قطب علمی تبدیل انرژی
گروه تبدیل انرژی
دانشکدهٔ مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی شریف

قطب علمی تبدیل انرژی

ترمودینامیک ۱

سیامک کاظم‌زادهٔ حنانی
مهدی کارزار جدی

۱۳۸۴

فهرست نویسی

عنوان: **ترمودینامیک ۱**
عنوان انگلیسی: Thermodynamics I
نویسندگان: سیامک کاظم‌زادهٔ حنانی و مهدی کارزار جدی
تاریخ انتشار الکترونیکی: ۱۳۸۴

Thermodynamics I

Siamak Kazemzadeh Hannani and Mehdi Karzar Jeddi
Center of Excellence in Energy Conversion (CEEC)
Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Winter 2006

فهرست مطالب

فهرست نویسی ۱
فهرست مطالب ۲
مقدمه ۵
فصل اول: تــعاریف ۶
تعاریف اصلی ۶
تعریف ترمودینامیک ۶
قانون صفرام یا اصل همدمائی ۶
قانون اول ترمودینامیک ۷
قانون دوم ترمودینامیک ۷
تعاریف فرعــی ۸
تعریف سیستم ترمودینامیکی ۸
تعریف خاصیت ۱۰
فرآیند ۱۰
خواص متمرکز و گستــرده ۱۱
تعادل ترمودینامیکی ۱۱
فرآیند غیرتعادلی و تعادلی ۱۱
فصــل دوم: خواص مادهٔ سادهٔ تراکم‌پذیر ۱۳
تعریف مــادهٔ خالص ۱۳
تعادل فاز بخار و مایع ۱۳
تعریف کیفیت ۱۶
درونیابی از جداول ۲۱
فصل ســوم: کار و گرما ۲۳
تعریف کار ۲۳
کاردرفرآیند شبه تعادلی ۲۵
الف) فرآیند حجم ثابت ۲۵
ب) فرآیند فشار ثابت (با در نظر گرفتن رفتار گاز کامل) ۲۵
پ) فرآیند دما ثابت یا ایزوترمال برای گاز کامل (یعنی PV=Const) ۲۵
ت) فرآیند پلی‌تروپیک ۲۶

تشابه بین کار و گرما ۲۶

فصل چـــهارم: قانون اول ترمودینامیک ۲۷

قانون اول ترمودینامیک ۲۷

قانون اول ترمودینامیک برای یک فرآیند ۲۹

تعریف آنتالپی ۲۹

آنتالپی برای گاز ایده آل ۲۹

گرمای ویژه گازایده آل برحسب واحد جرم ۲۹

گرمای ویژه گاز ایده آل ۳۱

گرمای ویژه در حجم ثابت ۳۱

گرمای ویژه در فشار ثابت ۳۱

آزمایش ژول ۳۲

تغییرات گرمای ویژه با دما ۳۲

یک رابطه بسیار مهم بین C_{P_o} و C_{v_o} ۳۳

طرق محاسبه اختلاف انرژی داخلی و انتالپی گازکامل ۳۳

قانون بقاء جرم برای حجم کنترل ۳۴

محاسبه دبی برای جریان یک بعدی یکنواخت در لوله‌ها ۳۵

اصل بقاء انرژی (قانون اول ترمودینامیک) در مورد حجم کنترل ۳۶

فرآیند حالت دائمی - جریان دائمی ۳۷

فرآیند حالت یکنواخت - جریان یکنواخت ۳۸

فصل پنجم: قانون دوم ترمودینامیک ۳۹

ماشین یا موتور حرارتی ۳۹

پمپ حرارتی ۴۰

منبع حرارتی ۴۱

راندمان یا بازدهٔ حرارتی ۴۱

تعریف ضریب کارائی برای پمپ حرارتی ۴۱

بیان قانون دوم ترمودینامیک ۴۲

بیان کلاسیوس ۴۲

بیان کلوین پلانک ۴۴

اثبات معادل بودن بیان کلاسیوس و کلوین پلانک ۴۴

ماشین حرکت دائمی نوع دوم ۴۵

فرآیند برگشت پذیر ۴۷

فرآیند برگشت پذیر داخلی ۵۲
نامعادلهٔ کلاسیوس ۵۲
انتروپی خاصیت سیستم بسته ۵۷
تغییرات انتروپی برای یک فرآیند برگشت ناپذیر ۵۸
اصل افزایش انتـــروپی ۵۹
قابلیت کاردهی ۶۰
تغییرات انتروپی جامدات و مایعات ۶۳
روش ساده برای محاسبات فرآیند آدیاباتیک برگشت پذیر گازهای کامل ۶۶
محاسبه کار در فرآیند آدیاباتیک برای گاز کامل و C_{Po}, C_{vo} ثابت ۶۷
فرآیند پلی‌تروپیک برگشت پذیر برای گاز کامل ۶۷
فرآیند برگشت پذیر همدمای گاز کامل ۶۷
تعمیم قانون دوم ترمودینامیک برای حجم کنترل ۶۸
کار فرآیند حالت دائمی جریان دائمی برگشت پذیر ۶۹
اصل افزایش انتروپی برای حجم کنترل ۶۹
سیکل کارنو ۷۱
مراجع برای مطالعهٔ بیشتر ۷۷

مقدمه

جزوه حاضر خلاصه ای از برخی از فصول مباحث درسی ترمودینامیک۱ است که دردورهٔ کارشناسی مهندسی مکانیک توسط همکاران ارجمند تدریس می گردد. هدف ازتدوین این جزوه راهنمائی دانشجویان درخلاصه نمودن مباحث مهم و مفاهیم اصلی درس می باشد که امیدوارم بتواند دانشجویان را در درک مطالب کمک کرده و عاملی جهت موفقیت درآزمونهای کلاس‌های مربوطه باشد. شایان ذکر است که درک عمیق مفاهیم ترمودینامیک صرفاً توسط مطالعه با حوصله کتب مرجع امکان پذیر می باشد. لذا، این جزوه به تنهائی نمی تواند بدین منظور قابل استفاده باشد.

در تهیهٔ این جزوه آقای مهندس مهدی کارزار جدی به عنوان مولف و سرکار خانم فرشته پورشریفی به عنوان تایپیست مرا یاری کرده اند که از این بزرگواران سپاسگزاری می گردد.

سیامک کاظم‌زادهٔ حنانی
تهران – اسفند ۱۳۸۴
دانشگاه صنعتی شریف

فصل اول: تــعاریف

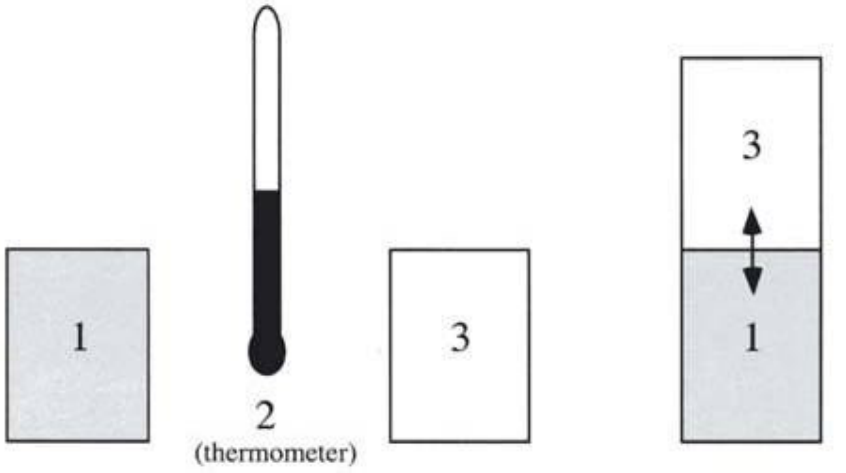
۱-۱ تعاریف اصلی

تعریف ترمودینامیک

علمی است که درمورد روش های تبدیل انرژی و تغییرات خواص ماده در اثر تبـدیل انـرژی، تغییـر فاز و یا تماس با مادهٔ دیگر بحث می کند. این تعریف بسیارکلی است و در واقع هنگامی می‌توان این تعریف را واقعاً درک کرد که با جوانب کاربردی آن آشنا شده باشیم. بعبارت دیگر تجربه و حوصـلهٔ خواننده نقش مهمی در فهم مطالب دارد. خواننده نباید انتظار داشته باشد کـه در طـول یـک تـرم تحصیلی کلیهٔ مفاهیم این درس را مانند دروس استاتیک یا مقاومت مصالح درک کند بلکه یادگیری دروس دیگر مانند انتقال حرارت، سیالات و کاربردهای این دروس دریچهٔ جدیـدی را مـی‌گـشاید و ابهامات درس ترمودینامیک در طول زمان و طی دوره چهارساله کارشناسی تا حدود زیادی از بـین می‌رود. با این وجود، مشکلات فوق الذکر نباید منجر به بی‌علاقگی دانشجویان به این درس گردد.
ترمودینامیک کلاسیک بر پایهٔ سه قانون اصلی که از تجربه نتیجه گرفته شده است بنا نهـاده شـده است.

قانون صفرام یا اصل همدمائی

هرگاه دو جسم با جسم سومی درتعادل حرارتی باشند آنگاه آن دو جسم با هم در تعـادل حرارتـی یعنی همدما خواهند بود.



شکل بیان قانون دوم ترمودینامیک برای سه جسم همدما (دو جسم ۱ و ۲ در تعادل حرارتی هستند همچنین دو جسم ۲ و ۳ در تعادل حرارتی هستند در نتیجه دو جسم ۱ و ۳ خود در تعادل حرارتی می‌باشند).

برای درک بهتر بیان قانون صفرام نیاز به آشنایی با عبارات و تعاریف خاص این قانون می‌باشد. بـه همین منظور باید پاره‌ای تعاریف در زیر ارائه گردد. مثلاً منظور ما از تعادل حرارتـی بایـد مـشخص

گردد. ولی هنوز حرارت را تعریف نکرده‌ایم. پس در این قسمت گریزی می‌زنیم به تعریف پایه‌ای حرارت: حرارت شکلی از جریان انرژی است که در اثر اختلاف دمای بین دو محیط صورت می‌گیرد. پس باید اختلاف دما وجود داشته باشد تا انتقال حرارت صورت پذیرد. در این صورت قانون صفرام را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

هرگاه جسم A، با جسمB (که اختلاف دما ممکن است داشته باشد) در کنار یکدیگر قرار بگیرند یعنی در تبادل حرارتی باشند و به دمای تعادل T برسند و سپس جسم B با جسمC نیز به دمای تعادل T برسد یعنی در انتها بین آنها هیچگونه حرارتی منتقل نشود آنگاه دوجسم A و B قبل از دخالت ما همدما بوده‌اند.

تذکر: در بیان قانون فوق جسم A، B و C نباید با هم از فیزیکی مخلوط یا از نظر شیمیایی ترکیب شوند.

قانون اول ترمودینامیک

اصل بقاء انرژی یا اصل ثابت بودن کمیت انرژی است. در بیان فوق ملاحظه می شود که به انرژی صفتی اطلاق کرده‌ایم و گفته‌ایم انرژی کمیت دارد. می‌دانیم که انرژی جنبشی یک جسم بوسیلهٔ رابطهٔ $E=\frac{1}{2}mV^2$ که m جرم و V سرعت آن است محاسبه می‌شود یعنی کمیت انرژی جنبشی مقدار E است. قانون اول می گوید که این کمیت E را نمی‌توان از بین برد بلکه از شکلی به شکل دیگر تبدیل می‌شود مثلاً دراثر صعود به ارتفاع h، جسم دارای انرژی پتانسیل می‌شود که کمیت آن اگر سرعت در ارتفاع h صفر شود، همان E است یا داریم:

$$\frac{1}{2}mV^2=E=mgh \qquad (۱-۱)$$

در رابطهٔ فوق g شتاب ثقل است.

قانون دوم ترمودینامیک

به نظر می رسد که قانون اول ترمودینامیک از آنچه درمورد انرژی هنگامی که از یک نوع به نوعی دیگرتبدیل می‌شود، تصویرکاملی نمایش نمی‌دهد. برای احساس ما همواره تبدیل شدن و از شکلی به شکلی دیگر درآمدن منجر به گم شدن یا ناپدید شدن یک چیزی است که براحتی قابل تعریف نمی‌باشد. بدن انسان در طول سالیان پیر می شود. به نظر می رسد که انرژی نیز در هنگام زندگی خود و از شکلی به شکلی دیگر تبدیل شدن باید یک خاصیت منفی پیدا کند. آن خاصیت که پیرشدن انرژی را بیان می کند توسط قانون دوم ترمودینامیک بیان می شود. بعبارت دیگر قانون دوم ترمودینامیک قانون اول را به این صورت تکمیل می کند. اگر چه کمیت انرژی در جهان ثابت است (E) ولی کیفیت آن هرلحظه در اثر تبدیل یا انتقال انرژی کاهش پیدا می‌کند. آنچه که بیانگر و ارزیابی کنندهٔ میزان کاهش کیفیت انرژی است خاصیتی دیگری است که انتروپی (Entropy) نامیده می شود.

۲-۱ تعاریف فرعـــی

تعریف سیستم ترمودینامیکی

سیستم بسته به مجموعه ای معین از جرم را گویند(Closed System) یا (Control Mass).
سیستم باز منطقه مشخص از فضا را گویند(Open System) یا (Control Volume) که جرم می‌تواند از مرز آن عبور نماید.
برای مثال هوای موجود در درون یک توپ را می توان به عنوان یک سیستم بسته در نظر گرفت، و یا یک پمپ باد را می توان یک حجم کنترل در نظر گرفت که هوا از آن عبور می‌نماید.

شکل ۱-۱. هوای موجود در درون توپ فوتبال به عنوان سیستم بسته و پمپ هوا که هوا از آن عبور می‌نماید به عنوان سیستم باز

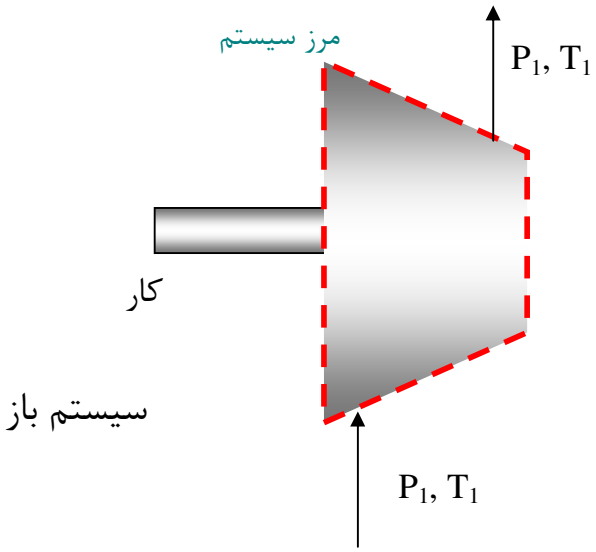
هرسیستمی توسط مرز (Boundary) مشخص می شود. این مرز می تواند حقیقی یا مجازی باشد. مرز سیستم می‌تواند تغییر شکل دهد یا حرکت کند. در سیستم بسته جرم از مرزها عبور نمی‌کند. ولی در سیستم باز جرم از مرز سیستم عبور خواهد کرد. فضای خارج هر سیستمی را محیط(Environment) گویند. کار و گرما (که بعداً تعریف می شود) می تواند از مرز سیستم بسته یا باز با محیط یا با سیستم بسته و باز دیگری مبادله شود.
مثال۱: فرض کنید بخواهیم گازی را از حجم V_1 و فشارP_1 توسط انتقال گرما در محفظهٔ سیلندر پیستونی تا فشار P_2 بصورت همدما تا دو برابر حجم اولیه منبسط کنیم و هدف یافتن فشارP_2 باشد.

شکل ۱-۲. مثال ۱

به سیلندر گرما می‌دهیم و وزنه نیز از روی پیستون بر می داریم تا دما بتواند ثابت بماند.
فرض کنید سیستم که گاز است رفتار گاز کامل را داشته باشد.

$$P_2V_2 = P_1V_1 \rightarrow P_2 = \frac{P_1}{2} \qquad (۲-۱)$$

مثال ۲: فرض کنید گازی را از فشار P_1 و T_1 تا فشار P_2 وT_2 متراکم می‌کنیم و هدف محاسبه کار کمپرسور است.



شکل ۱-۳. مثال ۲

$$W_{\text{کمپرسور}} = C_p(T_2 - T_1)$$

C_p گرمای ویژهٔ گاز در فشار ثابت است.

مثال ۳: فرض کنید گازی در مخزنی قرار داشته باشد و با باز کردن شیر مخزن بخواهیم جرم خروجی از مخزن را در یک مدت زمان (فاصله معینی از زمان) حساب کنیم.

شکل ۱-۴. مثال ۳

دراین مثال ملاحظه می‌کنید که می‌توان گاز را به صورت سیستم باز درنظر گرفت و جرمی که از شیر عبور می کند تعریف آن را کامل می‌کند. بعداً خواهیم دید که می‌توان با استفاده از روابطی جرم خروجی را محاسبه کرد. با این وجود، از دیدگاه نظری می‌توان جرم معینی را نیز در داخل مخزن بعنوان سیستم بسته اختیارکرد و تغییر شکل یا انبساط آن را تحلیل کرده و جرم خروجی را محاسبه نمود.