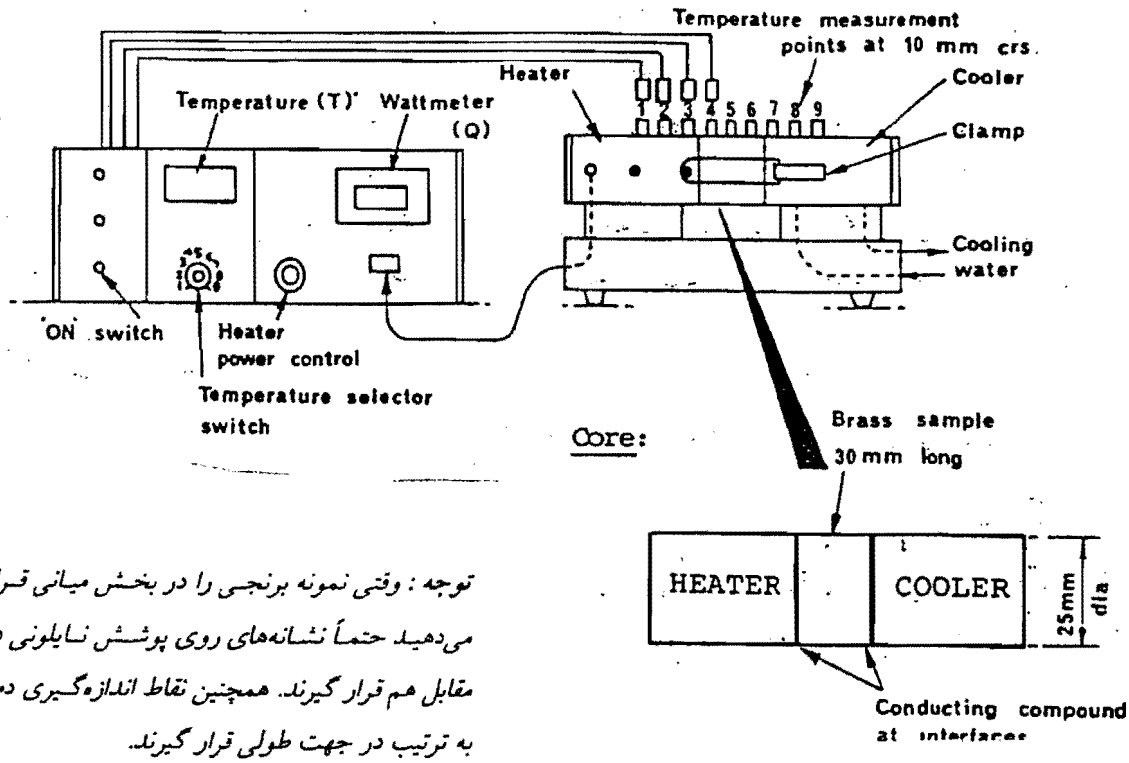
توجه: پس از انجام هر آزمایش کلید منبع تغذیه را خاموش و دستگاه را به حالت اولیه برگردانید.

A هدایت حرارتی در میلهٔ ساده

A-۱ هدف : بررسی قانون فوریه در هدایت یک بعدی طولی.

A-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



توجه : وقتی نمونه برنجی را در بخش میانی قرار می‌دهید حتماً نشانه‌های روی پوشش نایلونی در مقابل هم قرار گیرند. همچنین نقاط اندازه‌گیری دما به ترتیب در جهت طولی قرار گیرند.

۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در وضعیت میانی قرار دهید.

۳- هر یک دقیقه یکبار دما در طول میله و نرخ انتقال حرارت را بخوانید و مطابق جدول زیر یادداشت کنید. (قرائت دما بهتر است ابتدا از انتهای سرد میله و به سرعت انجام شود)

$T_9(^oC)$	$T_8(^oC)$	$T_7(^oC)$	$T_6(^oC)$	$T_5(^oC)$	$T_4(^oC)$	$T_3(^oC)$	$T_2(^oC)$	$T_1(^oC)$	نرخ انتقال حرارت q(W)	زمان (min)

۴- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را پر کنید.

$T_9(^oC)$	$T_8(^oC)$	$T_7(^oC)$	$T_6(^oC)$	$T_5(^oC)$	$T_4(^oC)$	$T_3(^oC)$	$T_2(^oC)$	$T_1(^oC)$	نرخ انتقال حرارت q(W)	آزمایش

۵- اندازه‌گیری دما در حالت دائم را برای یک توان گرمکن دیگر تکرار و در جدول یادداشت کنید.

A-۳ خواسته آزمایش

i - حالت دائم

۱- پروفیل دمای حالت دائم را در دو وضعیت آزمایش شده رسم کنید.

۲- با استفاده از پروفیل دما ضریب هدایت حرارتی میلهٔ برنجی را محاسبه و با مقدار نمونه موجود در جداول انتقال حرارت مقایسه کنید.

۳- براساس نتایج آزمایش اثر دما بر ضریب هدایت حرارتی برنج چقدر است؟

۴- عوامل مؤثر در خطای آزمایش کدامند؟

ii- حالت گذرا

۱- پروفیلهای دمای میله بر حسب زمان را برای حالتیکه قدرت گرمکن در وضعیت متوسط قرار دارد رسم کنید.

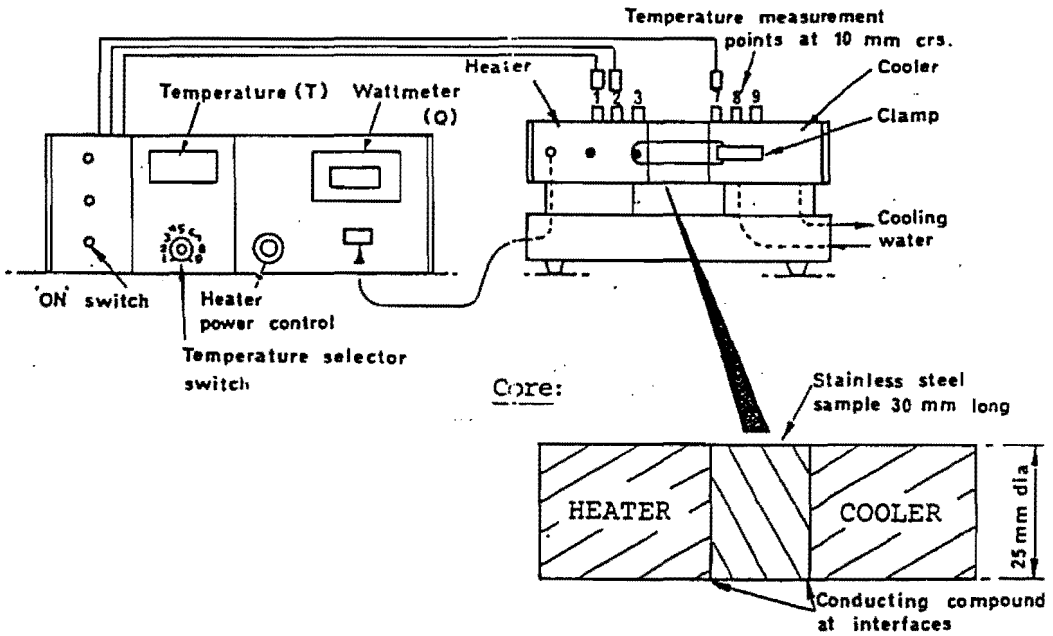
۲- در مقایسه با حالت تئوریک هدایت گذرا در جسم نیمه بینهایی، آیا کدامیک از دو مدل شرط مرزی دمای سطح ثابت و یا نرخ انتقال حرارت ثابت مناسبتر است؟ نمودار تئوریک را همراه نمودار آزمایش رسم کنید و در مورد اختلاف مقادیر بحث کنید.

B هدایت حرارتی در میلهٔ مرکب

B-۱ هدف : بررسی انتقال حرارت هدایتی در دیوارهٔ مرکب و تعیین ضریب انتقال حرارت کلی.

B-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در وضعیت میانی قرار دهید.

۳- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را پر کنید.

T_9(°C)	T_8(°C)	T_7(°C)	T_3(°C)	T_2(°C)	T_1(°C)	نرخ انتقال حرارت q(W)	آزمایش

۴- این کار را برای یک قدرت گرمکن دیگر تکرار کنید.

B-۳ خواسته آزمایش

۱- پروفیل دمای حالت دائم را در دو وضعیت آزمایش شده رسم کنید. دمای انتهایی میله T_{HS} و T_{CS} را تعیین کنید.

۲- با استفاده از پروفیل دما ضریب هدایت حرارتی میلهٔ فولادی را محاسبه و با مقدار نمونه موجود در جداول انتقال حرارت مقایسه کنید.

۳- ضریب انتقال حرارت کلی را برای هر دو وضعیت به دو روش زیر مقایسه کنید. در مورد اختلاف مقادیر بحث کنید.

1) $$U = \frac{q}{A(T_{HS} - T_{CS})}$$

2) $$\frac{1}{U} = \frac{x_H}{k_H} + \frac{x_S}{k_S} + \frac{x_C}{k_C}$$

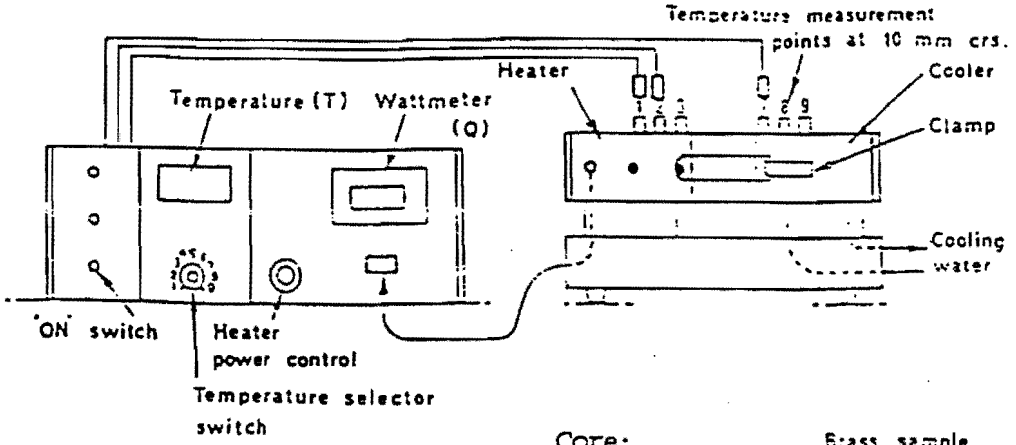
۴- وابستگی خواص حرارتی فولاد و برنج به دما را مقایسه کنید.

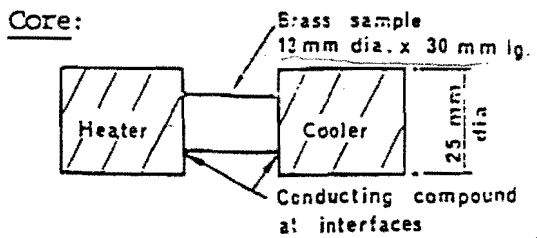
C اثر تغییر سطح مقطع در هدایت حرارتی

C-۱ هدف : بررسی تأثیر سطح ممقطع بر پروفیل دما

C-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.





$A_1 \Delta T_1 = A_2 \Delta T_2$

$625 \times 129 = 169\ \Delta T_2$

۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در وضعیت میانی قرار دهید.

۳- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را پر کنید.

T_9(°C)	T_8(°C)	T_7(°C)	T_3(°C)	T_2(°C)	T_1(°C)	نرخ انتقال حرارت q(W)	آزمایش

C-۳ خواسته آزمایش

۱- پروفیل دمای حالت دائم را رسم کنید.

۲- با استفاده از پروفیل دما گرادیان دما در نمونهٔ میانی و میلهٔ بخش اول و سوم را تعیین کنید. نسبت گرادیان دما در نمونهٔ میانی به گرادیان دمای میله بخش اول وسوم را تعیین و مطابق جدول زیر تکمیل کنید.

آزمایش	$\frac{(dT/dx)_S}{(dT/dx)_H}$	$\frac{(dT/dx)_S}{(dT/dx)_C}$
1		

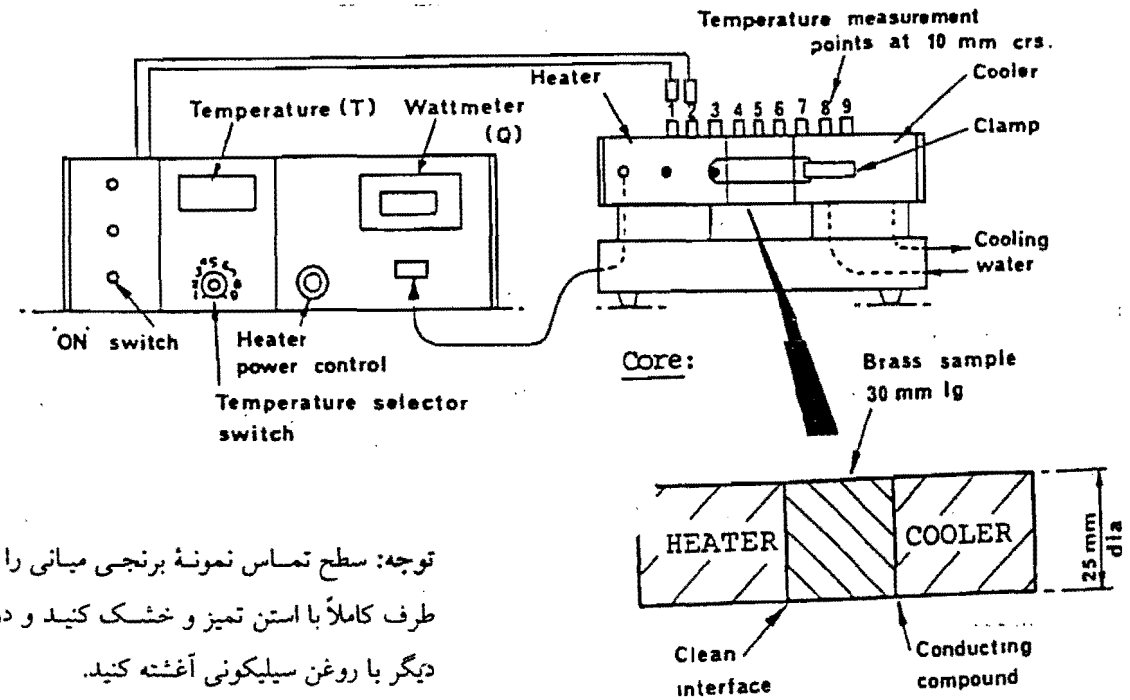
۳- مقادیر جدول بالا را با عدد 3.70 مقایسه کنید. این عدد از کجا آمده است؟ علت اختلاف مقادیر جدول با 3.70 چیست؟ این اختلاف را برای قدرت حرارتی زیاد و کم مقایسه کنید.

D مقاومت سطح تماس

D-۱ هدف : بررسی اثر مادهٔ پرکننده در مقاومت سطح تماس

D-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



توجه: سطح تماس نمونهٔ برنجی میانی را در یک طرف کاملاً با استن تمیز و خشک کنید و در طرف دیگر با روغن سیلیکونی آغشته کنید.

۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در وضعیت بیشینه قرار دهید.

۳- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را پر کنید.

آزمایش	نرخ انتقال حرارت q(W)	T_1(°C)	T_2(°C)	T_3(°C)	T_4(°C)	T_5(°C)	T_6(°C)	T_7(°C)	T_8(°C)	T_9(°C)

۴- این کار را برای نمونهٔ فولادی میانی تکرار کنید.

D-۳ خواسته آزمایش

۱- پروفیل دمای حالت دائم را در دو وضعیت آزمایش شده رسم کنید. بخصوص دمای سطوح تماس و سطوح ابتدا و انتهایی میله را تعیین کنید.

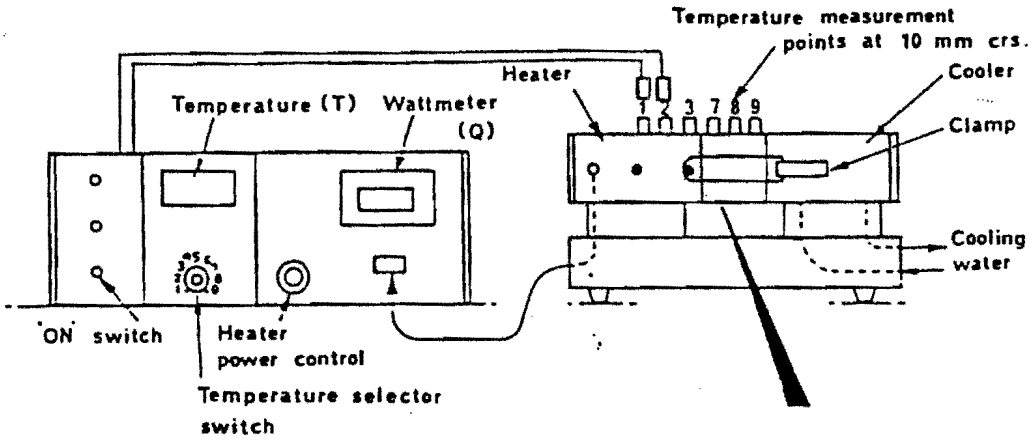
۲- مقدار مقاومت تماس دو سطح را برآورد کنید و حالتهای مختلف را با هم مقایسه کنید.

E عایق حرارتی

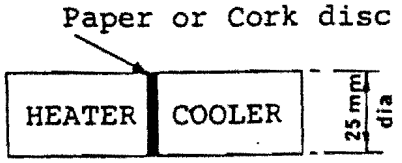
E-۱ هدف : بررسی اثر عایقهای حرارتی بر هدایت گرما بین دو دیواره و تعیین ضریب هدایت حرارتی عایق

E-۲ روش انجام آزمایش

۱۰- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



توجه: از روغن سیلیکونی استفاده نکنید. مطمئن شوید که دیسک عایق با میلهٔ فلزی هم محور باشد. قبل از جاگذاری دیسک عایق ضخامت آنرا با کولیس اندازه بگیرید.



۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در حدود 10-15 w قرار دهید. به طوریکه دمای دائم T_1 از 100 °C بیشتر نشود.

۳- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را برای دیسک کاغذی و دیسک چوب‌پنبه‌ای پر کنید.

آزمایش	نرخ انتقال حرارت q(W)	T_1(°C)	T_2(°C)	T_3(°C)	T_7(°C)	T_8(°C)	T_9(°C)

E-۳ خواسته آزمایش

۱- پروفیل دمای حالت دائم را در دو وضعیت آزمایش شده رسم کنید. بخصوص دمای سطوح تماس و سطوح ابتدا و انتهایی میله را تعیین کنید.

۲- با استفاده از پروفیل دما ضریب هدایت عایق را محاسبه و با مقدار نمونه موجود در جداول انتقال حرارت مقایسه کنید.

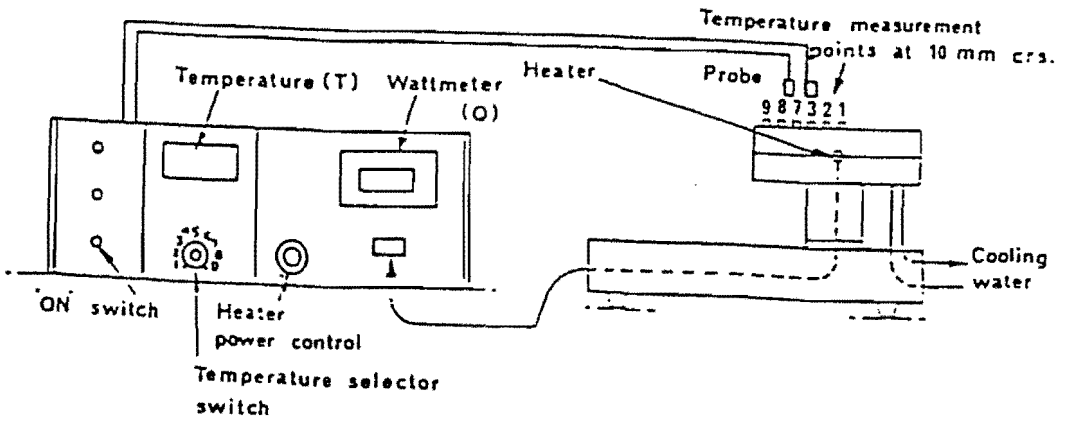
۳- اثر مقاومت تماس در خطای آزمایش و سایر عوامل خطا چقدر است؟

F هدایت شعاعی در دیسک

F-۱ هدف : تعیین پروفیل دما و نرخ انتقال حرارت شعاعی در دیسک

F-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت گرمکن را در وضعیت میانی قرار دهید.

۳- پس از رسیده به حالت دائم جدول زیر را پر کنید.

آزمایش	نرخ انتقال حرارت q(W)	T_1(°C)	T_2(°C)	T_3(°C)	T_7(°C)	T_8(°C)	T_9(°C)

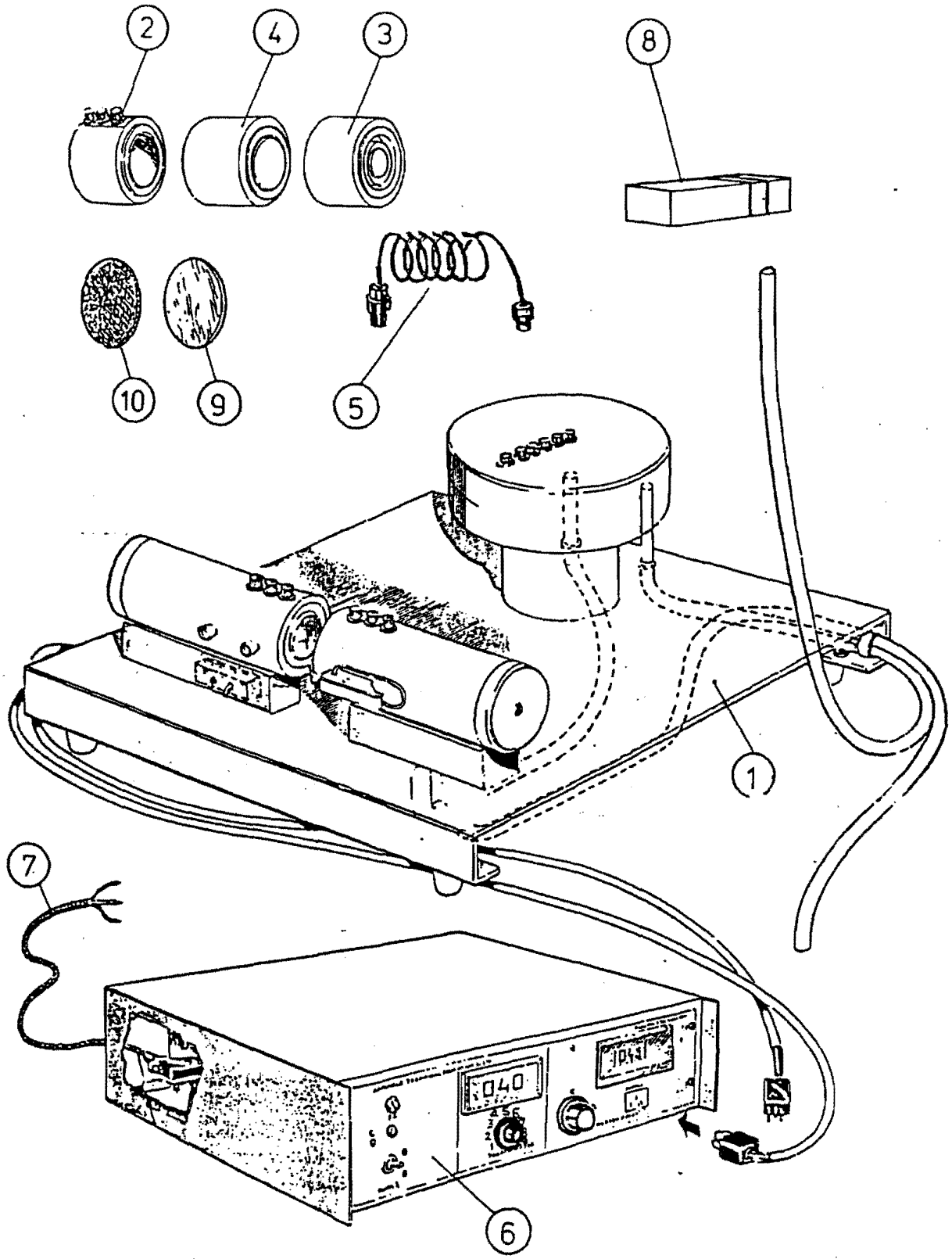
۴- این کار را برای یک قدرت ورودی دیگرتکرار کنید.

F-۳ خواسته آزمایش

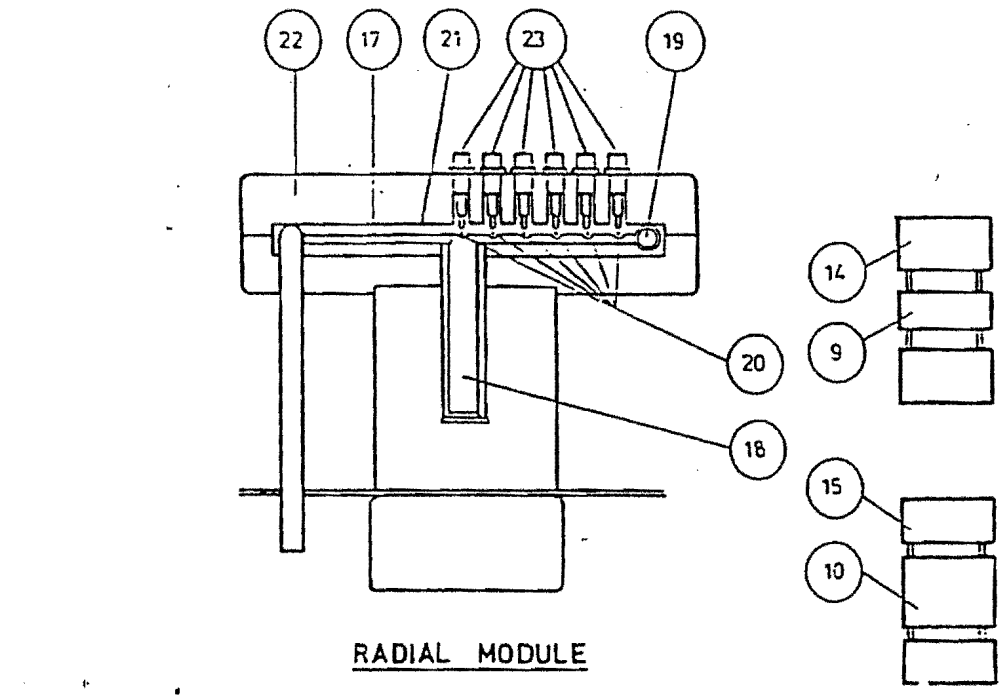
۱- پروفیل دمای حالت دائم را در دو وضعیت آزمایش شده در طول شعاع دیسک در دیاگرام نیمه لگاریتمی (T-ln$R$) رسم کنید.

۲- دمای سطح داخلی دیسک T_i و دمای سطح خارجی دیسک T_o را تعیین کنید.

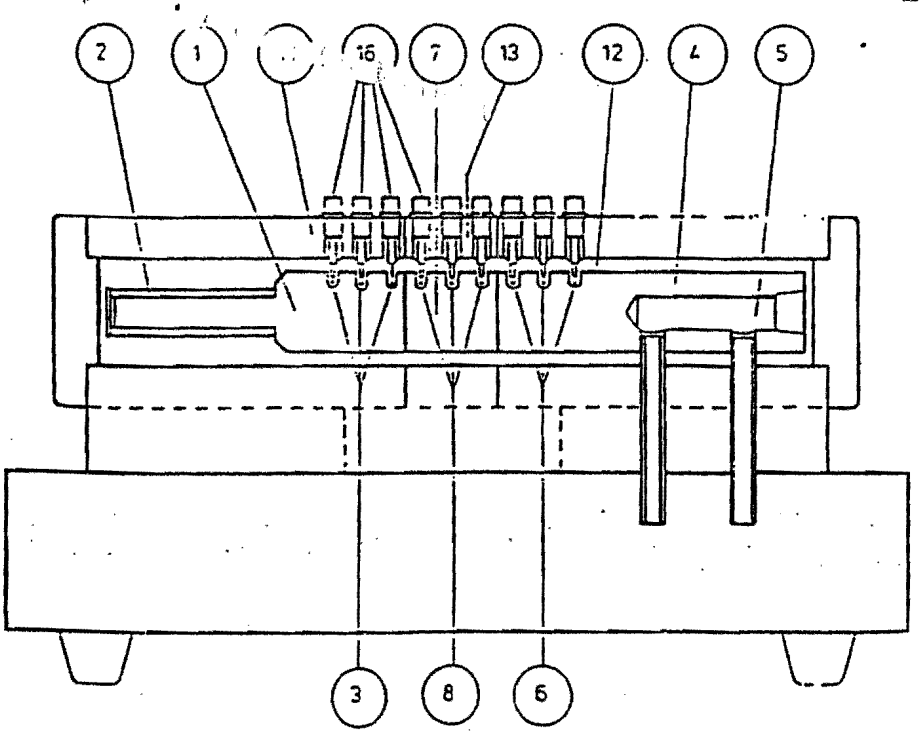
۳- مقدار انتقال حرارت را با استفاده از پروفیل دما تعیین و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کنید.



شکل ۱-۱ مشخصات کلی دستگاه آزمایش انتقال حرارت هدایتی



RADIAL MODULE



LINEAR MODULE

شکل ۱-۲ مشخصات مدول شعاعی و طولی

۲- آزمایش انتقال حرارت جابجایی روی سطوح

انتقال حرارت جابجایی، اجباری و آزاد، مهمترین مکانیزم انتقال گرما در محیط سیالی است و در کنار هدایت حرارتی پایه و اساس عملکرد اغلب مبدل‌های حرارتی صنعتی و تجهیزات مربوطه است. میزان انتقال حرارت جابجایی از یک سطح به هندسهٔ سطح و جریان، خواص ترموفیزیکی سیال و خواص جریان بستگی دارد. به‌خصوص در جابجایی آزاد اختلاف دمای سطح و سیال تأثیر زیادی بر ضریب انتقال گرما دارد.

از طرفی معمولاً از سطوح گسترش‌یافته یا پره‌ها به منظور افزایش نرخ گرمای انتقال یافته استفاده می‌شود. این عمل با تغییر ضریب انتقال حرارت و افزایش سطح تبادل گرما همراه است.

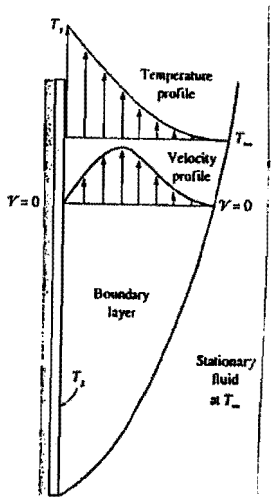
در آزمایشهای زیر مقایسه جابجایی آزاد و اجباری و بررسی اثر پره‌ها از طریق مشاهدهٔ تغییرات دما و نرخ انتقال گرما انجام می‌شود.

۲-۱ تئوری

یک سطح گرم بیشترین تلفات حرارتی به محیط را از طریق جابجایی دارد. اگرچه تشعشع نیز وجود دارد، اما در شرایط دماهای متوسط و سطوح متداول اثر آن ناچیز است. ضریب انتقال حرارت جابجایی h توسط رابطهٔ زیر تعریف می‌شود:

$$h = \frac{q''}{T_s - T_\infty}$$

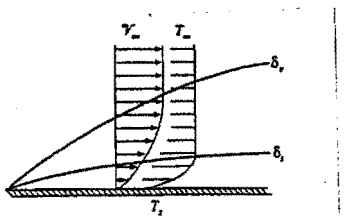
در این رابطه q" شار حرارتی و T_s و T_∞ به ترتیب دمای سطح و سیال است.



شکل ۲-۱ توزیع سرعت و دما
(جابجایی طبیعی روی صفحه)

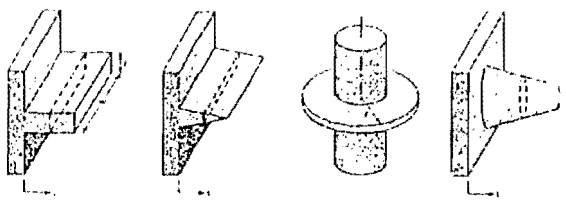
در *جابجایی آزاد (free or natural convection)* هوا در تماس با سطح داغ، گرم می‌شود و به واسطهٔ کاهش چگالی رو به بالا حرکت می‌کند. هوای سردی که جایگزین شده است، به نوبهٔ خود گرم و جریانی ایجاد می‌شود. هرچه سطح گرمتر باشد، جریان هوا سریعتر و نرخ انتقال گرما افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از پروفیل سرعت و دما در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

از آنجا که حرکت سیال در جابجایی آزاد کُند است، نرخ انتقال حرارت کم است. با افزایش سرعت سیال انتقال حرارت افزایش می‌یابد. وقتی سرعت زیاد توسط عامل خارجی انجام شود، این فرایند را *جابجایی اجباری (force convection)* می‌نامند. نمونه‌ای از پروفیل سرعت و دما روی یک سطح در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ توزیع سرعت و دما
(جابجایی اجباری روی صفحه)

افزایش نرخ انتقال حرارت را می‌توان توسط افزایش سطح تماس سیال انجام داد. این کار با نصب پره *(fin)* انجام می‌شود و به چنین سطوحی، *سطوح گسترش یافته (extended surface)* می‌گویند. مطابق شکل ۲-۳ شکل پره با توجه به هندسهٔ سطح و جریان می‌تواند به صورت‌های *میله‌ای (pinned)*، *مستطیلی (rectangular)* و *حلقوی (annular)* باشد. اگر چه در سطوح گسترش‌یافته مساحت تماس افزایش می‌یابد، اما دمای موضعی سطح پره‌ها نسبت به سطح *پایه (base)* کمتر می‌شود و با افزایش طول پره راندمان کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۳ نمونه سطوح گسترش‌یافته

۲-۲ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل ۲-۴ و ۲-۵ شامل اجزاء زیر است:

(۱) مجرای مربعی عمودی عبور هوا،

(۲و۱۶) سرعت‌سنج قابل حمل و حسگر مربوطه *(anemometer)*،

(۳و۴و۵) صفحه‌های مسطح *(flat)*، پره‌دار میله‌ای *(pinned)* و پره‌دار مستقیم *(finned)* که توسط المان الکتریکی گرم می‌شود،

(۶) جستجوگر دما با سیم اتصال مربوطه،

(۷) سیم اتصال ترموکوپل،

(B و۲۱) فن با سویچ کنترل سرعت (دور)،

(A) سویچ کنترل گرمکن.

۹۸۴۲۷۴۲۹۹۵

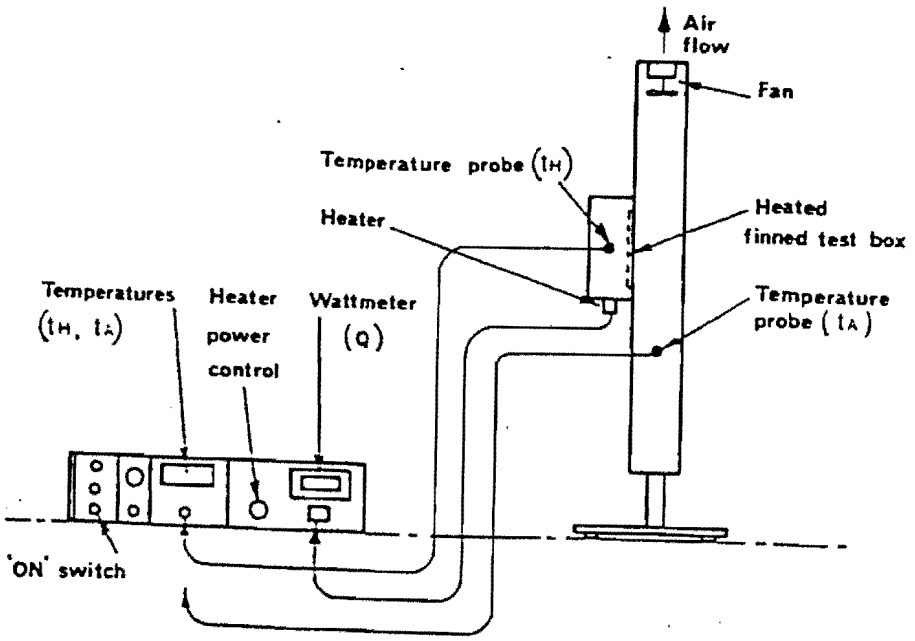
A اثر اختلاف دمای سطح و سیال بر جابجایی آزاد

A-۱ هدف : مشاهدهٔ تغییرات نرخ انتقال حرارت با اختلاف دمای سطح و سیال.

A-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.از صفحهٔ پره‌دار (پره مستقیم/ پره میله‌ای) استفاده کنید.

۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و توان گرمکن را *20 w* قرار دهید.



توجه : می‌توانید برای تسریع در آزمایش، ابتدا توان را *75w* قرار دهید تا دما به *80°C* برسد. سپس آزمایش را ادامه دهید.

۳- دمای هوا را یادداشت کنید(T_A(°C) .

۴- پس از رسیدن به حالت دائم جدول زیر را برای توانهای *20* تا *60* وات پر کنید.

جدول ۲-۱ نتایج آزمایش A

توان ورودی(w)	دمای سطح گرم T_H(°C)	$T_H - T_A$ (°C)
20		
40		
60		

A-۳ خواسته آزمایش

۱- منحنی تغییر **توان - اختلاف دما** را رسم کنید.

۲- یک تابع چند جمله‌ای به داده‌های فوق برازش کنید.

۳- اختلاف دما را برای توان *50 w* و *100 w* برآورد کنید.

B اثر سرعت جریان بر جابجایی اجباری

B-۱ هدف : مشاهدهٔ تأثیرسرعت جریان بر جابجایی

B-۲ روش انجام آزمایش

۱- مانند آزمایش قبل دستگاه را بر پا کنید.

۲- صفحهٔ تخت(بدون پره) را در محل خود نصب کنید.

۳- توان گرمکن را *30w* قرار دهید.

۴- سرعت فن را *0.5 m/s* تنظیم کنید.

۵- پس از رسیدن به حالت دائم جدول زیر را برای سرعتهای *0.5* تا *1.5* متر بر ثانیه تکمیل کنید.

جدول ۲-۲ نتایج آزمایش B

	سرعت هوا *(m/s)*	دمای سطح گرم $T_H(^oC)$	$T_H - T_A\ (^oC)$
صفحهٔ تخت	*0.5* *1* *1.5*		
صفحهٔ پره‌دار (مستطیلی / میله‌ای)	*0.5* *1* *1.5*		

۶- آزمایش را برای صفحهٔ گرم پره‌دار (مستطیلی/میله‌ای) تکرار کنید.

B-۳ خواسته آزمایش

۱- منحنی تغییر **اختلاف دما- سرعت** را برای سه نوع صفحه در یک دیاگرام رسم کنید.

۲- اختلاف دما را برای سرعت *0* و *2.5* متر بر ثانیه برآورد کنید.

۳- در مورد نحوهٔ تغییرات دما و سرعت بحث کنید.

C تغییرات طولی دمای پره

C-۱ هدف : مشاهدهٔ تغییرات طولی دما در پره و رسم پروفیل دما

C-۲ روش انجام آزمایش

۱- مانند آزمایش قبل دستگاه را بر پا کنید.

۲- صفحهٔ پره‌دار را در محل خود نصب کنید.

۳- توان گرمکن را *60w* قرار دهید.

۴- پس از رسیدن به حالت دائم جدول زیر را با اندازه‌گیری دمای پره در حفره‌ها توسط ترمیستور تکمیل کنید.

جدول ۲-۳ نتایج آزمایش C

	سرعت هوا *(m/s)*	دمای پره (^oC)			
		T_1	T_2	T_3	T_4
صفحهٔ پره‌دار (مستطیلی / میله‌ای)	*0* *1* *1.5*				

C-۳ خواسته آزمایش

۱- منحنی تغییرات دما در طول پره برای تمام حالتها را در یک دیاگرام رسم کنید. *(T – x)*

۲- گرادیان دما در طول پره را برای تمام حالتها محاسبه و در یک نمودار رسم کنید. *(dT/dx – x)*

۳- راندمان پره در کدام حالت بیشتر است؟

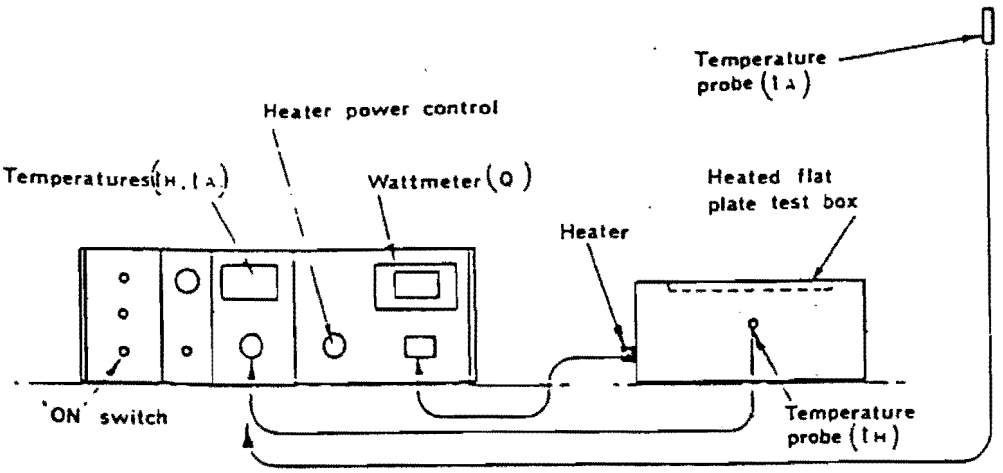
۴- انتقال حرارت در کدام حالت بیشتر است؟

D جابجایی آزاد از صفحهٔ مایل

D-۱ هدف : بررسی اثر وضعیت قرار گرفتن صفحهٔ گرم بر انتقال حرارت جابجایی آزاد

D-۲ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را بر پا کنید.



توان گرمکن را *15w* قرار دهید.*(توجه: می‌توانید ابتدا توان را 70w قرار دهید تا دما به 50°C برسد. سپس آزمایش را ادامه دهید.)*

۳- دمای هوا را یادداشت کنید. T_A *(°C)*

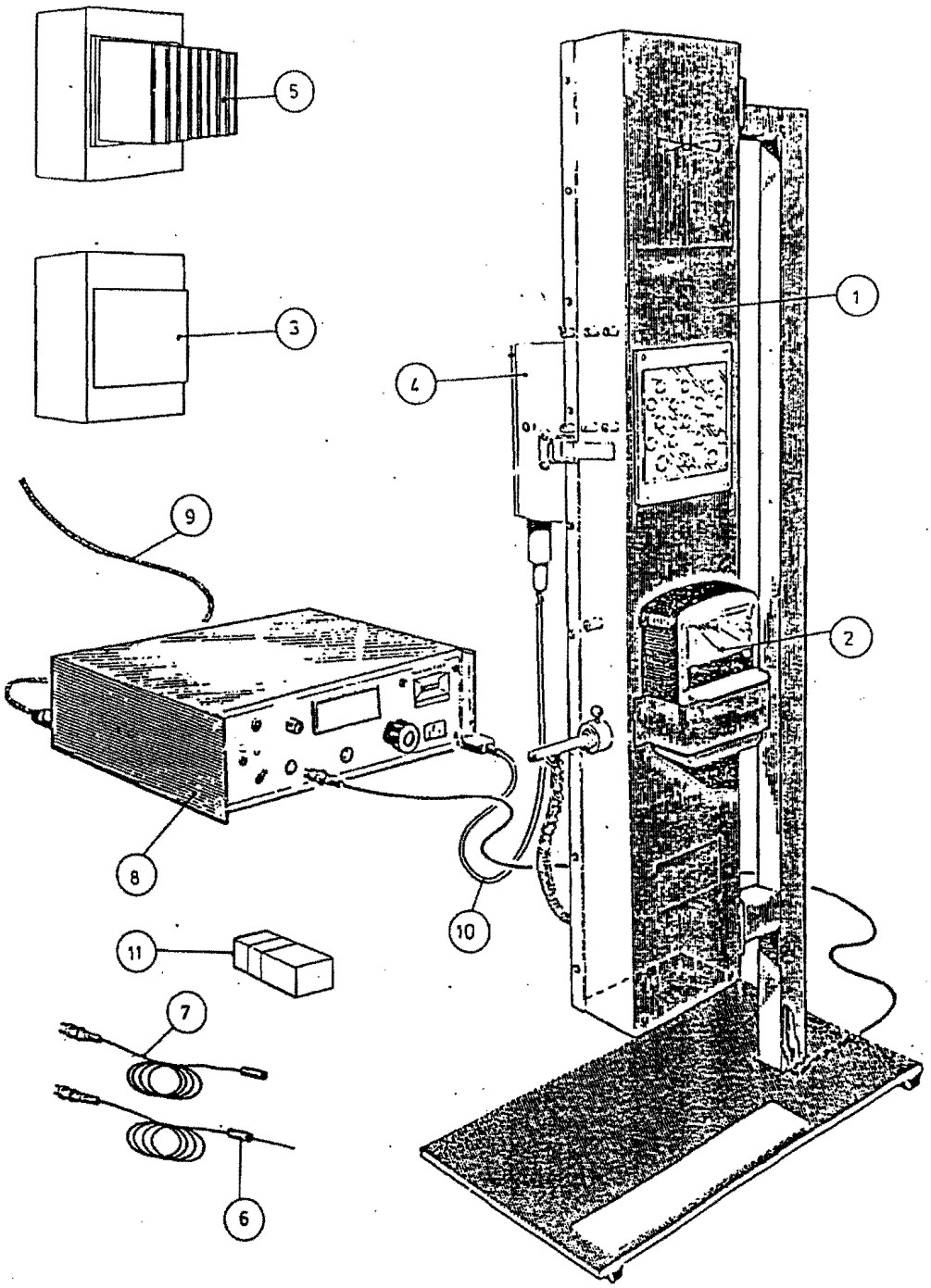
۴- *پس از رسیدن به حالت دائم دمای صفحه را در چهار وضعیت صفحهٔ افقی، صفحهٔ مایل و صفحهٔ عمودی مطابق جدول زیر یادداشت کنید.*

جدول ۲-۴ نتایج آزمایش D

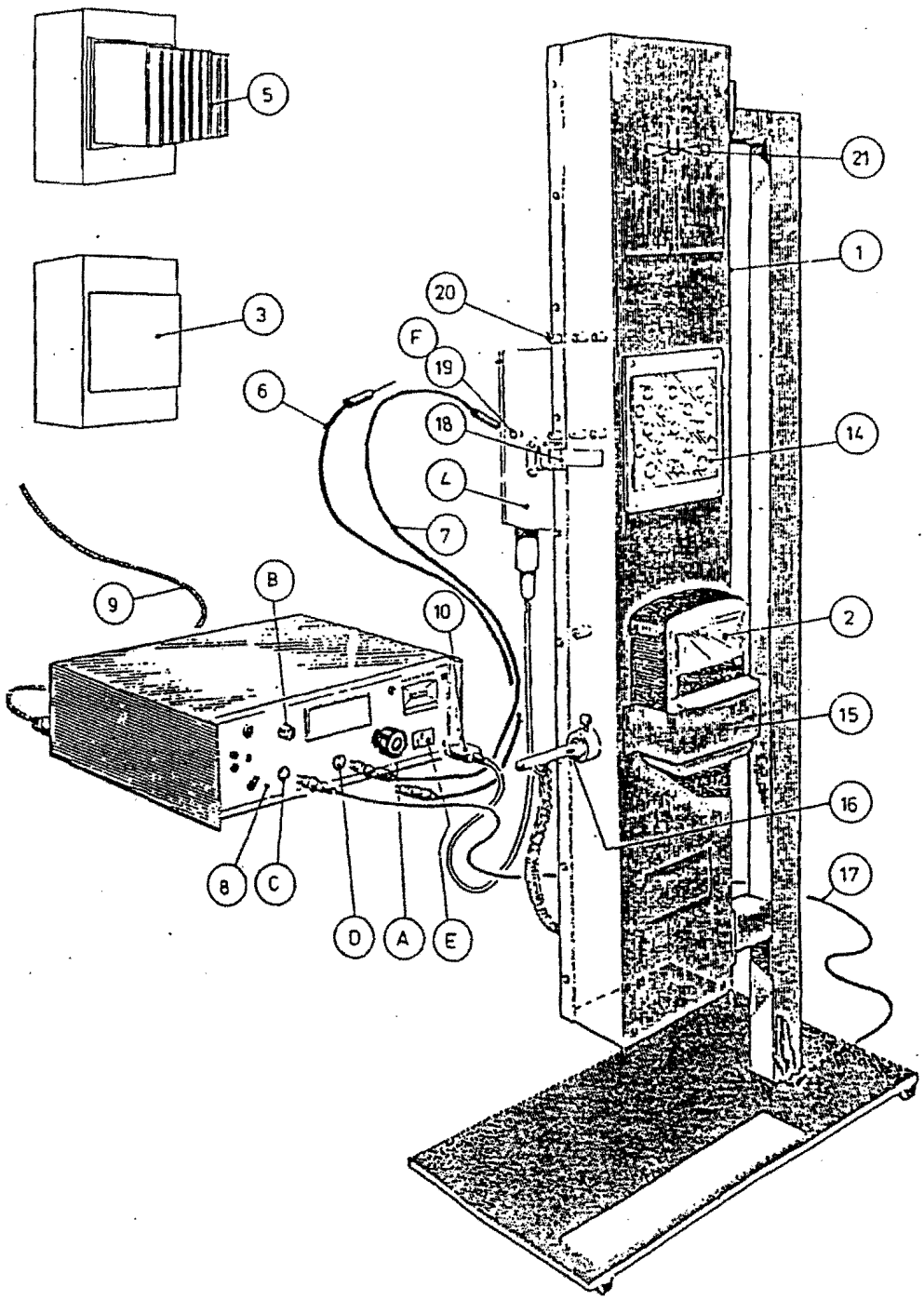
	دمای سطح گرم T_H (°C)	T_H-T_A(°C)
صفحهٔ افقی		
صفحهٔ مایل ۳۰°		
صفحهٔ مایل ۶۰°		
صفحهٔ عمودی		

D-۳ خواسته آزمایش

۱- ضریب انتقال حرارت در چهار وضعیت فوق را محاسبه و با هم مقایسه کنید.



شکل ۴-۴ مشخصات کلی دستگاه آزمایش انتقال حرارت جابجایی



شکل ۲-۵ شمای اتصال تجهیزات

۳- آزمایش انتقال حرارت جابجایی اجباری داخل لوله

آگاهی از مبانی نظریه انتقال حرارت از طریق جابجایی اجباری جایگاه ویژه‌ای در بسیاری از زمینه‌های مهندسی ، به‌خصوص در طراحی مبدلهای حرارتی دارد. با استفاده از این آزمایش دانشجو قادر خواهد بود به تئوریها و فرمولهای مرتبط با جابجایی اجباری در لوله‌ها بپردازد. مقادیر اندازه‌گیری شده به دانشجو این امکان را می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی h ، ضریب اصطکاک لوله fو گروه‌های بدون بعد شامل عدد رینولدز Re ، نوسلت Nu و استنتون St را محاسبه کند. مقادیر بدست آمده را می‌توان با مقادیری که از روابط تجربی حاصل می‌شود مقایسه و صحت اصل تشابه رینولدز را بررسی کرد.

۱ هدف : ارزیابی تجربی اصل تشابه رینولدز $(St=f/2)$ برای هوا و همچنین مقایسه مقادیر تجربی St ،Nu و f با مقادیری که از روابط تجربی بدست می‌آید.

۲ تئوری: انتقال حرارت جابجایی شامل مبادله انرژی بین یک سطح و سیال مجاور آن به دو دسته تقسیم می‌شود. انتقال حرارت جابجایی اجباری که در آن سیال به وسیلهٔ یک عامل خارجی مثل پروانه یا پمپ مجبور به جریان از روی یک سطح جامد می‌شود.در مقابل در جابجایی طبیعی (آزاد) سیال گرمتر (یا خنک تر) در مجاورت سطح جامد به علت وجود تغییرات دما در یک ناحیه از سیال که باعث اختلاف چگالی می‌شود، جریان می‌یابد. رابطه انتقال حرارت جابجایی اولین بار در ۱۷۰۱ میلادی توسط نیوتن چنین بیان شد:

$$\frac{q}{A} = h\Delta T \qquad (۱-۳)$$

که در آن q نرخ انتقال حرارت جابجایی $(watt)$ ، A مساحت قائم بر جهت جریان حرارت (m^2) ، ΔT اختلاف دما بین سطح و سیال (^oC) و h ضریب انتقال حرارت جابجایی (w/m^2K) است.

محاسبات این آزمایش در شش قسمت زیر شرح داده شده است:

۲-۱ دبی جرمی هوا: توسط اُریفیس و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$\dot{m} = \rho \times \text{سطح اُریفیس} \times C_d\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (kg/s) \qquad (۲-۳)$$

که در آن:

C_d : ضریب تخلیهٔ اُریفیس برابر 0.613

ρ : چگالی هوا در اُریفیس

Δp : افت فشار در اُریفیس

P_a : فشار هوای اتمسفر محلی برابر $0,882$ bar

۲-۲ شار گرما

گرمای ورودی توسط نوار گرمایی (المنت): از رابطهٔ

$$q_1 = \frac{Amp \times Volt}{1000} \quad (kw) \qquad (۳-۳)$$

تلفات گرمایی عایق (هدایت): از رابطهٔ

$$q_2 = \frac{k}{1000} \times \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \times \text{(طول ناحیهٔ آزمایش)} \times \text{(میانگین دمای کاسته‌شده در طول عایق)} \quad (kw) \qquad (۴-۳)$$

k ضریب هدایت حرارتی عایق برابر با: $k = 0,0415$ W/m°C

که در آن: r_i : شعاع داخلی عایق

r_o : شعاع خارجی عایق

شار گرما در جدارهٔ لوله: که با توجه به تعاریف فوق برابر است با:

$$(q_1 - q_2) \text{ / (سطح داخلی دیوارهٔ لوله)} \quad (\text{kw/ m}^2) \qquad (۵-۳)$$

از شار گرما برای محاسبهٔ ضریب انتقال حرارت جابجایی h استفاده می‌شود.

در این رابطه اثر هدایت در طول لوله مسی بر شار گرما در نظر گرفته نشده است. یعنی برای هر قطعه از لولـه گرمـای ورودی از یک انتها برابر گرمای خروجی از انتهای دیگر است.

۲-۳ دمای هوای میانگین در قسمت معینی از ناحیهٔ حرارتی

دیاگرام نمایشی روی پانل دستگاه محل قرار گیری ترموکوپلها را نشان می‌دهد. از خواندن دماها اینگونه برمی‌آید که ناحیهٔ بین ۲ و ۵ تحت تأثیر ابتدا و انتها قرار ندارد. لذا محاسبات انتقال حرارت باید حول و حوش مقطع ۴ انجام گیرد.بـا محاسـبه نـرخ کل گرمای وارده به این نقطه دمای متوسط هوا بدست می‌آید. کل گرمای ورودی شامل گرمای ورودی توسط المنت گرمـایی بعلاوهٔ گرمای ورودی توسط هدایت در لوله و منهای تلفات حرارتی عایقهاست.

گرمای ورودی توسط هدایت در دیوارهٔ لوله مسی برابر است با :

$$q_3 = \frac{380.6}{1000} \times \frac{2\pi \bar{r} t}{10^6} \times \text{(کاهش دما) / (متر)} \quad (\text{kw}) \qquad (۶-۳)$$

که در آن: $\bar{r}$: شعاع متوسط لولهٔ مسی *(mm)*

380.6 : ضریب هدایت گرمایی مس در دمای *380 K*

t : ضخامت دیواره *(mm)*

کل گرمای ورودی به ناحیهٔ مورد نظر برابر است با:

$$(q_1 - q_2) \times \left(\frac{b}{1753}\right) + q_3 \quad (\text{kw}) \qquad (۷-۳)$$

که در آن: b : طول لولهٔ حرارتی در ناحیهٔ انتخابی *(mm)*

1753 : طول کل ناحیه تست *(mm)*

دمای میانگین هوا برابر است با:

$$T_b = T_1 + \frac{1}{\dot{m} \times c_p} \times \text{(کل گرمای ورودی)} \quad (^{\circ}\text{C}) \qquad (۸-۳)$$

که در آن: T_1 : دمای هوای ورودی

C_p : گرمای ویژه هوا در دمای ورودی

۲-۴ ضریب انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت برابر است با :

$$h = \frac{1}{T_w - T_b} \times \text{(شار گرمایی)} \qquad (۹-۳)$$

دمای دیواره T_w توسط ترموکوپل در نقطه ای که تعادل گرمایی نوشته می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. ایـن دمـا را می‌تـوان از نمودار دمای دیواره بر حسب طول لوله نیز بدست آورد.

۲-۵ مقادیر تجربی Nu ، St و f

با استفاده از تعریف از روابط زیر بدست می‌آید:

$$I)\ Nu = \frac{hd}{k} \qquad \text{عدد نوسلت} \qquad (۱۰-۳)$$

$$II)\ St = \frac{h}{\rho \bar{u} C_p} \qquad \text{عدد نواستنتون} \qquad (۱۱-۳)$$

$$III)\ p_1 - p_2 = \frac{4 f l \rho \bar{u}^2}{2d} \qquad \text{ضریب اصطکاک} \qquad (۱۲-۳)$$

معادلهٔ آخر بر این فرض استوار است که تمام افت فشار ناشی از اصطکاک در جداره است. اما برای جریان در حال گرم شدن این فرض درست نیست . زیرا قسمتی از تغییر فشار ناشی از شتاب حاصل از انبساط هوا است که در طول لوله حرارتی رخ می‌دهد. یکی از روابطی که این اثر را با دقت خوبی در نظر می‌گیرد معادله معروف به گوگنهایم *(Guggenheim)* است:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \left[\frac{4fl}{2d} + \frac{T_2 - T_1}{\bar{T}} + \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)\right] \qquad (۱۳-۳)$$

۲-۶ محاسبهٔ مقادیر Nu ، St و f با استفاده از روابط تجربی متداول

$$Nu = 0.023 \mathrm{Re}^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.4} \qquad (۱۴-۳)$$

$$St = 0.023 \mathrm{Re}^{-0.2} \mathrm{Pr}^{-0.6} \qquad (۱۵-۳)$$

$$f = 0.079 \mathrm{Re}^{-0.25} \qquad \textit{(Turbulent region only)} \qquad (۱۶-۳)$$

که در آنها $\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{u} d}{\mu}$ عدد رینولدز و $\mathrm{Pr} = \frac{\mu c_p}{k}$ عدد پرانتل است که برای گازها تقریباً ثابت است. این عدد تغییرات اندکی با دما و فشار گاز دارد. در جدول ضمیمه مقادیر Pr ،k ،c_p و μ برای هوای خشک در دماهای مختلف داده شده‌است.

تشابه رینولدز بر این فرض استوار است که $Pr = 1$ است. در این صورت اصل تشابه چنین بیان می‌شود:

$$St = \frac{Nu}{\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}} = \frac{f}{2} \qquad (۱۷-۳)$$

با جایگزین کردن این رابطه در معادلهٔ (۳-۱۵) رابطهٔ دیگری برای ضریب اصطکاک f استخراج می‌شود:

$$f = 0.046 \mathrm{Re}^{-0.2} \qquad (۱۸-۳)$$

مقادیر بدست آمده از روابط فوق را می‌توان با مقادیر حاصل از آزمایش مقایسه کرد.

۳ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش بطور کامل در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک فن دمنده سانتریفوژ *(Centrifugal Fan)* الکتریکی است که هوا را از طریق یک شیر کنترل مکیده و آن را به درون لوله U شکل می فرستد. سرعت فن در طول آزمایش ثابت می ماند. یک صفحهٔ ارفیس استاندارد برای اندازه گیری دبی هوا در لوله تعبیه شده است. این لوله به لوله مسی آزمایش متصل است و هوا را به اتمسفر تخلیه می‌کند. لوله آزمایش توسط یک نوار حرارتی که بر سطح خارجی آن پیچیده

شده است توسط جریان الکتریکی گرم می‌شود. توان ورودی به نوار بوسیلهٔ یک ترانسفورمر متغیر که به دستگاه متصل است تنظیم می‌شود. مقادیر ولتاژ و جریان ورودی بوسیلهٔ ولتمتر و آمپرمتر بر روی دستگاه نشان داده می‌شود. لوله آزمایش با لایه پشم شیشه (*Fiberglass*) عایق بندی شده است. تمام لوله ها بر روی بلوک های چوبی که بوسیلهٔ بدنهٔ فولادی دستگاه نگهداری می شود قرار دارند. در دو سر طول مشخصی از لوله آزمایش که در قسمت حرارت داده شده قرار دارد سوراخهای فشار قرار دارد که هر کدام به مانومترهایی بر روی صفحهٔ دستگاه متصل است. مانومترهای دیگر که بر روی صفحهٔ دستگاه قرار دارد، فشار خروجی فن و افت فشار در اُریفیس را نشان می‌دهد.

یک دماسنج جیوه‌ای در ورودی لولهٔ آزمایش قرار دارد که دمای هوای ورودی را اندازه‌گیری می‌کند. دیاگرام نشان داده شده بر روی صفحه دستگاه موقعیت ۱۳ ترموکوپل را نشان می‌دهد که هفت عدد آنها در طول لولهٔ آزمایش و شش‌تای بقیه در قسمت عایق‌بندی شده قرار گرفته‌اند(شکل۲). خروجی هر ترموکوپل را می‌توان بوسیله یک کلید انتخاب‌کننده که بر روی صفحهٔ دستگاه قرار دارد مشخص نمود. این خروجی توسط یک پتانسیومتر الکترونیکی *(Electronic Potentiometer)* اندازه‌گیری می‌شود.

۴ روش انجام آزمایش

توجه: همیشه قبل از روشن کردن دستگاه ترمز چرخ ها را ببندید. انتهای خروجی لوله حداقل باید 130 cm از دیوار یا هر مانع دیگر فاصله داشته باشد. حتما در حال کار کردن در انتهای خروجی لوله از محافظ چشم استفاده کنید.

۱)در حالی که شیر ورودی پروانه کاملاً باز است، آن را روشن کنید.

۲)در حالیکه ترانسفورمر متغیر برروی صفر قرار دارد، گرم کننده (هیتر) را روشن کنید (توجه کنید که این اعمال بهمین ترتیب صورت گیرد).

۳)ولتاژ را اضافه کنید تا جریانی درحدود ماکزیمم ۴/۵ آمپر بدست آید. در اینجا دستگاه باید حداقل مدت ۳۰ دقیقه کار کند تا شرایط دایمی دما بدست آید. دمای لوله (ترموکوپل های ۱ تا ۷) نباید حداکثر از $150\,^{\circ}C$ تجاوز کند. پس از به دست آمدن شرایط دایمی مقادیر زیر را یادداشت کنید :

۱- فشار هوا قبل از اُریفیس (فشار خروجی فن)

۲- اختلاف فشار دو سر اُریفیس

۳- دمای هوای ورودی به لوله آزمایش

۴- دما و فشار محیط

۵- افت فشار در طول لوله آزمایش

۶- دمای ترموکوپل‌های روی لوله آزمایش (ترموکوپل‌های ۱ تا ۷)

۷- دمای ترموکوپل‌های داخل و خارج لایه عایق (ترموکوپل‌های ۸ تا ۱۳)

۸- شدت جریان (آمپرمتر) و اختلاف پتانسیل (ولتمتر)

۴)آزمایش را با شار حرارتی و عدد رینولدز کمتر انجام دهید. به این منظور شیر ورودی فن را تا نیمه بسته و ولتاژ را کم کنید تا جریانی در حدود ۲/۵ آمپر بدست آید. پس از انجام این تغییرات دستگاه دوباره تا حدود ۲۰ دقیقه کار کند تا به شرایط پایدار برسد. هنگامی که این شرایط حاصل شد، مقادیر ذکر شده در بالا را برای آزمایش دوم یادداشت کنید.

۵)پس از پایان آزمایشها هیتر را خاموش کنید. فن را برای مدت حداقل پنج دقیقه روشن نگهدارید و سپس آنرا خاموش کنید.

۵ خواسته‌های آزمایش

۱- منحنی تغییرات دمای دیواره در طول لوله را رسم کنید و مقطع انتخاب شده برای انجام موازنهٔ حرارتی (نیمه بین ترموکوپل ۴ و ۵) را روی آن مشخص کنید

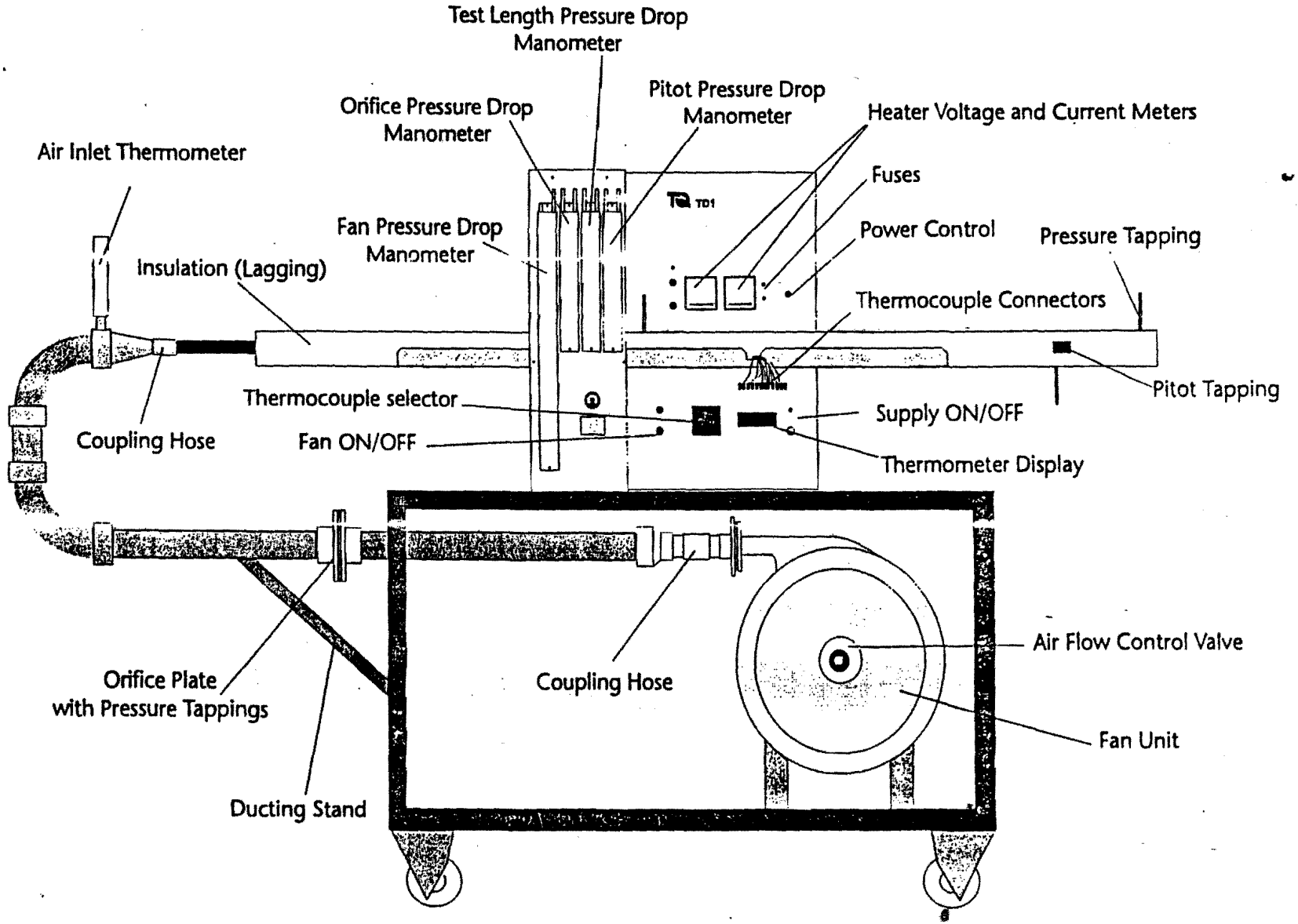
۲- منحنی تغییرات اختلاف دمای لایه عایق را بر حسب طول لوله رسم کنید و مقطع انتخابی و طول حرارت داده شده تا این مقطع را در آن نشان دهید.

۳- تغییرات دمای لوله و اختلاف دمای عایق را براساس منحنی‌های فوق توضیح دهید.

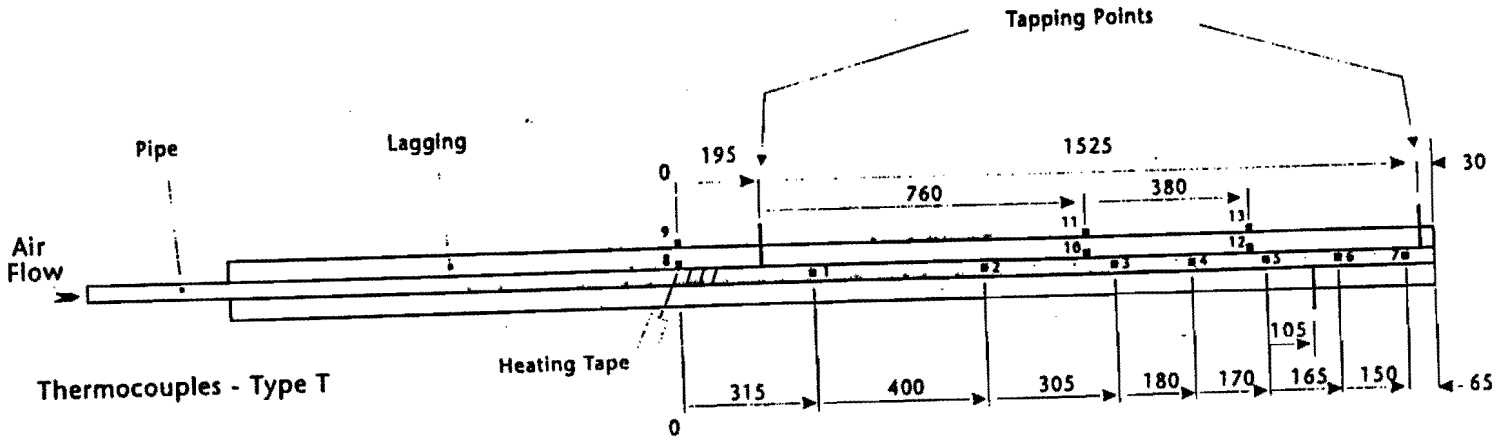
۴- کمیتهای زیر را محاسبه و در یک جدول مانند جدول زیر ارائه نمایید:

کمیت محاسبه شده	نحوهٔ محاسبه	مقدار با واحد مربوطه
کل نرخ حرارت داده شده		
تلفات حرارتی در عایق		
شار حرارتی متوسط در جداره		
نرخ هدایت حرارت در مقطع انتخابی در لوله		
کل نرخ حرارت داده شده تا مقطع انتخابی		
دمای متوسط سیال در مقطع انتخابی		
ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط		
عدد نوسلت آزمایش		
دبی جرمی هوا		
عدد رینولدز آزمایش		
عدد استنتون آزمایش		
عدد پرانتل		
عدد نوسلت از روابط تجربی		
عدد استنتون از روابط تجربی		
ضریب اصطکاک آزمایش بدون اثر شتاب گرمایشی		
ضریب اصطکاک آزمایش با اثر شتاب گرمایشی		
ضریب اصطکاک از روابط تجربی		
ضریب اصطکاک از اصل تشابه رینولدز		
عدد استنتون از اصل تشابه رینولدز		

۱- اعداد بدست‌آمده از آزمایش و روابط تجربی را مقایسه کنید. عوامل خطا را ذکر کنید.



شکل ۱_ شمای کلیه دستگاه



شکل ۲_ابعاد لوله آزمایش و مو قعیت ترموکوپلها

T K	C_p kJ/kgK	μ kg/ms	k J/msK	Pr
247	1.002	0.1603×10^{-4}	0.02231	0.719
274	1.002	0.1743×10^{-4}	0.02457	0.711
302	1.003	0.1875×10^{-4}	0.2664	0.705
330	1.006	0.2004×10^{-4}	0.02872	0.699

جدول ۱_مقادیر Cp و μ و K برای هوا

۴- آزمایش انتقال حرارت تشعشعی

از بین سه مکانیزم یا مودهای اصلی انتقال حرارت، تشعشع حرارتی تفاوت اساسی با دو مود دیگر یعنی هدایت و جابجایی دارد. از سطح هر جسم نوعی انرژی ساطع می‌شود که حاصل تغییر سطح انرژی مولکولها و اتمهای آن ماده است. این انرژی را انرژی تشعشعی می‌گویند که دارای خواص موج الکترومغناطیسی است. انرژی تشعشعی در باند طول موج حرارتی یعنی طول موجهای بین 0.1 تا 100 میکرومتر، تشعشع حرارتی را تشکیل می‌دهد. حاصل تشعشع حرارتی بین دو سطح مختلف‌الدما، انتقال حرارت تشعشعی از سطح گرمتر به سطح سردتر است. این حقیقت که انتقال گرما به صورت تشعشع در خلاء نیز امکان‌پذیر است، تنها به کمک تئوری امواج الکترومغناطیس قابل بیان است. اما آنچه در مهندسی بیشتر اهمیت دارد شناخت چگونگی تشعشع حرارتی نیست، بلکه آگاهی کافی از ویژگیها و رفتاری است که توسط قانونهای تشعشع حرارتی بیان می‌شوند.

در این آزمایش به کمک تشعشع حرارتی و با استفاده از موانع و دستگاههای اندازه‌گیری مختلف قوانین اساسی تشعشع حرارتی تحقیق می‌شود. با ترتیب دادن چند آزمایش ساده، مشاهده و برداشت نتایج و تجزیه و تحلیل آنها دانشجو صحت روابط و دقت محاسبات تشعشعی را ارزیابی می‌کند.

A قانون عکس مربع فاصله در تشعشع حرارتی

A-۱ هدف : بررسی صحت این قانون که شدت تشعشع بر یک سطح با عکس مربع فاصلهٔ آن از منبع تشعشع‌کننده متناسب است.

A-۲ تئوری: اگر نرخ انرژی ساطع‌شده از المان سطح dA را dq بنامیم، مطابق شکل A-۱ می‌توان dq را به صورت جریانی از انرژی در نیمکره به شعاع r در نظر گرفت. در آن صورت المان سطح dA_1 از نیمکره که روی خطی با زاویهٔ ϕ نسبت به جهت عمود بر dA قرار دارد، نرخ انرژی dq_ϕ را دریافت می‌کند که برابر است با :

$$dq_\phi = i_\phi d\omega_\phi dA$$

و $d\omega_\phi$ زاویهٔ فضایی سطح dA_1 از سطح dA برابر است با :

$$d\omega_\phi = \frac{dA_1}{r^2}$$

و i_ϕ شدت تشعشع در جهت ϕ است.

A-۳ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل ۴-۱ شامل اجزاء زیر است:

(۱) پایهٔ نگهدارنده که روی آن یک منبع تشعشع حرارتی در یک انتها و یک منبع نور در انتهای دیگر ثابت شده است،

(۲) ترانسفورمر کاهنده برای کاهش ولتاژ،

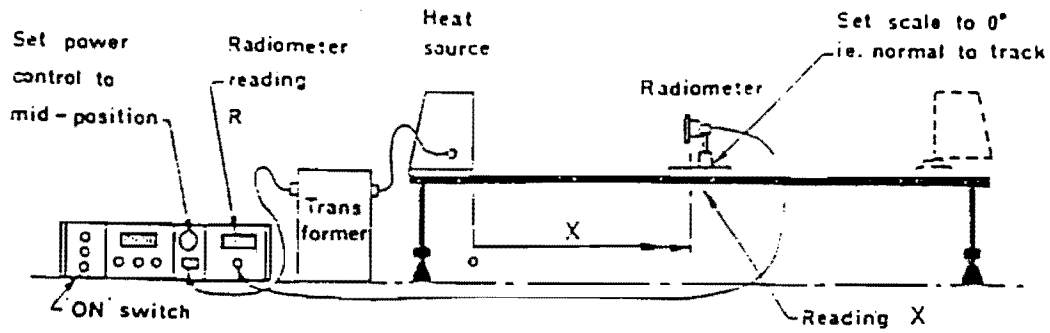
(۳) منبع تغذیه قابل کنترل برای تأمین قدرت مورد نیاز منبع تشعشعی و نوری،

(۱۳) رادیو متر به منظور اندازه‌گیری تشعشع حرارتی که محل آن روی پایه قابل تنظیم است،

(۱۷) خط‌کش به منظور اندازه‌گیری فاصله‌ها که روی پایه نصب شده‌است.

A-۴ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



۲- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و قدرت منبع تشعشی را در وضعیت میانی قرار دهید.

۳- رادیو متر را با زاویهٔ صفر در فاصلهٔ 100 mm از منبع حرارتی قرار دهید.

۴- اجازه دهید تا سیستم به حالت تعادل برسد و مقدار قرائت شده تشعشع رادیو متر ثابت شود. سپس فاصله و مقدار تشعشع قرائت‌شده را یادداشت کنید.

۵- این کار را برای فواصل 150 تا 700 میلیمتر (حداقل ده آزمون) تکرار کنید.

A-۵ خواسته آزمایش

۱- مطابق جدول نمونه نتایج را تنظیم و در نمودار لگاریتمی کامل (log-log) رسم کنید.

فاصله x (mm)	100										700
شار تشعشعی قرائت‌شده (w/m^2)											

۲- برای نمودار لگاریتمی شیب بهترین خط را بدست آورید.

۳- میزان خطای آزمایش را برآورد کنید. عوامل مؤثر و میزان تأثیر هر یک در خطای آزمایش را مشخص کنید.

۴- چه محدودیتی در حداقل فاصلهٔ بین رادیومتر و منبع تشعشع‌کننده وجود دارد؟

B قانون استفان بولتزمن

B-۱ هدف : بررسی صحت این قانون که شار تشعشعی از یک سطح متناسب با توان چهارم دما تغییر می‌کند.

B-۲ تئوری: براساس قانون استفان بولتزمن شار تشعشعی سطح سیاه dA به دمای T_S با محیط پیرامونش به دمای T_A از رابطهٔ زیر بدست می‌آید:

$$q_b'' = \sigma\left(T_S^4 - T_A^4\right)$$

که q_b'' شار تشعشعی گسیل‌شده از سطح سیاه (w/m^2)و σ ثابت استفان بولتزمن برابربا 5.67×10^{-8} w/m^2k^4 است.

B-۳ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل ۴-۱ شامل اجزاء زیر است:

۱ پایهٔ نگهدارنده که روی آن یک منبع تشعشع حرارتی در یک انتها و یک منبع نور در انتهای دیگر ثابت شده است،

۲ ترانسفورمر کاهنده برای کاهش ولتاژ،

۳ منبع تغذیه قابل کنترل برای تأمین قدرت مورد نیاز منبع تشعشعی و نوری،

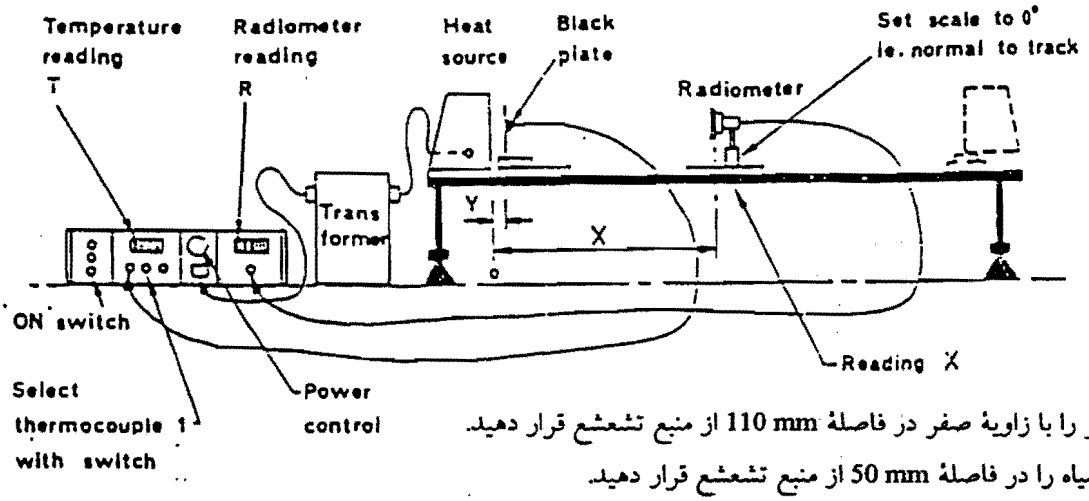
۵ صفحهٔ سیاه که محل آن روی پایه قابل تنظیم است،

۱۳ رادیو متر به منظور اندازه‌گیری تشعشع حرارتی که محل آن روی پایه قابل تنظیم است،

۱۷ خط‌کش به منظور اندازه‌گیری فاصله‌ها که روی پایه نصب شده‌است.

B-۴ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



۲- رادیو متر را با زاویهٔ صفر در فاصلهٔ 110 mm از منبع تشعشع قرار دهید.

۳- صفحهٔ سیاه را در فاصلهٔ 50 mm از منبع تشعشع قرار دهید.

۴- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و با تغییر قدرت منبع برای سه وضعیت بین قدرت بیشینه و کمینه دمای سطح سیاه، دمای محیط (سطح رادیومتر) و شار تشعشعی قرائت شده را پس از رسیدن به حالت دائم یادداشت کنید.

B-۵ خواسته آزمایش

۱- مقدار شار تشعشی گسیل‌شده را محاسبه و با مقدار حاصل از قانون استفان بولتزمن مطابق جدول نمونه مقایسه کنید.

نتایج آزمایش				محاسبات	
دمای سطح T_S (°C)	شار تشعشی قرائت‌شده R (w/m^2)	T_S (K)	T_A (K)	$q_b=5.59\times R$ (w/m^2)	$q_b=\sigma(T_S^4-T_A^4)$ (w/m^2)

۲- عوامل مؤثر در خطای آزمایش کدامند؟

۳- دقت نتایج را در دماهای زیاد و کم مقایسه کنید.

C ضریب گسیل سطح

C-۱ هدف : تعیین ضریب گسیل سطوح مختلف و نقش ترکیب سطوح مختلف در شدت انتقال حرارت

C-۲ تئوری: سطح اجسام واقعی را نمی‌توان سطح سیاه فرض کرد. طبق تعریف نسبت کل انرژی گسیل‌شده از سطح به انرژی گسیل‌شده از سطح سیاه با همان دما ضریب گسیل ε نامیده می‌شود. اگرچه در حالت واقعی ε تابعی از طول موج تابش، زاویهٔ تابش، دما و حتی پرداخت سطح مورد نظر است، در محاسبات عملی از یک مقدار متوسط فرضی استفاده می‌شود. مقادیر نمونه برای مواد مختلف در کتابها و منابع انتقال حرارت به صورت جدول ارائه شده است.

این مقدار متوسط توسط ضریب گسیل تشعشعی کلی نیمکره به صورت ثابت در قانون استفان- بولتزمن اعمال می‌شود.

$$q_b'' = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - T_\lambda^4\right)$$

C-۳ شرح دستگاه

دستگاه آزمایش مطابق شکل ۴-۱ شامل اجزاء زیر است:

① پایهٔ نگهدارنده که روی آن یک منبع تشعشع حرارتی در یک انتها و یک منبع نور در انتهای دیگر ثابت شده است،

② ترانسفورمر کاهنده برای کاهش ولتاژ،

③ منبع تغذیه قابل کنترل برای تأمین قدرت مورد نیاز منبع تشعشعی و نوری،

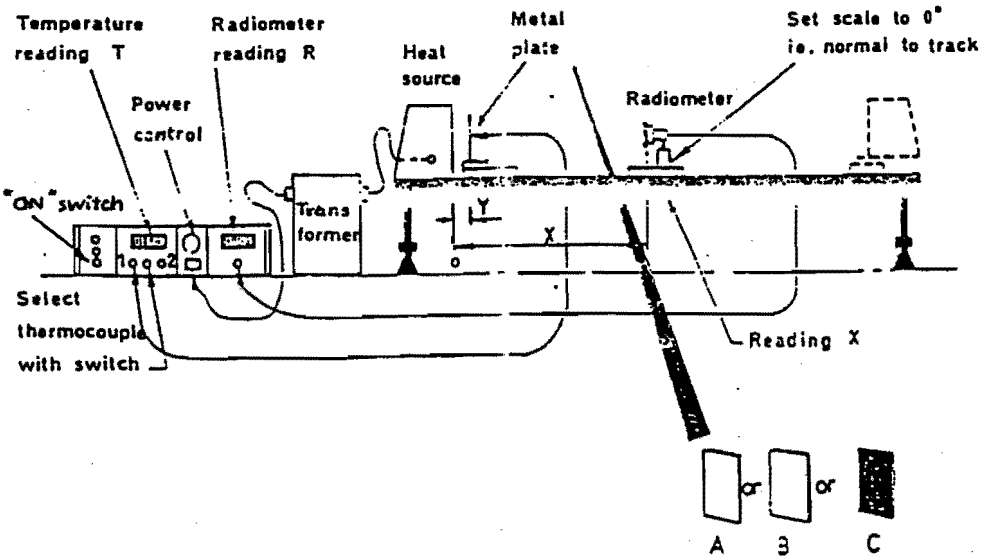
⑤ و ⑥ صفحهٔ سیاه و صفحات صیقلی و نقرهٔ آندی،

⑬ رادیو متر به منظور اندازه‌گیری تشعشع حرارتی که محل آن روی پایه قابل تنظیم است،

⑰ خط‌کش به منظور اندازه‌گیری فاصله‌ها که روی پایه نصب شده‌است.

C-۴ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید.



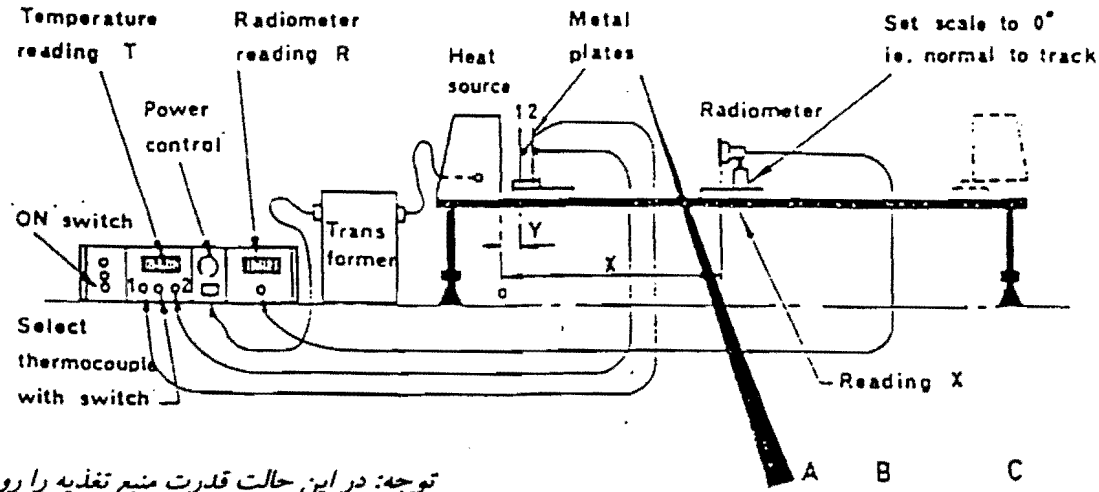
۲- رادیو متر را با زاویهٔ صفر در فاصلهٔ 110 mm از منبع تشعشعی قرار دهید.

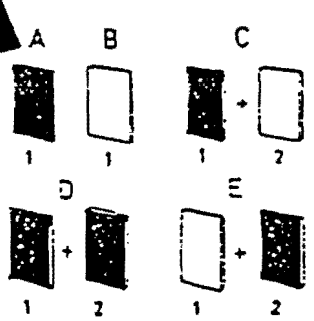
۳- صفحهٔ فلزی صیقلی را در فاصلهٔ 50 mm از منبع تشعشعی قرار دهید.

۴- سویچ منبع تغذیه را روشن کنید و با تغییر قدرت منبع تشعشی برای دو وضعیت بین قدرت بیشینه و کمینه دمای سطح سیاه، دمای محیط (سطح رادیومتر) و شار تشعشعی فرائت شده را پس از رسیدن به حالت دائم یادداشت کنید.

۵- این کار را برای صفحات نقرهٔ آندی تکرار کنید و نتایج مربوط به سه صفحه را در جدول مشابه جدول زیر بنویسید.

۶- آزمایش را مطابق شکل زیر برای ترکیب دو سطح سیاه و صیقلی و در پنج وضعیت A ، B ، C، D و E انجام دهید.





توجه: در این حالت قدرت منبع تغذیه را روی مقدار بیشینه قرار دهید، فاصلهٔ رادیومتر را 130 mm و فاصلهٔ نزدیکترین صفحهٔ فلزی با منبع تشعشعی را 50 mm قرار دهید. (فاصلهٔ دو صفحهٔ فلزی از هم 20mm است)

۵-C خواسته آزمایش

۱- مقدار ضریب گسیل برای سطوح مختلف را محاسبه و با مقدار متوسط ارائه شده در مراجع مقایسه کنید.

محاسبات		نتایج آزمایش				
$\varepsilon = \frac{q_b''}{\sigma\left(T_S^4 - T_A^4\right)}$	$q_b''=5.59\times R$	T_A	T_S	شار تشعشعی فرائت‌شده R	دمای سطح T_S	
	(w/m^2)	(K)	(K)	(w/m^2)	(°C)	
						A
						B
						C

۲- عوامل مؤثر در خطای آزمایش کدامند؟

۳- آیا صفحهٔ نقره‌ای بیشتر شبیه سطح سیاه است یا سطح صیقلی؟ چرا؟

۴- برای ترکیب دو سطح فلزی مقدار شار تشعشعی اندازه گیری‌شده را در جدولی مشابه جدول زیر تکمیل و با مقدار تئوریک (استفاده از مدار معادل) مقایسه کنید.

شماره آزمون	دمای صفحهٔ ۱ (°C)	دمای صفحهٔ ۲ (°C)	شار تشعشعی قرائت‌شده R (w/m^2)	ترکیب صفحات فلزی
A				تنها صفحهٔ سیاه
B				تنها صفحهٔ صیقلی
C				صفحهٔ سیاه به صیقلی
D				صفحهٔ سیاه به سیاه
E				صفحهٔ صیقلی به سیاه

۵- آیا دو حالت C و E با هم یکسان هستند؟ توضیح دهید.

ضمیمه: مشخصات رادیومتر

حساسیت	5.0 μV/w cm^{-2} - 50 μV/w cm^{-2}	زاویه دید کامل	±40°
دمای منبع کالیبراسیون	1000 °C	محدوده دمای محیط	0 - 70 °C
دقت کالیبراسیون	±3%	محدوده اندازه‌گیری	0 - 1 w/cm^2 °C
زاویه دید کامل	±25°		

۱- اندازه‌گیر دیجیتالی که همراه با رادیومتر بکار گرفته شده است، مستقیماً شدت تشعشع مادون قرمز را بر حسب w/cm^2 نشان می‌دهد. یعنی سیگنال ایجاد شده توسط رادیومتر ۲۰ برابر توسط میلی‌ولتمتر نشان داده شده می‌شود.

۲- اندازه‌گیر دیجیتالی تشعشع دریافت شده توسط رادیومتر را نشان می‌دهد. درحالیکه در برخی آزمایشها نیاز به اندازه‌گیری تشعشع گسیل شده است. به لحاظ تئوریک اثبات می‌شود که رابطهٔ زیر بین شدت تشعشع قرائت شده و شدت تشعشع گسیل شده برقرار است:

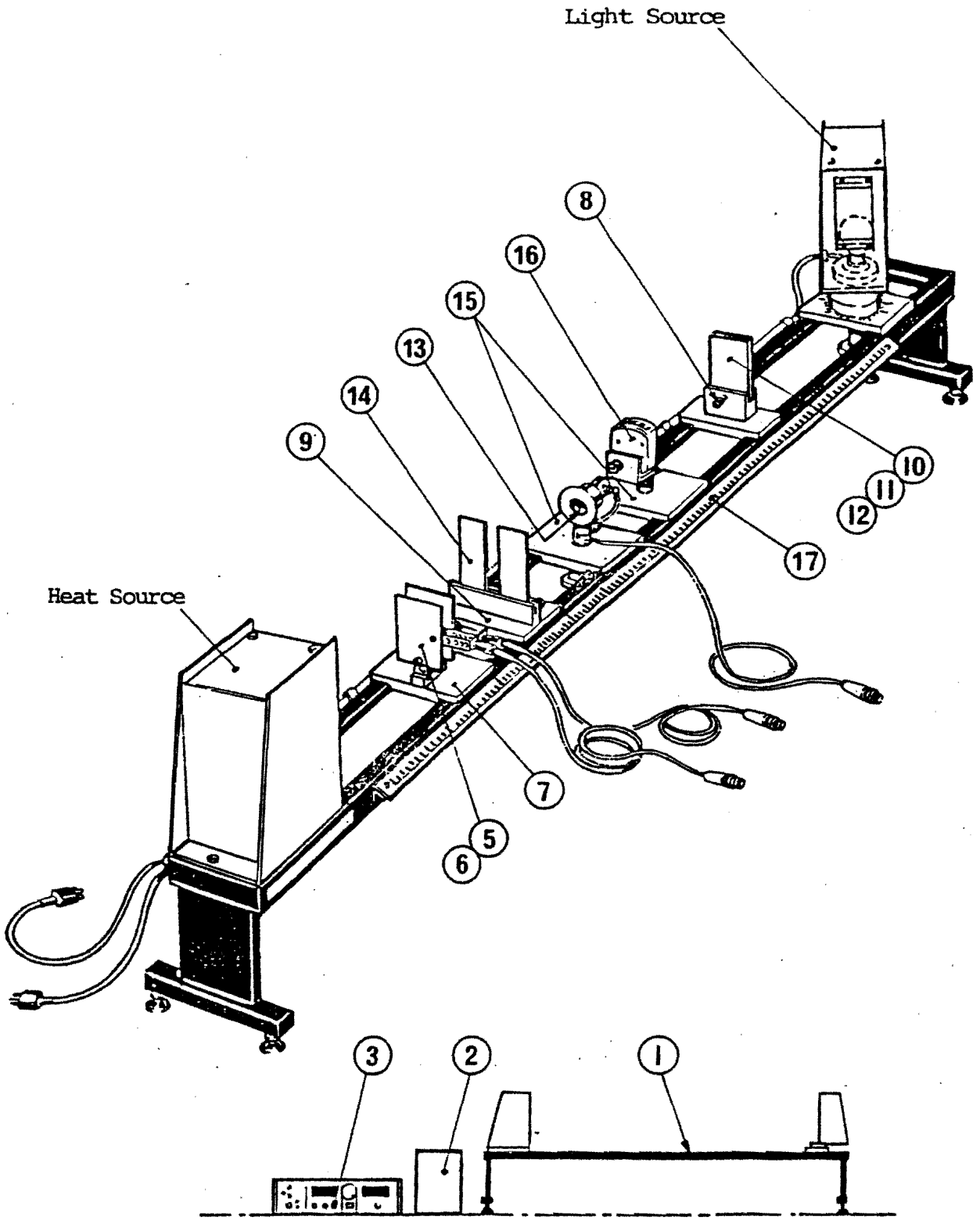
$$R = q'' \sin^2\theta$$

که :

شدت تشعشع قرائت شده	R : (w/m^2)
شدت تشعشع گسیل شده از سطح منبع حرارتی	q'' : (w/m^2)
نصف زاویهٔ پنجره رادیومتر (زاویه دید کامل)	θ : $(^o)$

در این دستگاه چون نصف زاویه دید کامل 25° است،

$$q'' = \frac{R}{\sin^2\theta} = \frac{R}{0.17861} = 5.599 \times R$$

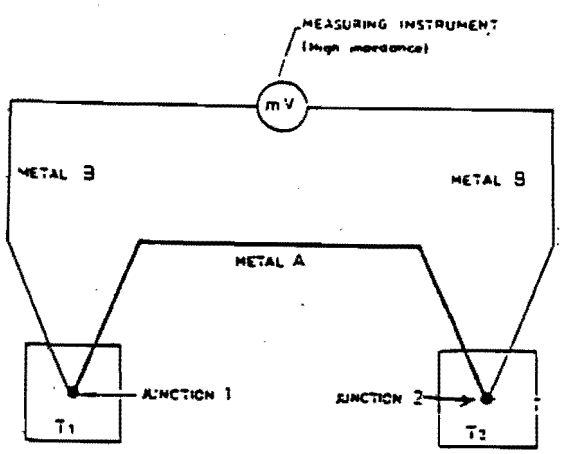


شکل ٤-١ مشخصات کلی دستگاه آزمایش انتقال حرارت تشعشعی

۵- آزمایش اندازه‌گیری دما با ترموکوپل

دما با مفهومی پیچیده درجهٔ گرمی و سردی یک جسم را بیان می‌کند. اما این بیان برای اندازه‌گیری دما کافی نیست. در بیان تخصص دما نشانگر شدت فعالیت مولکولی است. یعنی افزایش دمای یک ماده منجر به افزایش حرکات ارتعاشی مولکولها می‌شود. با اعمال انرژی به یک جسم سرد حرکات ارتعاشی مولکولهای ماده شدت می‌یابد و جسم گرمتر می‌شود. به عبارتی ساده‌تر دمای یک جسم معیاری از میزان پتانسیل گرمایی آن جسم است و تعیین می‌کند که در تماس با جسمی در دمای متفاوت انرژی گرمایی جذب یا دفع می‌شود. اجسام همدما در تعادل گرمایی هستند و مبادلهٔ خالص گرما بین آنها رخ نمی‌دهد.

۵-۱ تئوری: یکی از مهمترین وسایل اندازه‌گیری دمای اجسام جامد، مایع یا گاز *ترموکوپل* است. ترموکوپل از دو سیم با جنس متفاوت تشکیل شده است که در یک انتها به هم متصل شده‌اند. وقتی محل اتصال *(junction)* حرارت می‌بینند، یک نیروی محرکهٔ الکتریکی(*e.m.f.*[1]) بنام *نیروی محرکهٔ الکتریکی پلتیه*[2] ایجاد می‌شود. مطابق شکل با ارتباط دادن محلهای اتصال و ابزار اندازه‌گیری مناسب، مداری برای تعیین اختلاف دمای دو جسم ایجاد می‌شود. در چنین مداری چهار منبع نیروی محرکهٔ الکتریکی وجود دارد:



۱- نیروی محرکهٔ پلتیه در اتصال (۱) دو فلز A و B بواسطهٔ دمای T_1

۲- نیروی محرکهٔ پلتیه در اتصال (۲) دو فلز A و B بواسطهٔ دمای T_1

۳- *اثر تامسون*[3] در طول فلز A بواسطهٔ اختلاف دمای $T_1 - T_2$

۴- اثر تامسون در طول فلز B بواسطهٔ اختلاف دمای $T_1 - T_2$

برآیند این چهار نیروی محرکه، *نیروی محرکهٔ سی‌یک*[4] نامیده می‌شود که مقدار آن تابع جنس دو فلز اتصال و اختلاف دمای دو اتصال است. بنابراین برای یک ترکیب فلزی و دمای خاص امکان کالیبره کردن نیروی محرکه براساس اختلاف دما وجود دارد. این کار تکرار پذیر است و روش مطمئنی برای اندازه‌گیری دما است. از آنجا که اندازه‌گیری اختلاف دما در صنعت محدود است، برای تعیین دمای یک نقطهٔ مشخص لازم است که یک اتصال در دمای ثابت معلوم باشد. این اتصال مرجع(اتصال سرد) عموماً در دمای ذوب یخ $0^{\circ}C$ قرار می‌گیرد. اتصال دیگر، یعنی اتصال اندازه‌گیر، اتصال گرم هم نامیده می‌شود و با کالیبره کردن نسبت به نقطهٔ ذوب یخ مستقیماً بر حسب درجهٔ سانتیگراد مشخص می‌شود. در ارتباط با اندازه‌گیری دما دو قانون ترموالکتریک مطرح است.

الف- قانون فلزهای واسط[5]

اضافه کردن یک فلز واسط در مدار ترموکوپل اثری بر نیروی محرکهٔ خالص تولید شده ندارد، به شرطی که در محل اتصال با فلز واسط همدما باشد. اهمیت قانون فلزهای واسط در این است که می‌توان در مدار ترموکوپل تجهیزات اندازه‌گیری، سیمهای رابط و ... اضافه کرد و این کار تأثیری بر دمای قرائت‌شده ندارد. از طرف دیگر اگر اتصالهای واسط در دمای متفاوتی باشند، نیروی محرکهٔ الکتریکی خالص مدار تغییر می‌کند و این مسئله بر دقت اندازه‌گیری مؤثر است.

---

[1] *electric motive force*

[2] *Poltier e.m.f*

[3] *Thompson effect*

[4] *Seebeck e.m.f.*

[5] *the law of Intermediate Metals*

ب- قانون دماهای واسط[1]

اگر یک مدار ساده ترموکوپل در حالتیکه اتصالها به ترتیب در دمای T_1 و T_2 قرار دارد، نیروی محرکهٔ e_1 و در حالتیکه اتصالها در دمای T_2 و T_3 قرار دارد، نیروی محرکهٔ e_2 ایجاد کند، نیروی محرکهٔ ایجاد شده وقتی اتصالها در دمای T_1 و T_3 قرار گیرند، نیروی محرکهٔ $e_1 + e_2$ خواهد بود. به این ترتیب در حالیکه دمای مرجع استاندارد قابل دسترسی نیست. می‌توان اندازه‌گیری را تصحیح کرد و از جدول ترموکوپلها که براساس دمای مرجع استاندارد تهیه شده‌است استعاده کرد.

۵-۲ شرح دستگاه:

مطابق شکل ۵-۱ و ۵-۲ دستگاه آزمایش از مجموعهٔ تجهیزات اندازه‌گیری دما شامل اجزاء زیر تشکیل شده است:

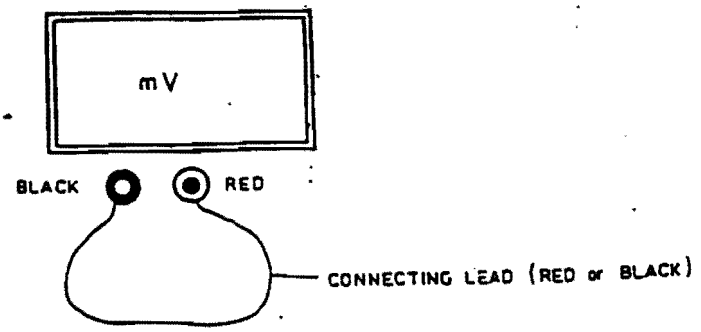
- گرمکن (هیتر) آب
- پانل اندازه‌گیری شامل نشانگرها، سوکتها و...
- رزیستور پلاتینی با انتهای چهار میله‌ای
- ترمومتر جیوه‌ای ، فشار سنج ، سایکومتر و ...
- فلاسک نگهداری آب خنک
- تعدادی ترموکوپل کرومل/ آلومل (با انتهای قرمز و سیاه)
- تعدادی ترموکوپل مس/ کنستانتن (با انتهای قرمز و سبز)
- سیمهای رابط

A اثر ترموالکتریک پلتیر *(the Poltier thermo-electric effect)*

A-۱ هدف: مشاهده پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در تماس دو فلز همجنس و وابستگی آن به دما

A-۲ روش انجام آزمایش

۱- گرمکن را پر آب کنید و درپوش آنرا جای خود قرار دهید. ترمومتر جیوه‌ای را در محل خود روی درپوش نصب کنید به طوری که انتهای ترمومتر در آب قرار گیرد.



۲- یک ترمومتر کرومل/ آلومل [مس/ کنستانتن] و یک سیم رابط از جعبه ابزار بردارید.

۳- رابط را مطابق شکل در سوکتهای زیر میلی‌ولتمتر قرار دهید. باید مقدار قرائت شده برابر $0\ mV$ باشد.

۴- یک ترموکوپل را جایگزین رابط نمایید. غلاف ترموکوپل را در سوراخ درپوش گرمکن قرار دهید و محل آنرا با اُ-رینگ تنظیم کنید.

۵- کلید تغذیه اصلی گرمکن را روشن کنید و سویچ چرخان را کاملاً در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید.

۶- ولتاژ و دمای آب را مطابق جدول زیر پر کنید. این کار را تا افزایش دمای آب به $80\ ^oC$ ادامه دهید.

۷- گرمکن را خاموش و آب را بتدرج خنک کنید.ولتاژ را مجدداً در جدول یادداشت کنید. رسیدن به دمای 45^oC کافی است.

دمای آب(°C)	۳۰										۸۰
ولتاژ در گرم شدن *(mV)*											
ولتاژ در سرد شدن *(mV)*											

A-۳ خواسته آزمایش

۱- منحنی تغییر ولتاژ - دما را در یک دیاگرام رسم و نحوهٔ تغییرات را توضیح دهید.

---

[1] *the law of intermediate temperature*

B اثر ترموالکتریک سی‌بک *(the Seebeck thermo-electric effect)*

B-۱ هدف: مشاهده پتانسیل الکتریکی حاصل از مدار ترموکوپل و کاربرد آن در اندازه‌گیری دما و استفاده از اتصال مرجع

B-۲ روش انجام آزمایش

۱- گرمکن را پر آب کنید و درپوش آنرا جای خود قرار دهید. ترمومتر جیوه‌ای را در محل خود روی درپوش نصب کنید به طوری که انتهای ترمومتر در آب قرار گیرد.

۲- دو ترموکوپل کرومل/ آلومل [مس/ کنستانتن] از جعبه ابزار بردارید.

۳- یک ترموکوپل را در غلاف درپوش قرار دهید.

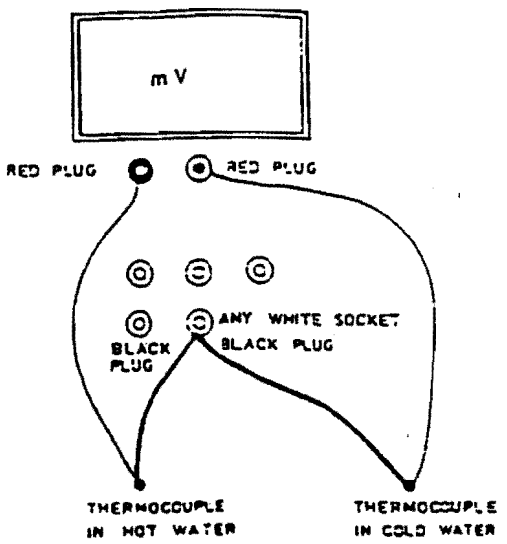
۴- فلاسک را از آب و یخ پر کنید و یک ترموکوپل در آن جاسازی کنید.

مطمئن شوید که اتصال ترموکوپل در آب قرار گیرد.

۵- مطابق شکل ترموکوپلها را به هم و به میلی‌ولتمتر متصل کنید(دو فلز همجنس به هم متصل شود).

۶- کلید تغذیه اصلی گرمکن را روشن کنید و سویچ چرخان را کاملاً در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید.

۷- ولتاژ و دمای آب گرمکن و فلاسک را مطابق جدول زیر پر کنید. این کار را تا افزایش دمای آب به $80\,^{\circ}C$ ادامه دهید. وقتی دمای آب $63^{\circ}C$ است، مقدار ولتاژ را جداگانه یادداشت کنید. در فواصل فوق گاهی جای ترموکوپلها را عوض کنید و یا هر دو را در یک جا قرار دهید و نتیجه را یادداشت کنید.



۸- گرمکن را خاموش و آب را بتدریج خنک کنید.ولتاژ را مجدداً در جدول یادداشت کنید. رسیدن به دمای $45^{\circ}C$ کافی است.

دمای آب فلاسک(°C)											
دمای آب گرمکن(°C)	۳۰										۸۰
ولتاژ در گرم شدن (mV)											
ولتاژ در سرد شدن (mV)											

B-۳ خواسته آزمایش

۱- منحنی تغییر ولتاژ - اختلاف دما را رسم و نحوهٔ تغییرات را توضیح دهید.

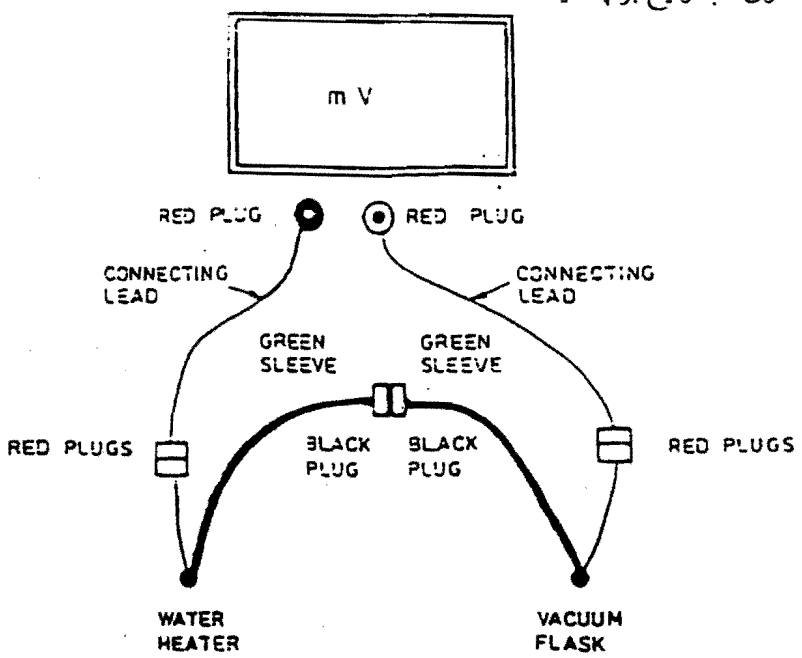
۲- مقدار ولتاژ را برای دمای آب $63^{\circ}C$ از منحنی بخوانید و آن را با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کنید.

C قانون فلز واسط

C-۱ هدف: مشاهده اثر وجود یک فلز متفاوت در مدار ترموکوپل

C-۲ روش انجام آزمایش

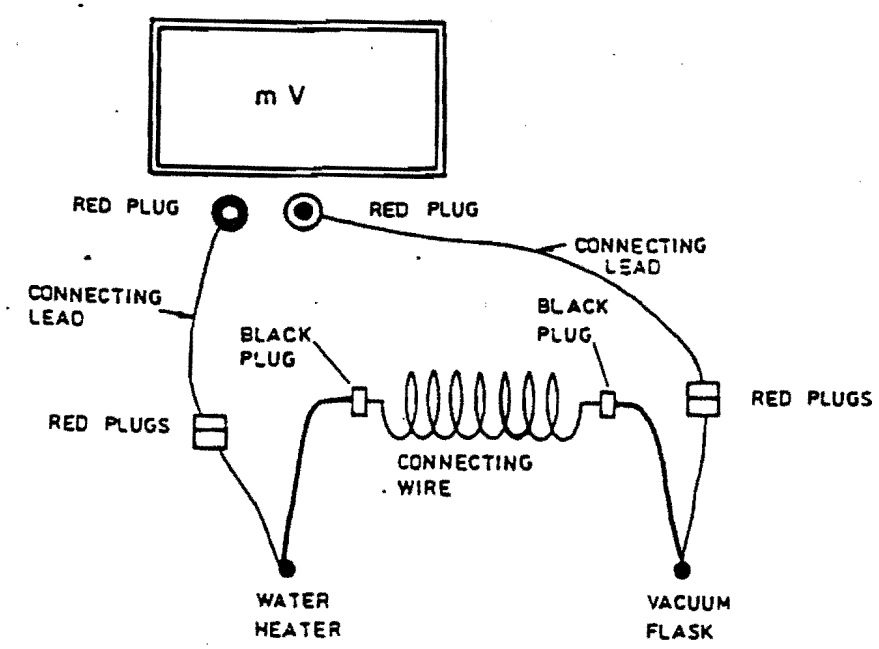
۱- مانند آزمایش قبل دستگاه را با گرمکن آب و فلاسک حاوی آب و یخ بر پا کنید.



۲- مطابق شکل مدار ترموکوپل را با استفاده از دو ترموکوپل مس/کنستانتن و سیمهای رابط بر پا کنید. یکی از ترموکوپلها را در فلاسک و دیگری را در گرمکن قرار دهید.

۳- کلید تغذیه اصلی گرمکن را روشن کنید و سویچ چرخان را کاملاً در جهت عقربه‌های ساعت بچرخانید تا آب به جوش آید. سپس قدرت را کم کنید تا جوشش به آرامی صورت گیرد و دمای آب به حالت پایدار برسد. در این حالت(*I*) مقدار ولتاژ را یادداشت کنید

۴- مطابق شکل یک سیم مسی بین دو ترموکوپل قرار دهید. در اینحالت(*II*) نیز مقدار ولتاژ را یادداشت کنید.



۵- دو اتصال جدید را در گرمکن قرار دهید و ولتاژ را یادداشت کنید(*IV*).

۶- یکی از دو اتصال جدید(اتصال طرف سرد) را در فلاسک آب یخ و دیگری را در گرمکن قرار دهید و ولتاژ را یادداشت کنید(*V*).

۷- آزمایش را با سیم واسط کنستانتن تکرار کنید.

C-۳ خواسته آزمایش

۱- قانون فلز واسط را آنطور که در آزمایش مشاهده شد بیان کنید.

۲- اگر در بند ۶ این آزمایش با سیم واسط مسی (کنستانتن) جای اتصال های جدید را عوض کنید، میلی ولتمتر چه مقدار را نشان خواهد داد؟

D قانون دمای واسط

D-۱ هدف: بررسی صحت قانون دماهای واسط

D-۲ روش انجام آزمایش

۱- مانند آزمایش قبل با استفاده از ترموکوپل کرومل/ آلومل[مس/ کنستانتن] شرایط پایدار گرمکن در حال جوش و فلاسک محتوی آب یخ را ایجاد کنید.

۲- اتصال ترموکوپل ۱ را بین دو انگشت نگهدارید و ترموکوپل ۲ را در فلاسک آب یخ بگذارید.ولتاژ را بنویسید (E_1).

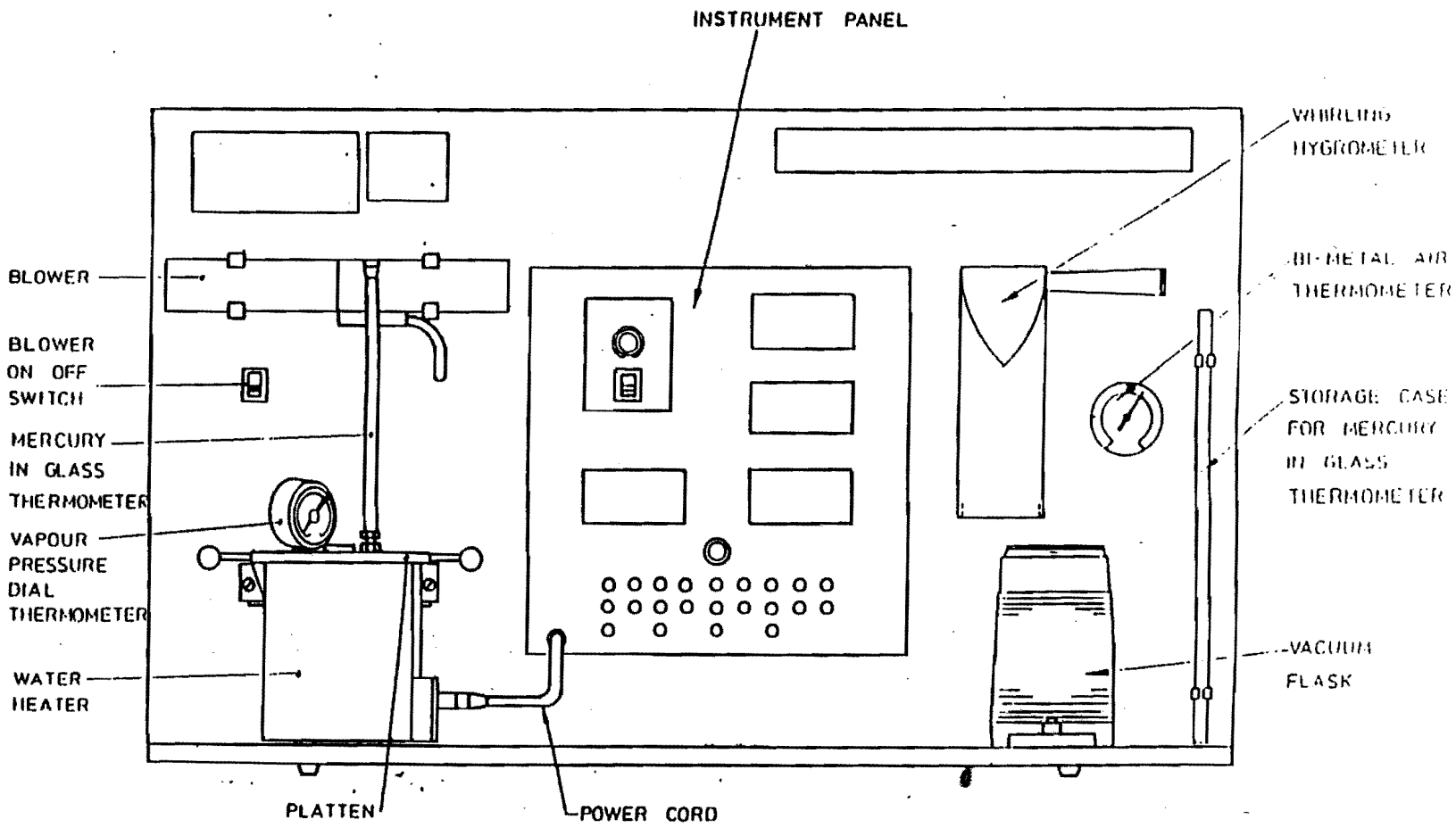
۳- ترموکوپل ۱ را در گرمکن قرار دهید و اتصال ترموکوپل ۲ را بین دو انگشت نگهدارید. ولتاژ را بنویسید (E_2).

۴- ترموکوپل ۱ را در گرمکن قرار دهید و ترموکوپل ۲ را در فلاسک آب یخ بگذارید. ولتاژ را بنویسید (E_3).

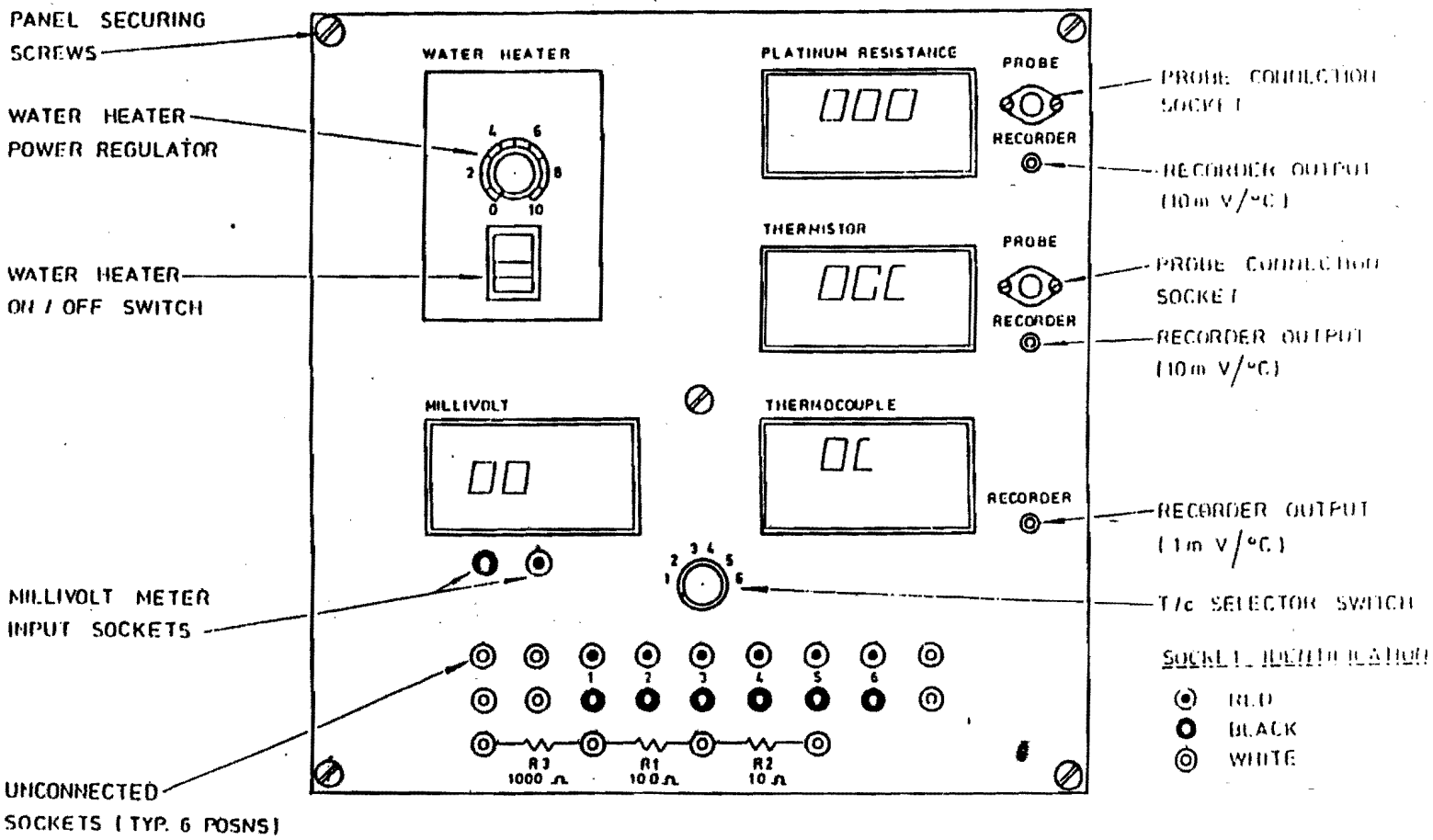
D-۳ خواسته آزمایش

۱- آیا جمع دو ولتاژ E_1 و E_2 برابر E_3 است؟ در اینصورت قانون دمای واسط را آنطور که در آزمایش مشاهده شد بیان کنید.

۲- با توجه به آزمایشهای قبل اگر دمای بدن در سه حالت به ترتیب ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد باشد، مقادیر E_1 و E_2 را در هر حالت پیش‌بینی کنید.



شکل ۵-۱ مشخصات کلی دستگاه آزمایش اندازه گیری دما



شکل ۵-۲ شمای پانل اندازه گیری

۶- آزمایش مبدل دولوله‌ای

مبدلهای حرارتی از مهمترین اجزاء تأسیسات مکانیکی هستند که به منظور مبادلهٔ گرما بین دو سیال به کار می‌روند. آشنایی با نحوهٔ کار، بررسی عملکرد و روش طراحی مبدلهای حرارتی مبحث گسترده‌ای است که بررسی آزمایشگاهی کامل آن نیاز به تجهیزات، وقت و تخصص ویژه دارد.

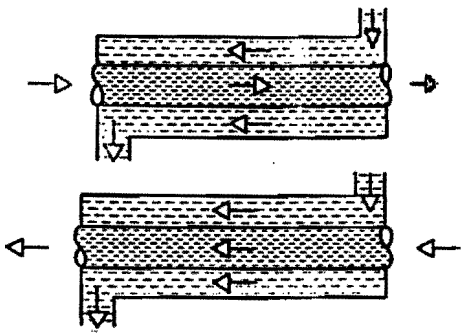
درک اصول کار مبدلهای حرارتی صنعتی در محدودهٔ درس آزمایشگاه انتقال حرارت با استفاده از تجهیزات ساده برای دانشجویانی تدارک دیده شده است که اصول مقدماتی طراحی و عملکرد مبدلهای حرارتی را می‌دانند. اهمیت کاربردی موضوعاتی مانند:

- پروفیل دما در طول مبدل
- جریان موازی و مخالف
- موازنه انرژی
- اختلاف دمای متوسط لگاریتمی
- ضرایب انتقال حرارت

در این آزمایشها مورد تأکید است.

۶-۱ هدف : بررسی اصول کارکرد یک مبدل دو لوله‌ای و مقایسه مبدل جریان موازی و مخالف

۶-۲ تئوری: برای یک مبدل حرارتی تماس سطحی مانند شکل زیر دو جریان تک فاز سیال گرم و سرد توسط دیوارهٔ فلزی از هم جدا شده‌اند. سیال گرم حرارت q_h از دست می‌دهد و سیال سرد حرارت q_c جذب می‌کند و داریم:



$$q_h = (\rho Q C_p)_h \left(T_{h,in} - T_{h,out}\right)$$

$$q_c = (\rho Q C_p)_c \left(T_{c,out} - T_{c,in}\right)$$

که ρ ، Q و C_p به ترتیب چگالی، دبی حجمی و گرمای ویژهٔ سیال هستند.

در وضعیت ایده‌ال $q_h = q_c$ و برابر حرارت مبادله شده است. اما در کارکرد واقعی بخشی از گرما از دیواره‌ها به محیط منتقل شده و اصطلاحاً تلف می‌شود.

طبق تعریف راندمان یک مبدل حرارتی را می‌توان چنین بیان کرد:

$$\eta = \frac{\text{heat absorbed}}{\text{heat emited}} \times 100 = \frac{q_c}{q_H} \times 100$$

می‌توان نشان داد که رابطهٔ میزان حرارت منتقل شده و ضریب انتقال حرارت در یک مبدل دو لوله‌ای جریان موازی یا مخالف برابر است با:

$$q = UA\Delta T_m$$

که U ضریب انتقال حرارت کلی، A سطح تبادل حرارت و ΔT_m اختلاف دمای متوسط لگاریتمی برابر:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

است و ΔT_1 و ΔT_2 اختلاف دمای دو جریان سیال گرم و سرد در مقطع ابتدا و انتهای مبدل است. به طوریکه:

برای مبدل جریان موازی :

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in}$$
$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out}$$

و برای مبدل جریان مخالف :

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$
$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

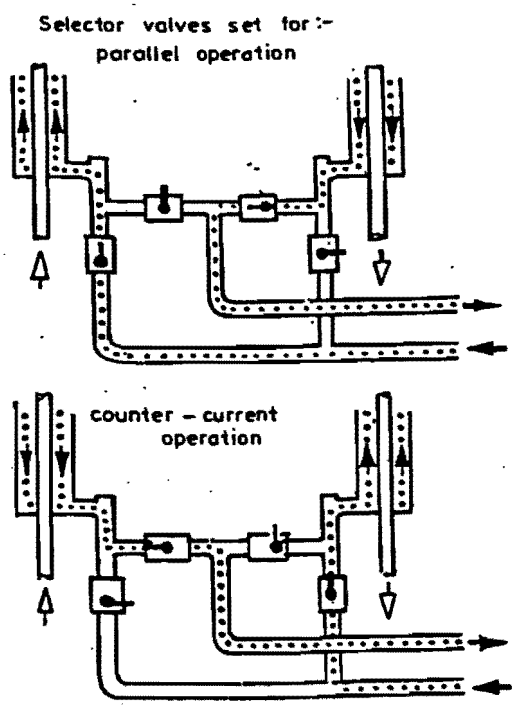
۶-۳ شرح دستگاه:

مطابق شکل ۶-۱ و۶-۲ آب داغ تا دمای بیشینهٔ $80\,^{o}C$ توسط المان حرارتی [۲] گرم شده و در تانک ذخیره [۱] جمع‌آوری می‌شود. دمای آب توسط یک سنسور [۴] تقریباً در ناحیهٔ خروجی تانک [۵] اندازه‌گیری می‌شود. یک کنترل‌کننده همراه با سنسوردما [۹] قدرت المان الکتریکی را برای ایجاد یک دمای ثابت تنظیم می‌کند. تانک ذخیره دارای یک درب [۷] برای جلوگیری از نفوذ گرد و غبار و خروج بخار آب است. آب داخل تانک به طور پیوسته توسط یک پمپ [۶] سیرکوله می‌شود و از یک بافل [۳] برای اختلاط بهتر و تأمین دمای ثابت در خروجی تانک استفاده شده است. یک شیر تخلیه [۲۴] برای تانک پیش‌بینی شده است.

برای کاهش تلفات حرارتی در مبدل دو لوله‌ای [۱۳] جریان آب داغ در داخل لوله حرکت می‌کند و دبی آن توسط یک شیر کنترل [۱۸] تنظیم و در دبی سنج [۱۹] نشان داده می‌شود. دماسنجهای [۱۵]، [۱۰] و [۱۷] دمای آب داغ را به ترتیب در ورود، وسط و انتهای مبدل نشان می‌دهد.

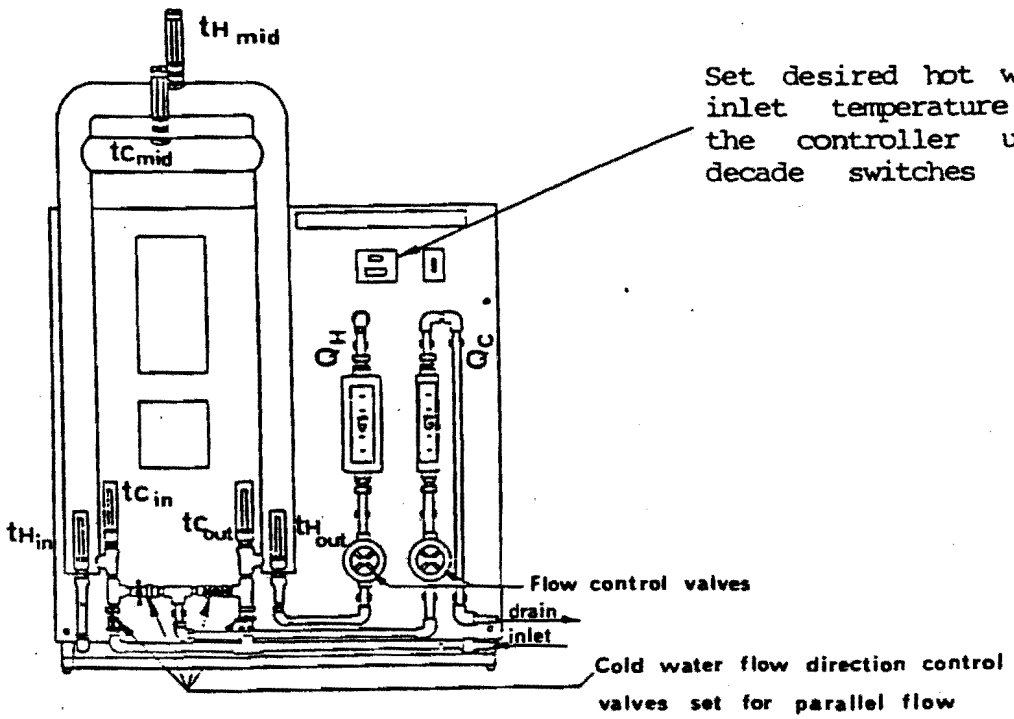
آب سرد از طریق یک سرشلنگی [۲۱] و مجموعهٔ شیر [۱۶] در جدارهٔ خارجی جریان دارد. یک شیر کنترل [۲۰] و دبی سنج [۲۳] جریان آب را تنظیم و مقدار آن را نشان می‌دهد. آب سرد پس از مبادلهٔ حرارت در مبدل از طریق خروجی [۲۲] از دستگاه خارج می‌شود. دماسنجهای [۱۲] و [۱۴] دمای آب سرد را در ابتدا، وسط و انتهای مبدل مشخص می‌کند.

جریان موازی یا مخالف در مبدل با قراردادن وضعیت مناسب شیرهای انتخاب [۱۶] مطابق شکل زیر ایجاد می‌شود. شیرهای [۱۱] در بالای مبدل برای هواگیری و تخلیهٔ آسان سیستم قرار گرفته است.



۶-۴ روش انجام آزمایش

۱- مطابق شکل زیر دستگاه را برپا کنید. مطمئن شوید که تانک ذخیره تا *75 mm* زیر لبهٔ بالایی پر است. وضعیت شیرهای انتخاب (۱۶) را برای مبدل جریان موازی تنظیم کنید.



۲- شیرهای هواگیری (۱۱) را ببندید.

۳- شیر کنترل آب داغ (۱۸) را ببندید و سویچ انتخاب موتور پمپ (۶) را روی مقدار بیشینه بگذارید. کنترل کنندهٔ دما (۹) را با استفاده از سویچ مربوطه روی صفر قرار دهید. سویچ قدرت ورودی (۸) را روشن کنید. مشاهده می‌شود که پمپ شروع به کار می‌کند. چراغ قرمز روی کنترل‌کنندهٔ دما روشن و خاموش می‌شود. درب روی تانک ذخیره را بردارید. سیرکولاسیون آب در تانک مشخص است. شیر کنترل آب داغ را باز کنید تا جریان دائم در دبی سنج (۱۹) مشاهده شود.

۴- شیر کنترل آب سرد (۲۰) را باز کنید تا جریان دائم در دبی سنج (۲۳) مشاهده شود.

۵- شیرهای کنترل آب سرد و داغ را ببندید. با اتصال شلنگ به شیرهای هواگیری سیستم را هواگیری کنید. سپس شیرهای هواگیری را کاملاً ببندید و شلنگ را جدا کنید.

۶- به کمک کنترل‌کننده (۹) دمای آب داغ را روی *60 °C* تنظیم کنید.

۷- به کمک شیرهای کنترل دبی آب سرد را *1000 cc/min* و دبی آب داغ را *2000 cc/min* تنظیم کنید.

۸- پس از رسیدن به حالت دائم کارکرد، جدول ۳-۱ را پر کنید.

جدول ۶-۱ نتایج آزمایش مبدل جریان موازی و مخالف

آزمایش	$T_{c,out}(^oC)$	$T_{c,mid}(^oC)$	$T_{c,in}(^oC)$	$T_{h,out}(^oC)$	$T_{h,mid}(^oC)$	$T_{h,in}(^oC)$
جریان موازی						
جریان مخالف						

۹- وضعیت شیرهای انتخاب را برای مبدل جریان مخالف تنظیم کنید و نتایج را در جدول ۳-۱ یادداشت کنید.

۱۰- به کمک شیرهای کنترل دبی آب سرد و داغ را *2000 cc/min* تنظیم کنید.

۱۱- پس از رسیدن به حالت دائم کارکرد، جدول ۶-۲ را پر کنید.

جدول ۶-۲ نتایج آزمایش مبدل جریان مخالف و دبی یکسان

$T_{h,in}(^oC)$	$T_{h,mid}(^oC)$	$T_{h,out}(^oC)$	$T_{c,in}(^oC)$	$T_{c,mid}(^oC)$	$T_{c,out}(^oC)$

۱۲- به کمک کنترل‌کننده دمای آب داغ را روی $50\,^oC$ تنظیم کنید.

۱۳- پس از رسیدن به حالت دائم کارکرد، جدول ۶-۳ را پر کنید.

جدول ۶-۳ نتایج آزمایش مبدل جریان مخالف برای دماهای مختلف آب داغ

$T_{h,in}(^oC)$	$T_{h,mid}(^oC)$	$T_{h,out}(^oC)$	$T_{c,in}(^oC)$	$T_{c,mid}(^oC)$	$T_{c,out}(^oC)$	دمای کنترل کننده(^oC)	آزمایش
						50	*1*
						55	*2*
						60	*3*
						65	*4*

۱۴- آزمایش را برای دمای آب داغ 55^oC، 60^oC و 65^oC تکرار کنید و نتایج را در جدول یادداشت کنید.

۱۵- به کمک کنترل‌کننده دمای آب داغ را روی $60\,^oC$ تنظیم کنید.

۱۶- به کمک شیرهای کنترل دبی آب سرد را *2000 cc/min* و دبی آب داغ را *1000 cc/min* تنظیم کنید.

۱۷- پس از رسیدن به حالت دائم کارکرد، جدول ۶-۴ را پر کنید.

جدول ۶-۴ نتایج آزمایش مبدل جریان مخالف برای دبی مختلف آب داغ

$T_{h,in}(^oC)$	$T_{h,mid}(^oC)$	$T_{h,out}(^oC)$	$T_{c,in}(^oC)$	$T_{c,mid}(^oC)$	$T_{c,out}(^oC)$	دبی سیال گرم Q_h *(cc/min)*	آزمایش
						1000	*1*
						2000	*2*
						3000	*3*
						4000	*4*

۱۸- آزمایش را برای دبی آب داغ *2000*، *3000* و *4000 cc/min* تکرار کنید.

توجه: پس از انجام آزمایشها کلید منبع تغذیه را خاموش و دستگاه را به حالت اولیه برگردانید.

۶-۵ خواسته آزمایش

۱- بر اساس نتایج جدول ۶-۱ حرارت از دست داده شده q_h، حرارت جذب شده q_c، تلفات حرارتی، راندمان مبدل، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ΔT_m و ضریب انتقال حرارت کلی U را برای دو مبدل جریان موازی و جریان مخالف محاسبه و در جدول مناسب ارائه دهید. براساس نتایج حاصل دو مبدل را با هم مقایسه کنید. (خواص متوسط سیال ρ و C_p را برای آب از جداول انتقال حرارت قرائت کنید)

۲- براساس نتایج جدول ۶-۱ پروفیل دمای تقریبی سیال گرم و سرد را در طول مبدل برای دو وضعیت جریان موازی و مخالف با هم مقایسه کنید.

۳- راندمان دمایی مبدل چنین تعریف می‌شود:

برای سیال سرد:

$$\eta_c = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}}$$

برای سیال گرم:

$$\eta_h = \frac{T_{h,in} - T_{h,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}}$$

راندمان دمایی متوسط :

$$\overline{\eta} = \frac{\eta_h + \eta_c}{2}$$

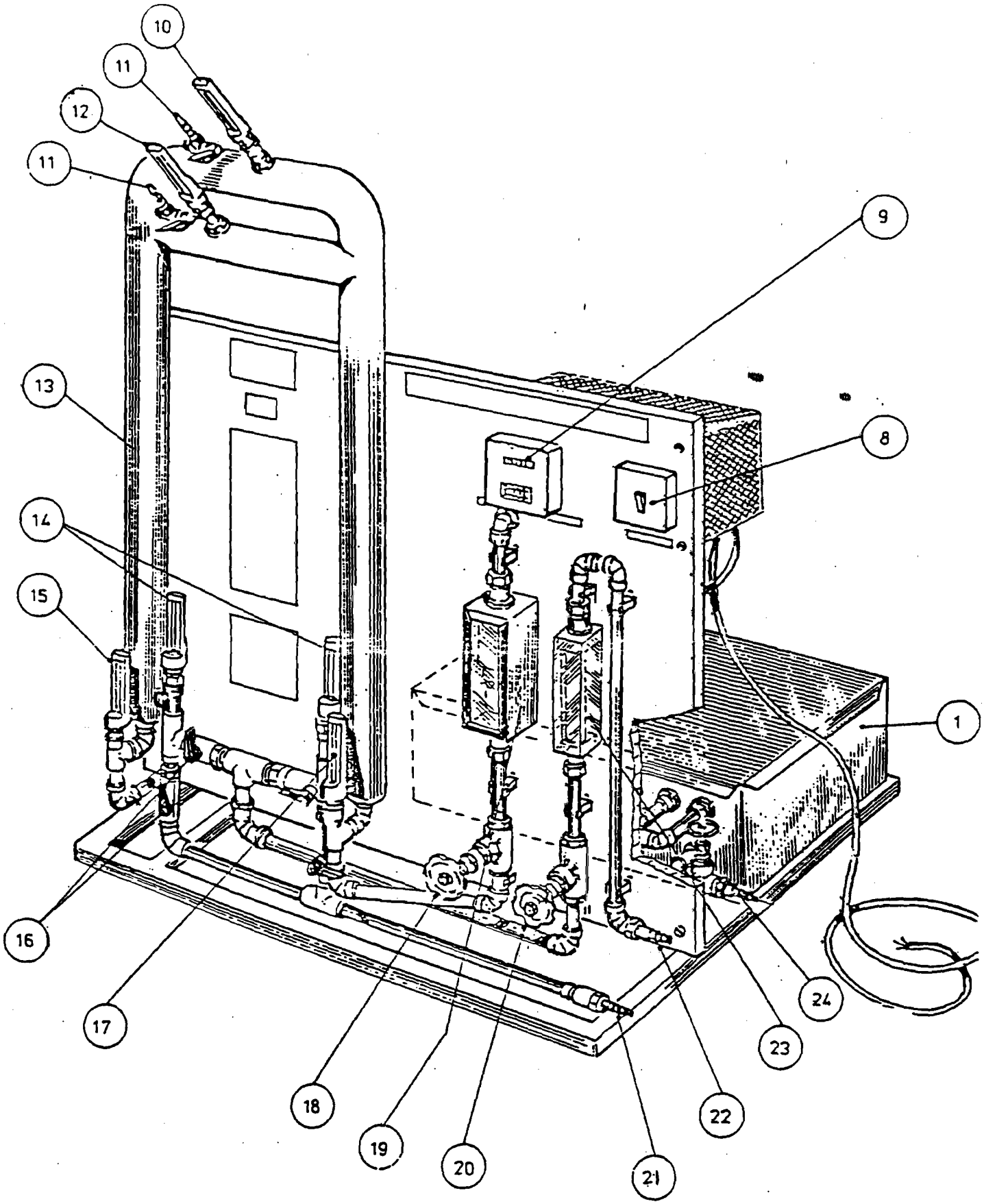
براساس نتایج جدول ۶-۲، مقادیر q_h ، q_c ، تلفات حرارتی، η، ΔT_m ، U، η_h ، η_c و $\overline{\eta}$ را برای چهار حالت دمایی آزمایش محاسبه و در جدول ارائه کنید. حالتهای مختلف را با هم مقایسه کنید.

۴- براساس نتایج جدول ۶-۲ پروفیل دمای تقریبی سیال گرم و سرد را در طول مبدل برای چهار حالت دمایی مختلف در یک نمودار رسم کنید. در مورد نتایج بحث کنید.

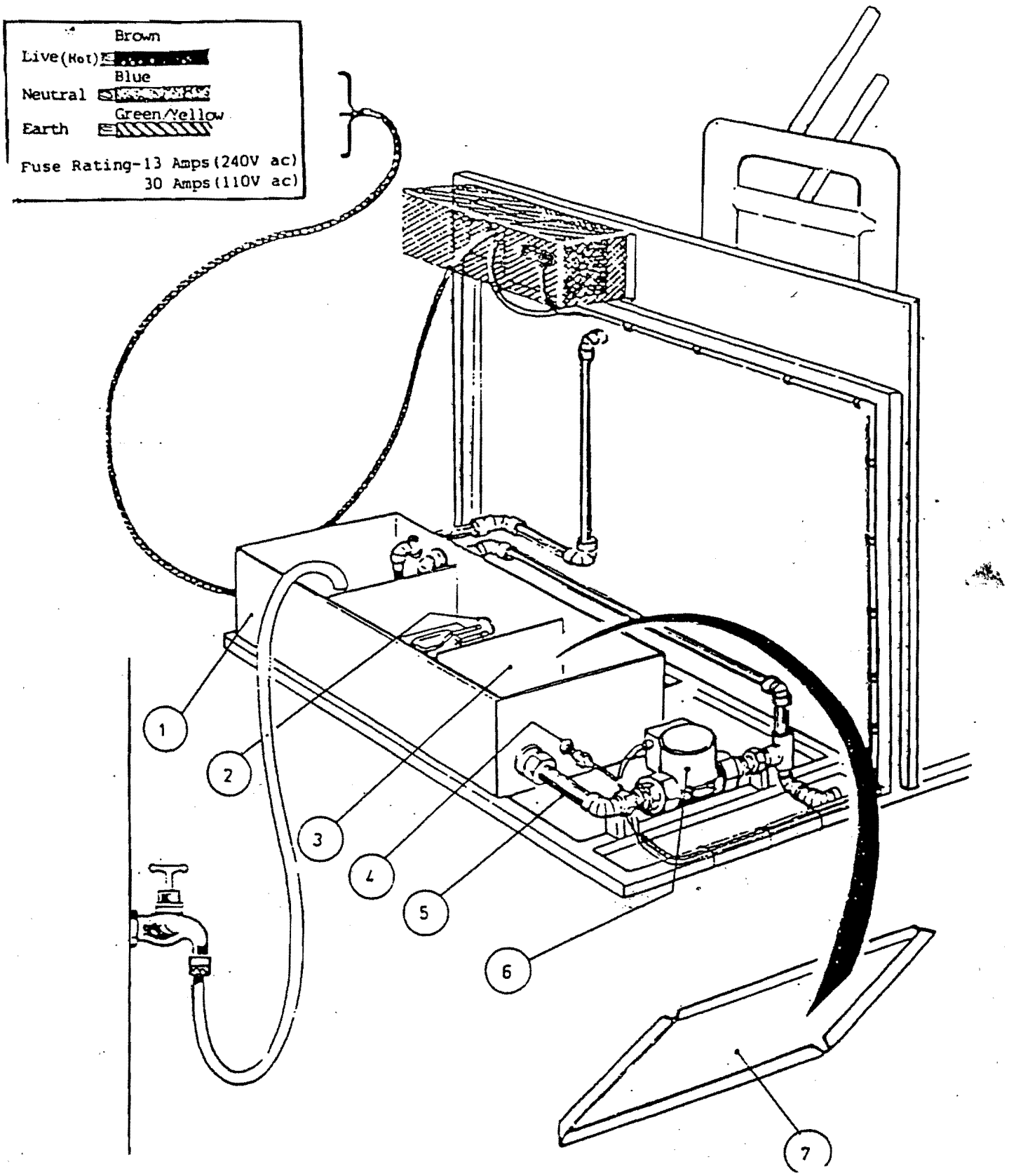
۵- براساس نتایج جدول ۶-۳، مقادیر q_h ، q_c ، تلفات حرارتی، η، ΔT_m و U را برای چهار حالت دبی سیال گرم در جدولی ارائه و مقایسه کنید.

۶- براساس نتایج جدول ۶-۳ پروفیل دمای تقریبی سیال گرم و سرد را در طول مبدل برای دو حالت دبی سیال گرم *1000 cc/min* و *4000 cc/min* رسم و با هم مقایسه کنید.نشان دهید که هرگاه $(\dot{m}C_p)_h > (\dot{m}C_p)_c$ باشد، ΔT_1 کمتر از ΔT_2 است و بالعکس.

۷- برای حالتی که راندمان مبدل بیشترین مقدار است، رابطهٔ ε - *NTU* را برای دو مبدل جریان موازی و جریان مخالف با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌ها (نتایج جدول ۶-۱) مقایسه کنید.



شکل ٤-١ مشخصات کلی دستگاه آزمایش (نمای جلو)



شکل ٤-٢ مشخصات کلی دستگاه آزمایش (نمای پشت)