

شیمی فیزیک و ترمودینامیک

سری کتابهای کمک آموزشی کارشناسی ارشد

مجموعه مهندسی مواد

مؤلف: الهه جباری

ویراستار علمی: زهرا نادری

سرشناسه	: جباري، الهه
عنوان	: شيمي فيزيك و ترموديناميك
مشخصات نشر	: تهران: مشاوران صعود ماهان، ۱۴۰۱
فروست	: سري كتابهاي كمك آموزشي كارشناسي ارشد
شابك	: ۹۷۸-۶۰۰-۴۵۸-۸۳۶-۲
وضعيت فهرست نويسي	: فبياي مختصر
يادداشت	: اين مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل
دسترسى است.	
شماره كتابشناسى ملي	: ۴۲۳۵۰۳۲



كتاب: شيمي فيزيك و ترموديناميك
 مدير مسؤل:..... هادي سياري، مجيد سياري
 مولف:..... الهه جباري
 ناشر:..... مشاوران صعود ماهان
 مدير توليد محتوا:..... سميه بيگي
 ويراستار علمي:..... زهرا نادري
 نوبت و تاريخ چاپ: دوم / ۱۴۰۱
 ۱۰۰۰ جلد
 قتييلژ:..... ۲/۳۹۰/۰۰۰ ريال
 شابك:..... ISBN:۹۷۸-۶۰۰-۴۵۸-۸۳۶-۲

انتشارات مشاوران صعود ماهان: خيابان وليعصر، بالاتر از تقاطع مطهري،

روبروي قنادي هتل بزرگ تهران، جنب بانك ملي، پلاك ۲۰۵۰

تلفن: ۸۸۱۰۰۱۱۳-۴

سخن ناشر

«ن والقلم و ما یسطرون»

کلمه نزد خدا بود و خدا آن را با قلم بر ما نازل کرد.

به پاس تشکر از چنین موهبت الهی، مؤسسه ماهان درصدد برآمده است تا در راستای انتقال دانش و مفاهیم با کمک اساتید مجرب و مجموعه کتب آموزشی خود برای شما داوطلبان ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد، گام مؤثری بردارد. امید است تلاش‌های خدمتگزاران شما در این مؤسسه پایه‌گذار گام‌های بلند فردای شما باشد.

مجموعه کتاب‌های کمک آموزشی ماهان به منظور استفاده داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد سراسری و آزاد تألیف شده‌اند. در این کتاب‌ها سعی کرده‌ایم با بهره‌گیری از تجربه اساتید بزرگ و کتب معتبر داوطلبان را از مطالعه کتاب‌های متعدد در هر درس بی‌نیاز کنیم.

دیگر تألیفات ماهان برای سایر دانشجویان به صورت ذیل است.

● مجموعه کتاب‌های ۸ آزمون: شامل ۵ مرحله کنکور کارشناسی ارشد ۵ سال اخیر به همراه ۳ مرحله آزمون تألیفی ماهان همراه با پاسخ تشریحی می‌باشد که برای آشنایی با نمونه سوالات کنکور طراحی شده است. این مجموعه کتاب‌ها با توجه به تحلیل ۳ ساله اخیر کنکور و بودجه‌بندی مباحث در هریک از دروس، اطلاعات مناسبی جهت برنامه‌ریزی درسی در اختیار دانشجو قرار می‌دهد.

● مجموعه کتاب‌های کوچک: شامل کلیه نکات کاربردی در گرایش‌های مختلف کنکور کارشناسی ارشد می‌باشد که برای دانشجویان جهت جمع‌بندی مباحث در ۲ ماهه آخر قبل از کنکور مفید است.

بدین وسیله از مجموعه اساتید، مولفان و همکاران محترم خانواده بزرگ ماهان که در تولید و به‌روزرسانی تألیفات ماهان نقش مؤثری داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نماییم.

دانشجویان عزیز و اساتید محترم می‌توانند هرگونه انتقاد و پیشنهاد درخصوص تألیفات ماهان را از طریق سایت ماهان به آدرس mahan.ac.ir با ما در میان بگذارند.

مؤسسه آموزش عالی آزاد ماهان

سخن مؤلف

کتابی که در پیش رو دارید خلاصه‌ای از مراجع اصلی درس شیمی فیزیک و ترمودینامیک مواد است. با توجه به اینکه دانشجویان معمولاً در استفاده از کتب مرجع چه در دروس دانشگاه و چه در آمادگی کنکور کارشناسی ارشد دچار مشکل می‌شوند، سعی کردم منبعی در اختیار آنها قرار دهم تا بهره‌گیری از زبان و نگارش ساده‌تر به طرح موضوعات مورد لزوم آنها بپردازد. این کتاب شامل ۶ فصل به صورت شرح درس، نکات کلیدی و کلیه تستهای کنکور کارشناسی ارشد به صورت طبقه‌بندی همراه با پاسخ تشریحی آنها می‌باشد.

لازم می‌دانم از مدیریت مؤسسه ماهان آقایان سیاری و همچنین سرکار خانم زاهدی سرشت به سبب تلاشهای بی‌دریغشان در چاپ این مجموعه نهایت تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین همواره خود را مرهون محبت‌های بی‌منت خانواده عزیزم بخصوص مادر و پدر مهربان و بزرگوارم که در تمامی مراحل در کنارم بودند، می‌دانم.

از آنجا که می‌دانم اثرم عاری از اشکال نمی‌باشد از کلیه دانشجویان و اساتید خواهشمندم اشکالات مجموعه، نظرات و پیشنهادات خود را به آدرس الکترونیکی elahe.jabari@gmail.com ارسال نمایند، که امیدوارم با اعمال این نظرات در چاپ‌های بعدی در ارائه مجموعه کامل به دانشجویان عزیز موفق باشیم.

الهه جباری

فصل اول: مفاهیم اولیه ترمودینامیک.....	۹
۱-۱- مفاهیم اولیه ترمودینامیک.....	۱۱
۲-۱- قانون اول ترمودینامیک.....	۱۳
۱-۲-۱- تعیین کار.....	۱۳
۲-۲-۱- ظرفیت گرمایی.....	۱۴
۳-۲-۱- کمیت آنتالپی.....	۱۵
۴-۲-۱- فرآیندهای مختلف برای گاز ایده‌آل.....	۱۵
۵-۲-۱- مقایسه تحول ایزوترم برگشت پذیر و آدیاباتیک برگشت پذیر.....	۱۷
۳-۱- گرمای تشکیل (ΔH_f) و گرمای واکنش (ΔH_r).....	۱۸
۴-۱- ماشینهای حرارتی.....	۱۹
۵-۱- فرآیندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر (خودبخودی).....	۲۰
۶-۱- قانون دوم ترمودینامیک و آنتروپی.....	۲۱
۱-۶-۱- دو بیان از قانون دوم ترمودینامیک.....	۲۱
۲-۶-۱- تلفیق قانون اول و دوم ترمودینامیک.....	۲۲
۳-۶-۱- محاسبه تغییرات آنتروپی.....	۲۲
۱-۳-۶-۱- آنتروپی سیستم‌های دیگر به غیر از گاز ایده‌آل.....	۲۳
۲-۳-۶-۱- دو قانون تجربی جهت تعیین آنتروپی.....	۲۳
نکات کلیدی فصل اول.....	۲۴
سؤالات چهارگزینه‌ای فصل اول.....	۲۵
پاسخنامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل اول.....	۳۵
فصل دوم: ترمودینامیک آماری.....	۴۳
۱-۲- ترمودینامیک آماری.....	۴۵
۲-۲- توابع ترمودینامیکی کمکی.....	۴۷
۱-۲-۲- انرژی آزاد هلمهولتز، معیار تعادل.....	۴۷
۲-۲-۲- انرژی آزاد گیبس، معیار تعادل.....	۴۸
۳-۲-۲- پتانسیل شیمیایی (μ_i).....	۴۸
۳-۲- معادله گیبس هلمهولتز.....	۴۹
۴-۲- روابط ترمودینامیکی مفید.....	۴۹
۵-۲- روابط ماکسول.....	۴۹
۶-۲- قانون سوم ترمودینامیک.....	۵۰
نکات کلیدی فصل دوم.....	۵۱

۵۲	سؤالات چهارگزینه‌ای فصل دوم
۵۸	پاسخنامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل دوم
۶۵	فصل سوم: طراحی راکتور
۶۷	۱-۳- رفتار گازها
۶۸	۲-۳- معادله گازهای حقیقی یا معادله واندروالس
۶۸	۳-۳- معادله ویریال گازهای حقیقی
۶۹	۴-۳- قوانین گازها
۷۰	۵-۳- عملیات ترمودینامیکی گاز واقعی
۷۱	نکات کلیدی فصل سوم
۷۲	سؤالات چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۳	پاسخنامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل سوم
۷۵	فصل چهارم: تعادل دو فاز و تغییرات انرژی آزاد
۷۷	۱-۴- تعادل دو فاز و تغییرات انرژی آزاد
۷۸	۲-۴- بررسی تعادل در واکنشهای همگن
۷۸	۳-۴- تأثیر دما بر ثابت تعادل (رابطه وانت - هوف)
۷۹	۴-۴- بررسی تعادل در واکنشهای ناهمگن
۷۹	۵-۴- قانون فازی گیبس
۸۰	۶-۴- بررسی ترمودینامیکی تعادل فازها
۸۲	۷-۴- دیگرانهای الینگهام (ریچاردسون)
۸۳	۸-۴- سیستم‌های الکتروشیمیایی
۸۴	نکات کلیدی فصل چهارم
۸۵	سؤالات چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۰۱	پاسخنامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۱۹	فصل پنجم: محلول‌ها
۱۲۱	۱-۵- مفهوم اکتیویته (a)
۱۲۱	۲-۵- قانون راولت و محلول‌های ایده‌آل
۱۲۲	۳-۵- محلول‌های غیر ایده‌آل و قانون هنری
۱۲۲	۴-۵- معادله گیبس - دوهم و مشتقاتش
۱۲۳	۵-۵- انرژی آزاد گیبس برای تشکیل یک محلول
۱۲۴	۶-۵- خواص محلول‌های ایده‌آل
۱۲۵	۷-۵- ضریب اکتیویته
۱۲۵	۱-۷-۵- اثر دما بر ضریب اکتیویته
۱۲۶	۲-۷-۵- اثر فشار بر ضریب اکتیویته
۱۲۶	۳-۷-۵- اثر ترکیب شیمیایی بر ضریب اکتیویته
۱۲۶	۸-۵- اعمال رابطه گیبس - دوهم برای محاسبه اکتیویته
۱۲۷	۹-۵- تابع α
۱۲۷	۱۰-۵- تابع اضافی

۱۲۸	۱۱-۵- محلول با قاعده (regular).....
۱۲۸	۱۲-۵- مدل شبه شیمیایی (Quasi-Chemical Model) محلول‌های با قاعده.....
۱۳۱	نکات کلیدی فصل پنجم.....
۱۳۲	سؤالات چهارگزینه‌ای فصل پنجم.....
۱۴۲	پاسخ‌نامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل پنجم.....
۱۵۳	فصل ششم: حالت‌های استاندارد.....
۱۵۵	۱-۶- حالت‌های استاندارد (مقیاس‌های مختلف اکتیویته).....
۱۵۵	۱-۱-۶- مقیاس هنری (Henrian Standard State).....
۱۵۶	۲-۱-۶- مقیاس یک درصد وزنی.....
۱۵۷	۲-۶- تعادل فازها در سیستم‌های دوتایی.....
۱۶۰	نکات کلیدی فصل ششم.....
۱۶۱	سؤالات چهارگزینه‌ای فصل ششم.....
۱۶۶	پاسخ‌نامه سؤالات چهارگزینه‌ای فصل ششم.....
۱۶۷	آزمون‌های سراسری سال ۸۵ تا ۹۹ همراه با پاسخ‌نامه تشریحی.....
۲۵۸	منابع.....

فصل اول

مفاهیم اولیه ترمودینامیک

- ❖ مفاهیم اولیه ترمودینامیک
- ❖ قانون اول ترمودینامیک
- ❖ ماشین‌های حرارتی
- ❖ فرآیندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر
- ❖ قانون دوم ترمودینامیک و آنتروپی

فصل اول

مفاهیم اولیه ترمودینامیک

۱-۱- مفاهیم اولیه ترمودینامیک

قبل از این که قوانین ترمودینامیک را مورد بحث قرار دهیم لازم است با مفاهیم پایه‌ای ترمودینامیک آشنا شویم:
ماده: هر شیئی که جرم دارد و فضا اشغال می‌کند.

سیستم: ماده یا مجموعه‌ای که در ترمودینامیک مورد بحث قرار می‌گیرد.

محیط: محدوده خارج از سیستم است.

جهان: مجموعه سیستم و محیط را تشکیل می‌دهد.

مرز: جداکننده سیستم و محیط را گویند.

انواع سیستم: ۱- سیستم باز ۲- سیستم بسته ۳- سیستم ایزوله

سیستم باز: سیستمی است که با محیط تبادل جرم و انرژی دارد.

سیستم بسته: سیستمی است که با محیط تبادل انرژی دارد ولی تبادل جرم ندارد.

سیستم ایزوله: سیستمی است که با محیط تبادل جرم و انرژی ندارد.

حالت سیستم: یک سیستم در هر زمان حالتی خاص دارد که توسط خواص حالت سیستم مشخص می‌شود.

خواص حالت: استعدادهایی هستند که برای تشخیص حالت یا شرایط سیستم باید مشخص شود مانند دما و فشار و...

متغیرهای حالت: به آن دسته از خواص حالت که مستقیماً قابل تغییر هستند، گفته می‌شود.

انواع خواص حالت: ۱- خواص فراگیر (مقداری) ۲- خواص غیر فراگیر یا متمرکز (شدتی)

خواص فراگیر (Extensive): خواصی که رابطه مستقیمی با اندازه سیستم دارند و به عبارتی تابع جرم سیستم می‌باشند. این خواص جمع پذیرند مانند: حجم و جرم و...

خواص غیر فراگیر یا متمرکز (Intensive): خواصی هستند که به اندازه سیستم بستگی ندارند و در هر نقطه سیستم، تنها یک مقدار به آنها می‌توان نسبت داد مانند: دما و فشار و ...

نکته: ما همواره مایلیم خواص فراگیر را به خواص غیر فراگیر تبدیل کنیم که برای این منظور آنها را به جرم کل سیستم یا تعداد مول سیستم تقسیم می‌کنیم.

نکته: معمولاً وقتی از خواص سیستم نام برده می‌شود، منظور خواص غیرفراگیر (متمرکز) است.

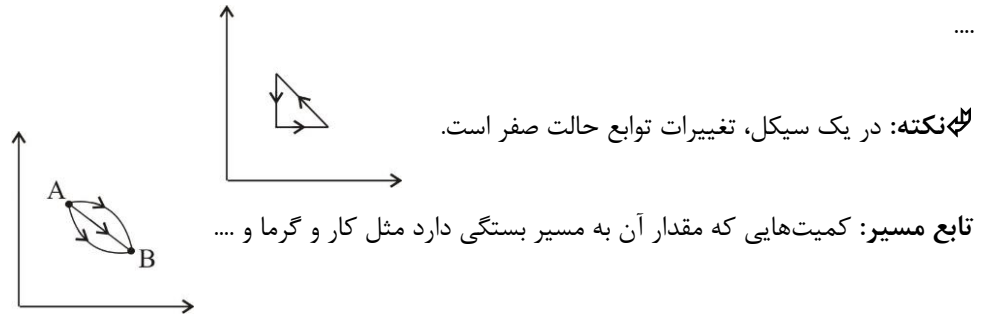
معادله حالت: بین متغیرهای حالت یک سیستم عموماً رابطه‌ای وجود دارد که به آن معادله حالت گفته می‌شود. مثلاً معادله حالت گازهای ایده‌آل به شکل $PV=nRT$ می‌باشد.

فرآیند: به تحولی که سبب انتقال یک سیستم از حالتی به حالت دیگر می‌شود، گفته می‌شود.

مسیر: در طی انجام فرآیند، سیستم از یک سری حالت مختلف عبور می‌کند که به مجموعه آنها مسیر انجام تحول یا مکانیزم گفته می‌شود.

سیکل: مسیری است که سیستم طی آن به حالت اولیه‌اش برمی‌گردد.

تابع حالت: کمتهایی که مقدار آنها به مسیر بستگی ندارد و در مسیرهای متفاوت مقداری یکسان دارند مثل حجم، دما، فشار و ...



معادله حالت گاز ایده‌آل: برای یک گاز سه کمیت T, V, P تعریف می‌شود، اگر گاز ایده‌آل فرض شود بین این سه کمیت رابطه زیر برقرار است:

$$PV = nRT$$

P : فشار

V : حجم

n : تعداد مول گاز

T : دمای گاز ($^{\circ}K$)

R : ثابت گازها

$$^{\circ}K = 273/15 + ^{\circ}C$$

گاز ایده‌آل گازی است که از وزن ذرات تشکیل دهنده گاز و نیروی بین ذرات صرف‌نظر شده است.

گاز حقیقی در دماهای نسبتاً بالا و فشارهای پایین مثل حالت ایده‌آل رفتار می‌کنند.

$$R = 8/314 \left(\frac{J}{mol.K} \right) = 0/082 \left(\frac{lit.atm}{mol.K} \right) = 1/987 \left(\frac{cal}{mol.K} \right)$$

انرژی داخلی سیستم: در مقیاس میکروسکوپی به مجموع انرژی‌های پتانسیل و جنبشی ذرات یک سیستم، گفته می‌شود و به عبارتی کل انرژی سیستم را انرژی داخلی آن گویند.

نکته: انرژی داخلی، تابع حالت است و تغییر آن در یک سیکل، صفر است.

نکته: انرژی داخلی یک خاصیت فراگیر یا مقداری می‌باشد.

نکته: انرژی داخلی یک سیستم ایزوله، ثابت است.

ضریب انبساط حجمی در فشار ثابت: تغییرات حجم بر حسب تغییرات دما در فشار ثابت را نسبت به حجم اولیه، گویند که با α نشان می‌دهند.

$$\alpha = \frac{+1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

ضریب انبساط حجمی گازهای ایده‌آل مقدار ثابت $\frac{1}{273/15}$ می‌باشد. بنابراین انقباض گازهای ایده‌آل محدود می‌باشد و در

$273/15 -$ درجه سانتیگراد، حجم گاز به صفر خواهد رسید. این حد کاهش دما که برابر $273/15 -$ می‌باشد را صفر مطلق می‌خوانند و آن را مبدا مقیاس کلوین برای اندازه‌گیری درجه حرارت در نظر می‌گیرند.

ضریب انبساط حجمی در دمای ثابت (ضریب تراکم پذیری): افزایش حجم برحسب کاهش فشار در دمای ثابت را نسبت به حجم اولیه گویند که با β نشان می دهند.

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

۱-۲- قانون اول ترمودینامیک

این قانون را می توان قانون بقای انرژی نامید یعنی انرژی نه به وجود می آید نه از بین می رود و بیان کامل این قانون به صورت زیر است:

برای سیستمی که در حال تعادل درونی باشد کمیتی به نام انرژی داخلی وجود دارد که تابع حالت است. مطابق این قانون، جذب گرما توسط سیستم، انرژی داخلی سیستم را به اندازه Q افزایش و انجام کار توسط سیستم سبب کاهش انرژی داخلی می گردد.

$$\Delta U = Q - W$$

$$\Delta U = \text{تغییر انرژی داخلی سیستم}$$

Q = حرارت جذب شده توسط سیستم (انرژی ورودی به سیستم به صورت گرما)

W = کار انجام شده توسط سیستم (انرژی خروجی از سیستم به صورت کار)

با توجه به صورت قانون اول ترمودینامیک، قراردادی برای علامت های Q, W به صورت زیر بنا نهاده شده است:

۱- علامت Q } مثبت: اگر به سیستم گرما داده شود.
منفی: اگر از سیستم گرما گرفته شود.

۲- علامت W } مثبت: اگر سیستم بر روی محیط کار انجام دهد.
منفی: اگر بر روی سیستم کار انجام دهیم.

به طور کلی اگر از سیستم انرژی گرفته شود علامت منفی و اگر سیستم انرژی جذب کند علامت مثبت دارد. تناقضی که در مورد W دیده می شود به دلیل علامت منفی W در رابطه قانون اول ترمودینامیک است.

نکات مربوط به قانون اول ترمودینامیک:

۱- از آنجایی که انرژی داخلی سیستم تابع حالت آن می باشد تغییرات آن را می توان به صورت دیفرانسیل کامل یک تابع حالت نوشت (du). ولی گرما و کار توابع مسیر بوده و تغییرات آنها به صورت دیفرانسیل غیر کامل وابسته به مسیر نشان داده می شود، ($\delta Q, \delta W$) براین اساس بیان دیفرانسیلی قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر است:

$$dU = \delta Q - \delta W$$

۲- مقدار مطلق انرژی داخلی یک سیستم قابل اندازه گیری نمی باشد ولی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک می توان تغییرات انرژی داخلی را ارزیابی نمود.

۳- قانون اول ترمودینامیک بیان می کند که کلیه سیستم ها دارای انرژی هستند و همچنین بیان می کند: ممکن نیست ماشینی ساخت که بدون سوخت کار کند، چون انرژی خلق نمی شود.

۱-۲-۱- تعیین کار

کار خاصیت سیستم نمی‌باشد و همیشه در اثر عمل و عکس العمل سیستم و محیط بدست می‌آید. برای تعیین اینکه آیا کار انجام شده است باید مراحل زیر را طی کنیم:

- ۱- سیستم را مشخص کرده و در پی آن مرز را تعریف می‌کنیم.
 - ۲- اگر مرز حرکت کرده باشد نتیجه می‌گیریم که امکان انجام کار وجود دارد.
 - ۳- اگر نیروی مقاوم نیز وجود داشته باشد می‌توانیم بگوئیم که کار انجام شده است.
- در ترمودینامیک اغلب با کاری مواجه هستیم که در اثر انبساط سیستم مبادله می‌شود و به آن « کار انبساطی » می‌گویند. اگر نیروی وارد از طرف محیط بر سیستم را با F_{ext} و تغییر مکان را با dx نشان دهیم، چنانچه تغییر مکان فقط در یک جهت انجام شود، کار انجام شده توسط سیستم بر محیط برابر خواهد بود با:

$$\delta W = F_{ext} \cdot dx = \frac{F_{ext}}{A} \cdot A \cdot dx = P_{ext} \cdot A \cdot dx = P_{ext} \cdot dV$$

P_{ext} : فشار وارد از طرف محیط بر سیستم

A : مساحت سطحی که فشار وارد می‌شود.

پس چنانچه تغییر حجمی نداشته باشیم ($\Delta V = 0$) کار انجام شده صفر خواهد بود.

اندیس (ext) به معنای خارجی است پس باید دقت کرد که همواره فشار مقاوم خارجی را قرار دهیم نه فشار سیستم را.

حال حالت‌هایی از سیستم را بررسی می‌کنیم:

انبساط آزاد: اگر کار انبساطی خالص انجام شود ($P_{ext} = 0$)، مقدار کار برابر صفر خواهد بود. به چنین تحولی « انبساط آزاد » گفته می‌شود.

انبساط هم فشار: اگر فرآیند در فشار ثابت باشد.

$$P_{ext} = K \Rightarrow W = \int_{V_i}^{V_f} P_{ext} \cdot dV = P_{ext} (V_f - V_i) \Rightarrow W = P_{ext} \cdot \Delta V$$

فرآیندی برگشت پذیر است که در هر لحظه در حال تعادل باشد.

انبساط برگشت پذیر: در صورتی که افزایش بسیار کوچک فشار محیط بتواند جهت حرکت پیستون را تغییر داده و حالت سیستم را از انبساط به انقباض مبدل کند، تحول را برگشت پذیر گویند. برای اینکه انبساط برگشت پذیر باشد باید در هر مرحله P_{ext} با P_{sys} (فشار سیستم) برابر باشد و در این صورت داریم:

$$\delta W = P_{ext} dV = PdV \Rightarrow W = \int_{V_i}^{V_f} PdV$$

یعنی کار، سطح زیر منحنی در نمودار P-V است و سطح زیر منحنی برای مسیرهای مختلف، متفاوت است.

میزان کار انجام شده در حالتی که تحول به صورت برگشت پذیر انجام شود، بیشترین مقدار ممکن بوده و بازدهی سیستم در این حالت، حداکثر است. در فرآیندهای برگشت ناپذیر به دلیل تحلیل رفتن انرژی مکانیکی و تبدیل آن به انرژی حرارتی کار انجام شده کمتر از حالت برگشت پذیر است.

$$\Delta U = Q_{rev} - W_{rev}$$

۱-۲-۲- ظرفیت گرمایی

قبل از بررسی فرآیندهای مختلف لازم است ظرفیت گرمایی تعریف شود:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} (dT \neq 0)$$

ظرفیت گرمایی (C) عبارتست از میزان حرارتی که به جسم می‌دهیم تا دمای آن یک درجه افزایش یابد. C یک خاصیت

مقداری است و برای شدتی کردن آن بر تعداد مول سیستم تقسیم می‌کنند، که ظرفیت گرمایی مولی (ویژه) نامیده می‌شود.

برای محاسبه C می‌توان آزمایشات را در فشار یا حجم ثابت انجام داد که اعداد حاصل به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت و ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت گفته می‌شوند:

$$C_p = \frac{\delta Q_p}{dT}$$

$$C_v = \frac{\delta Q_v}{dT}$$

اگر به دو سیستم که یکی حجم ثابت و دیگری فشار ثابت دارد گرمای یکسانی بدهیم سیستمی که حجم آن ثابت است تغییر دمای بیشتری می‌دهد، در فرآیند فشار ثابت علاوه بر مقدار گرمایی که برای افزایش دما لازم است مقداری گرما نیز صرف انجام کار و افزایش حجم سیستم می‌گردد، در نتیجه:

$$\frac{\delta Q_p}{dT} > \frac{\delta Q_v}{dT}$$

یعنی همواره $C_p > C_v$

برای گازهای ایده‌آل $C_p - C_v = R$

برای گاز ایده‌آل تک اتمی: $C_p = \frac{5}{2}R$, $C_v = \frac{3}{2}R$

$$C_p - C_v = \frac{\alpha^2 TV}{\beta} \rightarrow \alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_P, \quad \beta = \frac{-1}{V} \left(\frac{\delta V}{\delta P} \right)_T$$

طبق قانون اول ترمودینامیک:

$$\delta Q = \delta W + dU$$

$$nC_v = \frac{\delta Q_v}{dT} \Rightarrow \delta Q_v = nC_v dT$$

در صورتی که حجم ثابت باشد $\delta W = 0$ و داریم:

$$\delta Q_v = dU = nC_v dT$$

(C_v ظرفیت گرمایی مولی در حجم ثابت است و برای محاسبه تغییر انرژی داخلی کل باید در تعداد مول ضرب شود.)

$$\Rightarrow dU = nC_v dT$$

رابطه فوق فقط در حجم ثابت برقرار است ولی اگر گاز ایده‌آل باشد این رابطه همواره در تمامی فرآیندها برقرار است. زیرا انرژی داخلی تابع مسیر نیست.

۱-۲-۳- کمیت آنتالپی

کمیت آنتالپی را که با H نشان می‌دهند به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$H = U + PV$$

$$H_2 - H_1 = U_2 + P_2 V_2 - U_1 - P_1 V_1$$

اگر فشار ثابت باشد ($P = P_2 = P_1$)

$$\Rightarrow H_2 - H_1 = (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1)$$

$$\Rightarrow \Delta H = \Delta U + W$$

از طرفی طبق قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U + W = Q$$

بنابراین:

$$nC_p = \frac{\delta Q_p}{dT} = \frac{dH}{dT} \Rightarrow dH = nC_p dT$$

رابطه فوق فقط در فشار ثابت برقرار است ولی در مورد گاز ایده‌آل، این رابطه همواره در تمامی فرآیندها برقرار است.

نکته: از آنجایی که عبارت ($U+PV$) فقط از توابع حالت تشکیل شده است، خود عبارت یعنی آنتالپی نیز تابع حالت است.

۱-۲-۴- فرآیندهای مختلف برای گاز ایده آل

با توجه به اینکه هرگاه دو متغیر مستقل ثابت باشند حالت سیستم نیز تثبیت می‌شود، معمولاً بررسی مسیر فرآیندهایی که در آنها یکی از دو متغیر مستقل ثابت می‌ماند و متغیر دیگر در طی فرآیند تغییر می‌کند، مورد توجه می‌باشد. از طرف دیگر انتگرال δQ , δW تنها وقتی قابل تعیین هستند که مسیر تحول یا فرآیند مشخص باشد. در نتیجه در محاسبات ترمودینامیکی از یک سری مسیرهای مناسبی استفاده می‌کنند که عبارتند از:

- ۱- فرآیندها یا تحولات باحجم ثابت (فرآیند ایزوکور)
 - ۲- فرآیندهای با فشار ثابت (فرآیند ایزوبار)
 - ۳- فرآیندهای با دمای ثابت (فرآیند ایزوترم)
 - ۴- فرآیندهای بی‌دررو یا آدیاباتیک (که در آنها سیستم با محیط تبادل گرما ندارد $Q=0$)
- حال به بررسی این فرآیندها و اعمال قانون اول ترمودینامیک در این فرآیندها می‌پردازیم:
- ۱- تحولات با حجم ثابت ($V = cte$)

$$V = Cte \Rightarrow W = \int PdV \Rightarrow W = 0$$

قانون اول ترمودینامیک: $dU = \delta Q_V - \delta W$ (مقدار تبادل گرما در فرآیند حجم ثابت)

$$\Rightarrow \Delta U = Q_V$$

از آنجائیکه برای گازهای ایده‌آل همواره داریم: $dU = nC_V dT$

$$\Rightarrow dU = \delta Q_V = nC_V dT \rightarrow \Delta U = Q_V = \int nC_V dT$$

همچنین تغییر آنتالپی سیستم در این فرآیند نیز همواره برابر است با: $dH = nC_P dT$

۲- فرآیندهای با فشار ثابت ($P = Cte$)

$$P = Cte \Rightarrow W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P \int_{V_1}^{V_2} dV = P(V_2 - V_1) \Rightarrow W = P(V_2 - V_1)$$

طبق قانون اول ترمودینامیک:

$$\Delta U = Q_p - W \rightarrow U_2 - U_1 = Q_p - P(V_2 - V_1)$$

$$\rightarrow (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = Q_p$$

طبق قانون گازهای ایده‌آل:

$$dU = nC_V dT$$

$$dH = Q_p = nC_P dT$$

۳- فرآیندهای با دمای ثابت (ایزوترم) و برگشت پذیر

$$T = cte \Rightarrow PV = nRT = cte$$

طبق قانون گازهای ایده‌آل $dU = nC_V dT$ و $dH = nC_P dT$ می‌باشد یعنی انرژی داخلی و آنتالپی گازهای ایده‌آل فقط تابع دما می‌باشند. بنابراین در اینجا که دما ثابت است ($dT = 0$) داریم:

$$dU = 0, \quad dH = 0$$

طبق قانون اول ترمودینامیک: $\Delta u = \delta Q - \delta W$

$$\Rightarrow \delta Q = \delta W = PdV = \frac{RT}{V} dV$$

چنانچه بین حالت ۱ و ۲ انتگرال بگیریم:

$$\Rightarrow W = Q = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

۴- فرآیندهای آدیباتیک و برگشت پذیر

فرآیند آدیباتیک یعنی تبادل گرمایی بین سیستم و محیط وجود ندارد و $\delta Q = 0$ است.

$$dQ = dU + \delta W = 0 \Rightarrow dU = -\delta W \Rightarrow$$

$$nC_V dT = -PdV = -\frac{nRT}{V} dV \Rightarrow$$

$$C_V \frac{dT}{T} = -\frac{RdV}{V} \Rightarrow$$

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \frac{R}{C_V} \int_{V_1}^{V_2} -\frac{dV}{V} \Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{R}{C_V} \ln \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{R}{C_V}}, \gamma = \frac{C_P}{C_V} \Rightarrow \gamma - 1 = \frac{C_P - C_V}{C_V} = \frac{R}{C_V}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \Rightarrow P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = C$$

$$\text{همواره داریم}; \frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1}$$

یعنی در فرآیند برگشت پذیر آدیباتیک PV^γ مقدار ثابت C است که $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ است در نتیجه مقدار کار انبساطی را برای این فرآیند به صورت زیر محاسبه می کنیم:

$$W = \int PdV = \int \frac{C}{V^\gamma} dV = \frac{1}{1-\gamma} (CV_2^{1-\gamma} - CV_1^{1-\gamma})$$

$$= \frac{1}{1-\gamma} (P_2 V_2^\gamma V_2^{1-\gamma} - P_1 V_1^\gamma V_1^{1-\gamma}) = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{1-\gamma} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

بنابراین روابط حاکم در فرآیند آدیباتیک برگشت پذیر عبارتند از:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-\gamma}$$

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta U = -\delta W$$

۵- فرآیندهای آدیباتیک برگشت ناپذیر

$$\Delta U = -W$$

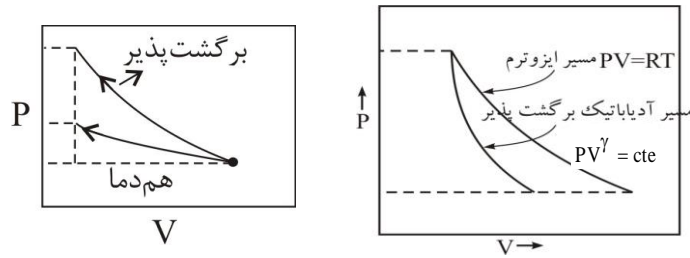
$$, \quad \text{کار داخلی } P_{\text{int}}, \quad \text{کار خارجی } P_{\text{ext}}$$

$$nC_V \Delta T = -P_{\text{ext}} \Delta V$$

$$nC_V = (T_2 - T_1) = -P_{\text{ext}} \left(\frac{nRT_2}{P_{\text{ext}}} - \frac{nRT_1}{P_{\text{int}}} \right) \Rightarrow T_2 = T_1 \left[\frac{C_V + \left(\frac{P_{\text{ext}}}{P_{\text{int}}} \right) R}{C_P} \right]$$

۱-۲-۵- مقایسه تحول ایزوترم برگشت پذیر و آدیباتیک برگشت پذیر

برای یک کاهش فشار معین، کار انجام شده در اثر تحول تک دما بیش از کار انجام یافته توسط تحول آدیباتیک می‌باشد. برای کاهش حجم و رسیدن به یک حجم مشخص کار انجام شده در حالت آدیباتیک بیشتر از حالت همدماست.



مقایسه تحول ایزوترم برگشت پذیر و آدیباتیک برگشت پذیر در کاهش فشار معین

این اختلاف به علت این واقعیت است که در طی یک تحول تک دما، سیستم برای ثابت نگه داشتن دما گرما جذب می کند در صورتیکه در طی تحول آدیباتیک سیستم نمی تواند گرما جذب کند، لذا دمای سیستم کاهش می یابد.

۱-۳- گرمای تشکیل (ΔH_f) و گرمای واکنش (ΔH_r)

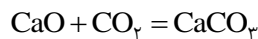
گرمای تشکیل عبارت است از تغییر آنتالپی در طی انجام واکنشی که یک مول جسم مورد نظر، از عناصر سازنده اش تشکیل شود.

با توجه به تعریف فوق گرمای تشکیل عناصر خالص در $298^\circ K$ ، صفر است.

از روی گرمای تشکیل عناصر می توان ΔH ناشی از یک واکنش شیمیایی را بدست آورد:

$$\Delta H_{\text{reaction}} = \sum \Delta H_{\text{product}} - \sum \Delta H_{\text{reactant}}$$

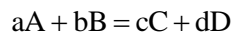
مثلاً برای واکنش



$$\Delta H_r = \Delta H_{f\text{CaCO}_3} - \Delta H_{f\text{CO}_2} - \Delta H_{f\text{CaO}}$$

(منظور از ΔH_f ناشی از یک واکنش شیمیایی، تفاوت آنتالپی مواد محصول و واکنش دهنده است)

معمولاً گرمای تشکیل مواد در $298^\circ K$ موجود می باشد بنابراین گرمای واکنش نیز در دمای $298^\circ K$ از این طریق بدست می آید و می دانیم که با تغییر دمای واکنش ΔH واکنش نیز تغییر می کند. بنابراین باید ΔH را به روشی در دماهای دیگر نیز بدست آوریم. مثلاً برای واکنش



$$\Delta H_{rT} = \Delta H_{r298} + n \int_{298}^T \Delta C_p dT$$

که ΔC_p برابر است با:

$$\Delta C_p = dC_{pD} + cC_{pC} - bC_{pB} - aC_{pA}$$

نکته: ممکن است به جای دمای 298 دمای دیگری داده شود که باز به همین ترتیب عمل می کنیم.

دو حالت خاص:

۱- محاسبه گرمای لازم برای گرم کردن n مول از جسم از دمای T_1 تا T_2 وقتی تغییر فازی نداریم:

$$\Delta H = n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

۲- محاسبه گرمای لازم برای گرم کردن جسم از دمای T_1 تا T_2 وقتی در دمای T_m ذوب داریم. (که T_m در محدوده

دمایی T_1 تا T_2 قرار دارد) گرمای نهان ذوب $L_f =$

$$\Delta H = n \int_{T_1}^{T_m} C_p^s dT + nL_f + n \int_{T_m}^{T_2} C_p^l dT$$

نکته: در صورتیکه فرآیند سرد کردن باشد L_f (گرمای نهان ذوب) با علامت منفی وارد می شود.

۱-۳-۱ آنتالپی به عنوان تابعی از فشار: همانطور که می‌دانیم H علاوه بر T با تغییرات P هم تغییر می‌کند و تنها زمانیکه فشار ثابت باشد یا گاز ایده‌آل باشد ($dH = nC_p dT$) می‌توان H را مستقل از فشار فرض کرد. ولی اگر تاثیر تغییرات فشار را بر روی H محاسبه کنیم یعنی سیستم را سیستمی غیر از گاز ایده‌آل در نظر گرفته و فرض کنیم تنها مشخصه سیستم بسته بودن آن است، داریم:

$$H = H(T, P) \Rightarrow$$

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP = C_p dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \Rightarrow$$

$$dH = T dS + V dP \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V \Rightarrow$$

$$dH = C_p dT + \left[T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V \right] dP \Rightarrow$$

$$dH = C_p dT + \left[T \left(-\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P + V \right] dP \Rightarrow$$

$$dH = C_p dT + [-T\alpha V + V] dP \Rightarrow$$

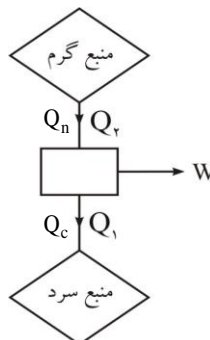
$$dH = C_p dT + V(1 - \alpha T) dP$$

در رابطه فوق جمله اول نشان‌دهنده تغییرات H با تغییرات دما و جمله دوم نشان‌دهنده تغییرات H با تغییرات فشار می‌باشد.

نکته: در گازهای ایده‌آل که $\alpha = \frac{1}{T}$ است می‌توان از جمله دوم رابطه فوق صرفه‌نظر کرد. بنابراین در گازهای ایده‌آل آنتالپی از فشار مستقل است.

۱-۴- ماشین‌های حرارتی

ماشین‌هایی هستند که گرما را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این ماشین‌ها در یک سیکل مقدراری گرما از منبع گرم گرفته (Q_2)، مقداری از آن را کار انجام می‌دهند (W) و مابقی گرما (Q_1) را به منبع سرد می‌دهد.

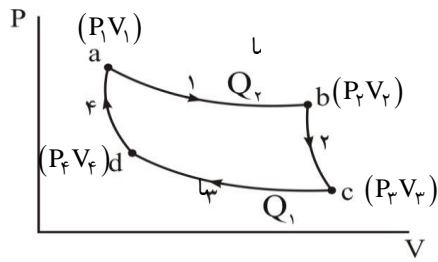


$$W = Q_2 - Q_1 \quad \text{کار ماشین حرارتی:}$$

بازده ماشین‌های حرارتی:

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}} \quad (12)$$

یک ماشین ایده‌آل که در بین ماشین‌های حرارتی دارای بیشترین راندمان است ماشین کارنو نام دارد. این ماشین محتوی گازی ایده‌آل است که به طور سیکلی عمل می‌کند و مشتمل بر چهار تحول به صورت زیر است که بر گاز ایده‌آل درون سیستم اعمال گردیده و در نتیجه مقداری کار و حرارت بین سیستم و محیط رد و بدل می‌شود:



- ۱- انبساط تک دما و برگشت پذیر گاز ایده آل (T_2)
- ۲- انبساط آدیاباتیکی و برگشت پذیر گاز ایده آل
- ۳- انقباض تک دما و برگشت پذیر گاز ایده آل (T_1)
- ۴- انقباض آدیاباتیکی و برگشت پذیر گاز ایده آل

$$a - b : \Delta U_{ab} = 0 \Rightarrow Q_{ab} = W_{ab} = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$b - c : Q_{bc} = 0 \Rightarrow \Delta U = -W_{bc} \rightarrow W_{bc} = -nC_V (T_2 - T_1)$$

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_1 V_3^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$c - d : \Delta U_{cd} = 0 \Rightarrow Q_{cd} = W_{cd} = nRT_1 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$d - a : Q_{da} = 0 \Rightarrow \Delta U_{da} = -W_{da} \Rightarrow W_{da} = -nC_V (T_1 - T_2)$$

$$T_2 V_1^{\gamma-1} = T_1 V_4^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

کاری که ماشین کارنو طی یک چرخه تولید می کند عبارتست از:

$$W = W_{ab} + W_{bc} + W_{cd} + W_{da}$$

$$\Rightarrow W = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} + nRT_1 \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3} \Rightarrow W = R(T_2 - T_1) \ln \frac{V_2}{V_1}$$

همواره در ماشین کارنو $V_a V_c = V_b V_d$ برقرار است.

بازده ماشین کارنو عبارتست از:

دمای منبع سرد : T_1

دمای منبع گرم : T_2

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

نکته: به طور کلی در تحولات چرخه کارنو همواره رابطه $\sum_i \left(\frac{Q_i}{T_i} \right)_{rev} = 0$ برقرار می باشد.

۱-۵- فرآیندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر (خودبه خودی)

اگر در یک سیستم در طول زمان هیچ تغییری ایجاد نشود به این حالت، حالت تعادل گفته می شود و چنانچه سیستمی با محیط خود در حال تعادل باشد، بدون دخالت عامل خارجی هیچ تغییری در سیستم به وجود نمی آید و در همان حالتی که بود

باقی می ماند. اما اگر چنانچه سیستمی با محیط خود در تعادل نباشد، به طور خود به خود میل به، تغییر حالت به سمت حالت تعادل خواهد داشت.

تحولی که در طی آن یک سیستم به طور خود به خود از حالت غیر تعادلی به سمت حالت تعادلی برود «تحول خود به خود یا طبیعی» نامیده می شود. از آنجا که چنین تحولی بدون دخالت عامل خارجی نمی تواند در جهت عکس انجام شود. به آن تحول «برگشت ناپذیر» گفته می شود. تحول برگشت ناپذیر، جهت انجام به نیروی محرکه خارجی نیاز ندارد. در تحول برگشت پذیر سیستم از حالت تعادل فاصله می گیرد. بنابراین از آنجائیکه این تحول خلاف میل طبیعی سیستم است، نیاز به نیروی محرکه خارجی، جهت انجام دارد.

تحلیل رفتن سیستم (Degradation Of system): هر گاه سیستمی در یک فرآیند خود به خود کار انجام دهد و حرارت تولید کند، در این صورت با ادامه پیدا کردن تحول ضمن اینکه سیستم به حالت تعادل خود نزدیکتر می شود، قابلیت سیستم برای ادامه این تغییر حالت خود به خود کاهش می یابد و سرانجام وقتی سیستم به حالت تعادل خود برسد قابلیت آن برای انجام کار بیشتر، تمام شده و به صفر می رسد. لذا در تحول خودبه خود (برگشت ناپذیر) ما همواره با پدیده تحلیل رفتن سیستم مواجه خواهیم بود.

در تحولات برگشت پذیر تحلیل رفتن سیستم نداریم. بنابراین اختلاف بین کار انجام شده در تحول برگشت ناپذیر و کار انجام شده در تحول برگشت پذیر در حقیقت به سبب انرژی مکانیکی می باشد که به علت ماهیت خودبه خودی، تحلیل رفته و به انرژی حرارتی تبدیل شده است.

پس چنانچه سیستم کار انجام دهد، کار انجام شده در تحول برگشت پذیر حداکثر کار می باشد.

نکته: چنانچه محیط بر روی سیستم کار انجام دهد، عکس مطالب گفته شده صادق می باشد و کار فرآیند برگشت ناپذیر، حداکثر است.

نکته: تحولی که حداکثر کار را دارا باشد، دارای گرمای مبادله شده حداکثر نیز می باشد (چراکه انرژی داخلی یک سیستم بسته همواره مقداری ثابت است).

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= q_{rev} - W_{rev} \\ \Delta U &= q - W \end{aligned} \right\} \Rightarrow q_{rev} - W_{rev} = q - W \Rightarrow q_{rev} - q = W_{rev} - W$$

۱-۶- قانون دوم ترمودینامیک و آنتروپی

آنتروپی معیاری جهت سنجش خود بخودی تحول هاست که تابع حالت بوده و دیفرانسیل کامل آن به صورت $dS = \frac{\delta Q}{T}$ تعریف می شود.

طی تحولات برگشت پذیر، مجموع آنتروپی های سیستم و محیط صفر است $(\Delta S_{env} + \Delta S_{sys} = 0)$.

ولی در تحولات برگشت ناپذیر مجموع آنتروپی ها سیستم و محیط بزرگتر از صفر می باشد $(\Delta S_{irr} = \Delta S_{env} + \Delta S_{sys} > 0)$. مقدار افزایش آنتروپی یک تحول، معیاری از میزان تحلیل رفتن انرژی سیستم یا میزان برگشت ناپذیری فرآیند می باشد.

نکته: آنتروپی هیچگاه از بین نمی رود بلکه همواره یا ثابت است یا افزایش می یابد.

نکته: از آنجائیکه آنتروپی تابع حالت است تغییر آنتروپی سیستم (ΔS_{sys}) در تحول برگشت پذیر و برگشت ناپذیر باهم برابر است و برابر است با:

$$\Delta S_{sys} = \frac{Q_{rev}}{T_{sys}}$$

Q_{rev} : گرمای مبادله شده در فرآیند برگشت پذیر

نکته: تغییر آنتروپی برگشت ناپذیری (ΔS_{irr}) به صورت زیر بدست می آید: در صورتیکه سیستم کار انجام دهد.

$$\Delta S_{\text{irr}} = \frac{\pm(Q_{\text{rev}} - Q)}{T_{\text{sys}}}$$

در صورتیکه بر روی سیستم کار انجام شود.

Q: گرمایی که از محیط گرفته شده یا به محیط داده می‌شود و به علت پدیده تحلیل رفتن انرژی در حالتیکه سیستم کار انجام دهد و یا بالعکس با گرمای منبع در حالت برگشت پذیر برابر نیست.

نکته: تغییر آنتروپی محیط را تنها برای فرآیندهای برگشت پذیر که در آنها $\Delta S_{\text{irr}} = 0$ است و گرمای مبادله شده بین سیستم و محیط همواره برابر Q_{rev} است، می‌توان محاسبه نمود.

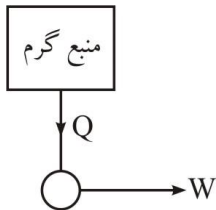
نکته: طبق تعاریف مذکور، در تحول برگشت ناپذیر (خودبخود) در حالیکه سیستم از حالت غیر تعادلی به سمت حالت تعادل می‌رود، آنتروپی سیستم مرتباً افزایش می‌یابد. وقتی سیستم به حالت تعادل برسد حداکثر آنتروپی را خواهد داشت. بنابراین آنتروپی می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین حالت تعادل نیز باشد.

نکته: یک سیستم بسته با انرژی داخلی و حجم ثابت وقتی در حال تعادل است که آنتروپی آن بیشترین مقدار باشد.

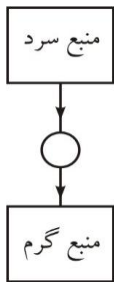
نکته: یک سیستم بسته با آنتروپی و حجم ثابت وقتی در حال تعادل است که انرژی داخلی آن کمترین مقدار باشد، یعنی پائین‌ترین سطح انرژی را داشته باشد.

۱-۶-۱- دو بیان از قانون دوم ترمودینامیک

۱- بیان کلوبین یا تامسون: ممکن نیست که در یک تحول سیکلی مقداری گرما از یک منبع حرارتی دریافت شود و تماماً به کار تبدیل گردد، بدون اینکه قسمتی از گرما به یک منبع سرد منتقل شود.



۲- بیان کلاسیوس: ممکن نیست که در یک فرآیند سیکلی مقداری گرما از یک منبع سرد به یک منبع گرم منتقل شود بدون اینکه مقدار معینی کار به گرما تبدیل شود.



۱-۶-۲- تلفیق قانون اول و دوم ترمودینامیک

طبق قانون اول ترمودینامیک برای یک سیستم بسته همواره: $du = \delta Q - \delta W$

طبق قانون دوم ترمودینامیک برای تحولات برگشت پذیر همواره: $dS = \frac{\delta Q}{T} \Rightarrow \delta Q = TdS$

طبق تعریف کار انبساطی همواره: $\delta W = pdV$

با توجه به سه مطلب فوق، هرگاه یک سیستم بسته، تحت تحول برگشت پذیری قرار گیرد و کار تنها تغییر حجم انجام شود (کار انبساطی) همواره داریم:

$$dU = TdS - PdV$$

۱-۶-۳- محاسبه تغییرات آنتروپی

دو رابطه مهم ترمودینامیکی را جهت تعیین تغییرات آنتروپی می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\left. \begin{aligned} dU &= TdS - PdV \\ dU &= nC_V dT \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta S = nC_V \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V}$$

$$\Rightarrow \Delta S = \int_{T_1}^{T_2} nC_V \frac{dT}{T} + nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

و اگر C_V تابع دما نباشد:

$$\Delta S = nC_V \ln \frac{T_2}{T_1} + nR \ln \frac{V_2}{V_1}$$

رابطه‌ای دیگر را می توان با استفاده از تابع آنتروپی به صورت زیر بدست آورد:

$$\left. \begin{aligned} H &= U + PV \Rightarrow dH = dU + PdV + VdP = TdS + VdP \\ dH &= nC_P dT \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$dS = nC_P \frac{dT}{T} - nR \frac{dP}{P} \Rightarrow \Delta S = \int_{T_1}^{T_2} nC_P \frac{dT}{T} - nR \ln \frac{P_2}{P_1}$$

و اگر C_P تابع دما نباشد:

$$\Delta S = nC_P \ln \frac{T_2}{T_1} - nR \ln \frac{P_2}{P_1}$$

حال چند حالت خاص را بررسی می کنیم:

۱- تغییرات آنتروپی در اثر تغییر دما وقتی تغییر فازی نداریم در فشار ثابت عبارتست از:

$$\Delta S = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P}{T} dT$$

۲- تغییرات آنتروپی در اثر تغییر دما وقتی تغییر فاز در دمای T_m رخ می دهد، در فشار ثابت عبارتست از :

$$\Delta S = n \int_{T_1}^{T_m} \frac{C_P^s}{T} dT + \frac{nL_f}{T_m} + n \int_{T_m}^{T_2} \frac{C_P^l}{T} dT$$

۳- تغییر آنتروپی واکنش در دمای T_2 در صورتیکه تغییر آنتروپی آن در دمای T_1 مشخص باشد:

$$\Delta S_{T_2} = \Delta S_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta C_P}{T} dT$$

$$\Delta C_P = \sum C_{P(\text{product})} - \sum C_{P(\text{reactant})}$$

۱-۶-۳-۱- آنتروپی سیستم های دیگر به غیر از گاز ایده آل

تاکنون روابط، با فرض اینکه سیستم، گاز ایده آل بوده است. بدست آمدند، اما اگر سیستم، گاز ایده آل نباشد و تنها مشخصه آن بسته بودنش باشد تغییر آنتروپی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta S = \underbrace{\int_{T_1}^{T_2} \frac{nC_P}{T} dT}_{(1)} + \underbrace{\int_{P_1}^{P_2} -\alpha V dP}_{(2)}$$

(۱): تغییر آنتروپی در اثر تغییر دما از T_1 به T_2 در فشار ثابت

(۲): تغییر آنتروپی در اثر تغییر فشار از P_1 به P_2 در دمای ثابت

۱-۶-۳-۲- دو قانون تجربی جهت تعیین آنتروپی

همواره جهت تعیین آنتروپی مواد دو قانون تجربی وجود دارد:

۱- قانون ریچارد: آنتروپی ذوب فلزات متراکم (FCC یا HCP) مقدار مشابهی برابر $\frac{\text{cal}}{\text{mol.k}}$ است.

$$\Delta S_m = \frac{\Delta H_m}{T_m} \cong \frac{\text{cal}}{\text{mol.k}} \sim \frac{\text{j}}{\text{deg ree}}$$

۲- قانون تروتن: آنتروپی تبخیر تمام فلزات تقریباً مقداری یکسان است که این مقدار $\frac{\text{cal}}{\text{mol.k}}$ است.

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_{\text{eva}}}{T_b} \sim \frac{\text{cal}}{\text{mol.k}} \sim \frac{\text{j}}{\text{deg ree}}$$

نکات کلیدی فصل اول

- ۱- در صورتیکه سیستم بر روی محیط کار انجام دهد، کار تحول برگشت پذیر حداکثر می باشد و چنانچه محیط بر روی سیستم کار انجام دهد، کار تحول برگشت ناپذیر حداکثر می باشد.
- ۲- روابط موجود برای محاسبه تغییرات آنتروپی عبارتند از:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta S = nC_V \ln \frac{T_2}{T_1} + nR \ln \frac{V_2}{V_1} \\ \Delta S = nC_P \ln \frac{T_2}{T_1} - nR \ln \frac{P_2}{P_1} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{تحول ایزوثرم: } \Delta S = -nR \ln \frac{P_2}{P_1} \\ \text{تحول هم فشار: } \Delta S = nC_P \ln \frac{T_2}{T_1} \\ \text{تحول هم حجم: } \Delta S = nC_V \ln \frac{T_2}{T_1} \end{array} \right.$$

- ۳- در مقایسه انبساط تک دما و آدیباتیک، کار انجام شده در اثر تحول تک دما بیش از کار انجام یافته توسط تحول آدیباتیک می باشد.
- ۴- در مقایسه انقباض تک دما و آدیباتیک، کار انجام شده در اثر تحول آدیباتیک بیش از کار انجام یافته توسط تحول تک دماست.
- ۵- روابط $du = nC_V dT$ و $dH = nC_P dT$ همواره برای گازهای ایده آل در تمامی فرآیندها برقرار می باشند ولی برای سایر سیستمها تنها در فشار ثابت صدق می کنند.
- ۶- همواره در تحولات برگشت ناپذیر با پدیده تحلیل رفتن انرژی روبرو هستیم.
- ۷- ضریب انبساط حجمی و ضریب تراکم گازهای ایده آل به ترتیب $\frac{1}{T}$ و $\frac{1}{P}$ می باشند.
- ۸- تغییر آنتروپی تنها برای فرآیندهای برگشت پذیر که در آنها $\Delta S_{\text{irr}} = 0$ می باشد و گرمای مبادله شده برابر q_{rev} است، به طور مستقیم قابل محاسبه است.
- ۹- تحول برگشت پذیر بی درو، تحول با آنتروپی ثابت یا تک آنتروپی می باشد.
- ۱۰- در مواد کندانس (α ناچیز) و گازهای کامل ($\alpha = \frac{1}{T}$)، ΔH تابع P نمی باشد.
- ۱۱- می توان W و Q فرآیندها را به طور خلاصه آورد.
- ۱۲- η حالت ماشین گرمایی و یخچال

سوالات چهارگزینه‌ای فصل اول

۱- گازی کامل با فشار P_1 و درجه حرارت T_1 و حجم V_1 تا حجم V_2 یک بار به صورت (a) همدمای برگشت پذیر و یک بار به صورت (b) آدیاباتیکی برگشت پذیر، متراکم می‌گردد. مشخص کنید کدام یک از گزینه‌های زیر صحیح است؟ (مهندسی مواد - ۸۴)

$$W_a > W_b, P_{ra} > P_{rb} \quad (2) \qquad W_a > W_b, P_{ra} < P_{rb} \quad (1)$$

$$W_a < W_b, P_{ra} < P_{rb} \quad (4) \qquad W_a < W_b, P_{ra} > P_{rb} \quad (3)$$

۲- بر اثر تجزیه یک گرم گاز O_3 به گاز O_2 در فشار ثابت در دمای $298^\circ K$ مقدار $2/97$ کیلوژول گرما به محیط اطراف منتقل می‌شود. گرمای استاندارد واکنش $2O_3(g) = 3O_2(g)$ در دمای $298^\circ K$ چقدر است؟ (مهندسی مواد - ۸۴)

$$(1) -285 \text{ kJ} \qquad (2) 427/5 \text{ kJ} \qquad (3) 285 \text{ kJ} \qquad (4) -427/5 \text{ kJ}$$

۳- $4/5 \text{ g}$ گاز کامل متان (CH_4) در داخل یک سیلندر در حالت تعادل قرار دارد. به طوری که دمای آن برابر $31^\circ K$ و حجم آن $12/7 \text{ lit}$ است و پیستون بالای آن نیز فشاری برابر $0/56 \text{ atm}$ بر گاز وارد می‌کند. چنانچه با کاستن ناگهانی فشار روی گاز تا $0/266 \text{ atm}$ یک فرآیند انبساط هم‌دما، حجم نهایی تعادلی گاز را به 16 lit برساند، کار انجام شده و تغییرات آنتروپی گاز را طی فرآیند محاسبه نمایید؟ (مهندسی مواد - ۸۴)

$$W = 167 \text{ J}, \Delta S = 0/45 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (2) \qquad W = 167 \text{ J}, \Delta S = 0/54 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$W = 87/78 \text{ J}, \Delta S = 0/54 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (4) \qquad W = 87/78 \text{ J}, \Delta S = 0/45 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (3)$$

۴- دو مول گاز کامل تک اتمی در دمای $298^\circ K$ و فشار 3° atm قرار دارد. اگر ناگهان این گاز در یک مسیر آدیاباتیکی غیر رورسیبل، به فشار 1° atm منبسط شود، دمای نهایی گاز چه خواهد بود؟ می‌دانیم که این تحول 500 کالری کار انجام شده است. $R = 2 \frac{\text{cal}}{\text{mole} \cdot ^\circ K}$ (مهندسی مواد - ۸۴)

$$(1) \approx 192^\circ K \text{ دمای نهایی گاز} \qquad (2) \approx 214^\circ K \text{ دمای نهایی گاز}$$

$$(3) \approx 280^\circ K \text{ دمای نهایی گاز} \qquad (4) \text{ دمای گاز تغییری نمی‌کند.}$$

۵- یک سیستم ترمودینامیکی به وسیله یک منبع حرارتی در دمای ثابت T قرار دارد. در یک تحول سیستم Q کالری گرما از منبع جذب کرده و W کالری کار انجام می‌دهد. اگر ماکزیمم کار ممکن در این تحول را W_m بنامیم، کدام یک از پاسخ‌های زیر در مورد تغییر کل آنتروپی سیستم و منبع صحیح است؟ (مهندسی مواد - ۸۴)

$$\Delta S = -\frac{\Delta U + W}{T} \quad (2) \qquad \Delta S = 0 \quad (1)$$

$$\Delta S = -\frac{W_m - W}{T} \quad (4) \qquad \Delta S = -\frac{\Delta U + W_m}{T} \quad (3)$$

۶- یک مول گاز کامل در دمای $100^\circ K$ ، ده متر مکعب حجم دارد. اگر در دمای ثابت، فشار روی این گاز ناگهان ده برابر گردد، W و ΔS سیستم را حساب نمایید. (مهندسی مواد - ۸۳)

$$W = -1914 \text{ J}, \Delta S = -74/79 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (2) \qquad W = -7479 \text{ J}, \Delta S = -19/14 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (1)$$

$$W = -7479 \text{ J}, \Delta S = -74/79 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (4) \qquad W = -1914 \text{ J}, \Delta S = -19/14 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (3)$$

۷- از سه مول قلع مذاب در فشار ثابت $P=1(\text{atm})$ و دمای 520°K چه مقدار حرارت بگیریم تا یک مول آن جامد گردد؟ (مهندسی مواد- ۸۳)

$$\Delta H_m = 7070 \frac{\text{J}}{\text{mole}}, \quad T_m = 505^\circ\text{K}$$

$$C_{P(s)} = 18/5 + 20 \times 10^{-3} T \frac{\text{J}}{\text{mole.k}}, \quad C_{P(l)} = 34/7 - 9/2 \times 10^{-3} T \frac{\text{J}}{\text{mole.k}}$$

$22559/25\text{J}$ (۴) $8419/25\text{J}$ (۳) $7519/75\text{J}$ (۲) $1349/25\text{J}$ (۱)

۸- یک کیلوگرم مس در نقطه ذوب آن 1083°C و یک کیلوگرم آلومینیوم در نقطه ذوب آن 900°C به طور جداگانه منجمد می‌شوند. گرمای نهان ذوب Cu و Al به ترتیب 12970 و 10700 ژول بر مول است. برای مقدار گرمای آزاد شده در این سیستم‌ها بدون در نظر گرفتن علامت آن‌ها گزینه صحیح کدام است؟ (مهندسی مواد- ۸۳)

$$M_{\text{Al}} = 27\text{g} \quad \text{و} \quad M_{\text{Cu}} = 63/5\text{g}$$

جرم مولکولی

(۱) گرمای انجماد مس $1/24$ برابر گرمای انجماد آلومینیوم هم وزن است.

(۲) گرمای انجماد آلومینیوم حدود نصف مقدار گرمای انجماد مس هم وزن آن است.

(۳) گرمای حاصل از انجماد آلومینیوم حدود دو برابر گرمای انجماد مس هم وزن آن است.

(۴) نسبت گرماها به نقطه ذوب برحسب $^\circ\text{K}$ تقریباً مقداری ثابت است.

۹- در داخل یک سیلندر و پیستون نیم مول کربنات کلسیم در دمای 70°C و فشار یک اتمسفر طبق واکنش $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ تجزیه شده است. کار انجام شده به وسیله این تجزیه را محاسبه نمایید. فرض کنید که CO_2 به صورت گاز ایده‌آل رفتار می‌کند؟ (مهندسی مواد- ۸۳)

$$235/7 \text{ ژول} \quad (1) \quad 4044/7 \text{ ژول} \quad (2) \quad 6038/5 \text{ ژول} \quad (3) \quad 8049/7 \text{ ژول} \quad (4)$$

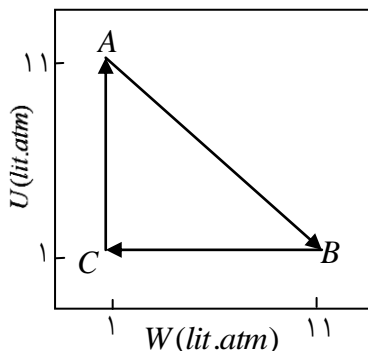
۱۰- یک مول از یک گاز ایده‌آل تک اتمی از دمای 273°K تحت فشار ثابت ۱ اتمسفر به آرامی تا دمای 1365°K گرم می‌شود. مقدار تغییرات آنروپی محیط در تبادل حرارتی با این گاز چقدر است؟ (مهندسی مواد- ۸۳)

$$20/07 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (1) \quad 33/45 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (2) \quad -20/07 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (3) \quad -33/45 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (4)$$

۱۱- حجم 52 میلی مول از یک گاز ایده‌آل در اثر انقباض برگشت پذیر بطور ایزوتروم در دمای 260°K به یک سوم مقدار اولیه کاهش یافته است. مقدار گرمای تولید شده در این تحول برابر است با: (مهندسی مواد- ۸۲)

$$2365 \text{ J} \quad (1) \quad 123 \text{ J} \quad (2) \quad -2365 \text{ J} \quad (3) \quad -253/15 \text{ J} \quad (4)$$

۱۲- شکل زیر تغییرات انرژی داخلی برحسب کار انجام شده را در یک سیکل برای یک گاز ایده‌آل نشان می‌دهد. تحول انجام شده در مسیر AB چیست؟ (مهندسی مواد ۸۲)



(۱) آدیباتیک (بی درو)

(۲) دمای ثابت

(۳) فشار ثابت

(۴) حجم ثابت

۱۳- یک مول گاز ایده آل از فشار 1 atm و دمای 100 درجه کلوین به صورت انبساط آزاد به داخل خلاء منبسط می شود تا حجم آن دو برابر شود. مقدار تغییرات آنتروپی و گرمای مبادله شده توسط گاز برابر است با:

(مهندسی مواد-۸۲)

$$\Delta S = 5/76 \text{ J/K} \quad (2)$$

$$q = 0$$

$$\Delta S = 5/68 \text{ J/K} \quad (4)$$

$$q = 0$$

$$\Delta S = 5/76 \text{ J/K} \quad (1)$$

$$q = 576 \text{ J}$$

$$\Delta S = 5/68 \text{ J/K} \quad (3)$$

$$q = 568 \text{ J}$$

۱۴- یک تکه نیکل با دمای T_{Ni} درون مقداری روغن با دمای T_{oil} ($T_{Ni} > T_{oil}$) در یک ظرف آدیاباتیک قرار داده می شود. پس از مدت زمانی دما به $T_{eq(1)}$ خواهد رسید. اگر در آزمایش دیگری این تکه نیکل در کمال آهستگی وارد روغن شود، پس از قرار گرفتن تمامی نیکل در روغن، تعادل حرارتی در دمای $T_{eq(2)}$ برقرار خواهد شد، در این صورت کدام رابطه در آن صدق می کند؟

(مهندسی مواد ۸۱)

$$T_{eq(2)} > T_{eq(1)} \quad (2)$$

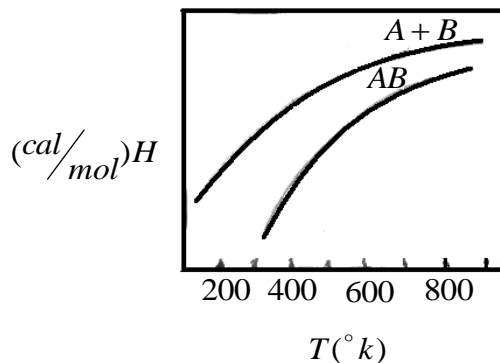
$$T_{eq(2)} \geq T_{eq(1)} \quad (4)$$

$$T_{eq(2)} < T_{eq(1)} \quad (1)$$

$$T_{eq(2)} \leq T_{eq(1)} \quad (3)$$

۱۵- با توجه به شکل زیر، که تغییر آنتالپی مخلوط کندانس $A+B$ و ترکیب کندانس AB را بر حسب دما نشان می دهد، چنانچه مخلوط $B+A$ با دمای اولیه 400 K به صورت آدیاباتیک واکنش نمایند، در این صورت دمای نهایی سیستم تقریباً چقدر است؟ (بر حسب کلوین)

(مهندسی مواد ۸۱)



۶۰۰ (۱)

۷۹۰ (۲)

۹۰۰ (۳)

۹۰۰ از بیش (۴)

(مهندسی مواد ۸۱)

۱۶- کدام گزینه بیان کننده قانون دوم ترمودینامیک است؟

(۱) انتقال گرما از جسم سرد به جسم گرم غیر ممکن است.

(۲) در طبیعت ماشینی که بدون سوخت کار کند وجود ندارد.

(۳) در طبیعت ماشینی که بتواند تمام گرمای دریافتی را به کار تبدیل کند وجود ندارد.

(۴) تمام انرژی گرمایی را می توان به انرژی درونی تبدیل نمود.

۱۷- آنتروپی آرگون نسبت به دما، با تقریب رضایت بخشی بر طبق رابطه زیر تغییر می کند. در این حالت کدام گزینه c_p گاز آرگون بر حسب دما را بیان می کند؟

(مهندسی مواد ۸۱)

$$S_T = 36/36 + 20/79 \ln(T) \text{ (J/K)}$$

$$20/79 \text{ J/K} \quad (2)$$

$$36/36 \text{ J/K} \quad (4)$$

$$20/79 \text{ T J/K} \quad (1)$$

$$36/36 + 20/79 \text{ T J/K} \quad (3)$$

۱۸- با توجه به اطلاعات مسأله اختلاف آنتروپی مولی آب جامد و مایع در دمای 400K و فشار ثابت (مهندسی مواد ۸۱) چند J/degree است؟ $(\Delta S_{f.o. (S \rightarrow L)})_{\text{atm}}$

$$\Delta H_{m.H_2O} = 6008 \text{ J/mole}, T_{m.H_2O} = 273^\circ\text{K}$$

$$C_{P(S)H_2O} = 38 \text{ J/deg.ree.mole}, C_{P(L)H_2O} = 75/44 \text{ J/deg.ree.mole}$$

$$22/00 \quad (2) \quad 14/30 \quad (1)$$

$$63/52 \quad (4) \quad 36/30 \quad (3)$$

۱۹- آنتروپی استاندارد روی در 298°K برابر $41/63 \text{ J/mol.K}$ است. آنتروپی استاندارد آن در دمای 1023°K چند (مهندسی مواد ۸۱) J/mol.K می باشد؟

$$\Delta H_f = 7/28 \text{ kJ/mol at } T_f = 693^\circ\text{K}$$

$$C_{P(zn.s)} = 22/38 + 10/04 \times 10^{-2} \text{ TJ.mol.K}, C_{P(zn)} = 31/38 \text{ J/mol.K}$$

$$52/13 \quad (2) \quad 41/63 \quad (1)$$

$$97/74 \quad (4) \quad 87/24 \quad (3)$$

۲۰- اگر از احتراق کامل $0/24$ گرم گرافیت در فشار ثابت یک اتمسفر و دمای 25 درجه سانتیگراد $7862/6$ ژول گرما تولید شود و نیز از احتراق کامل $0/14$ گرم اکسید کربن (CO) در شرایط فوق $1413/7$ ژول گرما آزاد گردد، گرمای تشکیل استاندارد CO چند ژول است؟ (مهندسی مواد ۸۱)

$$(M_C = 12 \text{ gr})$$

$$-393130 \quad (2) \quad 6448/9 \quad (1)$$

$$-110390 \quad (4) \quad -282740 \quad (3)$$

۲۱- مقدار 180 گرم آب در دمای جوش آنقدر حرارت می بیند تا تماماً تبخیر شود. با فرض اینکه بخار آب رفتار گاز کامل را داشته باشد و با استفاده از اطلاعات زیر، تغییر انرژی داخلی سیستم بر حسب KJ کدام است؟

(مهندسی مواد ۸۰)

$$\Delta H_{\text{vap}} = 40/6 \text{ KJmol}^{-1}, R = 8/314 \text{ JK}^{-1} \text{mol}^{-1}, M_{H_2O} = 18 \text{ g mol}^{-1}$$

$$406 \quad (2) \quad 0 \quad (1)$$

$$375 \quad (4) \quad 437 \quad (3)$$

۲۲- اگر گازی ایده آل در دوفراآیند جداگانه، یک بار تحت فرآیند ایزوترم برگشت پذیر بار دیگر تحت فرآیند آدیاباتیکی برگشت پذیر، منبسط گشته و فشار آن در هر دو فرآیند به اندازه یکسان ΔP کاهش یابد، در این صورت در فرآیند آدیاباتیکی درجه حرارت نهایی از فرآیند ایزوترم بوده و کار انجام شده از فرآیند ایزوترم خواهد بود. (مهندسی مواد ۸۰)

$$(1) \text{ کمتر، نیز کمتر} \quad (2) \text{ کمتر، بیشتر}$$

$$(3) \text{ بیشتر، نیز بیشتر} \quad (4) \text{ بیشتر، کمتر}$$

۲۳- یک گاز کامل در دمای 250°K و فشار یک اتمسفر، حجم 15 دسی متر مکعب را اشغال می کند. اگر حجم این گاز به شکل ایزوتروم به آرامی تا $6/58$ دسی متر مکعب کاهش یابد، تغییر آنتروپی آن کدام است؟

(مهندسی مواد ۸۰)