

باسمه تعالی



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

درسنامه ترمودینامیک (1)

استاد مربوطه :

دکتر امیرمحمد جدیدی

فهرست مطالب

5	فصل اول
5	مقدمه : علم ترمودینامیک
5	سیستم ترمودینامیکی و حجم کنترل
5	مرز سیستم
6	خواص سیستم
6	فرایند
7	نمودار فرایند
7	انواع فرایندها
8	سیکل
8	قانون صفرم ترمودینامیک
8	قانون اول ترمودینامیک
8	قانون دوم ترمودینامیک
8	قانون سوم ترمودینامیک
9	خواص ماده خالص
10	نقطه بحرانی
11	کیفیت
12	خواص مستقل ماده خالص
13	جداول خواص ترمودینامیکی
17	گاز کامل
17	معادله حالت
17	انحراف از حالت گاز ایده آل
21	فصل دوم
21	کار و گرما
21	کار ترمودینامیکی
22	کار انجام شده در مرز متحرک یک سیستم تراکم پذیر ساده
23	کار در فرایندهای مختلف
23	انواع کار
25	انتقال حرارت
32	فصل سوم
32	قانون اول ترمودینامیک

32	قانون اول ترمودینامیک برای جرم کنترلی که یک سیکل را طی می کند
33	قانون اول ترمودینامیک برای تغییر حالت جرم کنترل
36	انرژی داخلی : یک خاصیت ترمودینامیکی
39	آنتالپی
41	گرمای ویژه در حجم ثابت و گرمای ویژه در فشار ثابت
42	انرژی داخلی ، آنتالپی و گرمای ویژه گازهای ایده آل
42	آزمایش ژول
49	فصل چهارم
49	تحلیل قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل باز
49	حجم کنترل و پایستاری جرم
51	قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل
53	فرایند در حالت پایا (sssf)
54	نمونه هایی از فرایند پایا
54	مبدل گرمایی
55	نازل (شیپوره)
55	دیفیوزر (پخش کن)
55	شیر تنظیم جریان (فشار شکن)
55	توربین
56	کمپرسور و پمپ
56	فرایند گذرا یا یکنواخت (usuf)
79	فصل پنجم
79	قانون دوم ترمودینامیک
79	ماشین گرمایی
81	بازده گرمایی
83	منبع گرمایی (Energy Source)
83	بیان کلوین – پلانک
83	بیان کلازیوس
84	فرایند برگشت پذیر
85	عواملی که فرایند را برگشت ناپذیر می کنند:
86	سیکل کارنو
88	مقیاس دمای ترمودینامیکی
93	فصل ششم
93	آنتروپی (Entropy)
93	نامسای کلازیوس
97	انتروپی – خاصیت سیستم

98	.....	انتروپی یک ماده خالص
100	.....	تغییر انتروپی در فرایندهای برگشت پذیر
103	.....	رابطه های خواص ترمودینامیکی
104	.....	تغییر انتروپی جرم کنترل در فرایند برگشت ناپذیر
106	.....	تولید انتروپی
107	.....	اصل افزایش انتروپی
109	.....	تغییر انتروپی جامدات و مایعات
110	.....	تغییرات انتروپی گازهای ایده ال
112	.....	فرایند پلی تروپیک برگشت پذیر برای گاز ایده ال
116	.....	انتروپی به صورت معادله آهنگی
131	.....	راندمان آیزنتروپیک

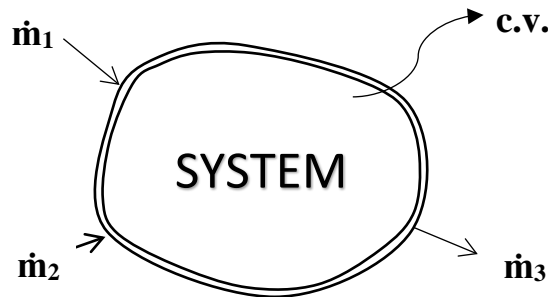
فصل اول

مقدمه : علم ترمودینامیک

علم انرژی و آنتروپی یکی از بهترین تعریف ها برای ترمودینامیک است. چون هنوز این واژه ها را تعریف نکرده ایم، ترمودینامیک را به صورت آشنای زیر تعریف می کنیم: ترمودینامیک علمی است که با گرما و کار و خواصی از ماده که با کار و گرما در ارتباط اند، سروکار دارد. مانند سایر علوم، ترمودینامیک بر مبنای مشاهدات آزمایشی است. در ترمودینامیک، این یافته ها به صورت قوانین اصلی خاصی، به نام قوانین اول، دوم و سوم ترمودینامیک فرمول بندی می شود. علاوه بر این قوانین، قانون صفرم ترمودینامیک را، که قبل از قانون اول می آید، بیان کرده ایم.

سیستم ترمودینامیکی و حجم کنترل

سیستم ترمودینامیکی شامل وسیله یا وسیله هایی است که حاوی کمیت جرم تحت بررسی می باشد. برای تعریف دقیق تر، یک حجم کنترل انتخاب می کنیم، به طوری که شامل ماده و وسایل داخل سطح کنترل باشد. آنچه را که برای حجم کنترل به عنوان خارجی تلقی می شود اطراف یا محیط گویند، که توسط سطح کنترل از حجم کنترل جدا می شود. سطح کنترل می تواند در برابر جریان جرم باز یا بسته باشد. انرژی نیز به صورت انتقال گرما و کار می تواند از سطح کنترل عبور کند. مرزهای سطح کنترل می توانند متحرک یا ساکن باشند. سطح کنترلی را که در برابر جریان جرم بسته است، به طوری که هیچ جرمی نتواند از حجم کنترل فرار کند یا وارد شود، جرم کنترل می گویند و همواره حاوی مقدار جرم ثابتی است.



شکل 1

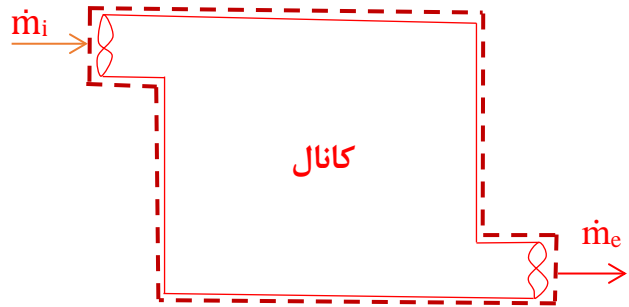
مرز سیستم

مرز واقعی یا فرضی که سیستم را از محیط جدا می کند مرز سیستم می نامند. سیستم ایزوله (منزوی) سیستمی است که به هیچ وجه تحت تاثیر اطراف قرار نمی گیرد. یعنی جرم، گرما یا کار از مرز این سیستم نمی گذرد. اغلب، در تحلیل های ترمودینامیکی با وسیله ای، مانند کمپرسور هوا، سروکار داریم که شامل جریان جرم ورودی، یا خروجی، یا هر دو می باشد. در این تحلیل ها، حجم کنترلی انتخاب می کنیم که وسیله تحت بررسی را فراگیرد. سطح این حجم کنترل را سطح کنترل می گویند، که ممکن است تکانه، و نیز گرما و کار، از آن عبور کند.

به این ترتیب، سطح کنترل کلی حجم کنترلی را مشخص می کند، که ممکن است جرم به داخل یا خارج آن جریان یابد، و جرم کنترل حالت خاصی است که فاقد جریان جرم است. لذا، جرم کنترل همواره حاوی جرم ثابتی است. گاهی برای تفکیک دو حالت ذکر شده، از واژه های سیستم بسته (جرم ثابت) و سیستم باز (شامل جریان جرم) استفاده می شود، در شکل 1-2 نمونه ای از این سیستم ها را مشاهده می کنیم. در اینجا، از واژه سیستم به عنوان یک توصیف کلی برای جرم، وسیله، یا ترکیبی از وسایل استفاده می کنیم، و هنگام انتخاب حجم کنترل آن را با دقت بیشتر تعریف می کنیم. در روش انتخابی، قوانین اول و دوم ترمودینامیک را ابتدا برای جرم کنترل و سپس برای حجم کنترل به کار می بریم.



سیستم بسته



سیستم باز

شکل 1-2 نمونه ای از سیستم بسته و باز

خواص سیستم

مشخصات هر سیستم را خاصیت آن سیستم می گویند. مانند: فشار، دما، حجم، انرژی، آنتروپی و خواص ترمودینامیکی را به دو گروه کلی می توان تقسیم کرد: **خاصیت شدتی** و **خاصیت مقداری**. خاصیت شدتی مستقل از جرم است، مقدار یک خاصیت مقداری مستقیم بر حسب جرم تغییر می کند. لذا، اگر کمیتی ماده در حالت معینی به دو قسمت مساوی تقسیم شود، مقدار خاصیت شدتی هر قسمت مانند خاصیت شدتی ماده اولیه، و مقدار خاصیت مقداری هر قسمت نصف خاصیت مقداری ماده اولیه است. فشار، دما و چگالی نمونه هایی از خواص غیر مقداری اند. جرم و حجم نمونه هایی از خواص مقداری اند. خواص مقداری جرم واحد، مانند حجم مخصوص، از خواص شدتی اند.

$$v = \frac{V}{m}$$

← حجم مخصوص خاصیت شدتی
→ حجم خاصیت مقداری

اغلب، نه تنها با خواص یک ماده بلکه با خواص سیستم نیز سروکار داریم. در این حالت، مقدار خاصیت را برای تمام سیستم ثابت می گیریم و این به معنی تعادل است. اگر سیستمی نسبت به تمام تغییر حالت های ممکن در تعادل باشد، می گوییم سیستم در تعادل ترمودینامیکی است.

فرایند

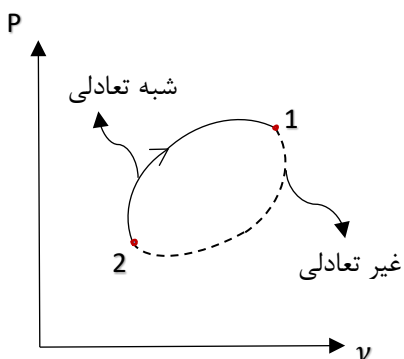
هر گاه یک یا تعداد بیشتری از خواص سیستم تغییر کند، می گوییم تغییر حالت روی داده است. مثلا اگر یکی از وزنه های روی پیستون شکل 1-3 برداشته شود، پیستون بالا می رود و تغییر حالت روی می دهد، زیرا فشار کاهش می یابد و حجم مخصوص زیاد می شود. مسیر توالی حالت هایی را که سیستم از آن می گذرد، **فرایند** می گویند.

فرایند شبه تعادلی فرایندی است که در آن انحراف از تعادل ترمودینامیکی بی نهایت کوچک است، و تمام حالت هایی را که سیستم در فرایند شبه تعادلی از آنها می گذرد می توان حالت های تعادل گرفت. بسیاری از فرایندهای واقعی نزدیک به فرایند شبه تعادلی اند و بدون خطای زیاد می توان آنها را شبه تعادلی گرفت. اگر وزنه های روی پیستون شکل 1-3 کوچک باشند و یکی یکی برداشته شوند، فرایند را می توان شبه تعادلی گرفت. ولی اگر تمام وزنه ها با هم برداشته شوند، پیستون به سرعت بالا می رود تا به مانع برخورد کند. این یک فرایند غیر تعادلی است، و سیستم در طی این تغییر حالت در تعادل نیست.

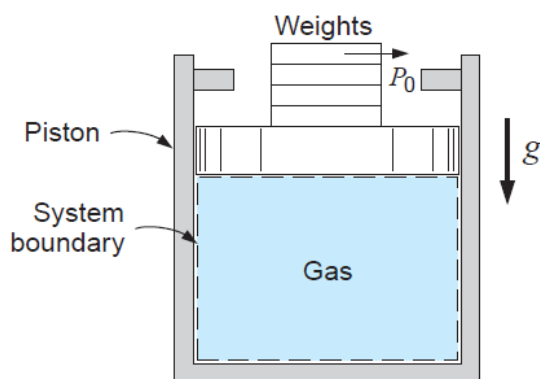
برای فرایندهای غیر تعادلی، سیستم را فقط می توان قبل از وقوع فرایند و پس از تکمیل فرایند و برقراری تعادل توصیف کرد و نمی توان تمام حالت هایی را که سیستم از آنها می گذرد یا آهنگ وقوع فرایند را مشخص کرد. البته، همانطور که بعدا خواهید دید، آثار کلی معینی را که در این فرایند روی می دهد را می توان توصیف کرد.

نمودار فرایند

نموداری که فرایند از حالت های شبه تعادلی عبور می کند تا بحالت نهایی برسد را نمودار فرایند می گویند ، شکل 1-4 .



شکل 1-3 نمودار فرایند شبه تعادلی و غیر تعادلی (شماتیک)



شکل 1-4 نمونه ای از سیستم در فرایند شبه تعادلی

انواع فرآیندها

1- ایزوبار : فشار ثابت $P = cte$

2- ایزوترم : دما ثابت $T = cte$

3- ایزومتریک : حجم ثابت $V = cte$

4- پلی تروپیک $Pv^n = cte$

سیکل

اگر سیستمی که در حالت اولیه معینی قرار دارد دستخوش چند تغییر حالت مختلف شود و سرانجام به حالت اولیه اش برگردد، می‌گوییم یک سیکل را طی کرده است. لذا، در انتهای سیکل، تمام خواص دارای همان مقدار اولیه اند.

قانون صفرم ترمودینامیک

دو قطعه مسی و دما سنج را در نظر بگیرید. فرض کنید یکی از این قطعه‌ها با دما سنج تماس گرمایی گیرد، و پس از برقراری تساوی دما، از آن جدا شود. سپس قطعه مسی دوم با دما سنج تماس می‌گیرد. اگر ارتفاع جیوه داخل دما سنج در طی تماس با قطعه دم تغییر نکند، می‌گوییم این دو قطعه با دماسنج در تعادل گرمایی اند.

قانون صفرم ترمودینامیک می‌گوید اگر دو جسم با جسم سوم دارای تساوی دمایی باشند، با یکدیگر نیز تساوی دمایی دارند. این قانون در واقع مبنای اندازه‌گیری دماست. هر گاه جسمی با دما سنج دارای تساوی گرمایی باشد، می‌توان گفت جسم دارای دمایی است که دما سنج می‌خواند.

قانون اول ترمودینامیک

انرژی درونی یک سیستم منزوی ثابت و پایدار است. انرژی نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود بلکه از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود. بعنوان مثال تبدیل انرژی شیمیایی در فرایند سوختن گاز متان. قانون اول ترمودینامیک که به عنوان قانون بقای کار و انرژی نیز شناخته می‌شود، می‌گوید: تغییر انرژی درونی یک سیستم برابر است با اختلاف گرمای داده شده به سیستم و کار انجام شده توسط سیستم بر روی محیط:

$$\Delta U = Q - W$$

قانون دوم ترمودینامیک

ساخت یک موتور سیکلی که تأثیری جز انتقال مداوم گرما از دمای سرد به دمای گرم نداشته باشد، غیرممکن است. بیان کلوین-پلانک: غیرممکن است وسیله‌ای بسازیم که در یک سیکل عمل کند و در عین حال فقط با یک مخزن تبادل حرارت داشته باشد یعنی غیرممکن است یک موتور حرارتی بدون از دست دادن گرما در Q_C به کار خود ادامه دهد. بیان کلازیوس: امکان ندارد که یک یخچال طی یک چرخه، تمام انرژی را که از منبع سرد دریافت می‌کند به منبع گرم انتقال دهد؛ بلکه مقداری از این انرژی طی این فرایند هدر می‌رود. بعبارتی دیگر قانون دوم ترمودینامیک مسیر انجام یک فرایند است.

$$T dS = Q$$

قانون سوم ترمودینامیک

قانون سوم ترمودینامیک می‌گوید هنگامی که انرژی یک سیستم به حداقل مقدار خود میل می‌کند، انتروپی سیستم به مقدار قابل چشم‌پوشی می‌رسد. یا بطور نمادین: هنگامی که

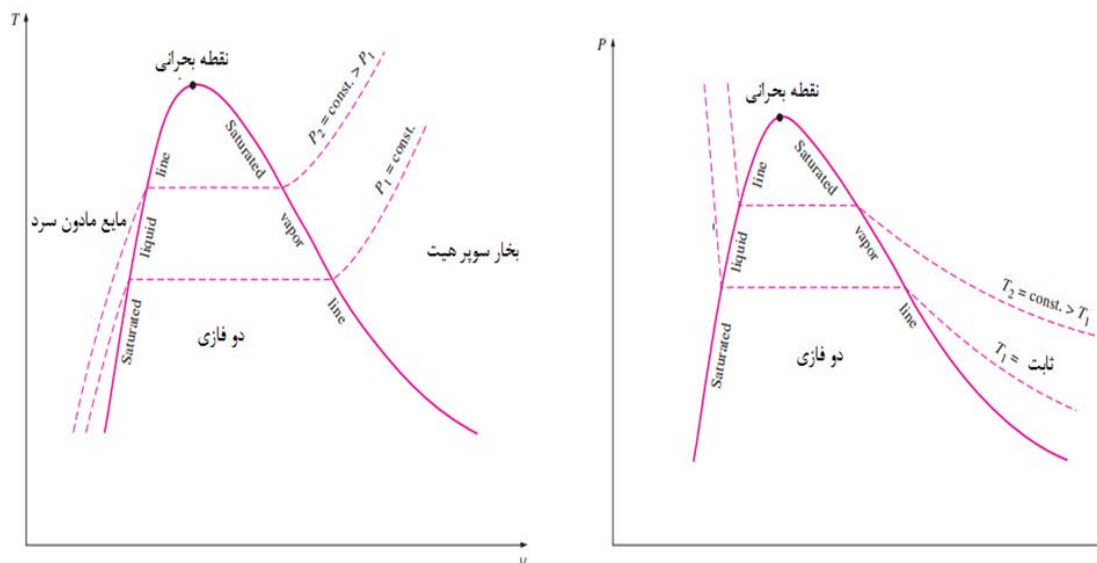
$$U \rightarrow U_0 \quad , \quad S \rightarrow 0$$

خواص ماده خالص

ماده خالص آن است که ترکیب شیمیایی همگن و نا متغیری دارد. ماده خالص می تواند در بیش از یک فاز وجود داشته باشد، اما ترکیب شیمیایی آن در تمام فازها یکسان است.

دمای اشباع : درجه حرارتی است که اگر سیستم را در فشار مشخصی به آن درجه حرارت برسانیم، شروع به تغییر فاز می کند.

فشار اشباع : فشاری است که اگر سیستم به آن فشار برسد، شروع به تغییر فاز می کند.

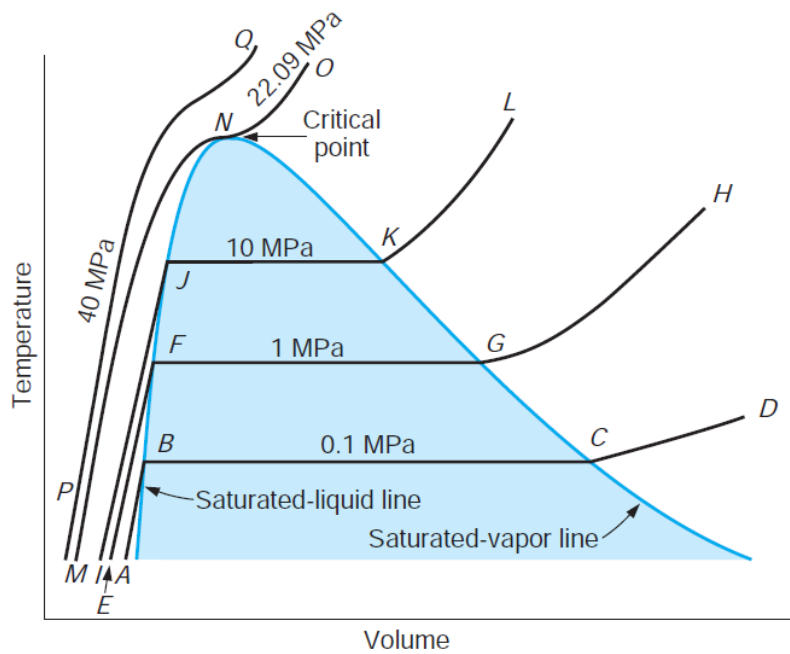


شکل 1-5 نمودار خواص برای فرایندهای تغییر فاز

اگر ماده ای در دما و فشار اشباع به صورت مایع باشد، آن را **مایع اشباع** می گویند. اگر دمای مایع کمتر از دمای اشباع متناظر با فشار موجود باشد، تک فاز است و آن را **مایع فرو سرد** گویند. (یعنی دمای آن کمتر از دمای اشباع متناظر با فشار داده شده است.) یا آن را **مایع متراکم** می گویند. (یعنی فشار آن بیشتر از فشار اشباع متناظر با دمای داده شده است.)

وقتی قسمتی از ماده به صورت مایع و قسمتی به صورت بخار در دمای اشباع است (در حالت دو فازی قرار دارد)، کیفیت آن به صورت جرم بخار به جرم کل تعریف می شود. کیفیت را به عنوان خاصیت غیر مقداری می توان گرفت و با نماد (X) نشان داده می شود کیفیت وقتی معنی دارد که ماده در حالت اشباع، یعنی در دما و فشار اشباع، باشد.

اگر ماده ای در دمای اشباع به صورت بخار باشد، آن را **بخار اشباع** می گویند. اگر بخار در دمای بیشتر از دمای اشباع باشد، تک فاز است و آن را **بخار فوق گرم** می گویند.



شکل 6-1 نمودار دما - حجم برای آب که فاز های مایع و بخار را نشان می دهد

نقطه بحرانی

در فشار 22.09 مگا پاسکال، که با خط MNO نشان داده شده است، دیده می شود که فرایند تبخیر دما ثابت روی نمی دهد. بلکه، نقطه N یک نقطه عطف با شیب صفر است و آن را نقطه بحرانی می گویند. در نقطه بحرانی، حالت های مایع اشباع و بخار اشباع یکسانند. دما، فشار و حجم مخصوص را در نقطه بحرانی، به ترتیب، دمای بحرانی، فشار بحرانی و حجم بحرانی می گویند.

جدول 1-1 جدول داده های بحرانی برای بعضی مواد در جدول زیر آورده شده است.

	Critical Temperature, °C	Critical Pressure, MPa	Critical Volume, m ³ /kg
Water	374.14	22.09	0.003 155
Carbon dioxide	31.05	7.39	0.002 143
Oxygen	-118.35	5.08	0.002 438
Hydrogen	-239.85	1.30	0.032 192

کیفیت

وقتی حالت ماده دو فازی باشد، پارامتری به نام کیفیت به شکل زیر تعریف می شود:

(طبق قرارداد از اندیس f برا نمایش خاصیت مایع اشباع و از اندیس g برای نمایش خاصیت بخار اشباع استفاده می شود. تمام مایع موجود در حالت f با حجم مخصوص v_f و تمام بخار موجود در حالت g با حجم مخصوص v_g است.

حجم کل برابر است با مجموع حجم مایع و حجم بخار ،

$$V = V_f + V_g = m_f v_f + m_g v_g$$

حجم مخصوص متوسط v طبق تعریف کیفیت $x = m_g / m$ ، عبارت است از:

$$v = V / m = (m_f / m) v_f + (m_g / m) v_g = (1-x) v_f + x v_g = v_f + x(v_g - v_f)$$

با استفاده از تعریف:

$$v_{fg} = v_f - v_g$$

$$v = v_f + x v_{fg}$$

می توان ثابت کرد که برای هر خاصیت دیگری در ناحیه دو فازی داریم :

$$y = y_f + x y_{fg}$$

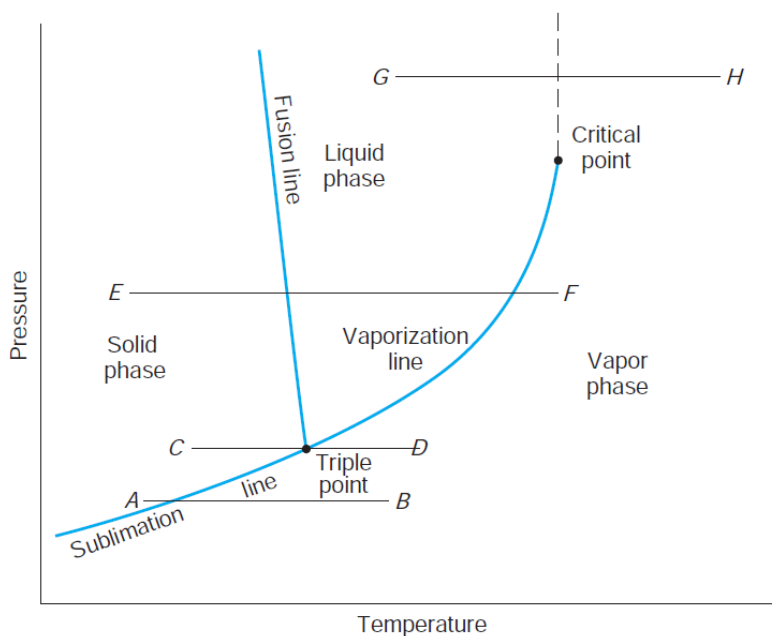
که y می تواند حجم مخصوص ، انرژی داخلی ، آنتالپی و یا آنتروپی باشد.

آنتالپی

آنتالپی نوعی انرژی است که به لحاظ ریاضی به صورت زیر تعریف می گردد:

$$h = e + Pv$$

نقطه سه گانه : حالتی است که در آن سه فاز می توانند در تعادل باشند.



شکل 1-7 نمودار فشار- دمای تغییر فاز

شکل بالا نشان می دهد که فاز های جامد، مایع و بخار چگونه می توانند با هم در تعادل باشند. فازهای جامد و بخار در امتداد خط تصعید، فازهای جامد و مایع در امتداد خط ذوب، و فازهای مایع و بخار در امتداد خط تبخیر در تعادل اند. تنها نقطه ای که در آن سه فاز می توانند در تعادل باشند، نقطه سه گانه است. خط تبخیر به نقطه بحرانی ختم می شود زیرا در بالای نقطه بحرانی هیچ تمایز مشخصی بین فاز مایع و فاز بخار وجود ندارد.

خواص مستقل ماده خالص

یکی از دلایل مهم برای وارد کردن مفهوم ماده خالص این است که حالت یک ماده خالص تراکم پذیر ساده (یعنی، ماده خالص فاقد حرکت، گرانش، و آثار سطحی، مغناطیسی و الکتریکی) توسط دو خاصیت مستقل تعریف می شود. برای مثال، اگر حجم مخصوص و دمای بخار آب فوق گرم معلوم باشند، حالت بخار آب تعیین می شود.

برای درک مفهوم واژه خاصیت مستقل، حالت های مایع اشباع و بخار اشباع یک ماده خالص را در نظر می گیریم. این دو حالت دارای فشار و دمای یکسان هستند، اما یقیناً حالت های یکسان نیستند. لذا، در حالت اشباع، فشار و دما خواص مستقلی نیستند. برای تعیین حالت اشباع یک ماده خالص، دو خاصیت مستقل مانند فشار و حجم مخصوص یا فشار و کیفیت نیازند.

جداول خواص ترمودینامیکی

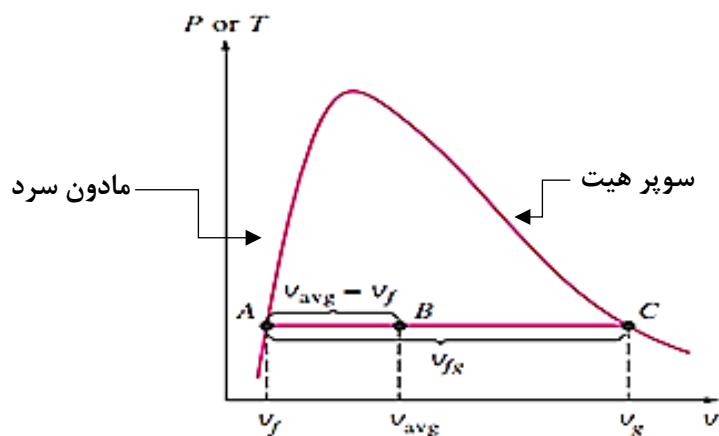
سوال چگونه از جداول ترمودینامیکی استفاده کنیم؟

پاسخ: (برای جداول سنجل)

$$T, Y \xrightarrow[A4]{\text{بخار آب اشباع}} \begin{cases} Y > Y_g \rightarrow \text{سوپر هیت} \\ Y_f < y < Y_g \rightarrow \text{دو فازی} \\ Y < Y_f \rightarrow \text{مایع مادون سرد} \end{cases}$$

$$P, Y \xrightarrow[A5]{\text{بخار آب اشباع}} \begin{cases} Y > Y_g \rightarrow \text{سوپر هیت} \\ Y_f < Y < Y_g \rightarrow \text{دو فازی} \\ Y < Y_f \rightarrow \text{مایع مادون سرد} \end{cases}$$

$$P, T \xrightarrow[A5]{\text{بخار آب اشباع}} \begin{cases} T > T_s \rightarrow \text{سوپر هیت} \\ T = T_s \rightarrow \text{دو فازی} \\ T < T_s \rightarrow \text{مایع مادون سرد} \end{cases}$$



شکل 8-1 نمودار فشار و دما بر حسب حجم (فشار، دما - حجم)

میان یابی: وقتی ما مقدار خاص مسئله را در جدول نداریم باید میانیابی کنیم. میان یابی با یک مثال در توضیح می دهیم:

T	P	...	H _g
200	1200
210	H.
250	1600

$$(210 - 200)/(250 - 200) = (h - 1200)/(1600 - 1200) \rightarrow h = 1280$$

مثال. فاز هریک از حالت های زیر را برای آب با استفاده از جداول بیاید و مکان آنها را در نمودار نشان دهید.

الف. دمای 120 درجه سانتی گراد، فشار 500 کیلو پاسکال

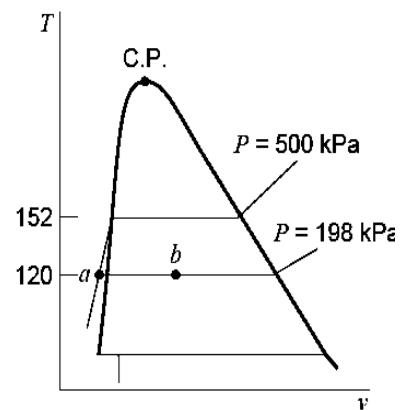
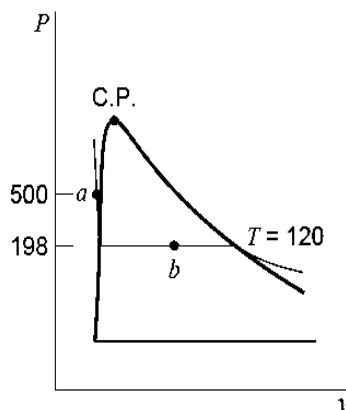
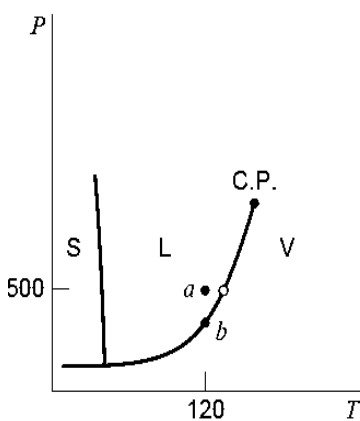
ب. دمای 120 درجه سانتی گراد، حجم مخصوص 0.5 متر مکعب بر کیلوگرم

حل. الف. با دمای 120 وارد جدول A4 می شویم. فشار اشباع 198.5 کیلو پاسکال است. چون فشار داده شده از فشار اشباع بیشتر است ، لذا مایع متراکم داریم. با فشار 500 کیلو پاسکال وارد جدول A5 می شویم و دمای اشباع 151.86 است. چون دمای داده شده بیشتر از دمای اشباع است، پس فروسرد داریم.

ب. با 120 درجه وارد جدول A4 می شویم و داریم:

$$v_f = 0.00106 < v < v_g = 0.89186$$

لذا مخلوط دو فازی مایع و بخار داریم.



مثال. دما و کیفیت آب را در فشار 300 کیلو پاسکال برای هر یک از حجم مخصوص های زیر بیابید:

الف. $0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$

ب. $1.0 \text{ m}^3/\text{kg}$

حل. الف. با مراجعه به جدول A5 داریم:

$$v_f = 0.001073 < v < v_g = 0.60582$$

پس حالت ماده دو فازی است. پس کیفیت آن برابر است با:

$$0.5 = (0.001073 + 0.60475) x \rightarrow x = 0.825$$

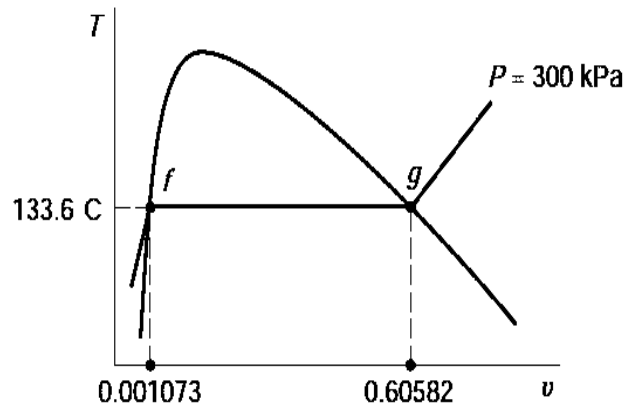
در حالت دو فازی دما برابر دمای اشباع است:

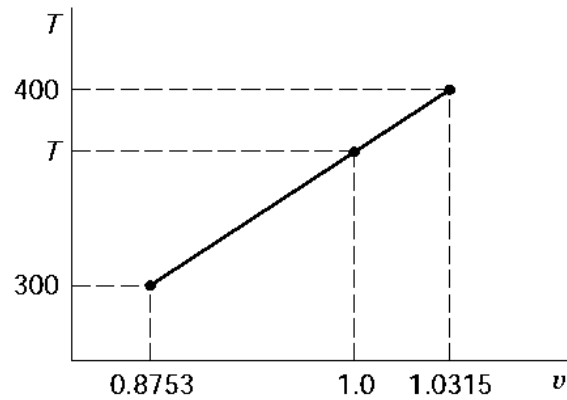
$$T = T_s = 133.6$$

ب. با مقایسه مقادیر دیده می شود حالت متناظر با $1/0 \text{ m}^3/\text{kg}$ در ناحیه بخار فوق گرم است که در آن کیفیت تعریف نشده است، پس باید به جدول سوپر هیت A6 مراجعه کنیم. در این حالت، T با درون یابی خطی بین مقادیر حجم مخصوص در فشار 300 کیلو پاسکال و دماهای 300 و 400 درجه سانتی گراد بدست می آید:

$$\text{شیب} = \frac{T - 300}{1 - 0.8753} = \frac{400 - 300}{1.0315 - 0.8753}$$

که در نتیجه دمای 379.8 بدست می آید.





مثال. جدول زیر را تکمیل کنید.

ردیف	نوع فاز	ν (m ³ /kg)	P(kpa)	T(سانتی گراد)
1		4.16		50
2	بخار اشباع		200	
3			400	250
4	مایع مادون سرد		600	

حل

1. با دمای 50 درجه وارد جدول A4 می شویم:

$$0.001012 = \nu_f < \nu < \nu_g = 12.026$$

پس حالت ماده دو فازی است و فشار آن برابر فشار اشباع = 12.352 است.

2. حالت ماده بخار اشباع است پس داریم: (از جدول A5 برای فشار 200)

$$\nu = \nu_g = 0.88578$$

$$T = T_s = 120.21$$

3. از جدول A5 برای فشار 400 داریم:

$$T > T_s = 143.61$$

پس حالت ماده سوپر هیت است، پس به سراغ جدول A6 می رویم:

$$\nu = 0.59520$$

4. در حالتی که مایع مادون سرد داریم، خواص سیال مادون سرد را تقریباً برابر با مایع اشباع فرض می‌کنیم:

$$v = v_f = 0.001101$$

$$T = T_s = 158.83$$

گاز کامل

گازی است که بتوان از تاثیر مولکولهای آن بر روی یکدیگر صرف نظر کرد. اکثر گازها در دماهای بالا و فشارهای پایین رفتاری شبیه گاز کامل از خود نشان می‌دهند. هر چه تاثیر نیروی بین مولکولی بیشتر شود از گاز کامل دور می‌شویم.

معادله حالت

معادله ای که رابطه میان فشار، دما و حجم را بیان می‌کند. صورت این معادله در زیر توضیح داده شده است:

$$PV = mRT \rightarrow \times \frac{1}{m} \rightarrow P \frac{V}{m} = RT \rightarrow Pv = RT$$

$$R = R_u/M_w$$

مثال. مخزنی به حجم 0.5 متر مکعب حاوی یک کیلوگرم گاز ایده آل با جرم مولکولی 24 است. در دمای 25 درجه سانتی‌گراد، فشار چقدر است؟

حل. ابتدا ثابت گاز را می‌یابیم:

$$R = R_u/M = \frac{8.31445}{24} = 0.34644$$

$$P = \frac{mRT}{V} = \frac{10 \times 0.34644 \times 298}{0.5} = 2066 \text{ kpa}$$

انحراف از حالت گاز ایده آل

در حالتی که گاز کامل نباشد، بایستی از روابط دیگری (معادله حالت‌های دقیق‌تر) استفاده کرد. (کتاب سنجل) یکی از معروف‌ترین روابطی که برای گازهای غیر کامل استفاده می‌گردد به شرح زیر است:

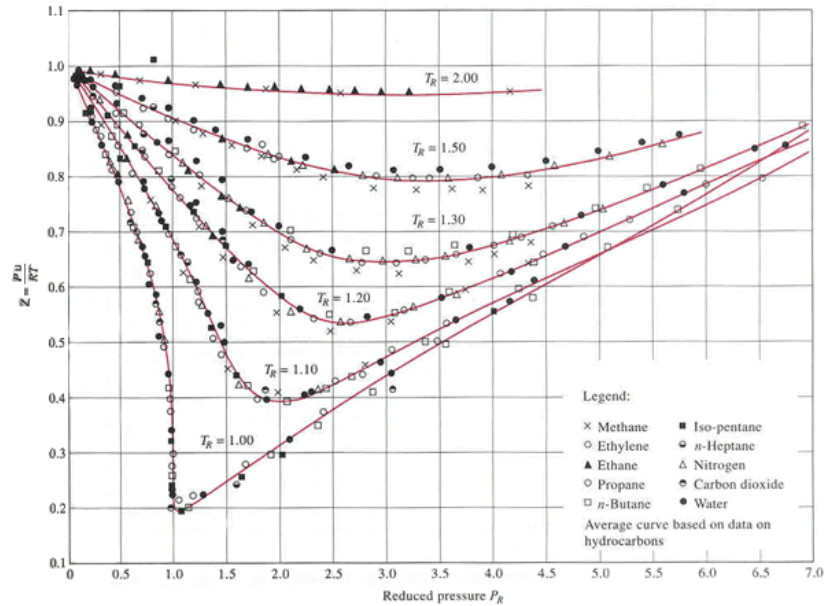
$$Pv = ZRT$$

همان‌گونه که از نمودار بر می‌آید، گاز نیتروژن در دماهای نزدیک دمای محیط و فشارهای تا 50bar رفتاری نزدیک به گاز ایده آل از خود نشان می‌دهد ($Z \rightarrow 1$). لازم بذکر است که رفتار اکثر گازها شبیه نیتروژن است. حال سؤال این است که برای هر گاز در چه محدوده دما و فشار می‌توان فرض گاز ایده آل را برقرار دانست؟

نکته: اگر گاز کامل باشد $Z = 1$ و اگر گاز کامل نباشد، $Z \neq 1$. برای بدست آوردن ضریب اصلاح، ابتدا دمای کاهیده و فشار کاهیده را طبق فرمول زیر بدست می‌آوریم:

$$Pr = \frac{P}{P_{cr}} \quad \text{و} \quad Tr = \frac{T}{T_{cr}}$$

سپس با مراجعه به نمودار ضریب اصلاح را پیدا می کنیم :



شکل 1-9 نمودار ضریب اصلاح

مثال. بخار آب در شرایط $P = 10\text{Mpa}$ و $T = 400$ درجه سانتی گراد قرار دارد.

الف. اگر گاز کامل فرض شود، حجم مخصوص سیال را محاسبه کنید.

ب. اگر گاز غیر کامل فرض شود، حجم مخصوص را بیابید.

حل. الف. در معادله حالت دما باید بر حسب کلوین باشد.

$$Pv = RT \rightarrow v = \frac{RT}{P} = \frac{0.4615 \times (400+273)}{10 \times 10^3} = 0.031 (\text{m}^3/\text{kg})$$

ب. گاز غیر کامل:

$$Pv = ZRT$$

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}} = \frac{10}{22.09} = 0.4527$$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}} = \frac{400+273}{647.3} = 1.04$$

$$Z = 0.848$$

به نمودار Z-Pr مراجعه کرده و Z را پیدا می کنیم:

بنابراین داریم:

$$V_{\text{new}} = 0.848 V_{\text{old}} = 0.848 \times 0.031 = 0.02641 \text{ m}^3/\text{kg}$$

یادداشت

یادداشت

فصل دوم

کار و گرما

کار و حرارت کمیت‌هایی هستند که عامل تحول در سیستم می‌باشند. و دارای شرایط زیر هستند:

- خاصیت ترمودینامیکی نیستند، (به مسیر وابسته هستند).
- پدیده‌های مرزی هستند.
- جهت دار می‌باشند.

کار ترمودینامیکی

کار بلحاظ ترمودینامیکی عامل تحولی است که بتوان اثر آن را معادل جابجایی تعدادی وزنه در نظر گرفت.

- اگر سیستم بر روی محیط کار انجام دهد، علامت کار مثبت می‌باشد.

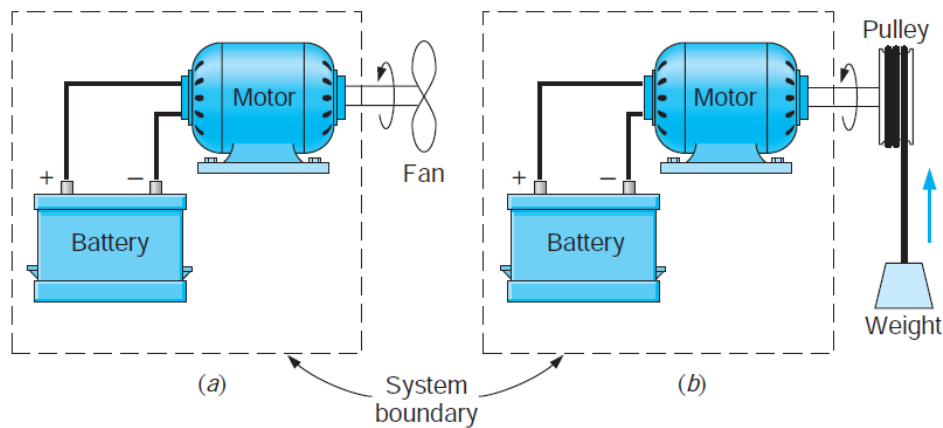
کار از لحاظ مکانیکی بصورت زیر تعریف می‌گردد:

وقتی نیروی F در تغییر مکان X در امتداد نیرو، اثر می‌کند می‌گوییم کار انجام شده است و آن را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$W = \int_1^2 F dx$$

این رابطه بسیار مفیدی است، زیرا با آن می‌توان کار لازم برای بالا بردن وزنه، کشیدن سیم یا به حرکت درآوردن ذره بارداری را در میدان مغناطیسی تعیین کرد.

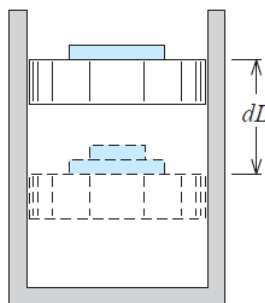
کار توسط یک سیستم انجام می‌شود هر گاه اثر خالص آن روی اطراف بتواند وزنه‌ای را بالا ببرد. باید دانست که بالا بردن وزنه به معنای نیرویی است که در فاصله‌ای اثر می‌کند.



شکل 2-1 الکترو موتور

کار انجام شده در مرز متحرک یک سیستم تراکم پذیر ساده

سیستم سیلندر-پیستون حاوی گاز را در نظر بگیرید.



شکل 2-2 سیستم سیلندر و پیستون

یکی از وزنه های کوچک را از روی پیستون برمی داریم. در نتیجه، پیستون به فاصله dL بالا می رود. این فرایند را شبه تعادلی می گیریم و مقدار کار W انجام شده توسط سیستم را در این فرایند محاسبه می کنیم. نیروی کل وارد بر پیستون PA است، که در آن P فشار گاز و A مساحت پیستون است. لذا، δW عبارت است از:

$$\delta W = PA dL$$

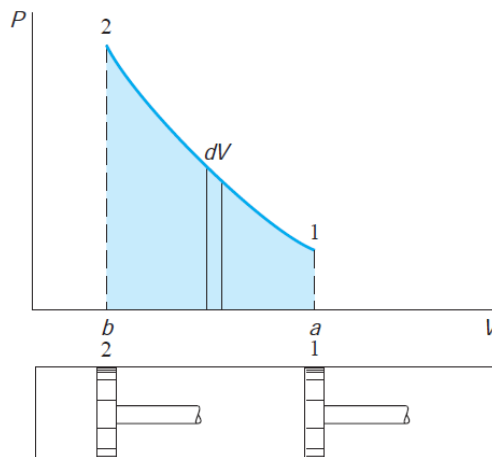
اما $A dL = dV$ که در آن dV تغییر حجم گاز است. لذا،

$$\delta W = PdV$$

کار انجام شده در مرز متحرک در یک فرایند شبه تعادلی را با انتگرال گیری از معادله بالا می توان بدست آورد:

$$W = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 PdV$$

بنابراین مسیر کار مهم است، زیرا همانگونه که از رابطه فوق پیداست کار برابر مساحت زیر نمودار فشار - حجم می باشد.



شکل 2-3 نمودار فشار - حجم

کار در فرایندهای مختلف

1. فرآیند پلی تروپیک: فرآیندی است که از رابطه ی زیر پیروی می کند:

توان پلی تروپیک $PV^n = cte$, or $Pv^n = cte$

$$\begin{aligned} {}^2_1W = \int_1^2 PdV &\xrightarrow{\text{result}} {}^2_1W = \int_1^2 Pdv = \int_1^2 \frac{cte}{v^n} dv \\ &= \frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-n} \end{aligned}$$

$$= \frac{p_2v_2 - p_1v_1}{1-n} \begin{cases} n = 1 \rightarrow \text{دما ثابت} \\ n = 0 \rightarrow \text{فشار ثابت} \\ n = \infty \rightarrow \text{حجم ثابت} \\ n = k \rightarrow \text{آیزنتروپیک} \end{cases}$$

2. فرآیند هم دما: اگر گاز کامل باشد و فرآیند هم دما روی آن انجام پذیرد داریم:

$$\begin{aligned} Pv = RT \Rightarrow {}^2_1W = \int_1^2 pdv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv \Rightarrow {}^2_1W = RT \int_1^2 \frac{dv}{v} = pvl \ln v \\ = pvl \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

3. فرآیند حجم ثابت: اگر حجم سیستم ثابت باشد داریم؛

$$dv=0 \text{ زیرا } {}^2_1W = \int_1^2 pdv = 0$$

در فرآیند حجم ثابت ${}^2_1W = 0$ است کار مرزی برابر صفر است.

4. فرآیند فشار ثابت: اگر فرآیند فشار ثابت باشد، آنگاه:

$$\begin{cases} {}^2_1W = \int_1^2 pdv \Rightarrow {}^2_1W = p \int_1^2 dv = p\Delta v \\ p = cte \end{cases}$$

انواع کار

- کار ناشی از تغییر مرز
- کار ناشی از جریانهای جرمی ← در حجم کنترل باز بدان پرداخته میشود.
- کارهای دیگر ← مثل کار نیروی وزن، کار ناشی از شتاب و...

کار ناشی از تغییر مرز از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$${}^2_1W = \int_1^2 p dv$$

کار ناشی از نیروی وزن:

$$\partial w = F dx, \quad F = mg \rightarrow {}^2_1\partial w = mg dx \rightarrow {}^2_1w = \int_1^2 mg dx = mg(x_2 - x_1)$$

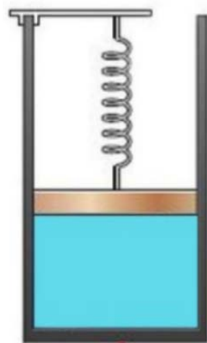
محاسبه کار ناشی از شتاب:

$$\partial w = F dx, \quad F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = mv \frac{dv}{dx}$$

$${}^2_1\partial w = mv \frac{dv}{dx} dx = mv dv \rightarrow {}^2_1w = \int_1^2 mv dv \rightarrow$$

$${}^2_1w = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$$

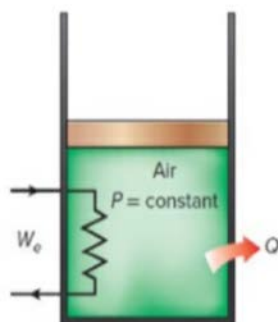
محاسبه کار فنر: اگر فنر خطی باشد، آنگاه داریم؛



شکل 2-4 پیستون و فنر

$$\partial w = F dx, \quad F = kx \rightarrow {}^2_1\partial w = kx dx, \quad {}^2_1w = \int_1^2 kx dx \rightarrow {}^2_1w = \frac{k}{2} (x_2^2 - x_1^2)$$

کار ناشی از هیتر (المنت):



شکل 2-5 هیتر

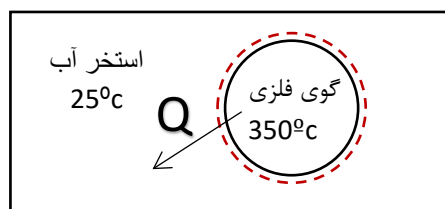
$$W_e = VI \Delta t$$

کار الکتریکی

انتقال حرارت

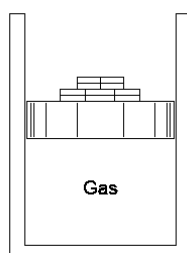
تبادل انرژی در مرز سیستم می باشد که از دمای بیشتر به دمای کمتر تبادل انجام می شود. در انتقال حرارت انرژی حتماً مرز سیستم را قطع می کند.

- اگر سیستم حرارت جذب کند، علامت حرارت مثبت می باشد .



شکل 2-6 انتقال حرارت سیستم

مثال: سیستم سیلندر-پیستون حاوی گاز مطابق شکل زیر در نظر بگیرید. روی پیستون وزنه های کوچکی قرار دارند. فشار و حجم اولیه گاز، به ترتیب ، 200 kpa و 0.04 m^3 است.



الف. با قرار گرفتن مشعل بونزن در زیر سیلندر، حجم گاز در فشار ثابت به 0.1 مترمکعب می رسد. کار انجام شده توسط این سیستم را در این فرایند بیابید.

حل.

$$W = \int_1^2 P dV$$

چون فشار ثابت است، از معادله بالا نتیجه می شود:

$$W = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

$$W = 200 \text{ kPa} \times (0.1 - 0.04) \text{ m}^3 = 12.0 \text{ kJ}$$

ب. همان سیستم و شرایط اولیه را در نظر بگیرید. اما، این بار در ضمن اینکه مشعل بونزن در زیر سیلندر است و پیستون بالا می آید، وزنه ها را با آهنگی از روی پیستون بر می داریم که دمای گاز ثابت بماند.

حل. فرایند هم دما است، پس داریم:

$$W = \int_1^2 P dV = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$W = 200 \times \frac{4}{100} \times \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{733}{100}$$

ج. همان سیستم را در نظر بگیرید، اما این بار در ضمن انتقال گرما وزنهها را با آهنگی بر می داریم که رابطه ی $PV^{1.3} = \text{ثابت}$ در فرایند برقرار باشد. مجدداً، حجم نهایی 0.1 m^3 است. کار را محاسبه کنید.

حل. این یک فرایند پلی تروپیک با $n = 1.3$ است. می نویسیم:

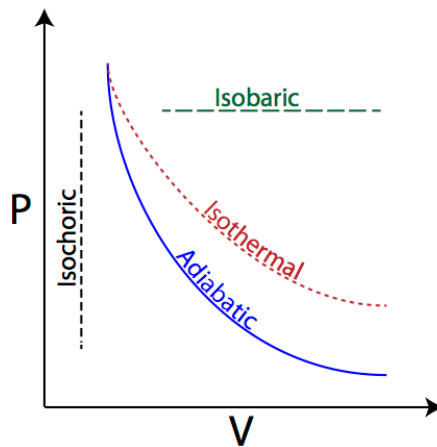
$$P_2 = 200 \left(\frac{0.04}{0.10} \right)^{1.3} = 147.36 \text{ kPa}$$

$$W = \int_1^2 P dV = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - 1.3} = \frac{60.77 \times 0.1 \times 200 \times 0.04}{1 - 1.3} = 176.833 \text{ KJ}$$

د. سیستم داده شده در سه حالت را در نظر بگیرید. اما این بار پیستون توسط پین نگه داشته می شود و حجم ثابت است. به علاوه، فرض کنید گرما از سیستم انتقال می یابد تا فشار به 100 kPa برسد. کار را محاسبه کنید.

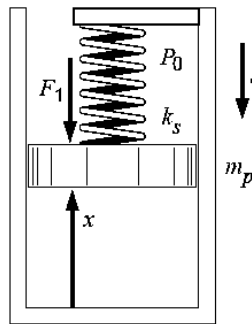
حل. در فرایند شبه تعادلی $dw = P dV$. چون تغییر حجم وجود ندارد ، کار برابر صفر است.

نتیجه: اگر $n > 1$ باشد: $W_p > W_T > W_{poly}$



شکل 2-7 نمودار فرایندهای گازی اصلی مختلف

مثال. سیستم سیلندر- پیستون را در شکل زیر در نظر بگیرید. پیستون به جرم m_p تحت فشار اتمسفر P_0 فنر خطی و نیروی نقطه ای F_1 قرار دارد. گاز داخل سیلندر تحت فشار P است. کار انجام شده را در فرایند حرکت پیستون بیابید.



حل. موازنه نیروی وارد بر پیستون در جهت حرکت می دهد:

$$m_p a = 0 = \sum F \uparrow - \sum F \downarrow$$

شتاب در این فرایند شبه تعادلی صفر است. موازنه نیروها، وقتی فنر با پیستون در تماس می گیرد، می دهد:

$$\sum F \uparrow = PA. \quad \sum F \downarrow = M_p g + P_0 A + K_s (x - x_0) + F_1$$

که در آن K_s ثابت فنر خطی است. X_0 وضعیت پیستون در حالت آزاد است. با تقسیم کردن نیرو بر مساحت A ، فشار گاز بدست می آید:

$$P = P_0 + \{ m_p g + F_1 + K_s (x - x_0) \} / A$$

برای نمایش این فرایند در نمودار $P - V$ فاصله x را با ضرب و تقسیم در A به حجم تبدیل می کنیم:

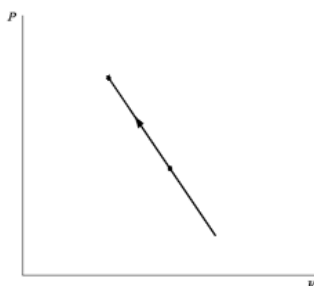
$$P = P_0 + m_p / A + F_1 / A + K_s / A^2 (V - V_0) = C_1 + C_2 V$$

این رابطه، فشار را به صورت یک تابع خطی از حجم نشان می دهد. شیب این خط عبارت است از $C_2 = K_s / A^2$. مقادیر ممکن P, V در نمودار زیر برای انبساط داده شده اند. هر فرایندی در امتداد نمودار $P-V$ روی می دهد، و این بستگی به ماده داخل سیلندر ندارد. لذا، جمله کار در فرایند شبه تعادلی به صورت زیر است:

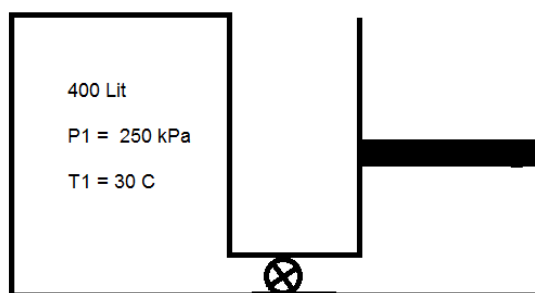
$$W = \int_1^2 P dV = \text{سطح زیر منحنی فرایند}$$

$$W = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (V_2 - V_1)$$

در تراکم، فرایند در جهت مخالف از نقطه اولیه 1 در امتداد خطی با همان شیب داده شده در نمودار زیر روی می دهد.



مثال. دو مخزن همانند شکل زیر توسط یک شیر بهم متصل شده اند. شیر باز می گردد و آرگون از مخزن A وارد مخزن B می گردد. مخزن B در ابتدا خالی است. آنقدر فرایند ادامه می یابد تا محفظه A به فشار 150 کیلو پاسکال و دمای 30 درجه سانتی گراد برسد. کار انجام شده توسط آرگون را بیابید.



حل :

$$m_1 = m_2 = m_A = \frac{P_A V_A}{RT_A} = \frac{250 \times 0.4}{0.208 \times 303.15} = 1.586 \text{ kg}$$

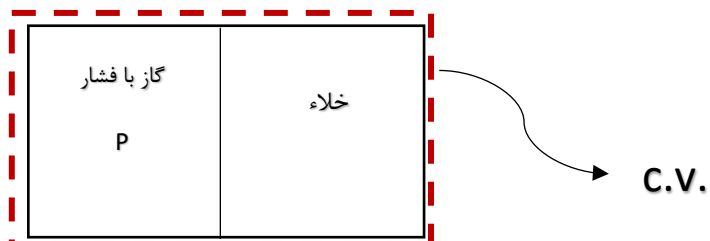
$$T_1 = T_2 \Rightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2 \Rightarrow 250 \times 0.4 = 150(0.4 + V_{B_2}) \Rightarrow V_{B_2} = 0.2667 \text{ m}^3$$

$${}_1W_2 = P_{\text{ext}} \Delta V_B = 150 \times (0.2667 - 0) = 40 \text{ kJ}$$

مثال: غشاء نازکی محفظه ای را به دو بخش گازدار با فشار P و خلاء تقسیم کرده است. اگر غشاء پاره شود کار انجام شده چقدر است؟

حل :

اگر حجم کنترل را قسمت گاز با فشار P در نظر بگیریم، مجاز به استفاده از فرمول کار در فرایند هم فشار نیستیم، چون فرایند غیر تعادلی است، اما مقاومتی در برابر گاز وجود ندارد در نتیجه کار صفر است.



یادداشت

یادداشت

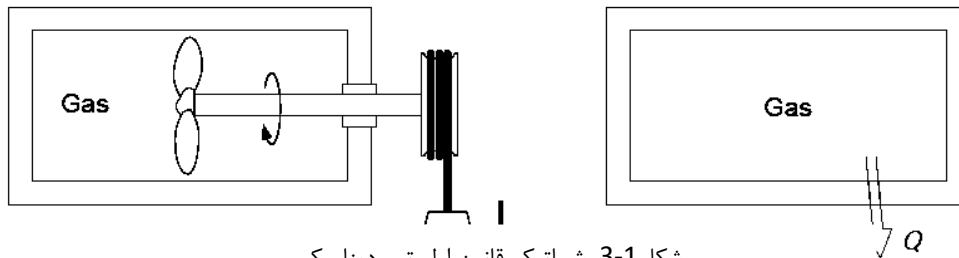
فصل سوم

قانون اول ترمودینامیک

این قانون را اغلب (قانون پایستاری انرژی) می گویند. این قانون بیان می دارد که انرژی نه از بین می رود و نه به وجود می آید، بلکه از نوعی به نوع دیگر تبدیل می شود. ابتدا، این قانون را برای سیستمی که سیکلی را طی می کند و سپس برای تغییر حالت سیستم بیان می کنیم. پس از فرمول بندی معادله انرژی، از آن برای ارتباط دادن تغییر حالت در حجم کنترل به مقدار انرژی، که به صورت کار یا گرما در فرایندی انتقال می یابد، استفاده می کنیم. وقتی موتور اتومبیلی مقداری کار انجام می دهد، تندی ماشین افزایش می یابد، و می توان آنرا به انتقال گرما ارتباط داد. فرایندهای پیچیده تر نیز روی می دهد، مانند انبساط گازهای خیلی داغ در سیستم سیلندر-پیستون موتور اتومبیل، که در آن کار بیرون داده می شود و هم زمان گرما به دیواره سردتر انتقال می یابد. در بعضی از موارد، تغییر حالت بدون انتقال گرما یا کار روی می دهد، مانند جسم ساقت شونده ای که انرژی جنبشی و هم زمان انرژی پتانسیل آن تغییر می کند.

قانون اول ترمودینامیک برای جرم کنترلی که یک سیکل را طی می کند

طبق قانون اول ترمودینامیک، در هر سیکل یک سیستم انتگرال سیکلی گرما با انتگرال سیکلی کار متناسب است. برای نمایش این قانون، گاز داخل مخزن شکل زیر را به عنوان جرم کنترل می گیریم. فرض کنیم این سیستم یک سیکل متشکل از دو فرایند را طی می کند. در فرایند اول، پره هایی که با سقوط وزنه می چرخند روی سیستم کار انجام می دهند. فرض می کنیم، با انتقال گرما از این سیستم و کامل شدن سیکل، سیستم به حالت اولیه اش بر گردد.



شکل 1-3 شماتیک قانون اول ترمودینامیک

کار بر حسب آحاد مکانیکی حاصل ضرب نیرو در فاصله، و گرما بر حسب آحاد گرمایی، بیان می شود. در گذشته، مقادیر کار و گرما را در یک سیکل برای انواع مختلف سیستم ها اندازه گیری کرده اند. با مقایسه مقادیر کار و گرما، دیده می شود که آنها همواره با هم متناسب اند. با مشاهده این بود که قانون اول ترمودینامیک به شکل زیر فرمول بندی شد:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

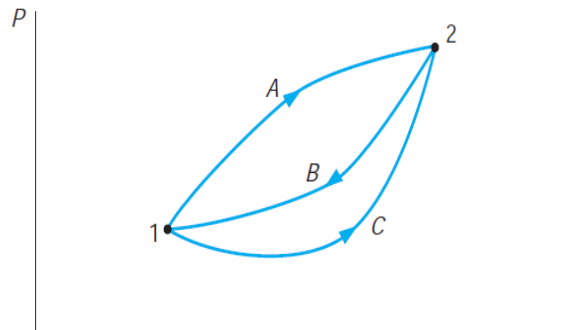
نماد $\oint \delta Q$ ، که آن را انتگرال سیکلی گرمایی گویند، انتقال گرمای خالص را در یک سیکل، و $\oint \delta W$ (انتگرال سیکلی کار) کار خالص را در آن نشان می دهد. در رابطه بالا [ضریب تناسبی است که به آحاد کار و گرما بستگی دارد.

در یک سیکل بسته کار با انتقال حرارت متناسب است. در سیستم SI، $J = 1$ می باشد. لذا عبارت اصلی برای قانون اول ترمودینامیک بصورت زیر است:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

قانون اول ترمودینامیک برای تغییر حالت جرم کنترل

معادله بالا قانون اول ترمودینامیک را برای جرم کنترل در یک سیکل بیان می کند. ولی، به جای سیکل، اغلب با فرایند سروکار داریم. حال قانون اول ترمودینامیک را برای جرم کنترلی که تغییر حالت می دهد بررسی می کنیم. با معرفی خاصیت جدید انرژی با نماد E ، بررسی خود را شروع می کنیم. سیستمی را در نظر بگیرید که سیکل زیر را طی می کند:



شکل 2-3 شماتیک سیکلی قانون اول ترمودینامیک

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

با در نظر گرفتن دو فرایند جدا گانه :

$$\int_1^2 \delta Q_A + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_A + \int_2^1 \delta W_B$$

حال، سیکل دیگری را در نظر می گیریم که در آن جرم کنترل در فرایند C از حالت 1 به 2، و در فرایند B به حالت 1 بر می گردد، در این سیکل می نویسیم :

$$\int_1^2 \delta Q_C + \int_2^1 \delta Q_B = \int_1^2 \delta W_C + \int_2^1 \delta W_B$$

با تفریق کردن معادله دوم از اول داریم :

$$\int_1^2 \delta Q_A - \int_1^2 \delta Q_C = \int_1^2 \delta W_A - \int_1^2 \delta W_C$$

$$\int_1^2 (\delta Q - \delta W)_A = \int_1^2 (\delta Q - \delta W)_C$$

چون A و C فرایندهای اختیاری بین حالت‌های 1 و 2 را نشان می‌دهند، کمیت $\delta Q - \delta W$ برای تمام فرایندهای بینحالت‌های 1 و 2 یکسان است. لذا، $\delta Q - \delta W$ فقط به حالت اولیه و نهایی بستگی دارد و مستقل از مسیر بین این دو حالت است. نتیجه می‌گیریم عبارت مذکور یک تابع نقطه‌ای است، و لذا دیفرانسیل خاصیتی از جرم را نشان می‌دهد. این خاصیت انرژی جرم است و با نماد E نشان داده می‌شود. می‌گوییم:

$$dE = \delta Q - \delta W$$

چون E یک خاصیت است، مشتق آن به صورت dE نوشته می‌شود. با انتگرال‌گیری از معادله بالا از حالت اولیه 1 تا حالت نهایی 2، داریم:

$$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

در غیاب انرژی جنبشی و پتانسیل داریم:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = U_2 - U_1$$

خاصیت E تمام انرژی سیستم را نشان می‌دهد. این انرژی می‌تواند به شکل‌های مختلف، مانند انرژی جنبشی یا پتانسیل، انرژی مربوط به حرکت و وضعیت مولکولها، انرژی مربوط به ساختار اتم، انرژی شیمیایی موجود در باتری، انرژی موجود در رسانای باردار، یا هر نوع انرژی دیگر باشد.

در ترمودینامیک، انرژی پتانسیل و جنبشی را به طور جداگانه و سپس سایر انرژی‌های جرم کنترل را در خاصیتی به نام انرژی داخلی، که با نماد U در نظر می‌گیریم. لذا، می‌نویسیم:

$$E = U + E_K + E_P$$

سیستم بسته: سیستمی است که هیچ گونه جریان جرمی مرزها را قطع نمی‌کند. پس داریم:

$$dE = dU + d(KE) + d(PE) = \delta Q - \delta W$$

که با انتگرال‌گیری از طرفین داریم:

$$Q - W = \Delta E$$

که رابطه بالا به قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های بسته معروف است.

مثال. یک مخزن صلب حاوی 0.1 m^3 بخار آب است که ای بخار در شرایط اولیه $P_1=500\text{KPa}$ و $T_1=200\text{C}$ قرار دارد. بخار آب به تدریج خنک می‌شود و به دمای $T_2=50\text{C}$ می‌رسد. حرارت انتقال یافته و فشار نهایی را بیابید.

حل.

فرضیات: الف. از انرژی جنبشی و پتانسیل می توان صرف نظر کرد. (در اکثر مسایل) ب. جسم صلب است در نتیجه کار مرزی برابر صفر است همچنین سایر کارها هم برابر صفر است.

حالت اولیه: با معلوم بودن P و T وارد جدول A5 می شویم. T_s برابر 151.83 است. پس حالت ماده سوپر هیت است پس وارد جدول A6 می شویم و داریم:

$$u = 2643.3 \text{ KJ/Kg} \quad \text{and} \quad v = 0.422 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

حالت ثانویه: با دمای 50 درجه سانتی گراد و $v_1 = v_2 = 0.422$ وارد جدول A4 می شویم که متوجه می شویم حالت ماده دو فازی است، پس داریم:

$$v = v_f + xv_{fg} \rightarrow x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0.422 - 0.0010}{12.026 - 0.0010} = 0.035$$

$$u_2 = u_f + xu_{fg} \rightarrow u = 209.33 + 0.035(2233.4) = 287.499 \text{ KJ/Kg}$$

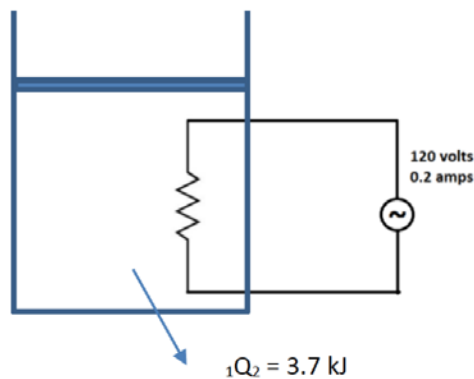
$$Q - W = \Delta E = \Delta U$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m_2u_2 - m_1u_1 = m(u_2 - u_1)$$

$$m = V/v = 0.235 \text{ kg} \rightarrow Q = 0.235 (287.499 - 2643.31) = - 533.41 \text{ kj}$$

$$P_2 = P_1 \text{ @ } T = 50\text{C}$$

مثال. یک دستگاه سیلندر-پیستون حاوی 25 gr بخار اشباع است که در فشار ثابت 200 kPa است. یک گرم کن برقی درون آن نصب شده است و جریان به شدت 0.2 A از منبعی به ولتاژ 120 V به میزان 5 دقیقه عبور می کند. مقدار تلفات حرارتی 3.7 کیلو ژول می باشد. مطلوب است دمای نهایی بخار



حل.

تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل برابر صفر است. مساله پایا است. فرایند فشار ثابت است.

کار مرزی برابر است با :

$$\begin{cases} {}^2_1W = \int_1^2 p dv \Rightarrow {}^2_1w = p \int_1^2 dv = p\Delta v \\ p = cte \end{cases}$$

کار الکتریکی برابر است با :

$$W_e = V I \Delta t = 120 \times 0.2 \times 5 \times 60 = 7200 \text{ J}$$

$$Q - p\Delta v - W_e = U_2 - U_1 \rightarrow Q + W_e = U_2 - U_1 + PV_2 - PV_1$$

از طرفی :

$$H = U + PV$$

پس داریم:

$$Q - W_e = H_2 - H_1 = m (h_2 - h_1)$$

$$-3.7 + 7.2 = 0.025 (h_2 - h_g @ P = 200 \text{ KPa}) \rightarrow h_2 = 2865.3 \text{ kJ/kg}$$

با داشتن h_2 و P به جدول سوپر هیت می رویم و دمای آن را بدست می آوریم.

انرژی داخلی : یک خاصیت ترمودینامیکی

انرژی داخلی یک خاصیت مقداری است زیرا به جرم سیستم بستگی دارد. به طور مشابه، انرژی های جنبشی و پتانسیل خواص مقداری اند.

انرژی داخلی جرم معینی از ماده ای با نماد U نشان داده می شود. با پیروی از قرارداد که برای سایر خواص مقداری به کار می رود، نماد u را برای انرژی داخلی جرم واحد به کار می بریم، آن را انرژی داخلی ویژه (مخصوص) می نامیم. چون زمینه بحث در مورد انرژی داخلی مخصوص است، هر جا اسم انرژی داخلی آمد، منظور همان انرژی داخلی مخصوص است. انرژی داخلی یکی از خواص مستقل مواد خالص است. لذا، در جداول خواص ترمودینامیکی مانند جدول بخار آب، مقدار انرژی داخلی را می توان همراه با سایر خواص ترمودینامیکی جدول بندی کرد.

مثال. در هر یک از حالت های زیر، خاصیت داده نشده (P, T, x, v) را برای آب بیابید:

$$\text{الف. } T = 300^\circ\text{C} \cdot u = 2780 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{ب. } P = 2000 \text{ KPa} \cdot u = 2000 \text{ KJ / Kg}$$

حل. در هر یک از حالت های بالا، دو خاصیت داده شده ، خواص مستقل اند و لذا حالت مربوطه را مشخص می کنند. در هر حالت، ابتدا باید اطلاعات داده شده را با مقادیر مرزی فازی مقایسه و فاز را بیابیم.

الف. در 300 درجه سانتی گراد از جدول ب-1-1 $u_g = 2563.0 \text{ kJ / kg}$ دیده می شود $u > u_g$. لذا این حالت در ناحیه بخار فوق گرم در فشار P ، $P < P_g = 8581 \text{ KPa}$ قرار دارد. با جست و جو در جدول ب-1-3 در دمای 300 دیده می شود مقدار $u = 2780$ بین مقادیر داده شده u در فشار 1600 و 1800 قرار دارد که با درون یابی خطی داریم:

$$P = 1648 \text{ kPa}$$

کیفیت در ناحیه بخار فوق گرم تعریف نشده است. در این فشار، با درون یابی خطی، داریم:

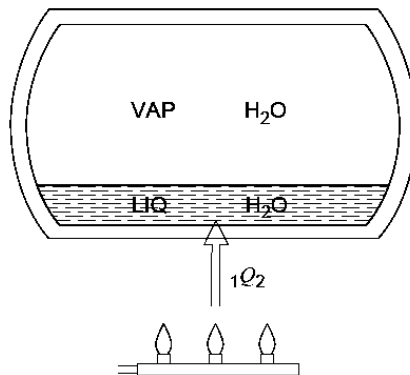
$$v = 0.1542 \text{ m}^3/\text{kg}$$

ب. در $P = 2000 \text{ kPa}$ ، از جدول ب-1-2، u با مقدار داده شده 2000 kJ/kg بزرگتر از $u_f (906.4)$ و کوچکتر از $u_g (2600.3)$ است. لذا این حالت در ناحیه دوفازی با $T = T_g = 212.4 \text{ C}$ قرار دارد، و

$$u = 2000 = 906.4 + x1693.8 \rightarrow x = 0.6456$$

$$v = 0.001177 + 0.6456 \times 0.09845 = 0.06474 \text{ m}^3/\text{kg}$$

مثال. مخزنی به حجم 5 m^3 حاوی 0.05 m^3 آب مایع اشباع و 4.95 m^3 بخار آب اشباع در 0.1 MPa است. یا انتقال گرما، مخزن پر از بخار اشباع می شود. انتقال گرما را در این فرایند بیابید.



جرم کنترل : تمام آب داخل مخزن

حالت اولیه : فشار ، حجم مایع ، حجم بخار ؛ لذا حالت اولیه مشخص است .

حالت نهایی : جایی در امتداد منحنی بخار اشباع ؛ آب گرم شده است . لذا $p_2 > p_1$

فرایند : با حجم و جرم ثابت ؛ لذا ، حجم مخصوص در این فرایند ثابت است .

تحلیل:

تمام آب داخل مخزن جرم کنترل است. فرایند با جرم و حجم ثابت است لذا، حجم مخصوص در این فرایند ثابت است. طبق قانون اول:

$${}_1 Q_2 = U_2 - U_1 + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(Z_2 - Z_1) + {}_1 W_2$$

از بررسی سطح کنترل برای حالت های مختلف کار، نتیجه می شود کار در این فرایند صفر است. به علاوه، سیستم حرکت نمی کند، و تغییر انرژی جنبشی نداریم. مرکز جرم سیستم تغییر کوچکی می دهد، اما فرض می کنیم تغییر انرژی پتانسیل متناظر با آن ناچیز است. لذا داریم:

$${}_1 Q_2 = U_2 - U_1$$

حل:

انتقال گرما از قانون اول تعیین می شود. حالت 1 معلوم است، لذا، u_1 را می توان محاسبه کرد. حجم مخصوص در حالت 2 نیز معلوم است. چون حالت 2 بخار اشباع است، این حالت مشخص است. لذا u_2 را نیز می توان تعیین کرد. حال می نویسیم:

$$m_{1 \text{ liq}} = \frac{V_{\text{liq}}}{v_f} = \frac{0.05}{0.001043} = 47.94 \text{ kg}$$

$$m_{1 \text{ vap}} = \frac{V_{\text{vap}}}{v_g} = \frac{4.95}{1.6940} = 2.92 \text{ kg}$$

لذا،

$$\begin{aligned} U_1 &= m_{1 \text{ liq}} u_{1 \text{ liq}} + m_{1 \text{ vap}} u_{1 \text{ vap}} \\ &= 47.94(417.36) + 2.92(2506.1) = 27\,326 \text{ kJ} \end{aligned}$$

برای تعیین u_2 باید دو خاصیت ترمودینامیکی را بدانیم، زیرا u_2 حالت نهایی را مشخص می کند. این دو خاصیت عبارتند از: کیفیت $x = 100\%$ و حجم مخصوص نهایی v_2 که به سهولت می توان آن را تعیین کرد:

$$m = m_{1 \text{ liq}} + m_{1 \text{ vap}} = 47.94 + 2.92 = 50.86 \text{ kg}$$

$$v_2 = \frac{V}{m} = \frac{5.0}{50.86} = 0.09831 \text{ m}^3/\text{kg}$$

در جدول ب-1-2 با درون یابی دیدیم که فشار $v_g = 0.09831 \text{ m}^3/\text{kg}$ و $2/03 \text{ MPa}$. لذا، فشار نهایی بخار آب $2/03 \text{ مگا پاسکال}$ است. در نتیجه:

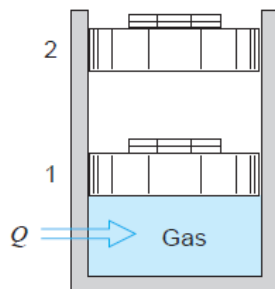
$$u_2 = 2600.5 \text{ kJ/kg}$$

$$U_2 = m u_2 = 50.86(2600.5) = 132\,261 \text{ kJ}$$

$$\underline{{}_1 Q_2 = U_2 - U_1 = 132\,261 - 27\,326 = 104\,935 \text{ kJ}}$$

آنتالپی

در تحلیل بعضی از فرایندها، اغلب با ترکیباتی از خواص ترمودینامیکی مواجه می شویم و این ترکیبات نیز خواصی از ماده اند که تغییر حالت می دهند. برای بررسی این موضوع، جرم کنترلی را در نظر می گیریم که دستخوش فرایند شبه تعادلی با فشار ثابت می شود. فرض می کنیم انرژی جنبشی و پتانسیل تغییر نمی کند و تنها کاری که در این فرایند انجام می شود کار مرز متحرک است.



گاز را به عنوان جرم کنترلی می گیریم و قانون اول را بکار می گیریم:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

کار انجام شده را از رابطه زیر می توان بدست آورد:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

چون فشار ثابت است:

$${}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

لذا،

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 \\ &= (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1) \end{aligned}$$

دیده می شود که، در این حالت بسیار مقید، انتقال گرما در طی فرایند بر حسب تغییر کمیت $U+PV$ بین دو حالت ابتدایی و نهایی بیان می شود. چون تمام این کمیت ها خواص ترمودینامیکی اند، یعنی فقط توابعی از حالت سیستم اند، ترکیب آنها نیز باید دارای همین مشخصه ها باشد. لذا، بهتر است خاصیت مقداری جدید آنتالپی را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$H \equiv U + PV$$

یا برای جرم واحد:

$$h \equiv u + Pv$$

مثال. سیستم سیلندر-پیستونی به حجم $0/1 \text{ m}^3$ حاوی $0/5 \text{ kg}$ بخار آب در $0/4 \text{ MPa}$ است. با انتقال گرما به آب در فشار ثابت، دمای آن به 300 C می رسد. انتقال گرما و کار انجام شده را در این فرایند بیابید.

جرم کنترل : آب داخل سیلندر

حالت اولیه : m, V_1, p_1 ؛ لذا u_1 معلوم است و حالت 1 مشخص میشود (با توجه به جداول بخار آب ، در p_1 و u_1 ناحیه دوفازی داریم

فرایند : فشار ثابت

تحلیل. تغییر انرژی جنبشی یا تغییر انرژی پتانسیل نداریم. کار بر اثر حرکت مرز انجام می شود. فرایند را شبه تعادلی می گیریم. چون فشار ثابت است داریم:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1) = m(P_2v_2 - P_1v_1)$$

طبق قانون اول :

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= m(u_2 - u_1) + {}_1W_2 \\ &= m(u_2 - u_1) + m(P_2v_2 - P_1v_1) = m(h_2 - h_1) \end{aligned}$$

حل. روش زیر را دنبال می کنیم. حالت 1 معلوم است لذا v_1 و h_1 را می توان تعیین کرد. حالت 2 نیز معلوم است، لذا h_2, v_2 را می توان به دست آورد. با استفاده از قانون اول و معادله کار، انتقال گرما و کار را می توان محاسبه کرد. با استفاده از آنتالپی ها:

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0.1}{0.5} = 0.2 = 0.001084 + x_1 0.4614$$

$$x_1 = \frac{0.1989}{0.4614} = 0.4311$$

$$\begin{aligned} h_1 &= h_f + x_1 h_{fg} \\ &= 604.74 + 0.4311 \times 2133.8 = 1524.7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_2 = 3066.8 \text{ kJ/kg}$$

$${}_1Q_2 = 0.5(3066.8 - 1524.7) = 771.1 \text{ kJ}$$

$${}_1W_2 = mP(v_2 - v_1) = 0.5 \times 400(0.6548 - 0.2) = 91.0 \text{ kJ}$$

لذا،

$$U_2 - U_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2 = 771.1 - 91.0 = 680.1 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u_f + x_1 u_{fg} \\
 &= 604.31 + 0.4311 \times 1949.3 = 1444.7 \text{ kJ/kg} \\
 u_2 &= 2804.8 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + {}_1W_2 \\
 &= 0.5(2804.8 - 1444.7) + 91.0 = 771.1 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

گرمای ویژه در حجم ثابت و گرمای ویژه در فشار ثابت

در این قسمت ، فاز همگن ماده ای با ترکیب ثابت را در نظر می گیریم . این فاز می تواند جامد ، مایع یا گاز باشد اما تغییر فاز روی نمی دهد ؛ لذا متغیری به نام گرمای ویژه را به عنوان مقدار گرمایی تعریف می کنیم که دمای جرم واحد را یک درجه افزایش می دهد . چون می خواهیم رابطه بین گرمای ویژه و سایر متغیرهای ترمودینامیکی را بررسی کنیم ، (با صرف نظر از تغییرات انرژی های جنبشی و پتانسیل و با فرض اینکه ماده تراکم پذیر ساده و فرایند شبه تعادلی است) داریم :

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

این عبارت را برای دو حالت خاص می توان ارزیابی کرد :

1 - حجم ثابت :

که در آن جمله کار (PdV) صفر است و لذا گرمای ویژه در حجم ثابت عبارت است از :

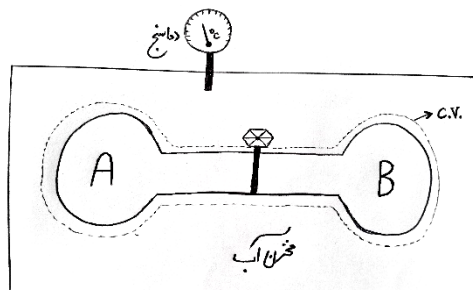
$$C_V = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_V \xrightarrow{V=cte \Rightarrow Q_V = \Delta U} \frac{1}{m} \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V$$

2 - فشار ثابت :

که در آن انتگرال جمله کار را می توان محاسبه و جمله PV حاصل را در حالت های ابتدایی و نهایی به جمله های انرژی داخلی نسبت داد و نتیجه گرفت که انتقال گرما را می توان بر حسب تغییر آنتالپی بیان کرد . لذا گرمای ویژه متناظر با فشار ثابت عبارت است از :

$$C_P = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_P \xrightarrow{P=cte \Rightarrow Q - P\Delta V = \Delta U \Rightarrow Q_P = \Delta H} \frac{1}{m} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$$

آزمایش ژول



شکل 3-3 شماتیک آزمایش ژول

ظرف A حاوی هوا با فشار 22 MPa و ظرف B در شرایط خلا قرار دارد. آقای ژول این مجموعه را داخل ظرف آب قرار داده و یک دماسنج نیز در آن جایگذاری کرد. سپس شیر واسط بین دو ظرف را باز کرد و مشاهده کرد که دما هیچ تغییری نمی کند.

$$T = cte \Rightarrow Q - W = \Delta U \xrightarrow{W=0} Q = \Delta U = 0 \Rightarrow U_1 = U_2$$

در نتیجه در گاز کامل، انرژی داخلی تابعی از فشار و حجم نمی باشد و تنها تابعی از دماست: $U_{Ideal\ gas} = f(T)$

به طور کلی انرژی داخلی (u) هر ماده ای به دو خاصیت مستقلی که حالت ماده را مشخص می کند بستگی دارد؛ ولی در گازها با چگالی کم، u عمدتاً به T بستگی دارد و با شدت خیلی کم تری به خاصیت دوم، P یا u بستگی دارد. با بررسی چند مقدار از بخار آب دیده می شود که u شدیداً به T بستگی دارد و بستگی چندانی به P ندارد؛ همچنین دیده می شود که در فشار کم وابستگی u به P کم تر می شود و در دمای زیاد خیلی کم تر می شود؛ یعنی با کاهش چگالی، وابستگی u به P (یا u) نیز کم می شود. لذا می توان این رفتار را برای گازها با چگالی خیلی کم نیز در نظر گرفت و با استفاده از گاز ایده آل می گوئیم انرژی داخلی ابتدا به فشار بستگی ندارد و فقط تابعی از دماست.

رابطه بین انرژی داخلی u و دما را با استفاده از تعریف گرمای ویژه در حجم ثابت می توان این گونه در نظر گرفت:

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

و از آنجایی که انرژی داخلی یک گاز ایده آل تابعی از حجم مخصوص نیست، می توان نوشت:

$$du = C_v dT$$

$$dU = mC_v dT$$

از تعریف آنتالپی و معادله حالت گاز ایده آل، نتیجه می شود:

$$PV = mRT \xrightarrow{\text{پس}} h = u + Pv = u + RT = f(T) + RT = G(T)$$

چون R ثابت است و u فقط تابعی از دماست، نتیجه می شود آنتالپی (h) یک گاز ایده آل نیز فقط تابعی از دماست:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P$$

چون آنتالپی یک گاز ایده آل فقط تابعی از دما و مستقل از فشار است ، در نتیجه :

$$dh = C_p dT$$

$$dH = m C_p dT$$

$$C_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v \xrightarrow{\text{ضرب طرفین در } dT \text{ و انتگرال گیری}} \int (du = C_v dT) \rightarrow \int_{u_1}^{u_2} du = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \Rightarrow \Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

$$C_p = \left(\frac{dh}{dT}\right)_p \xrightarrow{\text{ضرب طرفین در } dT \text{ و انتگرال گیری}} \int (dh = C_p dT) \rightarrow \int_{h_1}^{h_2} dh = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \Rightarrow \Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

$$\text{در گاز کامل} \rightarrow \begin{cases} C_v = \left(\frac{du}{dT}\right)_v = f(T) \\ C_p = \left(\frac{dh}{dT}\right)_p = f(T) \end{cases}$$

با استفاده از تعریف آنتالپی می توان رابطه مهمی بین گرماهای ویژه در فشار ثابت و حجم ثابت برای یک گاز ایده آل بدست آورد :

$$h = u + Pv = u + RT$$

با دیفرانسیل گیری از آن داریم :

$$dh = du + RdT$$

$$C_p dT = C_v dT + RdT$$

لذا :

$$C_p - C_v = R \quad , \quad R = \frac{\bar{R}}{M}$$

طبق این رابطه ، اختلاف بین گرماهای ویژه در فشار ثابت و در حجم ثابت برای یک گاز ایده آل همواره ثابت است ؛ اگرچه هردو تابعی از دما هستند . لذا فقط باید وابستگی دمایی یکی از این گرماهای ویژه را بررسی کنیم تا گرمای ویژه دوم به دست آید .

سه امکان را می توان بررسی کرد :

1 - C_p و C_v را ثابت در نظر بگیریم (گازهای تک اتمی) که در این صورت داریم :

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \xrightarrow{\text{برای گاز های تک اتمی از انتگرال خارج می شود}} \Delta u = C_{v_0} \Delta T$$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \xrightarrow{\text{برای گاز های تک اتمی از انتگرال خارج می شود}} \Delta h = C_{p_0} \Delta T$$

2- منحنی تغییرات C_p و C_v را برای گازها به دست می آوریم (طبق آزمایش) و بر اساس ضرایب ارائه شده در زیر ، انتگرال فوق را محاسبه می کنیم .

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + \dots + kT^6$$

3- انتگرال نتایج محاسبات ترمودینامیک آماری از یک دمای مرجع اختیاری تا دمای T محاسبه می شود (استفاده از جداول) :

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = \int_{T_0}^{T_2} C_v dT - \int_{T_0}^{T_1} C_v dT = u_{0_2} - u_{0_1}$$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = \int_{T_0}^{T_2} C_p dT - \int_{T_0}^{T_1} C_p dT = h_{0_2} - h_{0_1}$$

مثال :

تغییر آنتالپی 1kg اکسیژن را که از 300 تا 1500 درجه کلوین گرم می شود ، با استفاده از مدل گاز ایده آل بیابید .

حل :

این مسئله را از روش های مختلف حل و پاسخ ها را مقایسه می کنیم .

دقیق ترین پاسخ برای تغییر آنتالپی گاز ایده آل اکسیژن بین 300 تا 1500 درجه کلوین از جدول A_8 بدست می آید :

$$h_2 - h_1 = 1540.2 - 273.2 = 1267.0 \text{ kJ/kg}$$

معادله تجربی تقریب خوبی را برای این نتیجه می دهد :

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_p(\theta) d\theta$$

$$\left[0.88\theta - \frac{0.0001}{2}\theta^2 + \frac{0.54}{3}\theta^3 - \frac{0.33}{4}\theta^4 \right] = 1241.5 \text{ kJ/kg}$$

که 2٪ کم تر از نتیجه اول است .

اگر گرمای ویژه را ثابت بگیریم ، مقدار آن را باید مورد بررسی قرار دهیم ؛ اگر از مقدار متناظر با دمای 300 درجه از جدول استفاده کنیم ، داریم :

$$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) = 0.922 \times 1200 = 1106.4 \text{ kJ/kg}$$

که 12.7٪ کم تر است .

حال گرمای ویژه ثابت را در دمای 900 درجه که دمای متوسط است در نظر بگیریم ، با جایگذاری 900 در معادله گرمای ویژه داده شده در جدول A_6 داریم :

$$C_p = 0.88 - 0.0001(0.9) + 0.54(0.9)^2 - 0.33(0.9)^3 = 1.0767 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 - h_1 = 1.0767 \times 1200 = 1292.1 \text{ kJ/kg}$$

که 2٪ بیشتر است و به نتیجه حاصل از گرمای ویژه در دمای اتاق خیلی نزدیک است .
باید توجه داشت که برای انتخاب مقدار گرمای ویژه ثابت می توان از مدل گاز ایده آل استفاده کرد .

مثال :

یک سیستم سیلندر - پیستونی با حجم اولیه 0.1 m^3 حاوی نیتروژن در فشار 150 kPa و دمای 25°C است . با حرکت پیستون ، نیتروژن تا فشار 1 MPa و دمای 150°C متراکم می شود . در این فرایند تراکم ، گرما از نیتروژن دفع و 20 kJ کار روی آن انجام می شود . مقدار انتقال گرما را بیابید .

تحلیل :

طبق قانون اول :

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + {}_1W_2$$

حل :

جرم نیتروژن از معادله حالت بدست می آید :

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{150 \text{ kPa} \times 0.1 \text{ m}^3}{0.2968 \text{ kJ/kgK} \times 298.15 \text{ K}} = 0.1695 \text{ kg}$$

با فرض گرمای ویژه داده شده در جدول :

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= mC_v(T_2 - T_1) + {}_1W_2 \\ &= 0.1695 \text{ kg} \times 0.745 \text{ kJ/kgK} \times (150 - 25) \text{ K} - 20.0 = 15.8 - 20.0 = -4.2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

مثال :

یک تانک صلب به دو بخش A و B توسط یک غشا تقسیم شده است . هر دو قسمت شامل آب می باشند ؛ بخش A حاوی آب در فشار 200 kPa و $v = 0.5 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ و بخش B شامل 3.5 kg آب در فشار 0.5 MPa و دمای 400°C می باشد . غشا پاره می شود و سیال های دو بخش با همدیگر مخلوط می شوند تا به دمای نهایی 100°C می رسند . انتقال حرارت در طول فرآیند را بیابید .

حل :

حجم کنترل : کل تانک (شامل دو بخش A و B)

فرض : از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می کنیم

چون در کل تانک حجم ثابت است : $W = 0$

از قانون اول استفاده می کنیم: $Q - W = U_2 - U_1$

طبق فرض : $Q = m_2 u_2 - (m_{1A} u_{1A} + m_{1B} u_{1B})$

طبق پایستگی جرم داریم : $m_2 = m_{1A} + m_{1B}$

$$m_{1A} = \frac{V_{1A}}{v_{1A}} = \frac{1}{0.5} = 2 \text{ kg}$$

$$m_2 = 2 + 3.5 = 5.5 \text{ kg}$$

از جدول متوجه می شویم که بخش A در حالت دو فازی است :

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = 0.564$$

$$u_A = u_f + x u_{fg} = 1646.6 \text{ kJ/kg}$$

فشار و دمای بخش B را داریم در نتیجه از جدول مافوق گرم تمامی داده های آن را می توانیم بیابیم :

$$u_B = 2963.2$$

$$v_B = 0.6173$$

$$V_B = m_B v_B = 2.16 \text{ m}^3$$

$$v_2 = \frac{V}{m} = \frac{1 + 2.16}{5.5} = 0.5746$$

برای حالت دوم حجم مخصوص و دما را داریم در نتیجه در جدول در ناحیه دو فازی قرار دارد :

$$x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = 0.343$$

$$u_2 = u_f + x u_{fg} = 1134.95 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = -7421 \text{ kJ}$$

یادداشت

یادداشت

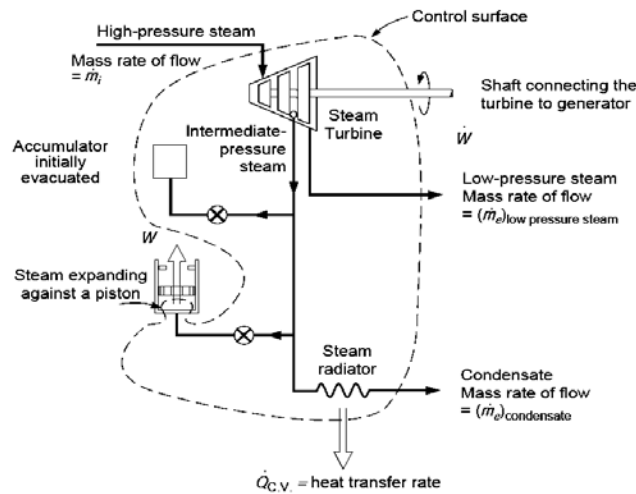
فصل چهارم

تحلیل قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل باز

حجم کنترل و پایستاری جرم

حجمی از فضا را که برای مطالعه خاصی در نظر گرفته می شود حجم کنترل ، و سطح آن را که همواره از سطح بسته ای تشکیل می شود ، سطح کنترل می گویند . اندازه و شکل حجم کنترل کاملا اختیاری اند و طوری در نظر گرفته می شوند که تحلیل به ساده ترین وجه انجام شود . سطح کنترل می تواند ثابت باشد یا منبسط و منقبض شود ؛ ولی سطح نسبت به دستگاه مختصات تعریف شده ای باید ثابت باشد . در بعضی تحلیل ها ممکن است بهتر باشد دستگاه مختصات چرخان یا متحرکی در نظر بگیریم و وضعیت سطح کنترل را نسبت به آن توصیف کنیم .

جرم ، گرما و کار می توانند از سطح کنترل بگذرند و جرم داخل حجم کنترل و نیز خواص آن می توانند بر حسب زمان تغییر کنند . در شکل زیر طرحواره حجم کنترلی که با انتقال گرما ، کار شفت ، کار مرز متحرک ، انباشت جرم در حجم کنترلی که با چند جریان جرم سروکار دارد نشان داده شده است . هر یک از این جریان های جرم و انرژی و قسمت هایی از حجم کنترل را که می توانند جرم ذخیره کنند باید مشخص کرد .

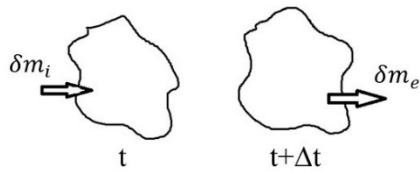


شکل 4-1 طرح شماتیک حجم کنترلی

حال قانون پایستاری جرم را در رابطه با حجم کنترل بررسی می کنیم . طبق قانون پایستاری جرم ، جرم نه می تواند ایجاد شود نه می تواند از بین برود . این قانون را به صورت ریاضی برای جرم داخل حجم کنترل بیان می کنیم ؛ برای انجام این کار ، باید تمام جریان های جرمی ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن و نیز افزایش خالص جرم داخل حجم کنترل را در نظر بگیریم . برای سهولت ، مخزنی را در نظر می گیریم که مطابق شکل زیر سیستم سیلندر - پیستونی و دو لوله به آن متصل شده اند . با ورود یا خروج جرم ، آهنگ تغییر جرم در داخل حجم کنترل مخالف صفر خواهد بود و داریم :

« خروجی - ورودی + = آهنگ تغییر »

برای جریان ورودی و خروجی می نویسیم :



در زمان t : $m_t + \delta m_i$

در زمان $t + \Delta t$: $m_{t+\Delta t} + \delta m_e$

$$\xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} m_t + \delta m_i = m_{t+\Delta t} + \delta m_e$$

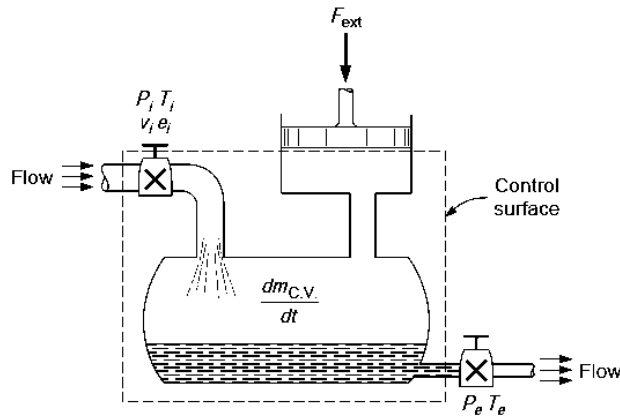
$$\frac{1}{\delta t} (\delta m_i - \delta m_e) = \frac{1}{\delta t} (m_{t+\Delta t} - m_t)$$

از طرفین حد می گیریم $\xrightarrow{\quad}$

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m_i - \delta m_e}{\delta t} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{m_{t+\Delta t} - m_t}{\delta t} \Rightarrow \dot{m}_i - \dot{m}_e = \frac{dm_{C.V.}}{dt}$$

حال اگر چندین ورودی و خروجی داشته باشیم :

$$\frac{dm_{C.V.}}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{m}_i - \sum_{e=1}^M \dot{m}_e$$



شکل 4-2 بررسی آهنگ تغییر جرم

طبق این رابطه با ورود یا خروج جرم ، جرم داخل حجم کنترل بر حسب زمان تغییر می کند . هیچ وسیله دیگری وجود ندارد که باعث تغییر جرم در حجم کنترل شود .

چون معادله بالا برای جرم کل در حجم کنترل نوشته می شود ، آن را متشکل از چند سهم می توان در نظر گرفت :

$$m_{C.V.} = \int \rho dV = \int (1/V) dV = m_A + m_B + m_C + \dots$$

وقتی حجم کنترل دارای چند وسیله ذخیره کننده انرژی با حالت های گوناگون جرم است ، جمع بندی بالا نیاز است .

حال آهنگ های جریان جرمی را در عرض سطح کنترل یا تفصیل کم تر بررسی می کنیم . برای سهولت فرض می کنیم سیالی در مجرای شکل زیر جریان دارد ؛ می خواهیم آهنگ جریان کل را به خواص محلی حالت سیال ارتباط دهیم . جریان در عرض سطح کنترل را با سرعت متوسط یا با سرعت توزیعی در مقطع عرضی می توان نشان داد . آهنگ جریان حجمی عبارت است از :

$$\dot{V} = v A = \int v_{local} dA$$

لذا آهنگ جرم چنین است :

$$\dot{m} = \rho_{avg} \dot{V} = \dot{V} / V = \int (v_{local} / V) dA = v A / V$$

که در آن اغلب از سرعت متوسط استفاده می شود . این معادله برای هر جریان متغیر عمود بر سطحی که وارد حجم کنترل یا از آن خارج می شود به کار می رود .

مثال :

هوا با سرعت یکنواخت 0.1 m/s وارد لوله ای به قطر 0.2 m می شود . دما 25° C و فشار 150 kPa است . آهنگ جرم را بیابید .

حل :

$$\dot{m} = v A / V$$

$$V = \frac{RT}{P} = \frac{0.287 \text{ kJ/kg K} \times 298.2 \text{ K}}{150 \text{ kPa}} = 0.5705 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0.2)^2 = 0.0314 \text{ m}^2$$

لذا داریم :

$$\dot{m} = v A / V = 0.1 \text{ m/s} \times \frac{0.0314 \text{ m}^2}{0.5705 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.0055 \text{ kg/s}$$

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل

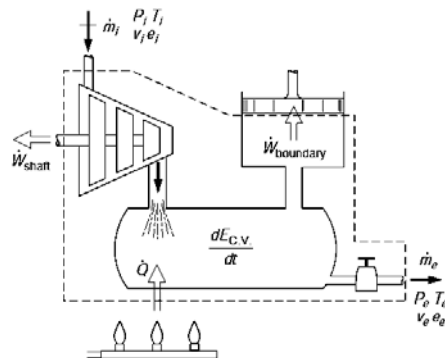
قانون اول ترمودینامیک را برای جرم کنترل که دارای جرم ثابت است ، بررسی کرده و آن را به صورت زیر نوشتیم :

$$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

همچنین دیدیم که رابطه بالا را به صورت معادله آهنگی زیر می توان نوشت :

$$\frac{dE_{C.M.}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

حجم کنترلی را که با انتقال گرما، کار به شکل آهنگی و با جریان های جرم سروکار دارد را مطابق شکل زیر در نظر بگیرید. طبق یکی از قوانین بنیادی فیزیک، انرژی را نه می توان ایجاد کرد نه می توان از بین برد و به این ترتیب هر تغییر انرژی، ناشی از انرژی ورودی به حجم کنترل یا انرژی خروجی از حجم کنترل است.



شکل 3-4 حجم کنترلی با انتقال گرما

سیالی که در عرض سطح کنترل جریان دارد با انرژی زیر، به ازای جرم واحد، وارد یا خارج می شود:

$$e = u + \frac{1}{2}v^2 + gz$$

هر وقت سیال در حالت i وارد حجم کنترل یا در حالت e از آن خارج شود، کار حرکت مرز در فرایند به وجود می آید. برای توضیح این موضوع مقداری جرم را که وارد حجم کنترلی می شود را در نظر می گیریم؛ هنگام ورود این جرم به داخل فشاری در سطح پشت این جرم وجود دارد به طوری که جرم پشت سر آن، که اطراف را تشکیل می دهد، آن را به داخل حجم کنترل هل می دهد. تاثیر خالص این است: اطراف که جرم مذکور را با سرعتی بر علیه فشار محلی به داخل حجم کنترل رانده است، روی آن کار انجام داده است. به طور مشابه، سیالی که در حالت e داخل حجم کنترل است، سیال اطراف جلوی خود را هل می دهد و روی آن کار انجام می دهد و این کاری است که از حجم کنترل خارج می شود. سرعت و مساحت متناظر با حجم معینی که در زمان واحد وارد حجم کنترل می شود، ما را قادر می سازد کار خروجی را به آهنگ جرم و حجم مخصوص در حالت ورودی ارتباط دهیم. حال آهنگ کار جریان را به صورت زیر بیان می کنیم:

$$\dot{W}_{flow} = F v = \int P v dA = P\dot{V} = P v \dot{m}$$

حجم کنترل با آهنگ $P_e v_e \dot{m}_e$ روی جریانی که از حجم کنترل خارج می شود کار انجام می دهد؛ و اطراف با آهنگ $P_i v_i \dot{m}_i$ روی جرمی که وارد حجم کنترل می شود کار انجام می دهد. لذا کار جریان برای جرم واحد Pv است و انرژی کل مربوط به جریان جرم عبارت است از:

$$e + Pv = u + Pv + \frac{1}{2}v^2 + gz = h + \frac{1}{2}v^2 + gz$$

در این معادله از تعریف خاصیت ترمودینامیکی آنتالپی استفاده کرده ایم و انرژی جریان جرم یعنی عبارت $u + Pv$ ، علت اصلی تعریف آنتالپی است. بسط قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر است:

$$\frac{dE_{C.V.}}{dt} = \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} + \dot{m}_i e_i - \dot{m}_e e_e + \dot{W}_{flow in} - \dot{W}_{flow out}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{C.V.}}{dt} &= \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} + \dot{m}_i(e_i + P_i v_i) - \dot{m}_e(e_e + P_e v_e) \\ &= \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} + \dot{m}_i(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) \end{aligned}$$

حجم کنترل کلی می تواند چند جریان جرمی ورودی و خروجی داشته باشد و اغلب باید روی این جمله ها جمع زنی کرد ؛ لذا قانون اول ترمودینامیک به صورت زیر در می آید :

$$\frac{dE_{C.V.}}{dt} = \dot{Q}_{C.V.} - \dot{W}_{C.V.} + \sum \dot{m}_i(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e)$$

فرایند در حالت پایا (sssf)

اولین کاربرد معادله های حجم کنترلی این است که از آنها برای استنتاج مدل تحلیل مناسبی برای عملیات پایای طولانی مدت وسایلی چون توربین ها، کمپرسورها، نازل ها، بویلرها، کندانسورها - که گروه بسیار وسیعی از مسائل ترمودینامیک را فرا می گیرد- استفاده می شود. این مدل شامل عملیات کوتاه مدت یا دوره توقف وسایل مذکور نمی شود ؛ بلکه فقط شامل عملیات پایاست .

حال فرض های زیر را در نظر می گیریم :

- حجم کنترل نسبت به مرجع مختصات حرکت نمی کند .
- حالت جرم در هر نقطه داخل حجم کنترل بر حسب زمان تغییر نمی کند .
- شار جرم که در عرض سطح کنترل جریان دارد و حالت این جرم در هر سطح مجزایی از سطح کنترل بر حسب زمان تغییر نمی کند .
- آهنگ انتقال گرما و کار در عرض سطح کنترل ثابت است .

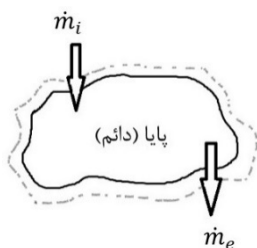
به عنوان نمونه ای از فرایند در حالت پایا ، کمپرسور هوای سانتریفیوژی را در نظر بگیرید که آهنگ جرم ورودی و خروجی از آن ثابت است ؛ خواص در تمام نقاط ورودی و خروجی مجراها ثابت اند ؛ آهنگ انتقال گرما به اطراف ثابت است و قدرت کمپرسور نیز ثابت است . در هر نقطه از این کمپرسور خواص بر حسب زمان ثابت اند ؛ حتی اگر خواص قسمتی از هوا هنگام جریان در کمپرسور تغییر کند . اغلب ، این فرایند را فرایند با جریان پایا می گویند ؛ زیرا عمدتاً با خواص سیال ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن سروکار داریم .

حال مفهوم هر یک از این فرض ها را برای فرایند پایا در نظر می گیریم :

- فرض سکون حجم کنترل نسبت به دستگاه مختصات به این معنی است که تمام سرعت ها نسبت به این دستگاه مختصات ، سرعت ها نسبت به سطح کنترل نیز هستند و کاری در ارتباط با شتاب حجم کنترل انجام نمی شود .
- این فرض که حالت جرم در هر نقطه داخل حجم کنترل بر حسب زمان تغییر نمی کند می رساند که :

$$\frac{dm_{C.V.}}{dt} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{dE_{C.V.}}{dt} = 0$$

لذا برای فرایند پایا می توان نوشت :



$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

$$\dot{Q}_{C.V.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \dot{W}_{C.V.}$$

• این فرض که جریان های مختلف جرم ، حالت ها و آهنگ های انتقال گرما و کار عبوری از سطح کنترل ثابت می ماند ، می رساند که هر کمیتی در معادلات بالا بر حسب زمان ثابت است و این معادله ها را در تمام طول کارکرد وسایل می توان به کار برد .

در اغلب کاربرد های مدل پایا ، فقط با یک جریان ورودی به حجم کنترل و یک جریان خروجی از حجم کنترل سروکار داریم . در این نوع فرایند می توان نوشت :

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

$$\dot{Q}_{C.V.} + \dot{m} \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \dot{W}_{C.V.}$$

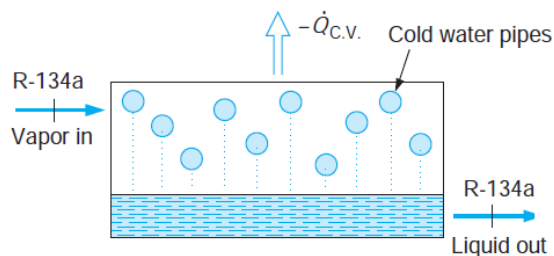
$$q + h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i = h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e + w$$

$$q = \frac{\dot{Q}_{C.V.}}{\dot{m}} \quad \text{and} \quad w = \frac{\dot{W}_{C.V.}}{\dot{m}}$$

نمونه هایی از فرایند پایا

مبدل گرمایی

مبدل گرمایی پایا وسیله ای است که در آن سیالی در لوله ای یا مجموعه ای از لوله ها به طور ساده جریان دارد و گرما به سیال داده یا از آن دفع می شود . سیال می تواند گرم یا سرد شود ؛ می تواند بجوشد (تبدیل مایع به بخار) یا نجوشد ؛ می تواند چگالیده شود (تبدیل بخار به مایع) یا نشود . به عنوان نمونه می توان از کندانسور نام برد ؛ بخار فوق گرم وارد کندانسور شده و به صورت مایع از آن خارج می شود . فرایند در فشار ثابت روی می دهد . در این وسیله هیچ کاری انجام نمی شود و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل معمولاً ناچیز است . انتقال گرما در اغلب مبدل های گرمایی به صورت تغییر آنتالپی سیال محاسبه می شود . نمونه ای از کندانسور سیستم تبرید را مشاهده می کنید :



شکل 4-4 کندانسور سیستم تبرید

نازل (شیپوره)

نازل وسیله جریان پایایی است که در آن جریان سیال افزایش و فشار آن کاهش می یابد. نازل طوری شکل داده می شود که سیال در حال جریان به طور هموار منبسط و کاهش فشار دهد و سرعت آن افزایش یابد. در نازل هیچ کاری انجام نمی شود و در آن تغییر انرژی پتانسیل و انتقال گرما معمولا ناچیز یا صفر است. انرژی جنبشی سیال در ورودی نازل معمولا کم است و اگر مقدار آن معلوم نباشد می توان از آن صرف نظر کرد.

دیفیوزر (پخش کن)

دیفیوزر پایا وسیله ای است که سرعت سیال را کاهش و فشار آن را افزایش می دهد. اساسا دیفیوزر دقیقا برعکس نازل عمل می کند؛ فرض های مربوط به دیفیوزر مانند فرض های مربوط به نازل است.

شیر تنظیم جریان (فشار شکن)

فرایند اختناق وقتی روی می دهد که جریانی در خطی ناگهان با محدودیت مجرای جریان روبرو شود. این محدودیت می تواند ناشی از یک صفحه یا سوراخی در آن، یا ناشی از شیر نیمه بسته ای باشد که در مجرای جریان قرار دارد؛ یا ناشی از تبدیل مجرا به لوله ای با قطر بسیار کوچک تر، به نام لوله مویین باشد که معمولا در یخچال ها وجود دارد. بر اثر این محدودیت، سیال که باید در مجرای ناگهان تنگ شده حرکت کند دستخوش افت فشار ناگهانی می شود. این فرایند با انبساط در نازل که دارای مرز هموار و تغییر سطح هموار است و سرعت در آن به طور قابل توجه افزایش می یابد، خیلی تفاوت دارد. معمولا قدری افزایش سرعت در فشار شکن وجود دارد اما انرژی جنبشی در ورودی و خروجی آن معمولا ناچیز است. در این وسیله کاری انجام نمی شود و تغییر انرژی پتانسیل کم یا صفر است. معمولا فرصتی برای تبادل گرما در این وسیله وجود ندارد؛ به طوری که تنها جمله هایی که در قانون اول می مانند آنتالپی های ورودی و خروجی هستند. به این ترتیب فرایند اختناق در حالت پایا را تقریبا افت فشار در آنتالپی ثابت فرض می کنیم؛ مگر اینکه خلاف آن ذکر شود. اغلب فرایند اختناق با تغییر فاز سیال همراه است.

توربین

توربین ماشین پایای چرخانی است که در آن فشار سیال عامل کاهش می یابد و بر اثر آن کار شفت ایجاد می شود.

دو دسته توربین کلی عبارتند از:

الف) توربین بخاری (یا توربین هایی که با سیال عامل دیگری کار می کنند) و در آن بخار آب خروجی از توربین وارد کندانسور و در آنجا به مایع تبدیل می شود.

ب) توربین گازی که در آنها گاز معمولا از توربین به اتمسفر تخلیه می شود.

در هر یک از دو نوع بالا شرایط محیطی که سیال عامل به آن تخلیه می شود و فشار ورودی توربین که توسط پمپاژ یا متراکم کردن سیال عامل در فرایند دیگری ایجاد می شود، عواملی هستند که فشار خروجی توربین را مشخص می کنند.

در داخل توربین دو فرایند جداگانه روی می دهد:

در فرایند اول، سیال عامل از مجموعه نازل ها یا وسایل مشابه آنها - مجرا های ثابت پره داری که سیال در آن ها تا فشار کم تر و سرعت زیاد منبسط می شود - عبور می کند.

در فرایند دوم ، این جریان پرسرعت به سمت مجموعه ای از پره های متحرک (چرخان) هدایت می شود و در آن جا قبل از این که سیال از مجرا خارج شود ، سرعتش کاهش می یابد . این کاهش سرعت هدایت شده باعث اعمال گشتاور بر شفت چرخان می شود و کار شفت به وجود می آید ؛ سپس سیال کم سرعت و کم فشار از توربین خارج می شود .

معمولا تغییرات انرژی پتانسیل و نیز انرژی جنبشی ورودی در توربین ها ناچیز است . اغلب از انرژی جنبشی خروجی نیز صرف نظر می شود و هر گونه دفع گرما از توربین ، نامطلوب و معمولا کم است . لذا معمولا فرایند در توربین را ادیاباتیک فرض می کنیم و کار خروجی در این حالت برابر است با کاهش آنتالپی از حالت ورودی تا حالت خروجی .

کمپرسور و پمپ

وظایف کمپرسور گاز پایا و پمپ مایع پایا یکسان است ؛ هر دو روی سیال کار انجام می دهند و فشار آن را افزایش می دهند . کمپرسور ها بر دو دسته اند . متداول ترین نوع ، کمپرسور چرخان است (جریان محوری یا شعاعی) که در آن فرایندهای داخلی اساسا متضاد با دو فرایندی هستند که در توربین روی می دهد . سیال عامل با فشار کم وارد کمپرسور می شود ، به داخل تیغه های چرخان حرکت می کند و از آن جا با سرعت زیاد خارج می شود و در نتیجه روی آن کار انجام می شود . آنگاه پس از عبور از دیفیوزر کاهش سرعت و افزایش فشار می دهد و با فشار زیاد از کمپرسور خارج می شود . معمولا تغییرات انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی ورودی در کمپرسور ناچیز است ؛ اغلب از انرژی جنبشی خروجی نیز صرف نظر می شود . دفع گرما از سیال عامل در ضمن تراکم فرایند مطلوب است اما مقدار آن در کمپرسور چرخان که ماشینی با آهنگ جریان حجمی زیاد است ، کم می باشد و فرصت کافی برای دفع گرمای بیشتر از سیال عامل وجود ندارد . لذا فرایند در کمپرسور چرخان را ادیاباتیک می گیریم و کار ورودی در این حالت برابر است با تغییرات آنتالپی از حالت ورودی تا حالت خروجی . در کمپرسور سیلندر-پیستونی ، سیلندر معمولا پره هایی دارد که دفع گرما را در ضمن تراکم تسریع می کنند (برای سرمایش با آهنگ بیشتر در کمپرسورهای بزرگ می توان سیلندر را مجهز به ژاکت آب - خنک کرد) . در این نوع کمپرسور دفع گرما از سیال عامل قابل توجه است و در قانون اول در نظر گرفته می شود . به عنوان یک قاعده کلی ، مسایل این متن ، کمپرسور را ادیاباتیک بگیریید مگر اینکه خلاف آن ذکر شده باشد .

فرایند گذرا یا یکنواخت (usuf)

بسیاری از فرایندها در ترمودینامیک با جریان غیر پایا سروکار دارند و در گروه فرایندهای پایا قرار نمی گیرند . بعضی فرایندهای غیر پایا مانند شارژ مخزن های بسته از گاز یا مایع یا تخلیه مخزن های بسته را می توان در تقریب اول با مدل ساده ای نشان داد ؛ این فرایند را فرایند گذرا می نامیم .

فرض های مدل گذرا عبارتند از :

- حجم کنترل نسبت به دستگاه مختصات مرجع ثابت است .
- حالت جرم در داخل حجم کنترل می تواند بر حسب زمان تغییر کند ؛ اما این حالت در هر لحظه در تمام حجم کنترل یکنواخت است .
- حالت جرمی که از سطوح جریان در سطح کنترل می گذرد ، بر حسب زمان ثابت است ولی آهنگ های جرم می توانند بر حسب زمان تغییر کنند .

حال ، نتایج این فرض ها و عبارت قانون اول را که برای این فرایند به کار می رود بررسی می کنیم . فرایند کلی در زمان t روی می دهد . در هر لحظه در این فرایند ، معادله پیوستگی به صورت زیر است :

$$\frac{dm_{C.V.}}{dt} + \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_i = 0$$

$$\frac{dm_{C.V.}}{dt} \neq 0 \quad \text{and} \quad \frac{dE_{C.V.}}{dt} \neq 0$$

که در آن جمع زنی روی تمام سطوح جریان انجام می شود . با انتگرال گیری نسبت به زمان t تغییر جرم در داخل حجم کنترل در فرایند کلی به دست می آید :

$$\int_0^t \left(\frac{dm_{C.V.}}{dt} \right) dt = (m_2 - m_1)_{C.V.}$$

جرم کل خروجی از حجم کنترل در زمان t عبارت است از :

$$\int_0^t \left(\sum \dot{m}_e \right) dt = \sum m_e$$

جرم کل ورودی به حجم کنترل در طی زمان t چنین است :

$$\int_0^t \left(\sum \dot{m}_i \right) dt = \sum m_i$$

لذا در دوره زمانی t معادله پیوستگی برای فرایند گذرا بصورت زیر می توان نوشت :

$$(m_2 - m_1)_{C.V.} + \sum m_e - \sum m_i = 0$$

برای نوشتن قانون اول در فرایند گذرا معادله زیر را که در هر لحظه از فرایند به کار می رود در نظر می گیریم :

$$\dot{Q}_{C.V.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \frac{dE_{C.V.}}{dt} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \dot{W}_{C.V.}$$

چون حالت در داخل حجم کنترل در هر لحظه یکنواخت است ، قانون اول برای فرایند گذرا به صورت زیر در می آید :

$$\dot{Q}_{C.V.} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \frac{d}{dt} \left[m \left(u + \frac{v^2}{2} + gZ \right) \right]_{C.V.} + \dot{W}_{C.V.}$$

حال از این معادله نسبت به t انتگرال می گیریم :

$$\int_0^t \dot{Q}_{C.V.} dt = Q_{C.V.}$$

$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) \right] dt = \sum m_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right)$$

$$\int_0^t \left[\sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) \right] dt = \sum m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right)$$

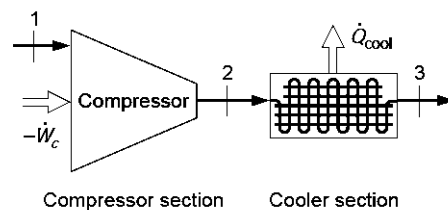
$$\int_0^t \dot{W}_{C.V.} dt = W_{C.V.}$$

$$\int_0^t \frac{d}{dt} \left[m \left(u + \frac{v^2}{2} + gZ \right) \right]_{C.V.} dt = \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{C.V.}$$

لذا در دوره زمانی t قانون اول برای فرایند گذرا به صورت زیر است :

$$Q_{C.V.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{C.V.} + W_{C.V.}$$

مثال . دی اکسید کربن در فشار 100 kPa ، دمای 280° K و با سرعت کم وارد یک کمپرسور می شود . در فشار 1100 kPa ، دمای 500° K و با سرعت 25 m/s از آن خارج و سپس وارد پس خنک کن فشارثابت (مبدل گرمایی) می شود و در آنجا تا 350° K خنک می شود . قدرت کمپرسور 50 kW است . آهنگ انتقال گرما را در پس خنک کن بیابید .



حل :

کمپرسور وسیله ای پایاست با یک جریان ورودی و یک جریان خروجی . معادله انرژی :

$$q + h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + w$$

در این جا فرض می کنیم انتقال گرما و انرژی جنبشی و پتانسیل برابر صفر است و آنتالپی را از جدول می خوانیم . پس داریم :

$$-w = h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 - h_1 = 401.52 + \frac{25^2}{2 \times 1000} - 198 = 203.5 + 0.3 = 203.8 \text{ kJ/kg}$$

برای تبدیل انرژی جنبشی از J/kg به kJ/kg آن را بر 1000 تقسیم کرده ایم .

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_c}{w} = \frac{-50}{-203.8} = 0.245 \text{ kg/s}$$

پس برای خنک کن پایا با یک جریان ورودی و یک جریان خروجی و فاقد کار داریم :

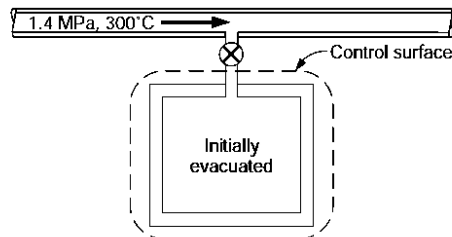
$$q + h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 = h_3 + \frac{1}{2} V_3^2$$

در این جا تغییر انرژی جنبشی را ناچیز می گیریم و مجدداً h را از جدول می خوانیم . پس داریم :

$$q = h_3 - h_2 = 257.9 - 401.5 = -143.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{cool} = -\dot{Q}_{C.V.} = -\dot{m}q = 0.245 \text{ kg/s} \times 143.6 \text{ kJ/kg} = 35.2 \text{ kW}$$

مثال : بخار آب در فشار 1.4 MPa و دمای 300°C در لوله ای جریان دارد . این لوله از طریق شیری به مخزن تخلیه شده ای متصل است . شیر باز می شود و بخار آب وارد مخزن می شود و فشار به 1.4 MPa می رسد و شیر بسته می شود . این فرایند به طور ادیاباتیک روی می دهد و انرژی های جنبشی و پتانسیل ناچیزند . دمای نهایی بخار آب را بیابید .



فرضیات :

2- از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می شود

1- فرایند آدیاباتیک است ($Q = 0$)

$$m_e = m_1 = 0 \rightarrow \sum m_i - \sum m_e = m_2 - m_1 \Rightarrow m_i = m_2 - 4$$

3- کار برابر با صفر است

تحلیل :

از قانون اول داریم :

$$Q_{c.v.} + \sum m_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) = \sum m_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) + \left[m_2 \left(u_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) - m_1 \left(u_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) \right]_{c.v.} + W_{c.v.}$$

توجه کنید که انتقال گرما و کار و جرم خروجی و جرم اولیه حجم کنترل برابر صفر است . همچنین انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیزند . لذا

$$m_i h_i = m_2 u_2 \quad \text{قانون اول برای این فرایند به صورت مقابل است :}$$

$$m_2 = m_i \quad \text{از معادله پیوستگی برای این فرایند نتیجه می شود :}$$

$$h_i = u_2 \quad \text{لذا با ترکیب قانون اول و معادله پیوستگی داریم :}$$

یعنی انرژی داخلی نهایی بخار آب در مخزن با آنتالپی بخار آب ورودی به مخزن برابر است .

حل :

$$h_i = u_2 = 3040.4 \text{ kJ/kg} \quad \text{از جداول بخار آب داریم :}$$

چون فشار نهایی 1.4 MPa داده شده است ، دو خاصیت را در حالت نهایی می دانیم و لذا این حالت معلوم می شود . دمای متناظر با این فشار 452° C و انرژی داخلی برابر با 3040.4 kJ/kg است .

مثال : فرض کنید مخزن مثال قبل به حجم 0.4 m³ است و ابتدا حاوی بخار اشباع در فشار 350 KPa است . شیر باز می شود و بخار آب از لوله ای که در فشار 1.4 MPa و دمای 3007° C است وارد مخزن می شود و فشار به 1.4 MPa می رسد . جرم بخار آبی را که وارد مخزن شده است بیابید .

تحلیل :

این مثال مانند مثال قبل است با این تفاوت که مخزن در ابتدا خالی نیست . $Q_{c.v.} = 0$ و $W_{c.v.} = 0$ و $m_e = 0$ و فرض می کنیم تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است . قانون اول برای این فرایند به صورت زیر است :

$$m_i h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

معادله پیوستگی به صورت زیر در می آید :

$$m_2 - m_1 = m_i$$

با ترکیب معادله پیوستگی و قانون اول داریم :

$$(m_2 - m_1) h_i = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$m_2(h_i - u_2) = m_1(h_i - u_1)$$

دو مجهول m_2 و u_2 در این معادله وجود دارند ولی معادله اضافی زیر را نیز داریم :

$$m_2 v_2 = V = 0.4 \text{ m}^3$$

با جایگذاری و مرتب کردن داریم :

$$\frac{V}{v_2}(h_i - u_2) - m_1(h_i - u_1) = 0$$

که در آن v_2 و u_2 که هر دو تابعی از T_2 و P_2 هستند ، مجهول اند . T_2 مجهول است یعنی فقط یک مقدار برای T_2 وجود دارد که به ازای آن معادله برقرار است و باید آن را با آزمون و خطا بیابیم .

حل :

داریم :

$$v_1 = 0.5243 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad m_1 = \frac{0.4}{0.5243} = 0.763 \text{ kg}$$

$$h_i = 3040.4 \text{ kJ/kg} \qquad u_1 = 2548.9 \text{ kJ/kg}$$

فرض می کنیم $T_2 = 300^\circ\text{C}$. برای این دما و مقدار معلوم P_2 داریم :

$$v_2 = 0.1823 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad u_2 = 2785.2 \text{ kJ/kg}$$

با جایگذاری در معادله داریم :

$$\frac{0.4}{0.1823}(3040.4 - 2785.2) - 0.763(3040.4 - 2548.9) = +185.0 \text{ kJ}$$

حال فرض می کنیم $T_2 = 350^\circ\text{C}$. برای این دما و مقدار معلوم P_2 داریم :

$$v_2 = 0.2003 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad u_2 = 2869.1 \text{ kJ/kg}$$

با جایگذاری در معادله داریم :

$$\frac{0.4}{0.2003}(3040.4 - 2869.1) - 0.763(3040.4 - 2548.9) = -32.9 \text{ kJ}$$

دیده می شود T_2 واقعی باید بین دو مقدار فرضی بالا باشد تا جواب معادله برابر صفر شود . با درون یابی خواهیم داشت :

$$T_2 = 342^\circ\text{C} \qquad \text{and} \qquad v_2 = 0.1974 \text{ m}^3/\text{kg}$$

جرم نهایی در داخل مخزن عبارت است از :

$$m_2 = \frac{0.4}{0.1974} = 2.026 \text{ kg}$$

جرم بخار آبی که وارد مخزن می شود برابر است با :

$$m_i = m_2 - m_1 = 2.026 - 0.763 = 1.263 \text{ kg}$$

مثال : مخزنی به حجم 2 m^3 حاوی آمونیاک اشباع در دمای 40°C است . ابتدا 50 درصد حجم مخزن را مایع و 50 درصد آن را بخار تشکیل می دهد . بخار از بالای مخزن کشیده می شود و دما به 10°C می رسد . با فرض این که فقط بخار خارج می شود و فرایند ادیاباتیکی است ، جرم آمونیاک خارج شده را بیابید .

تحلیل :

در قانون اول قرار می دهیم $Q_{c.v.} = 0$ ، $W_{c.v.} = 0$ ، $m_i = 0$ و تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل را ناچیز می گیریم . ولی آنتالپی بخار اشباع بر حسب دما تغییر می کند و به سهولت نمی توان فرض کرد آنتالپی خروج از مخزن ثابت است . اما توجه داریم که در 40°C ، $h_g = 1470.2$ و در 10°C ، $h_g = 1452$. چون تغییر h_g در این فرایند کوچک است می توان فرض کرد h_e متوسط دو مقدار مذکور است . لذا :

$$(h_e)_{ave} = 1461.1 \text{ kJ/kg}$$

و قانون اول به صورت زیر در می آید :

$$m_e h_e + m_2 u_2 - m_1 u_1 = 0$$

و معادله پیوستگی به صورت زیر در می آید :

$$(m_2 - m_1)_{c.v.} + m_e = 0$$

با ترکیب این دو معادله داریم :

$$m_2 (h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1$$

حل :

مقادیر زیر را از جداول آمونیاک می یابیم :

$$v_{f1} = 0.001725 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{g1} = 0.08313 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_{f2} = 0.00160$$

$$v_{fg2} = 0.20381$$

$$u_{f1} = 368.7 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{g1} = 1341.0 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{f2} = 226.0$$

$$u_{fg2} = 1099.7$$

جرم اولیه مایع و بخار در مخزن برابر است با :

$$m_{f1} = \frac{V_f}{v_{f1}} = \frac{1.0}{0.001725} = 579.7 \text{ kg}$$

$$m_{g1} = \frac{V_g}{v_{g1}} = \frac{1.0}{0.08313} = 12.0 \text{ kg}$$

$$m_1 = m_{f1} + m_{g1} = 579.7 + 12.0 = 591.7 \text{ kg}$$

$$m_1 h_e = 591.7 \times 1461.1 = 864533 \text{ kJ}$$

$$m_1 u_1 = (mu)_{f1} + (mu)_{g1} = 579.7 \times 368.7 + 12.0 \times 1341.0 = 229827 \text{ kJ}$$

با جایگذاری در قانون اول خواهیم داشت :

$$m_2(h_e - u_2) = m_1 h_e - m_1 u_1 = 864533 - 229827 = 634706 \text{ kJ}$$

دو مجهول m_2 و u_2 در این معادله داریم؛ اما از طرفی نیز داریم :

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{2.0}{0.00160 + x_2(0.20381)} \quad \text{and} \quad u_2 = 226.0 + x_2(1099.7)$$

لذا هر دو مجهول توابعی از کیفیت در حالت نهایی (x_2) هستند . در نتیجه :

$$\frac{2.0(1461.1 - 226.0 - 1099.7x_2)}{0.00160 + 0.20381x_2} = 634706 \Rightarrow x_2 = 0.011057$$

در نتیجه :

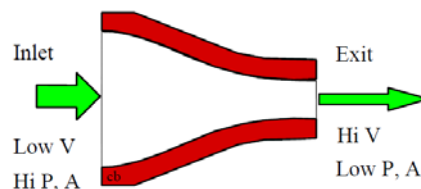
$$v_2 = 0.00160 + 0.011057 \times 0.20381 = 0.0038535 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{2}{0.0038535} = 519 \text{ kg}$$

جرم آمونیاک خروجی عبارت است از :

$$m_e = m_1 - m_2 = 591.7 - 519 = 72.7 \text{ kg}$$

مثال : بخار آمونیاک فوق گرم در دمای 20°C و فشار 800 kPa با سرعت کم وارد نازل عایقی می شود . آهنگ جرم ثابت و برابر 0.01 kg/s است . آمونیاک در فشار 300 kPa و با سرعت 450 m/s از نازل خارج می شود . دما و مساحت خروجی نازل را بیابید .



فرضیات :

- 1 - نازل عایق ($Q = 0$)
- 2 - کار انجام نمی شود ($W = 0$)
- 3 - فرایند $sssf$
- 4 - صرف نظر از تغییرات انرژی پتانسیل

تحلیل :

نازل پایا است (فرایند دائم انجام می پذیرد) ؛ یک جریان ورودی و یک جریان خروجی ، کار و انتقال حرارت برابر صفر و تنها از انرژی پتانسیل صرف نظر می شود .

حل :

با توجه به قانون اول برای نازل داریم :

$$q + h_i + \mathbf{V}_i^2/2 = h_e + \mathbf{V}_e^2/2,$$

$$q = 0, \quad \mathbf{V}_i = 0$$

با توجه به جدول داریم :

$$h_i = 1464.9 = h_e + 450^2/(2 \times 1000) \Rightarrow h_e = 1363.6 \text{ kJ/kg}$$

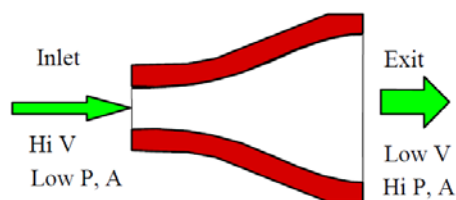
$$P_e = 300 \text{ kPa} \quad \text{Sat. state at } -9.2^\circ\text{C} :$$

$$h_e = 1363.6 = 138.0 + x_e \times 1293.8,$$

$$\Rightarrow x_e = \mathbf{0.947}, \quad v_e = 0.001536 + x_e \times 0.4064 = 0.3864 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$A_e = \dot{m}_e v_e / \mathbf{V}_e = 0.01 \times 0.3864 / 450 = \mathbf{8.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2}$$

مثال: هوا در فشار 100 kPa و دمای 300° K و با سرعت 200 m/s وارد دیفیوزری می شود . مساحت مقطع عرضی ورودی دیفیوزر 100 mm² است . در خروجی مساحت 860 mm² و سرعت 20 m/s است . فشار و دمای خروجی هوا را بیابید .



تحلیل :

قانون بقای جرم :

$$\dot{m}_i = A_i \mathbf{V}_i / v_i = \dot{m}_e = A_e \mathbf{V}_e / v_e,$$

قانون اول برای این مثال (با فرض آدیاباتیک بودن فرایند) :

$$h_i + \frac{1}{2} \mathbf{V}_i^2 = h_e + \frac{1}{2} \mathbf{V}_e^2$$

حل :

$$h_e - h_i = \frac{1}{2} \times 200^2/1000 - \frac{1}{2} \times 20^2/1000 = 19.8 \text{ kJ/kg}$$

$$T_e = T_i + (h_e - h_i)/C_p = 300 + 19.8/1.004 = \mathbf{319.72 \text{ K}}$$

و در ادامه برای حل از قانون گاز کامل استفاده می کنیم :

$$v_e = v_i \left(\frac{A_e \mathbf{V}_e}{A_i \mathbf{V}_i} \right) = (RT_i/P_i) \left(\frac{A_e \mathbf{V}_e}{A_i \mathbf{V}_i} \right) = RT_e/P_e$$

$$P_e = P_i \left(\frac{T_e}{T_i} \right) \left(\frac{A_i \mathbf{V}_i}{A_e \mathbf{V}_e} \right) = 100 \left(\frac{319.72}{300} \right) \left(\frac{100 \times 200}{860 \times 20} \right) = \mathbf{123.92 \text{ kPa}}$$

مثال : R-134a در شرایط 25°C و 750 kPa در لوله ای جریان دارد و هنگام مواجهه با لوله دیگر تا فشار 165 kPa دستخوش اختناق می شود . دما خروجی و نسبت قطر لوله خروجی به قطر لوله ورودی را بیابید به طوری که سرعت در دو لوله یکسان باشد .

حل :

قانون اول برای این مثال :

فرایند آدیاباتیک بوده و کاری انجام نمی پذیرد . $(Q = 0, W = 0)$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_e \theta_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \theta_i$$

$$h_1 + \frac{1}{2} \mathbf{V}_1^2 + gZ_1 = h_2 + \frac{1}{2} \mathbf{V}_2^2 + gZ_2$$

$$Z_1 = Z_2 \quad \text{and} \quad \mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1$$

سرعت سیال و ارتفاع آن بدون تغییر باقی می ماند . برای حالت اول از جدول داریم :

$$h_1 = 234.59 \text{ kJ/kg}, \quad v_1 = v_f = 0.000829 \text{ m}^3/\text{kg}$$

با توجه به معادله حاصل از قانون اول داریم :

$$h_2 = h_1 = 234.59 \text{ kJ/kg}$$

حالت دوم :

$$P_2 \ \& \ h_2 \quad \Rightarrow \quad 2\text{-phase} \quad \text{and} \quad T_2 = T_{\text{sat}}(165 \text{ kPa}) = \mathbf{-15^\circ \text{C}}$$

$$h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = 234.59 \text{ kJ/kg}$$

$$x_2 = (h_2 - h_f) / h_{fg} = (234.59 - 180.19) / 209 = 0.2603$$

$$v_2 = v_f + x_2 \times v_{fg} = 0.000746 + 0.2603 \times 0.11932 = 0.0318 \text{ m}^3/\text{kg}$$

سرعت ورودی و خروجی با هم برابر است . پس داریم :

$$\dot{m} = \rho A \mathbf{V} = A \mathbf{V} / v = A_1 \mathbf{V}_1 / v_1 = (A_2 \mathbf{V}_2) / v_2$$

$$(A_2 / A_1) = v_2 / v_1 = (D_2 / D_1)^2$$

$$(D_2 / D_1) = (v_2 / v_1)^{0.5} = (0.0318 / 0.000829)^{0.5} = \mathbf{6.19}$$

مثال : آب با آهنگ 2 kg/s در شرایط 2000 kPa و 20° C و 15 m/s وارد توربین آبی می شود . خروجی در شرایط 100 kPa و 20° C و با سرعت ناچیز است . کار ویژه و قدرت توربین را بیابید .

2 - تعیین توان توربین (\dot{W})

1 - تعیین کار ویژه (w)

اهداف :

فرضیات :

2 - جریان دائم (قانون بقا جرم)

1 - فرایند آدیاباتیک ($Q = 0$)

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = \frac{dm_{CV}}{dt} = 0 \Rightarrow \dot{m}_e = \dot{m}_i = \dot{m} - 4$$

3 - تغییرات انرژی پتانسیل صفر است

حل :

قانون اول :

$$\dot{Q} - \dot{W}_T = \sum_{i=1}^n \dot{m}_e \theta_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \theta_i$$

$$h_1 + \frac{1}{2} \mathbf{V}_1^2 + gZ_1 = h_2 + \frac{1}{2} \mathbf{V}_2^2 + gZ_2 + w_T$$

$$Z_1 = Z_2 \quad \text{and} \quad \mathbf{V}_2 = 0$$

برای حالت اول داریم :

$$\text{Table B.1.4} \quad h_1 = 85.82 \text{ kJ/kg}$$

برای حالت دوم داریم :

Table B.1.1 $h_2 = 83.94$ (which is at 2.3 kPa so we should add $\Delta P v = 97.7 \times 0.001$ to this)

$$w_T = h_1 + \frac{1}{2} V_1^2 - h_2 = 85.82 + 15^2/2000 - 83.94 = \mathbf{1.99 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{W}_T = \dot{m} \times w_T = 2 \times 1.9925 = \mathbf{3.985 \text{ kW}}$$

مثال : توربین کوچک و پرسرعتی که با هوای فشرده کار می کند ، دارای قدرت خروجی 100 W است . حالت ورودی در شرایط 400 kPa و 50° C و حالت خروجی در شرایط 150 kPa و -30° C است . اگر سرعت ها کم و فرایند آدیاباتیک باشد ، آهنگ جرم هوا در توربین چقدر است ؟

حل :

با توجه به قانون اول برای این مثال داریم :

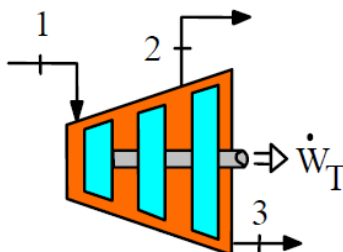
$$h_{in} = h_{ex} + w_T$$

چون هوا گاز کامل است ، پس می توانیم از فرمول زیر استفاده کنیم :

$$\begin{aligned} w_T &= h_{in} - h_{ex} \cong C_p(T_{in} - T_{ex}) \\ &= 1.004 \text{ (kJ/kg K)} [50 - (-30)] \text{ K} = 80.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\dot{W} = \dot{m} w_T \quad \Rightarrow \quad \dot{m} = \dot{W}/w_T = 0.1/80.3 = \mathbf{0.00125 \text{ kg/s}}$$

مثال : آب با فشار 15 MPa و دمای 600° C با آهنگ 100 kg/s وارد توربین بخاری می شود . در قسمت میانی 20 kg/s با فشار 2 MPa و دمای 350° C استخراج و بقیه با فشار 75 kPa و با کیفیت 95 درصد از توربین خارج می شود . با صرف نظر از انتقال حرارت و تغییرات انرژی جنبشی ، قدرت توربین را محاسبه کنید .



فرضیات :

1 - فرایند آدیاباتیک ($Q = 0$) 2 - تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل برابر صفر است 3 - فرایند sssf است

حل :

قانون بقای جرم :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 ; \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 80 \text{ kg/s}$$

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل باز (Steady Flow) :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{Q} - \dot{W}_t = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i + \frac{dE_{c.v.}}{dt}$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{W}_T + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3$$

برای حالت اول و دوم از جدول B.1.3 داریم :

$$h_1 = 3582.3 \text{ kJ/kg,}$$

$$h_2 = 3137 \text{ kJ/kg}$$

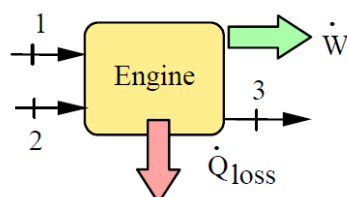
برای حالت سوم از جدول B.1.2 داریم :

$$\begin{aligned} h_3 &= h_f + x_3 h_{fg} = 384.3 + 0.95 \times 2278.6 \\ &= 2549.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

و سپس با جایگذاری :

$$\dot{W}_T = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 = 91.565 \text{ MW}$$

مثال : دو جریان آب با سرعت کم وارد موتور انبساطی پایای بزرگی می شود . بخار آب پرفشار در فشار 2 MPa و دمای 500°C با آهنگ 2 kg/s از نقطه 1 وارد و 0.5 kg/s آب خنک کن در فشار 120 kPa و دمای 30°C از نقطه مرکزی 2 وارد می شود . جریان مخلوط در فشار 150 kPa و با کیفیت (عیار) 80 درصد از طریق لوله خروجی به قطر 0.15 m از نقطه 3 خارج می شود . دفع گرما 300 kW است . سرعت خروجی و قدرت موتور را بیابید .



حل :

حالت اول از جدول B.1.3 :

$$h_1 = 3467.6 \text{ kJ/kg}$$

حالت دوم از جدول B.1.1 :

$$h_2 = 125.77 \text{ kJ/kg}$$

و حالت سوم :

$$h_3 = 467.1 + 0.8 \times 2226.5 = 2248.3 \text{ kJ/kg}$$

$$v_3 = 0.00105 + 0.8 \times 1.15825 = 0.92765 \text{ m}^3/\text{kg}$$

رابطه ی بقای جرم :

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = 2 + 0.5 = 2.5 \text{ kg/s} = (AV/v) = (\pi/4)D^2V/v$$

معادله انرژی (قانون اول برای حجم کنترل باز) :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

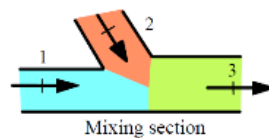
$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 (h_3 + 0.5 V^2) + \dot{Q}_{loss} + \dot{W}$$

$$V = \dot{m}_3 v_3 / [\frac{\pi}{4} D^2] = 2.5 \times 0.92765 / (0.7854 \times 0.15^2) = 131.2 \text{ m/s}$$

$$0.5 V^2 = 0.5 \times 131.2^2 / 1000 = 8.6 \text{ kJ/kg (remember units factor 1000)}$$

$$\dot{W} = 2 \times 3467.6 + 0.5 \times 125.77 - 2.5 (2248.3 + 8.6) - 300 = 1056 \text{ kW}$$

مثال : دو جریان هوا یکی با آهنگ $1 \text{ m}^3/\text{s}$ در 20°C و 100 kPa و دیگری با آهنگ $2 \text{ m}^3/\text{s}$ در 200°C و 100 kPa با هم مخلوط و جریان خروجی را با فشار 100 kPa تشکیل می دهند . با صرف نظر از انرژی های جنبشی ، دمای خروجی و آهنگ جریان حجمی را بیابید .



حل :

رابطه بقای جرم :

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

معادله انرژی (قانون اول برای حجم کنترل باز) :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

$$= (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

$$\dot{m}_1 (h_3 - h_1) + \dot{m}_2 (h_3 - h_2) = 0$$

$$\dot{m}_1 C_p (T_3 - T_1) + \dot{m}_2 C_p (T_3 - T_2) = 0$$

$$T_3 = (\dot{m}_1/\dot{m}_3)T_1 + (\dot{m}_2/\dot{m}_3)T_2$$

حال باید جرم را پیدا کنیم :

$$v_1 = RT_1/P_1 = (0.287 \times 293)/100 = 0.8409 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = RT_2/P_2 = (0.287 \times 473)/100 = 1.3575 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{1}{0.8409} = 1.1892 \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad \dot{m}_2 = \frac{\dot{V}_2}{v_2} = \frac{2}{1.3575} = 1.4733 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 2.6625 \text{ kg/s}$$

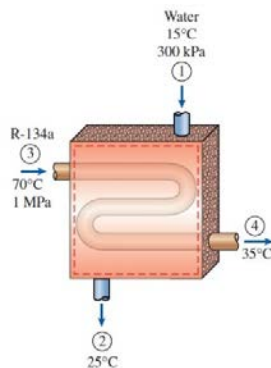
$$T_3 = \frac{1.1892}{2.6625} \times 20 + \frac{1.4733}{2.6625} \times 200 = \mathbf{119.6^\circ \text{C}}$$

$$v_3 = \frac{RT_3}{P_3} = \frac{0.287 (119.6 + 273)}{100} = 1.1268 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_3 v_3 = 2.6625 \times 1.1268 = \mathbf{3.0 \text{ m}^3/\text{s}}$$

مثال : مبرد 134-a قرار است توسط آب در یک چگالنده خنک شود . مبرد با جریان جرمی 6 kg/min در فشار 1 MPa و دمای 70° C وارد می شود و با دمای 35° C آن را ترک می کند . آب خنک کننده با فشار 300 kPa و دمای 15° C وارد و با دمای 25° C خارج می شود . با صرف نظر کردن از هرگونه افت فشار ، تعیین کنید :

(الف) جریان جرمی لازم برای آب خنک کننده .
(ب) نرخ انتقال حرارت از مبرد به آب .



فرضیات :

1 - فرایند جریان - دائم است ؛ زیرا هیچ تغییری طی زمان نداریم . $\Delta m_{CV} = 0$, $\Delta E_{CV} = 0$

2 - انرژی های جنبشی و پتانسیل قابل صرف نظر کردن هستند .

3 - اتلاف گرما قابل چشم پوشی است .

4 - هیچ کاری صورت نمی پذیرد .

تحلیل :

کل مبدل حرارتی را به عنوان سیستم (حجم کنترل) در نظر می گیریم . جرم مرز حجم کنترل را طی فرایند قطع می کند . ما دو جریان سیال را مورد بررسی قرار می دهیم (در نتیجه دو ورودی و دو خروجی خواهیم داشت) .

حل :

الف (تعادل جرم :

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \Rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_w \quad , \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_R$$

تعادل انرژی برای حجم کنترل باز :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 \quad (\dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, ke \cong pe \cong 0)$$

$$\dot{m}_w (h_1 - h_2) = \dot{m}_R (h_4 - h_3)$$

حال باید آنتالپی هر چهار حالت را تعیین کنیم . آب به عنوان یک مایع فشرده در ورود و خروج موجود هست به این خاطر که دما در هر دو موقعیت پایین تر از دمای اشباع آب در فشار 300 kPa و دمای 133.52° C است . با تقریب زدن مایع فشرده به عنوان یک مایع اشباع در دماهای داده شده داریم :

$$h_1 \cong h_{f@15^\circ\text{C}} = 62.982 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 \cong h_{f@25^\circ\text{C}} = 104.83 \text{ kJ/kg}$$

مبرد در حالت بخار فوق گرم وارد و در حالت مایع فشرده در دمای 35° C از کندانسور خارج می شود .

از جداول مبرد 134-a داریم :

$$P_3 = 1 \text{ MPa} \quad T_3 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

از این دو طبق جدول به دست می آید :

$$h_3 = 303.87 \text{ kJ/kg} \quad , \quad P_4 = 1 \text{ MPa} \quad , \quad T_4 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

از این دو طبق جدول به دست می آید :

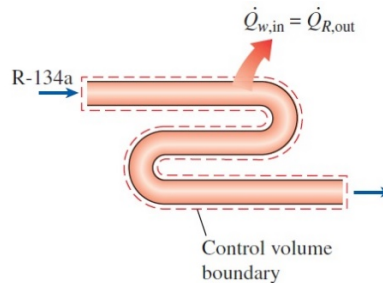
$$h_4 \cong h_{f@35^\circ\text{C}} = 100.88 \text{ kJ/kg}$$

با جایگذاری ، می یابیم :

$$\dot{m}_w (62.982 - 104.83) \text{ kJ/kg} = 6 \text{ kg/min} (100.88 - 303.87) \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_w = 29.1 \text{ kg/min}$$

ب) برای تعیین انتقال گرما از مبرد به آب ، باید یک حجم کنترل اطراف لوله مبرد در نظر بگیریم . برای این جریان دائم داریم :



$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{system}/dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

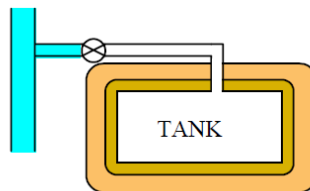
$$\dot{Q}_{w,in} + \dot{m}_w h_1 = \dot{m}_w h_2$$

با تنظیم مجدد و جایگذاری در معادله داریم :

$$\dot{Q}_{w,in} = \dot{m}_w (h_2 - h_1) = 29.1 \text{ kg/min} [(104.83 - 62.982) \text{ kJ/kg}]$$

$$\dot{Q}_{w,in} = 1218 \text{ kJ/min}$$

مثال : مخزنی به حجم 25 لیتر که ابتدا خالی است ، توسط شیری به لوله ای که در آن هوا با دمای 25°C و فشار 800 kPa جریان دارد متصل است . شیر باز می شود و هوا وارد مخزن می شود و فشار به 600 kPa می رسد . دمای نهایی و جرم هوای داخل مخزن را بیابید . رابطه بین دمای لوله و دمای نهایی را ، با استفاده از گرماهای ویژه ثابت ، بیابید . (فرایند را آدیاباتیک بگیرید) .



حل :

رابطه ی بقای جرم برای فرایند یکنواخت :

$$\sum m_i - \sum m_e = \Delta m_{C.V.}; m_e = m_1 = 0$$

$$m_2 = m_i$$

قانون اول :

$$E_{in} = E_{out}$$

$$m_2 u_2 = m_i h_i$$

از جدول A7 داریم :

$$u_2 = h_i = 293.64 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow T_2 = 410.0 \text{ K}$$

$$m_2 = \frac{P_2 V}{RT_2} = \frac{600 \times 0.025}{0.287 \times 410} = 0.1275 \text{ kg}$$

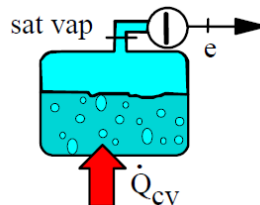
و با استفاده از گرمای ویژه داریم :

$$h_i = u_i + RT_i = u_2, \quad RT_i = u_2 - u_i = C_{v0}(T_2 - T_i)$$

$$C_{v0} T_2 = (C_{v0} + R) T_i = C_{p0} T_i, \quad T_2 = \left(\frac{C_{p0}}{C_{v0}} \right) T_i = k T_i$$

$$\text{For } T_i = 293.2 \text{ K \& constant } C_{p0}, \quad T_2 = 1.40 \times 293.2 = 410.5 \text{ K}$$

مثال : مخزنی به حجم 200 Lit ، ابتدا حاوی آب در 100 kPa و با کیفیت 1 درصد است . به آب گرما داده می شود و فشار و دمای آن افزایش می یابد . در فشار 2 MPa شیر اطمینان باز می شود و بخار اشباع در 2 MPa خارج می شود . این فرایند در همین فشار ثابت ادامه می یابد تا کیفیت در مخزن به 90 درصد می رسد و سپس متوقف می شود . جرم کل آب خروجی و انتقال گرمای کل را در این فرایند بیابید .



* در شیر اطمینان h ورودی با h خروجی برابر است ؛ همچنین فشار هم کاهش می یابد .

* طبق اصل ژول - تامسون :

$$\mu_j = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h \rightarrow \begin{cases} T \downarrow \Rightarrow \mu_j > 0 \rightarrow \text{خاصیت سرد سازی دارد} \\ T \uparrow \Rightarrow \mu_j < 0 \rightarrow \text{خاصیت سرد سازی ندارد} \end{cases} \xrightarrow{\text{گاز هایی مثل}} \begin{cases} R - 134a \\ R - 12, R - 22 \\ CFC, HCFC \end{cases}$$

- در گاز های کامل $\mu_j = 0$ می باشد .

فرضیات :

1 - تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صفر است

2 - فرایند usuf است

3 - بعد از رسیدن فشار مخزن به 2 MPa تا انتها فشار ثابت می ماند

حل :

رابطه بقای جرم برای فرایند یکنواخت :

$$\sum m_i - \sum m_e = \Delta m_{C.V.} ; m_i = 0$$

$$m_2 - m_1 = -m_e$$

قانون اول :

$$E_{in} = E_{out}$$

$$Q - W = \sum m_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum m_i(h_i + \frac{1}{2}v_i^2 + gZ_i) + (m_2u_2) - (m_1u_1)$$

$$\Rightarrow (m_2u_2) - (m_1u_1) = -m_e h_e + {}_1Q_2$$

حالت اول از جدول B.1.2 :

$$v_1 = v_f + x_1 v_{fg} = 0.001043 + 0.01 \times 1.69296$$

$$= 0.01797 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 = u_f + x_1 u_{fg} = 417.33 + 0.01 \times 2088.72 = 438.22 \text{ kJ/kg}$$

$$m_1 = V/v_1 = 0.2 \text{ m}^3 / (0.01797 \text{ m}^3/\text{kg}) = 11.13 \text{ kg}$$

حالت دوم :

$$v_2 = v_f + x_2 v_{fg} = 0.001177 + 0.9 \times 0.09845 = 0.08978 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_2 = u_f + x_2 u_{fg} = 906.42 + 0.9 \times 1693.84 = 2430.88 \text{ kJ/kg}$$

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0.2 \text{ m}^3}{0.08978 \text{ m}^3/\text{kg}} = 2.23 \text{ kg}$$

حالت خروج :

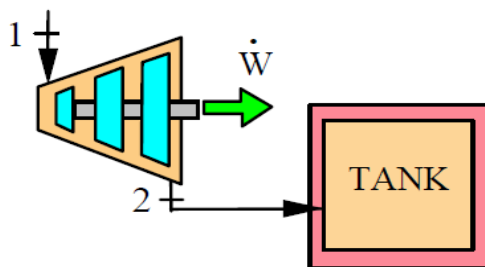
$$h_e = h_g = 2799.51 \text{ kJ/kg}$$

در نتیجه :

$$m_e = m_1 - m_2 = 11.13 \text{ kg} - 2.23 \text{ kg} = 8.90 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} {}_1Q_2 &= m_2 u_2 - m_1 u_1 + m_e h_e \\ &= 2.23 \times 2430.88 - 11.13 \times 438.22 + 8.90 \times 2799.51 = 25.459 \text{ kJ} = \mathbf{25.46 \text{ MJ}} \end{aligned}$$

مثال : نیتروژن با دمای 300°K و فشار 0.5 MPa در لوله ای جریان دارد . این لوله به توربینی متصل است و خروجی توربین به مخزنی با حجم 500 m^3 که ابتدا خالی است متصل می باشد . توربین کار می کند و فشار داخل مخزن به 0.5 MPa می رسد . دما در این حالت 250°K است . با فرض اینکه فرایند آدیاباتیک باشد ، کار توربین را بیابید .



حل. توربین و مخزن را با هم یک حجم کنترل در نظر می گیریم.

رابطه ی بقای جرم برای فرایند یکنواخت:

$$\begin{aligned} \sum m_i - \sum m_e &= \Delta m_{C.V.} ; m_e = m_1 = 0 \\ m_i &= m_2 = m \end{aligned}$$

قانون اول:

$$m_i h_i = m_2 u_2 + W_{CV} ; W_{CV} = m(h_i - u_2)$$

$$T_1 > T_{Sat} \Rightarrow \textit{Superheated Nitrogen}$$

از جدول B.6.2:

$$0.5 \text{ MPa} = 500 \text{ kPa}$$

نیاز به میانمایی بین دو جدول 400 و 600 کیلوپاسکال داریم:

$$\frac{600 - 500}{600 - 400} = \frac{310.06 - h_i}{310.06 - 310.50}$$

$$P_i = 0.5 \text{ MPa}, \quad T_i = 300 \text{ K}, \quad \text{Nitrogen}; \quad h_i = 310.28 \text{ kJ/kg}$$

در نتیجه:

$$T_2 > T_{Sat} \Rightarrow \text{Superheated Nitrogen}$$

نیاز به سه میانمایی وجود دارد:

در جدول 400 کیلوپاسکال:

$$\frac{260 - 250}{260 - 240} = \frac{191.64 - u_{x1}}{191.64 - 176.67} \Rightarrow u_{x1} = 184.15$$

در جدول 600 کیلوپاسکال:

$$\frac{260 - 250}{260 - 240} = \frac{191.13 - u_{x2}}{191.13 - 176.11} \Rightarrow u_{x2} = 183.62$$

بین جدول 400 و 600 کیلوپاسکال:

$$\frac{600 - 500}{600 - 400} = \frac{183.62 - u_2}{183.62 - 184.15} \Rightarrow u_2 = 183.885$$

برای v هم به همین ترتیب سه میانمایی را انجام می دهیم.

$$P_2 = 0.5 \text{ MPa}, \quad T_2 = 250 \text{ K}, \quad u_2 = 183.89 \text{ kJ/kg}, \quad v_2 = 0.154 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$m_2 = V/v_2 = 50/0.154 = 324.7 \text{ kg}$$

$$W_{CV} = 324.7 (310.28 - 183.89) = 41\,039 \text{ kJ} = \mathbf{41.04 \text{ MJ}}$$

یادداشت

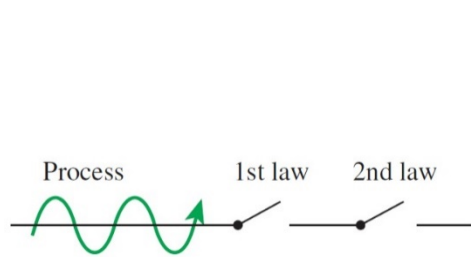
یادداشت

فصل پنجم

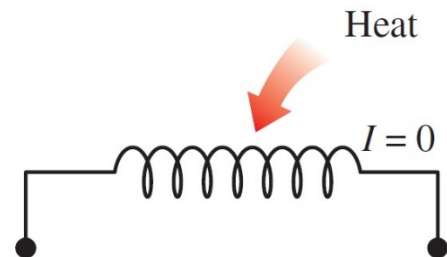
قانون دوم ترمودینامیک

طبق قانون اول ترمودینامیک، در هر سیکلی که سیستمی را طی می کند انتگرال سیکلی گرما با انتگرال سیکلی کار برابر است. قانون اول هیچ محدودیتی برای جهت جریان کار و گرما قائل نمی شود. سیکلی که در آن مقداری گرما از سیستم دفع و مقدار برابر کار روی سیستم انجام می شود، و نیز سیکلی که در آن عکس این عمل صورت گیرد هر دو قانون اول را برآورده می کنند. ولی، به تجربه می دانیم هر سیکلی که قانون اول را برآورده می کند به این معنی نیست که واقعا روی می دهد. این گواه آزمایشی است که منجر به فرمولبندی قانون دوم ترمودینامیک می شود. لذا، سیکلی واقعا روی می دهد که قوانین اول و دوم ترمودینامیک را با هم برآورده کند.

مفهوم وسیع تر قانون دوم این است که فرایندها در جهت معینی روی می دهند و در جهت خلاف آن روی نمی دهند. یک فنجان قهوه گرم بر اثر دفع گرما به اطراف سرد می شود، ولی گرما از اطراف سرد به فنجان قهوه منتقل نمی شود. وقتی اتومبیلی از تپه بالایی رود، بنزین مصرف می کند، ولی با حرکت اتومبیل به طرف پایین تپه نمی توان سوخت را به سطح اولیه برگرداند. این مشاهدات، و نظیر آنها، گواهی بر صحت قانون دوم ترمودینامیک هستند.



شکل 2-5 برای انجام فرایند هر دو قانون اول و دوم باید ارضا شود

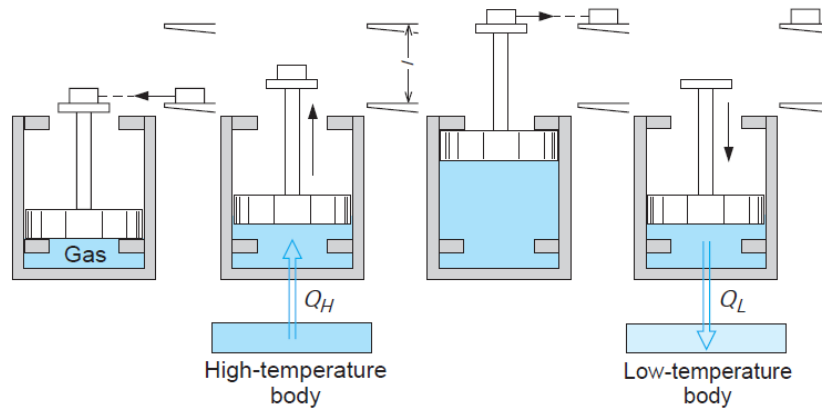


شکل 1-5 انتقال گرما به سیم، برق تولید نمی کند

ماشین گرمایی

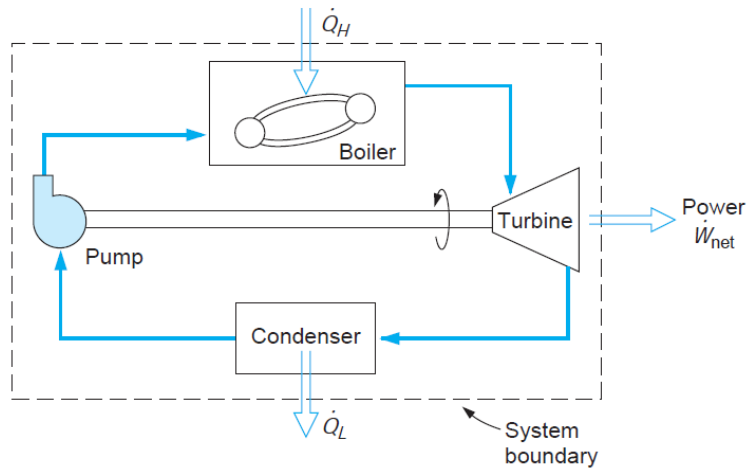
ماشین گرمایی را به عنوان وسیله ای می توان تعریف کرد که در یک سیکل ترمودینامیکی کار می کند و با انتقال گرما از یک جسم دما - بالا به یک جسم دما-پایین مقدار معینی کار خالص مثبت انجام می دهد. اغلب، از واژه ماشین گرمایی برای تمام وسایلی که با انتقال گرما یا با احتراق کار انجام می دهند استفاده می شود. حتی اگر این وسایل در یک سیکل ترمودینامیکی کار نکنند. موتور احتراق داخلی و توربین گازی نمونه هایی از این وسایل اند و می توان ماشین گرمایی نامید. البته در این فصل وسیله ای را ماشین گرمایی میگوییم که در یک سیکل ترمودینامیکی کار کند. ماده ای را که از آن گرما انتقال می یابد ماده عامل یا سیال عامل گویند.

شکل زیر، شکل ماشین گرمایی ساده را نشان می دهد:



شکل 3-5 ماشین گرمایی ساده

نیروگاه بخاری ساده نمونه ای از ماشین گرمایی است که سیکل ترمودینامیکی را طی می کند. هر یک از اجزای این نیروگاه را می توان با فرایندی پایا بررسی کرد، اما در مجموع می توان آن را به عنوان یک ماشین گرمایی دانست که در آن بخار آب، سیال عامل است و مقداری گرما، Q_H ، از جسم دما-بالا انتقال می یابد؛ این جسم می تواند فرآورده های احتراق کوره، رئاکتور یا سیالی ثانویه باشد که در رئاکتور گرم شده است. شکل زیر طرحواره توربین که پمپ را می گرداند، نشان داده شده است. آنچه که در اینجا اهمیت دارد کار خالصی است که در سیکل انجام می شود. گرمای Q_L به جسم دما-پایین که می تواند آب خنک کن کندانسور باشد، انتقال می یابد. لذا، نیروگاه ساده بخاری یک ماشین گرمایی است که در آن سیال عامل با تبادل گرما مقداری کار در سیکل انجام می دهد.



شکل 4-5 نیروگاه بخاری ساده

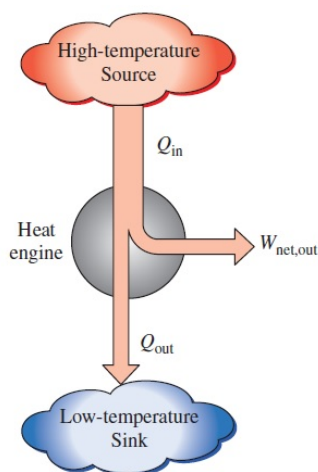
به این ترتیب، ماشین گرمایی سیستمی است که سیکلی را طی می کند و دارای کار خالص مثبت و انتقال گرمای مثبت است.

بازده گرمایی

بازده نسبت خروجی (انرژی خواسته شده) به ورودی (انرژی هزینه شده) است، اما خروجی و ورودی را باید به وضوح تعریف کرد. در یک ماشین گرمایی می توان گفت انرژی خواسته شده کار است، و انرژی هزینه شده گرمایی است که از منبع دما-بالا انتقال یافته است. بازده گرمایی به صورت زیر تعریف می شود:

$$W_{net} = Q_H - Q_L$$

$$\eta_{thermal} = \frac{W(\text{energy sought})}{Q_H(\text{energy that costs})} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$



شکل 5-5 بخشی از گرمای منتقل شده به کار تبدیل میشود، درحالیکه مابقی آن به منبع سرد پس داده می شود.

مثال: موتور اتومبیلی با 136 HP قدرت و بازده گرمایی 30 درصد است. انرژی ناشی از سوخت 35000 kJ/kg است. آهنگ کل انرژی دفع شده به محیط و آهنگ مصرف سوخت را بر حسب kg/s بیابید.

حل.

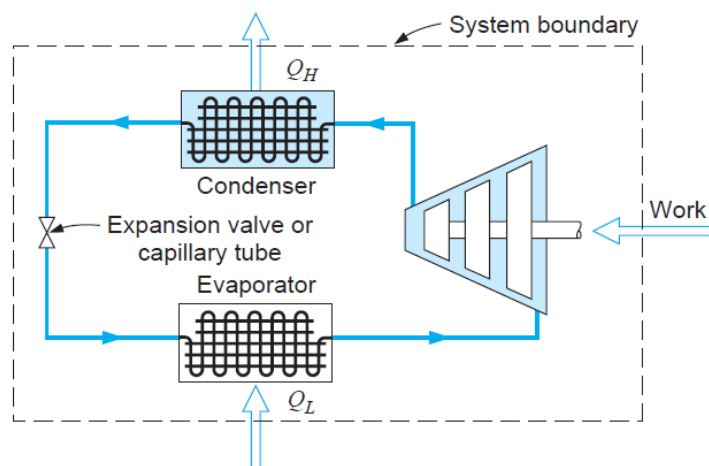
$$\dot{W} = \eta_{eng} \dot{Q}_H = 136 \text{ hp} \times 0.7355 \text{ kW/hp} = 100 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_H = \dot{W} / \eta_{eng} = 100 / 0.3 = 333 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = (1 - 0.3) \dot{Q}_H = 233 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = \dot{Q}_L / q_H = \frac{333 \text{ kW}}{35\,000 \text{ kJ/kg}} = 0.0095 \text{ kg/s}$$

سیکل دیگری که نمی تواند انجام شود انتقال گرما مستقیما از جسم دما-پایین به جسم دما - بالا می باشد. این عمل را با استفاده از **یخچال** یا **پمپ گرما** می توان انجام داد.



شکل 5-6 سیکل یخچال تراکمی

مبردی که یک سیکل ترمودینامیکی را طی می کند، سیال عامل را تشکیل می دهد. در اواپراتور، که در آنجا فشار و دما کم است، گرما به مبرد انتقال می یابد. در کمپرسور روی مبرد کار انجام می شود و در کندانسور، که در آنجا فشار و دما زیاد است، گرما از مبرد خارج می شود. فشار مبرد هنگام عبور از شیر انبساط کاهش می یابد.

لذا، یخچال یا پمپ گرما وسیله ای است که سیکلی را طی می کند، به کار نیاز دارد، و در آن گرما از جسم دما-بالا انتقال می یابد.

بازده یخچال ($COP_{Refrigerator}$) بر حسب ضریب عمکرد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta_{Refrigerator} = \frac{Q_L}{W_{net}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

$$\beta_{Heat Pump} = \frac{Q_H}{W_{net}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

$\beta = COP$ (Coefficient of Performance)

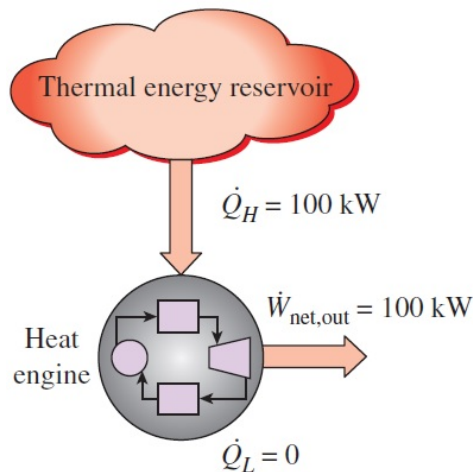
$$COP_{HP} = COP_R + 1$$

که در آن Q_L (گرمای انتقال یافته از فضای سرد) انرژی خواسته شده، و W کار خالص انجام شده است.

منبع گرمایی (□□□□□□ □□□□□□)

منبع گرمایی جسمی است که می توان به آن مقدار نامحدودی گرما داد یا از آن مقدار نامحدودی گرما گرفت بدون اینکه دمای آن تغییر کند. لذا، منبع گرمایی همواره دارای دمای ثابت است. اقیانوس و اتمسفر را تقریباً می توان منبع گرمایی دانست. دو بیان کلاسیک برای قانون دوم وجود دارد: بیان کلونین-پلانک و بیان کلازیوس.

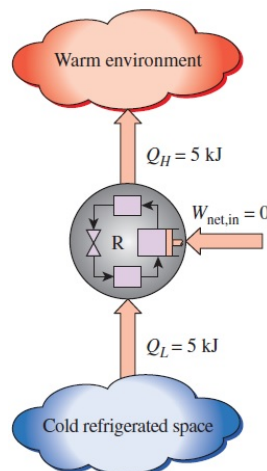
بیان کلونین - پلانک: نمی توان وسیله ای ساخت که در سیکلی کار کند و تأثیر آن فقط بالا بردن یک وزنه و تبادل گرما با یک منبع تنها باشد.



شکل 5-7 یک ماشین گرمایی که بیان کلونین-پلانک قانون دوم را نقض می کند.

این بیان با تعریف ماشین گرمایی ارتباط دارد. در حقیقت طبق این بیان، نمی توان یک ماشین گرمایی ساخت که سیکلی کار را طی کند، مقداری گرما از یک جسم دما بالا بگیرد و به همان مقدار کار انجام دهد. نمی توان ماشین گرمایی با بازه 100 درصد ساخت.

بیان کلازیوس: نمی توان وسیله ای ساخت که سیکلی را طی کند و تأثیر آن فقط انتقال گرما از جسم سرد به جسم گرم باشد.



شکل 5-8 یک یخچال که بیان کلازیوس قانون دوم را نقض می کند.

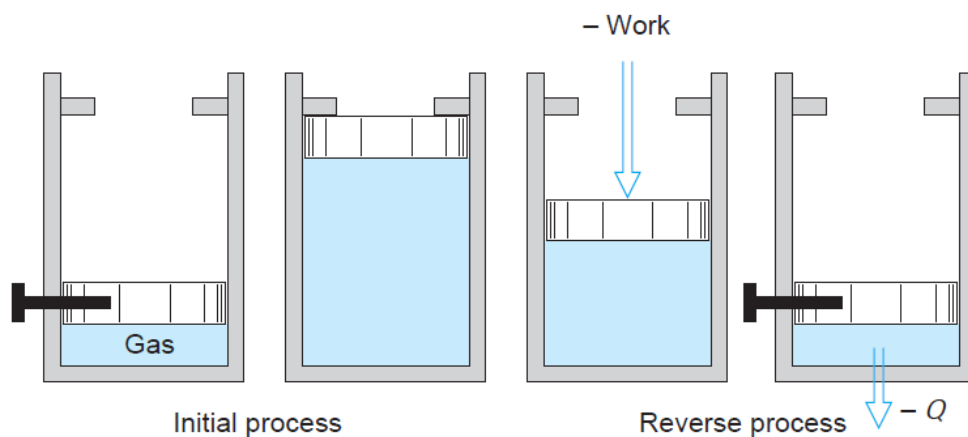
این بیان با تعریف یخچال ارتباط دارد. در حقیقت طبق این بیان نمی توان یخچالی ساخت که بدون کار ورودی عمل کند.

فرایند برگشت پذیر

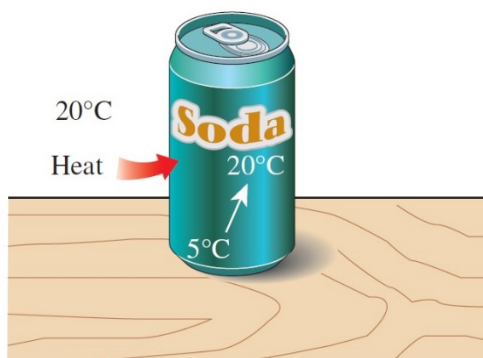
در اینجا سوالی که منطقی مطرح می شود این است که: اگر نمی توان ماشین گرمایی با بازده صد درصد داشت، ماکزیمم بازده ممکنه که می توان داشت چقدر است؟ گام اول در پاسخ به این سوال این است که فرایند ایده آل ، که آن را فرایند برگشت پذیر می گویند، تعریف کنیم.

فرایند برگشت پذیر در یک سیستم به عنوان فرایندی تعریف می شود که پس از وقوع بتوانیم آن را در جهت معکوس انجام دهیم بدون اینکه سیستم یا محیط اطراف هیچ گونه تغییری نماید.

مفهوم این تعریف را برای گاز داخل سیستم سیلندر- پیستونی بررسی می کنیم. ابتدا شکل زیر را در نظر می گیریم، که در آن گاز توسط پیستون که توسط یک پین به طور محکم قفل شده است تحت فشار زیاد قرار دارد. با حذف پین پیستون بالا می رود و به موانع برخورد می کند. در این فرایند، مقداری کار [مرزی] توسط سیستم انجام می شود، زیرا پیستون بالا رفته است. فرض کنید می خواهیم این سیستم را به وضعیت اولیه اش برگردانیم. یک راه این است که بر پیستون نیرو وارد کنیم و گاز را متراکم نماییم، تا آنجا که بتوانیم پین را مجدداً در پیستون قرار دهیم. چون فشار وارد بر پیستون در کورس برگشت بیشتر از فشار وارده در کورس اولیه است، کار انجام شده روی گاز در این فرایند معکوس بیشتر از کار انجام شده توسط گاز در فرایند اولیه است. در کورس معکوس باید مقداری گرما از گاز دفع شود تا سیستم دارای همان انرژی اولیه باشد، لذا سیستم به حالت اولیه بر میگردد اما اطراف، بر اثر کاری که برای راندمان پیستون به طرف پایین نیاز است و انتقال گرما به آن، دستخوش تغییر میشود. لذا فرایند اولیه برگشت ناپذیر است؛ زیرا بدون تغییر در محیط اطراف، نمی توان آن را معکوس کرد.



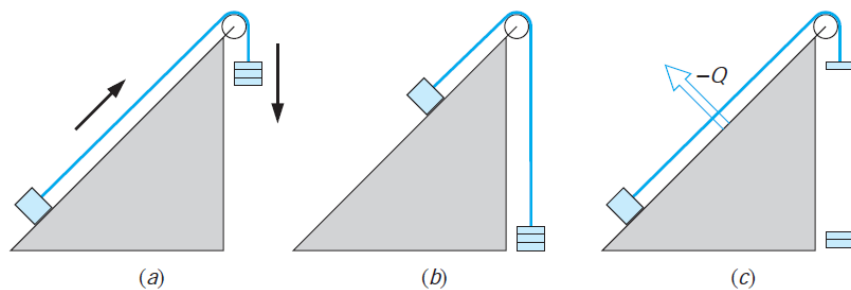
شکل 5-9 فرایند برگشت پذیر



شکل 5-10 یک انتقال حرارت طی فرایند برگشت ناپذیر

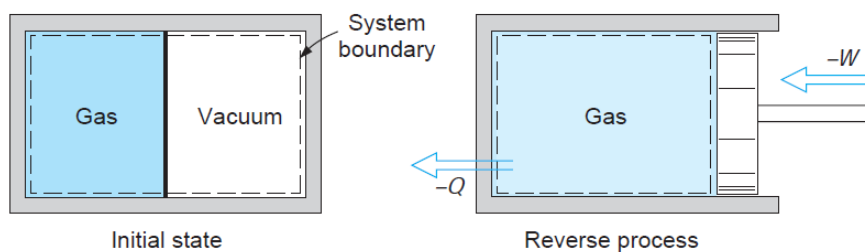
عواملی که فرایند را برگشت ناپذیر می کنند:

- اصطکاک



شکل 5-11 اصطکاک سطح شیبدار

- انبساط غیر مقید (آزاد)

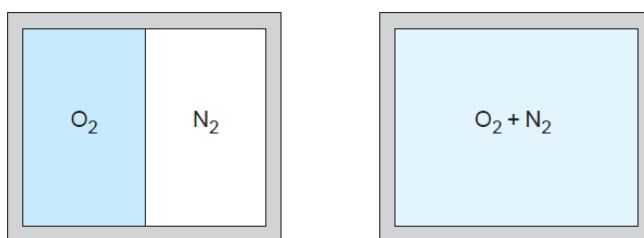


شکل 5-12 فرایند برگشت پذیر و بسته

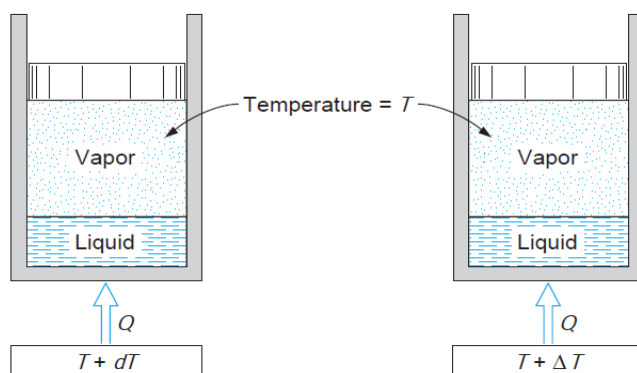
- انتقال گرما بر اثر اختلاف دمای محدود

انتقال حرارت از طریق اختلاف دمای خیلی کوچک نیازمند یک مقدار زمانی نامحدود یا سطح نامحدود دارد. بنابراین تمام انتقال حرارت های واقعی از طریق اختلاف دمای محدود هستند و در نتیجه برگشت ناپذیرند و هرچه اختلاف بیشتر، برگشت ناپذیری بزرگتر.

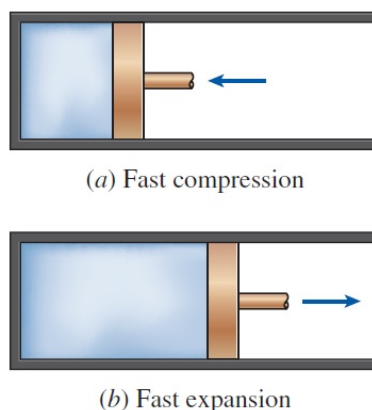
- اختلاط دو ماده مختلف



شکل 5-13 اختلاط دو عنصر O_2 و N_2



شکل 5-14 نمایش اختلاف بین فرایند برگشت پذیر داخلی و فرایند برگشت پذیر خارجی.



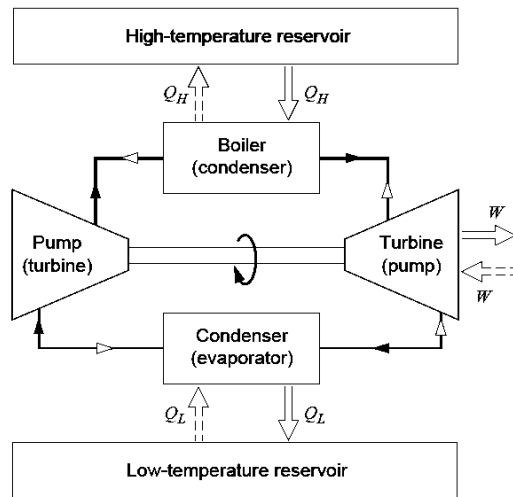
شکل 5-15 انقباض سریع (a) انبساط سریع (b)

سیکل کارنو

با تعریف فرایند برگشت پذیر و با در نظر گرفتن عواملی که فرایند ها را برگشت ناپذیر می کنند، سوال داده شده در قسمت قبل را مجدداً طرح می کنیم. اگر بازده تمام ماشین های گرمایی کمتر از 100 درصد است، کاراترین سیکل کدام است؟ این سوال را برای یک ماشین گرمایی که از منبع دما-بالا گرما می گیرد و به منبع دما-پایین گرما دفع می کند پاسخ می دهیم. چون با منابع دمایی سروکار داریم، می گوییم انتقال گرما در آنها هر چه باشد دمای آنها ثابت است.

فرض کنید این ماشین گرمایی، که بین منابع دما-بالا و دما-پایین کار میکند، سیکلی را طی کند که در آن تمام فرایندها برگشت پذیرند. اگر تمام فرایندها برگشت پذیر باشند، سیکل برگشت پذیر است، و اگر سیکل برگشت پذیر باشد، ماشین گرمایی می تواند به یخچال تبدیل شود. در قسمت بعد نشان می دهیم که این کاراترین سیکلی است که می تواند بین دو منبع دما ثابت کار کند، و آن را **سیکل کارنو** گویند.

حال سیکل کارنو را بررسی می کنیم. شکل زیر نیروگاهی را نشان می دهد که از بسیاری جهات شبیه نیروگاه ساده بخاری است.



شکل 5-16 سیکل کارنو

فرض می‌کنیم این نیروگاه بر مبنای سیکل کارنو کار می‌کند. سیال عامل را ماده خالصی، مانند بخار آب، می‌گیریم. گرما از منبع دما-بالا در بویلر به آب داده می‌شود. اگر بخواهیم این فرایند از نوع انتقال گرمای برگشت پذیر باشد، دمای آب با دمای منبع باید تفاوت بی‌نهایت کوچکی داشته باشد. یعنی، دمای آب باید ثابت بماند زیرا دمای منبع ثابت است. لذا، فرایند اولی در سیکل کارنو فرایند هم دمای برگشت پذیری است که در آن گرما از منبع دما-بالا به سیال عامل انتقال می‌یابد. البته، تغییر فاز از مایع به بخار در فشار ثابت برای یک ماده خالص یک فرایند هم دماست.

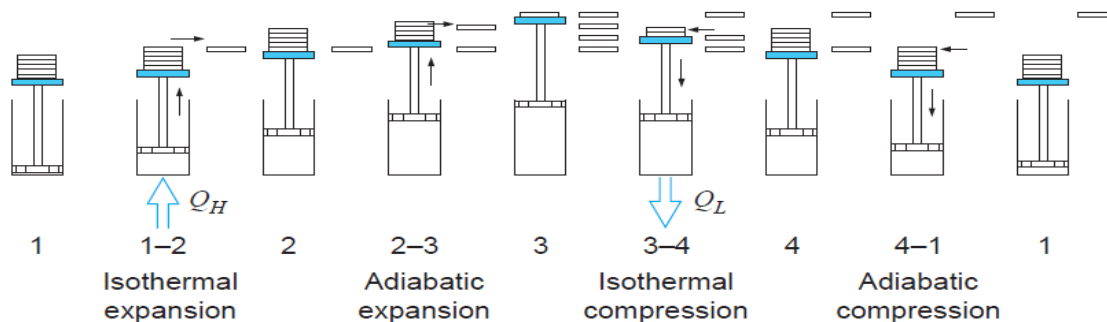
فرایند بعد در توربین بدون انتقال گرما روی می‌دهد و ادیاباتیکی است. چون تمام فرایندها در سیکل کارنو برگشت پذیرند، فرایند مذکور نیز یک فرایند ادیاباتیکی برگشت پذیر است، که در آن دمای سیال عامل از دمای منبع دما-بالا به دمای منبع دما-پایین کاهش می‌یابد.

در فرایند بعد، گرما از سیال عامل به منبع دما-پایین انتقال می‌یابد. این فرایندی هم دمای و برگشت پذیر است که در آن دمای سیال عامل تفاوت بی‌نهایت کوچکی با دمای منبع دما-پایین دارد. در این فرایند هم دما مقداری بخار آب چگالیده می‌شود. فرایند آخر، که سیکل را کامل می‌کند، فرایند ادیاباتیکی برگشت پذیری است که در آن دمای سیال عامل از دمای منبع دما-پایین تا دمای منبع دما-بالا افزایش می‌یابد. اگر بخواهیم این فرایند را برای آب به عنوان سیال عامل انجام دهیم، مخلوطی از مایع و بخار را باید از کندانسور اخذ و متراکم کنیم. (این کار در عمل مناسب نیست و لذا در تمام نیروگاه‌ها سیال عامل در کندانسور بطور کامل چگالیده می‌شود، و پمپ فقط با فاز مایع سروکار دارد).

چون سیکل ماشین گرمایی کارنو برگشت پذیر است، تمام فرایندهای آن را می‌توان معکوس و ماشین گرمایی را به یخچال تبدیل کرد. این یخچال در شکل قبل با خط چین و در پرانتز نشان داده شده است. دمای سیال عامل در اواپراتور مقدار بی‌نهایت کوچکی از دمای منبع دما-پایین کمتر است، و در کندانسور مقدار بی‌نهایت کوچکی از دمای منبع دما-بالا بیشتر است.

نکته مهم درباره سیکل کارنو این است که صرف نظر از نوع سیال عامل همواره دارای چهار فرایند بنیادی است. این فرایندها عبارتند از:

1. فرایند هم دمای برگشت پذیر که در آن گرما به/ یا از منبع دما-بالا انتقال می‌یابد.
2. فرایند ادیاباتیکی برگشت پذیر که در آن سیال عامل از دمای منبع دما-بالا به دمای منبع دما-پایین کاهش می‌یابد.
3. فرایند هم دمای برگشت پذیر که در آن گرما به/ یا از منبع دما-پایین انتقال می‌یابد.
4. فرایند ادیاباتیکی برگشت پذیر که در آن دمای سیال عامل از دمای منبع دما-پایین به دمای منبع دما-بالا افزایش می‌یابد.



شکل 5-17 نمونه یک سیستم گازی که در یک سیکل کارنو کار می کند

مقیاس دمای ترمودینامیکی

چون بازده سیکل کارنو فقط تابعی از دماست می توان نوشت:

$$\eta_{\text{thermal}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \psi(T_L, T_H)$$

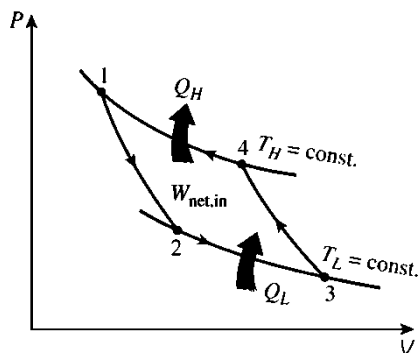
Ψ بیان کننده تابعی از دماست

که پس از محاسبات نتیجه می شود:

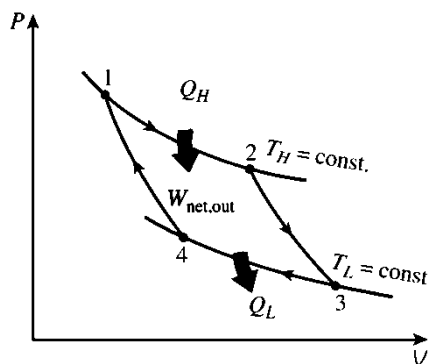
$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

پس بازده سیکل کارنو را می توان بر حسب دماهای مطلق تعریف کرد:

$$\eta_{\text{carnot}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



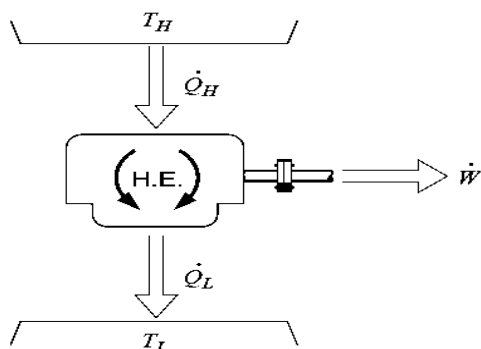
شکل 5-19 دیاگرام P-V سیکل یخچالی کارنو



شکل 5-18 دیاگرام P-V سیکل گرمایی کارنو

لازم به ذکر است که ماکسیمم راندمان قابل دستیابی، چرخه کارنو میباشد و فقط به دما مربوط است و نه گرما.

مثال: یک ماشین گرمایی با آهنگ 1 MW گرما را از منبعی با دمای 550 °C دریافت و انرژی را به صورت گرما به اطراف با دمای 300 K دفع می کند. قدرت این ماشین 450 kW است. انرژی دفع شده به اطراف و بازده این ماشین را بیابید و آنها را با مقادیر متناظر در ماشین گرمایی کارنویی که بین همان دو منبع کار می کند مقایسه کنید.



حل. اگر ماشین گرمایی را به عنوان حجم کنترل بگیریم، طبق معادله انرژی داریم:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 450 = 550 \text{ kW}$$

و از تعریف بازده داریم:

$$\eta_{\text{thermal}} = \dot{W} / \dot{Q}_H = 450 / 1000 = 0.45$$

بازده گرمایی ماشین کارنو عبارت است از:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{550 + 273} = 0.635$$

قدرت ماشین و آهنگ دفع گرما عبارتند از:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \eta_{\text{Carnot}} \dot{Q}_H = 0.635 \times 1000 = 635 \text{ kW} \\ \dot{Q}_L &= \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 635 = 365 \text{ kW} \end{aligned}$$

لذا، بازده ماشین گرمایی واقعی از بازده ماشین کارنو کمتر است و این بازده برای نیروگاه های مدرن بخار 45 درصد است. ضمناً دیده می شود که ماشین گرمایی واقعی در مقایسه با ماشین گرمایی کارنو (که 36 درصد انرژی به محیط اطراف دفع می کند) مقدار بیشتری انرژی به اطراف دفع کرده است.

نکته:

$$\eta_{th} < \eta_{carnot} \Rightarrow \text{فرایند برگشت ناپذیر ولی انجام شدنی}$$

$$\eta_{th} = \eta_{carnot} \Rightarrow \text{فرایند برگشت پذیر}$$

$$\eta_{th} > \eta_{carnot} \Rightarrow \text{فرایند غیرممکن}$$

نرخ انتقال حرارت:

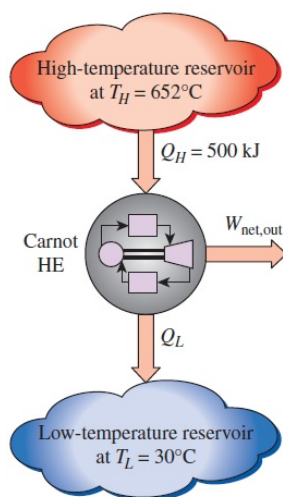
$$\dot{Q} = C\Delta T$$

مثال. یک ماشین گرمایی کانو همانند شکل 8، 500 kJ گرما بر سیکل از منبع دما-بالا در دمای 652°C گرفته و گرا را به منبع دما-پایین در دمای 30°C می دهد.

تعیین کنید:

الف) بازده حرارتی این ماشین کارنو.

ب) مقدار گرمای دفع شده به منبع دما-پایین بر هر سیکل.



حل. فرایند برگشت پذیر انجام می شود، و بازده آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} = 0.672$$

به این معنی که ماشین گرمایی کارنو 67.2 درصد گرمای دریافتی را به کار تبدیل می کند.

مقدار گرمای دفع شده، به آسانی از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$Q_{L,rev} = \frac{T_L}{T_H} Q_{H,rev} = \frac{(30 + 273) \text{ K}}{(652 + 273) \text{ K}} (500 \text{ kJ}) = 164 \text{ kJ}$$

یادداشت

یادداشت

فصل ششم

آنتروپی (Entropy)

تا به حال ضمن بررسی قانون دوم ترمودینامیک، فقط سیکل های ترمودینامیکی را در نظر گرفته ایم. گرچه این روش بسیار مهم و مفید است، ولی اغلب بجای سیکل ها با فرایند سروکار داریم. از این رو، تحلیل فرایندهای متداول، مانند فرایند احتراق در موتور اتومبیل، سرمایه‌ش فنجان قهوه، یا فرایندهای شیمیایی داخل بدن، از دیدگاه قانون دوم می تواند جالب باشد. به علاوه بهتر است قانون دوم را بصورت کمی و کیفی بررسی کنیم.

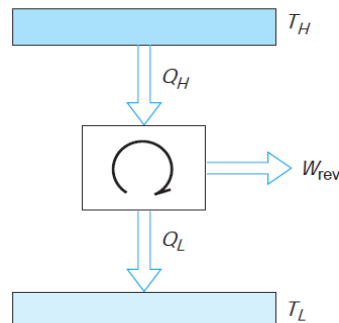
در بررسی قانون اول، ابتدا آن را برای یک سیکل بیان کردیم. سپس، با تعریف خاصیت انرژی داخلی توانستیم قانون اول را برای فرایندها به طور کمی به کار ببریم. به طور مشابه، قانون دوم را برای یک سیکل بیان کردیم. حال می خواهیم با استفاده از این قانون به خاصیت آنتروپی برسیم. با این خاصیت است که می توان قانون دوم را برای فرایندها به طور کمی تحلیل کرد.

نامساوی کلازیوس، به شکل زیر، اولین گام در بررسی خاصیت آنتروپی است:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

نامساوی کلازیوس نتیجه ای از قانون دوم ترمودینامیک است، و نشان می دهیم که این نامساوی برای تمام سیکل های ممکن، شامل ماشین های گرمایی و یخچال های برگشت پذیر و برگشت ناپذیر، صحت دارد. چون هر سیکل برگشت پذیر را با مجموعه ای از سیکل های کارنو می توان نشان داد، در این تحلیل فقط سیکل کارنو را که منجر به نامساوی کلازیوس می شود در نظر می گیریم.

ابتدا یک ماشین گرمایی برگشت پذیر کارنو را در نظر می گیریم که بین منابع با دماهای T_H و T_L کار می کند مطابق شکل زیر.



شکل 6-1 شماتیک ماشین گرمایی

برای این سیکل، انتگرال سیکلی انتقال گرما، $\oint \delta Q$ ، بزرگتر از صفر است:

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L > 0$$

چون T_H و T_L ثابت اند، از تعریف مقیاس دمای مطلق و با توجه به برگشت پذیر بودن سیکل، نتیجه می شود:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

اگر $\oint \delta Q$ با نزدیک شدن T_H و T_L به یکدیگر، به صفر نزدیک شود و سیکل برگشت پذیر بماند، انتگرال سیکلی $\frac{\delta Q}{T}$ صفر می ماند. لذا، برای تمام سیکل های ماشین های گرمایی:

$$\oint \delta Q \geq 0$$

و در صورت برگشت پذیر بودن:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

حال، یک ماشین گرمایی سیکلی برگشت ناپذیر را در نظر می گیریم که بین همان دو دمای T_H و T_L ماشین گرمایی برگشت پذیر قبل کار می کند و همان مقدار Q_H را دریافت می کند. با مقایسه سیکل برگشت پذیر (irr) و سیکل برگشت پذیر (rev)، از قانون دوم نتیجه می شود:

$$W_{irr} < W_{rev}$$

$$irr \equiv irreversible, rev \equiv reversible$$

چون برای سیکل های برگشت پذیر و برگشت ناپذیر $Q_H - Q_L = W$ داریم:

$$Q_H - Q_L_{irr} < Q_H - Q_L_{rev}$$

در نتیجه:

$$Q_L_{irr} > Q_L_{rev}$$

لذا برای ماشین سیکلی برگشت ناپذیر:

$$\oint \delta Q = Q_H - Q_L_{irr} > 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L_{irr}}{T_L} < 0$$

فرض کنید برگشت ناپذیری ماشین را زیاد و زیادتر کنیم، اما T_H ، Q_H و T_L را ثابت نگه داریم. در این صورت، انتگرال سیکلی δQ به صفر نزدیک می شود و انتگرال سیکلی $\frac{\delta Q}{T}$ دارای مقدار منفی افزایشی خواهد بود و، در حد، کار خروجی صفر می شود.

$$\oint \delta Q = 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

لذا، برای تمام سیکل های ماشین های گرمایی برگشت ناپذیر:

$$\oint \delta Q \geq 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

برای تکمیل نمایش نامساوی کلازیوس، باید تحلیل های قبل را برای سیکل های تبرید برگشت پذیر و برگشت ناپذیر به کار ببریم. برای سیکل تبرید برگشت پذیر داده شده در شکل قبل،

$$\oint \delta Q = -Q_H + Q_L < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0$$

وقتی انتگرال سیکلی δQ به طور برگشت پذیر به صفر نزدیک می شود، انتگرال سیکلی $\frac{\delta Q}{T}$ صفر می ماند. در حد:

$$\oint \delta Q = 0$$

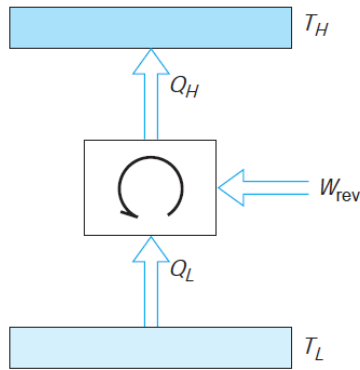
$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

لذا، برای تمام سیکل های تبرید برگشت پذیر:

$$\oint \delta Q \leq 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

سرانجام، فرض می کنیم یخچال سیکلی برگشت ناپذیری بین دما های T_H و T_L کار می کند و همان گرمای Q_L یخچال برگشت پذیر شکل زیر را دریافت می کند.



از قانون دوم نتیجه می شود کار ورودی مورد نیاز برای یخچال برگشت ناپذیر بیشتر است. یعنی:

$$W_{irr} > W_{rev}$$

چون در هر سیکل:

$$Q_H - Q_L = W$$

داریم:

$$Q_{H\ irr} - Q_L > Q_{H\ rev} - Q_L$$

در نتیجه:

$$Q_{H\ irr} > Q_{H\ rev}$$

یعنی گرمایی که یخچال برگشت ناپذیر به منبع دما بالا دفع می کند از گرمای دفع شده توسط یخچال برگشت پذیر بیشتر است. لذا، برای یخچال برگشت ناپذیر،

$$\oint \delta Q = -Q_{H\ irr} + Q_L < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = -\frac{Q_{H\ irr}}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} < 0$$

اگر این ماشین را به طور فزاینده برگشت ناپذیر کنیم اما Q_L ، T_H و T_L را ثابت نگه داریم، انتگرال های سیکلی δQ و $\frac{\delta Q}{T}$ دارای مقدار منفی افزایشی خواهند بود. لذا، برای یخچال برگشت ناپذیر، حالت حدی که در آن انتگرال سیکلی δQ به صفر نزدیک شود وجود ندارد.

لذا، برای تمام سیکل های تبرید برگشت ناپذیر:

$$\oint \delta Q < 0$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

به طور خلاصه، علامت $\oint \delta Q$ ، را برای تمام سیکل های برگشت پذیر ممکن بررسی کرده ایم و داریم:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

همچنین علامت $\oint \delta Q$ را برای تمام سیکل های برگشت ناپذیر ممکن بررسی کرده ایم و داریم:

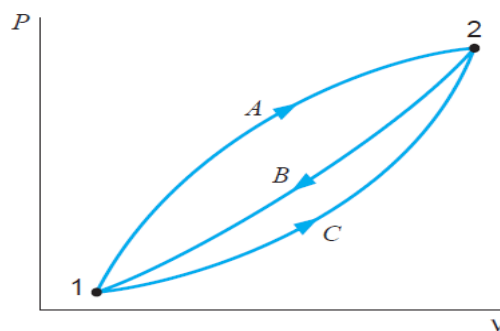
$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

لذا برای تمام سیکل ها میتوان نوشت:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

انترپوی - خاصیت سیستم

با توجه به مطالب گفته شده، می توان نشان داد که قانون دوم ترمودینامیک به خاصیتی از سیستم به نام انترپوی می انجامد.



شکل 2-6 سیکل برگشت پذیر

فرض کنید یک سیستم (جرم کنترل) از حالت 1 تا حالت 2 در امتداد مسیر A فرایند برگشت پذیری را طی می کند، و سیکل در امتداد مسیر برگشت پذیر B تکمیل شود.

چون سیکل برگشت پذیر است:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

حال، سیکل برگشت پذیر دیگری را در نظر می گیریم که ابتدا در امتداد مسیر C و سپس در امتداد مسیر B تکمیل می شود. برای این سیکل:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B$$

با تفریق معادله دوم از معادله اول داریم:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

چون $\oint \frac{\delta Q}{T}$ برای تمام مسیر های برگشت پذیر بین حالت 1 و 2 یکسان است، نتیجه می شود این کمیت از مسیر فرایند مستقل است و فقط تابعی از حالت های انتهایی است؛ لذا، خاصیتی از سیستم است. این خاصیت را انتروپی می گویند و با S نشان داده می شود. لذا، انتروپی را می توان به عنوان خاصیتی از ماده و با رابطه زیر تعریف کرد:

$$dS \equiv \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

انتروپی یک خاصیت مقداری است و انتروپی جرم واحد را با s نشان داده می شود. باید توجه داشت که انتروپی در اینجا برای فرایند برگشت پذیر تعریف شده است.

تغییر انتروپی سیستمی که تغییر حالت می دهد با انتگرال گیری از معادله بالا به دست می آید:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

نکته مهم این است که چون انتروپی یک خاصیت است، تغییر انتروپی ماده از حالتی تا حالت دیگر برای تمام فرایندها، برگشت پذیر یا برگشت ناپذیر، بین این دو حالت دارای مقدار یکسان است. با معادله بالا می توان تغییر انتروپی را فقط در امتداد یک مسیر برگشت پذیر محاسبه کرد. ولی، پس از محاسبه این تغییر، می توان آن را تغییر انتروپی برای تمام فرایندها بین این دو حالت دانست.

با معادله بالا می توان تغییرات انتروپی را محاسبه کرد، اما این معادله درباره مقادیر مطلق انتروپی چیزی نمی گوید. طبق قانون سوم ترمودینامیک، که بر مبنای واکنش های شیمیایی در دمای پایین است، نتیجه می شود مقدار صفر را در دمای صفر مطلق می توان به انتروپی تمام مواد خالص اختصاص داد. هم چنین از ترمودینامیک آماری می دانیم که تمام مواد خالص در حالت گاز ایده ال در دمای صفر مطلق دارای انتروپی صفر هستند.

انتروپی یک ماده خالص

انتروپی یکی از خواص مقداری سیستم است. مقادیر انتروپی ویژه (انتروپی جرم واحد) با همان روش جدول بندی حجم مخصوص و انتالپی ویژه در جداول خواص ترمودینامیکی فهرست می شوند. آحاد انتروپی ویژه در جداول بخار آب، در جداول مبردها و در جداول امونیاک بر

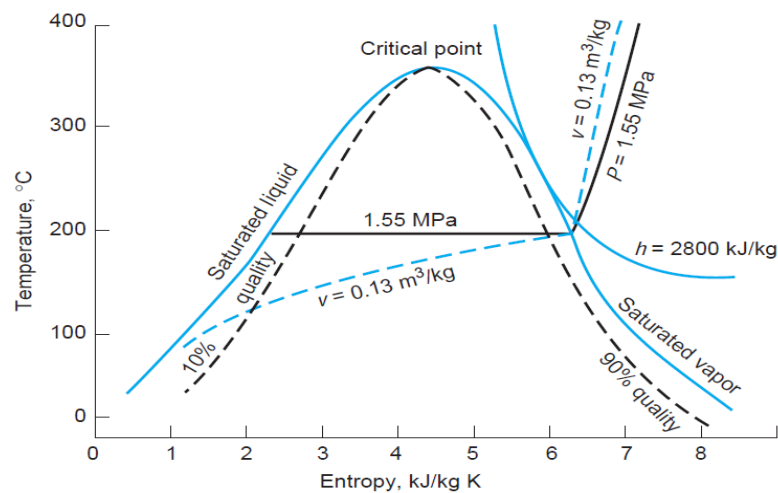
حسب kJ/kg K است و این مقادیر نسبت به یک حالت مرجع اختیاری فهرست شده اند. در جداول بخار آب، مقدار صفر به انتروپی مایع اشباع با دمای $0/01\text{ C}$ اختصاص داده شده است. برای بسیاری از میردها، انتروپی مایع اشباع با دمای 40 C برابر با صفر گرفته می شود. در ناحیه اشباع انتروپی را با استفاده از کیفیت می توان محاسبه کرد. رابطه ها شبیه آنچه هستند که برای حجم مخصوص، انرژی داخلی و انتالپی داده شده اند.

$$s = (1 - x)s_f + xs_g$$

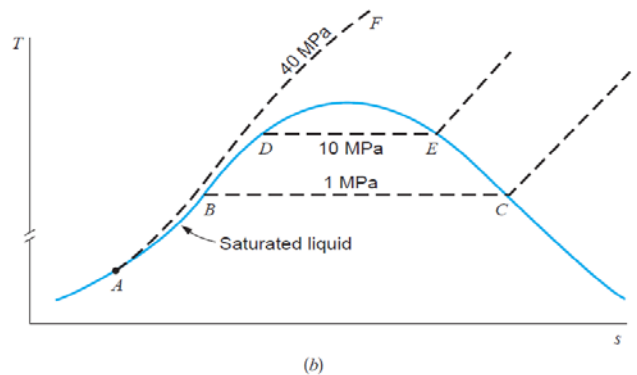
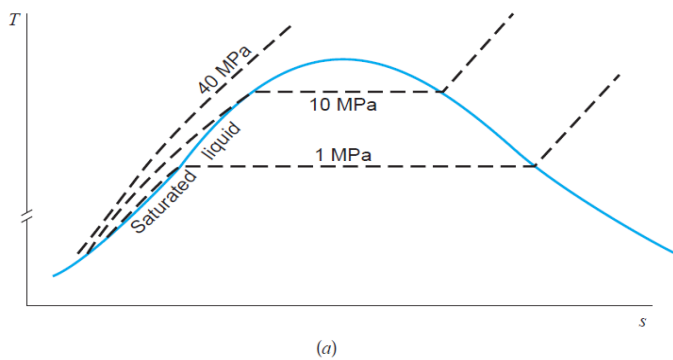
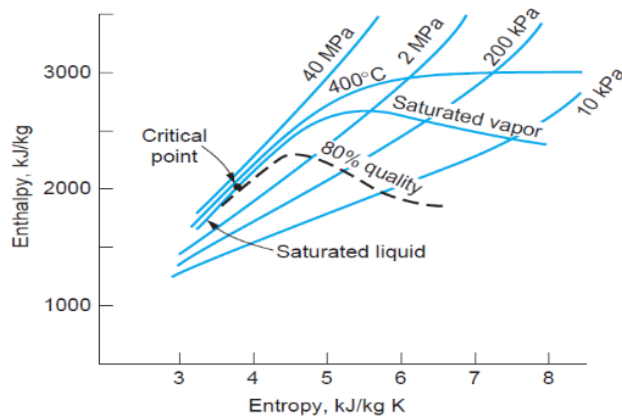
$$s = s_f + xs_{fg}$$

انتروپی یک مایع متراکم نیز مانند سایر خواص جدول بندی می شود. این خواص عمدتاً تابعی از دما هستند و با خواص مربوط به مایع اشباع در همان دما تفاوت زیادی ندارند. در جدول ب-1-4 انتروپی آب مایع متراکم مانند سایر خواص داده شده است.

اغلب خواص ترمودینامیکی یک ماده را در نمودار دما-انتروپی و در نمودار انتالپی-انتروپی، که به افتخار ریچارد مولیر آلمانی نمودار مولیر می گویند، نشان می دهند. شکل های زیر اجزای اصلی نمودار های دما-انتروپی و انتالپی-انتروپی را برای بخار آب نشان می دهند.



شکل 3-6 نمودار مولیر ، دما - انتروپی



شکل 4-6 دما - آنترופی

جنبه های کلی این نمودار ها برای تمام مواد خالص یکسانند. این نمودار ها هر دو با ارزش اند زیرا داده های ترمودینامیکی را نشان می دهند و نیز این دلیل که با استفاده از آنها، به خصوص از نمودار دما-آنترופی، می توان تغییر حالت ها در فرایند های مختلف را دید و این موضوعی است که بعدا به آن پی می برید. نمودار دما-آنترופی به خصوص برای این منظور مفید واقع می شود. در اغلب مواد، اختلاف آنترופی یک مایع متراکم و مایع اشباع هم دمای با آن به قدری کوچک است که فرایندی که در آن مایع در فشار ثابت گرم می شود تا دمای اشباع تقریبا بر خط مایع اشباع منطبق است.

تغییر آنترופی در فرایندهای برگشت پذیر

چون آنترופی یک خاصیت ترمودینامیکی است، مفهوم آن را در فرایند های مختلف بررسی می کنیم. در این قسمت، فقط سیستم هایی را که با فرایندهای برگشت پذیر سروکار دارند، سیکل کارنو، فرایند های انتقال گرمای برگشت پذیر و فرایند های ادیاباتیک برگشت پذیر را در نظر می گیریم.

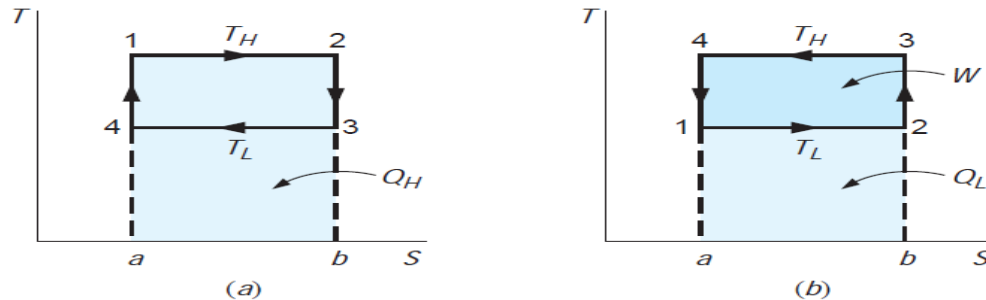
سیال عامل یک ماشین گرمایی را که بر مبنای سیکل کارنو عمل می کند به عنوان سیستم می گیریم. فرایند اول انتقال گرمای تک دما از منبع دما-بالا به سیال عامل است. در این فرایند:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

چون این فرایند برگشت پذیری است که در آن دمای سیال عامل ثابت است، با انتگرال از این معادله:

$$S_2 - S_1 = \frac{1}{T_H} \int_1^2 \delta Q = \frac{1}{T_H} Q_2$$

این فرایند در شکل زیر a نمایش داده شده است و سطح زیر خط 1-2 گرمای انتقال یافته به سیال عامل را در این فرایند نشان می دهد.



شکل 5-6 فرایند برگشت پذیر، دمای سیال عامل ثابت

نکته: در چرخه های برگشت پذیر، Q_{net} مساحت داخل چرخه است.

دومین فرایند سیکل کارنو یک فرایند ادیباتیک برگشت پذیر است. طبق تعریف انتروپی:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

بدیهی است که انتروپی در فرایند ادیباتیک برگشت پذیر ثابت می ماند. فرایند انتروپی-ثابت را فرایند تک انتروپی (ایزونتروپیک) می گویند. خط 2-3 این فرایند را نشان می دهد. این فرایند در حالت 3، که دمای سیال عامل به T_L می رسد، پایان می گیرد.

فرایند سوم یک فرایند تک دمای برگشت پذیر است که در آن گرما از سیال عامل به منبع دما-پایین انتقال می یابد. برای این فرایند:

$$S_4 - S_3 = \int_3^4 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} = \frac{3}{T_L} Q_4$$

چون در این فرایند گرما از سیال عامل انتقال می یابد (یعنی، منفی است)، انتروپی سیال عامل کاهش می یابد. به علاوه، چون فرایند نهایی 4-1 که سیکل را کامل می کند فرایند ادیباتیک برگشت پذیر (تک انتروپی) است، واضح است کاهش انتروپی در فرایند 3-4 دقیقاً با افزایش انتروپی در فرایند 2-1 برابر است. سطح زیر خط 3-4 گرمای انتقال یافته از سیال عامل به منبع دما-پایین را نشان می دهد.

چون کار خالص در سیکل با انتقال گرمای خالص برابر است، سطح 1-4-3-2-1 کار خالص در سیکل را نشان می دهد. بازده سیکل را نیز می توان بر حسب مساحت ها بیان کرد:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\text{area } 1-2-3-4-1}{\text{area } 1-2-b-a-1}$$

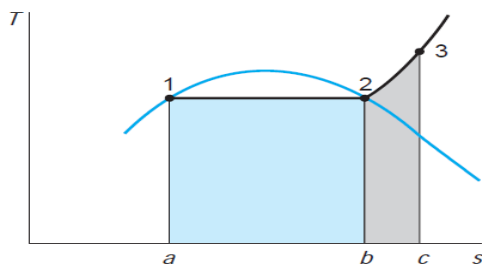
حال می توان معنای بعضی عبارت هایی را که قبلا درباره بازده نشان داده شد به طور ترسیمی فهمید. مثلا، با افزایش T_H در حالی که T_L ثابت می ماند، بازده افزایش می یابد. کاهش T_L در حالی که T_H ثابت می ماند باعث افزایش بازده می شود. هم چنین، واضح است وقتی دمای مطلق که در آن گرما دفع می شود به صفر نزدیک می شود، بازده به 100 درصد نزدیک می شود.

با معکوس کردن سیکل، یخچال یا پمپ گرما داریم. سیکل کارنو برای یخچال در شکل قبل (b) نشان داده شده است. توجه داریم که انتروپی سیال عامل در T_L افزایش می یابد، زیرا در این دما به آن گرما داده می شود. انتروپی سیال عامل در T_H کاهش می یابد چون در این دما از آن گرما دفع می شود.

حال فرایندهای انتقال گرمای برگشت پذیر را در نظر می گیریم. در این حالت با فرایندهایی سروکار داریم که برگشت پذیر داخلی اند، یعنی، فرایندهایی که در داخل مرز سیستم هیچ گونه برگشت ناپذیری ندارند. در این فرایندها، می توان نشان داد که انتقال گرما به/یا از سیستم با سطح زیر منحنی در نمودار دما-انتروپی برابر است. مثلا، تغییر حالت از مایع اشباع به بخار اشباع را در فشار ثابت در نظر می گیریم. این فرایند متناظر با فرایند 2-1 در نمودار T-s شکل زیر است و مساحت 1-a-b-2-1 انتقال گرما را نشان می دهد. چون این یک فرایند فشار-ثابت است، انتقال گرما برای جرم واحد با h_{fg} برابر است. لذا:

$$s_2 - s_1 = s_{fg} = \frac{1}{m} \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} = \frac{1}{mT} \int_1^2 \delta Q = \frac{1q_2}{T} = \frac{h_{fg}}{T}$$

در این رابطه می توان s_{fg} را از مقادیر داده شده در جداول خواص ترمودینامیکی به دست آورد.



شکل 6-6 نمودار دما-انتروپی

اگر گرما در فشار ثابت به بخار اشباع داده شود، بخار آب در امتداد خط 2-3 فوق گرم می شود. در این فرایند:

$$2q_3 = \frac{1}{m} \int_2^3 \delta Q = \int_2^3 T ds$$

چون T ثابت نیست، از این معادله وقتی می توان انتگرال گرفت که رابطه بین دما و انتروپی معلوم باشد. ولی، می دانیم که سطح زیر منحنی 2-3 کمیت $\int_2^3 T ds$ ، لذا گرمای انتقال یافته در این فرایند برگشت پذیر را نشان می دهد.

نتیجه مهمی که می توان گرفت این است که برای فرایندهای برگشت پذیر داخلی، سطح زیر منحنی دما-انتروپی مقدار گرمای انتقال یافته را نشان می دهد. همان طور که بعدا خواهید دید، این موضوع برای فرایندهای برگشت ناپذیر صحت ندارد.

رابطه های خواص ترمودینامیکی

حال، می خواهیم دو رابطه مهم ترمودینامیکی زیر را برای یک ماده تراکم پذیر ساده به دست آوریم:

$$T dS = dU + P dV$$

$$T dS = dH - V dP$$

رابطه اول را با در نظر گرفتن یک ماده تراکم پذیر ساده ساکن در غیاب آثار حرکتی یا گرانشی می توان بدست آورد. قانون اول برای تغییر حالت تحت این شرایط به صورت زیر است:

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

معادله های مذکور را ابتدا برای تغییراتی در نظر می گیریم که در آن حالت ماده همواره مشخص است. لذا، باید یک فرایند شبه تعادلی (برگشت پذیر) را در نظر بگیریم. در فرایند برگشت پذیر یک ماده ساده تراکم پذیر:

$$\delta Q = T dS \quad \text{and} \quad \delta W = P dV$$

با جایگذاری این رابطه ها در قانون اول، داریم:

$$T dS = dU + P dV$$

این اولین معادله ای است که می خواستیم به دست آوریم، و توجه داریم که آن را برای فرایند برگشت پذیر استنتاج کردیم. لذا، این معادله را برای هر فرایند برگشت پذیری می توان انتگرال گیری کرد، زیرا حالت ماده را در هر نقطه از چنین فرایندی می توان مشخص کرد. هم چنین توجه کنید که معادله بالا فقط با خواص سروکار دارد. فرض کنید فرایند برگشت ناپذیری بین حالت های اولیه و نهایی روی دهد. خواص ماده فقط به حالت های انتهایی بستگی دارد، و لذا تغییر خواص طی تغییر حالت معینی در یک فرایند برگشت ناپذیر با تغییر خواص در فرایند برگشت پذیر یکسان است. لذا معادله بالا اغلب برای یک فرایند برگشت ناپذیر بین دو حالت معین به کار می رود، ولی انتگرال معادله بالا در امتداد یک مسیر برگشت پذیر بین همان دو حالت محاسبه می شود.

چون انتالپی به صورت زیر تعریف می شود:

$$H = U + PV$$

نتیجه می شود:

$$dH = dU + P dV + V dP$$

با جایگذاری این رابطه در معادله داریم:

$$T dS = dH - V dP$$

و این رابطه دومی است که می خواستیم. این دو عبارت دو رابطه خواص ترمودینامیکی اند و آنها را معادله گیبس می گویند.

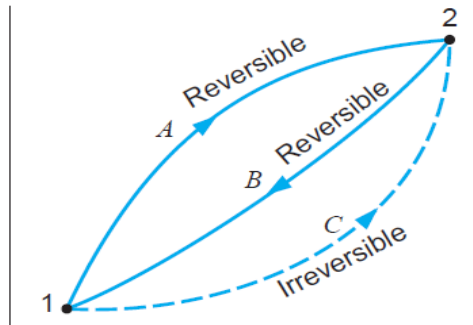
این معادله ها را برای جرم واحد نیز می توان نوشت:

$$T ds = du + P dv$$

$$T ds = dh - v dP$$

تغییر انتروپی جرم کنترل در فرایند برگشت ناپذیر

جرم کنترلی را در نظر بگیرید که سیکل های نشان داده شده در شکل زیر را طی می کند.



شکل 6-7 سیکل برگشت پذیر و سیکل برگشت ناپذیر

سیکل متشکل از فرایندهای برگشت پذیر A و B یک سیکل برگشت پذیر است. لذا،

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B = 0$$

سیکل متشکل از فرایند برگشت ناپذیر C و فرایند برگشت پذیر B یک سیکل برگشت ناپذیر است. با استفاده از نامساوی کلازیوس برای این سیکل داریم:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_B < 0$$

با تفریق معادله دوم از معادله اول و با مرتب کردن:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

چون مسیر A برگشت پذیر است و انتروپی یکی از خواص است:

$$\int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_A = \int_1^2 dS_A = \int_1^2 dS_C$$

لذا:

$$\int_1^2 dS_C > \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_C$$

چون مسیر C اختیاری است، نتیجه کلی به صورت زیر است:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$
$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

در این معادله ها ، علامت تساوی برای فرایند برگشت پذیر و علامت نامساوی برای فرایند برگشت ناپذیر است.

این یکی از مهم ترین معادله های ترمودینامیکی است. از این معادله برای استنتاج چند مفهوم استفاده می شود. اساسا، این معادله تاثیر برگشت ناپذیری را بر انتروپی جرم کنترل نشان می دهد. اگر در فرایند برگشت پذیری مقدار گرمای δQ در دمای T به جرم کنترلی داده شود، تغییر انتروپی آن عبارت است از:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}}$$

ولی، هرگونه برگشت ناپذیری باعث می شود تغییر انتروپی از مقدار بالا بیشتر باشد. یعنی:

$$dS > \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{irr}}$$

درمعادله زیر:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

در هر سه حالت $\delta Q = 0$ ، $\delta Q < 0$ و $\delta Q > 0$ صحت دارد. اگر δQ منفی باشد، انتروپی بر اثر انتقال گرما کاهش می یابد. ولی، برگشت ناپذیری ها در این حالت نیز باعث افزایش انتروپی جرم می شود، و از نظر مقدار عددی برای δQ می توان رابطه زیر را نوشت:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

نکته : تغییر انتروپی در حجم کنترل بسته به انتقال حرارت و برگشت ناپذیری سیستم بستگی دارد.

تولید انتروپی

نتیجه بحث های قبل این است که، برای δQ و T یکسان، تغییر انتروپی در فرایند برگشت ناپذیر از تغییر انتروپی در فرایند برگشت پذیر بیشتر است. این موضوع به صورت ریاضی زیر می توان نوشت:

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{\text{gen}}$$

که در آن:

$$\delta S_{\text{gen}} \geq 0$$

δS_g تولید انتروپی در فرایند بر اثر برگشت ناپذیری هایی است که در سیستم روی می دهند. فرایند هایی مانند اصطکاک، انبساط های غیر مقید، انتقال انرژی داخلی بر اثر اختلاف دمای معین، می توانند تولید انتروپی داخلی نمایند. انتقال گرمای ناشی از اختلاف دماهای معین، مانند انتقال δQ از یک منبع، یا کار مکانیکی می تواند، علاوه بر تولید انتروپی داخلی، برگشت ناپذیری خارجی نیز ایجاد کند.

معادله بالا با علامت تساوی برای فرایند برگشت پذیر، و علامت بزرگ تر برای فرایندهای برگشت ناپذیر صحت دارد. چون تولید انتروپی همواره مثبت است و برای فرایند برگشت پذیر دارای کمترین مقدار (صفر) است، حدود جمله های کار و انتقال گرما را می توان استنتاج کرد.

یک فرایند برگشت پذیر را، که تولید انتروپی در آن صفر است، در نظر می گیریم. لذا، جمله های کار و انتقال گرما عبارتند از:

$$\delta Q = T dS \quad \text{and} \quad \delta W = P dV$$

انتقال گرما در یک فرایند برگشت ناپذیر با تولید انتروپی غیر صفر:

$$\delta Q_{\text{irr}} = T dS - T \delta S_{\text{gen}}$$

و لذا، برای ds یکسان، انتقال گرما کمتر از مقدار متناظر در حالت برگشت پذیر است. همچنین، توجه کنید که در فرایند برگشت ناپذیر، کار با $P dV$ برابر نیست بلکه از آن کوچکتر است. به علاوه، از قانون اول:

$$\delta Q_{\text{irr}} = dU + \delta W_{\text{irr}}$$

و رابطه خاصیت زیر:

$$T dS = dU + P dV$$

نتیجه می شود:

$$\delta W_{\text{irr}} = P dV - T \delta S_{\text{gen}}$$

رابطه بالا نشان می دهد که کار به اندازه ای که متناسب با تولید انتروپی است کاهش می یابد. به این دلیل، جمله $T\delta S_{\text{gen}}$ را اغلب کار اتلافی می گویند. گرچه این جمله واقعا انرژی هدر رفته نیست بلکه فرصت از دست رفته برای ایجاد کار است.

انتگرال معادله زیر :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{\text{gen}}$$

بین حالت های اولیه و نهایی برابر است با :

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + {}_1 S_2 \text{ gen}$$

لذا، برای تغییر انتروپی عبارتی داریم که در آن برای فرایند برگشت ناپذیر علامت تساوی به کار رفته است، در حالی که در قسمت قبل علامت نامساوی داشتیم. در فرایند برگشت پذیر، با تولید انتروپی صفر، تغییر S که در معادله بالا بیان شده است تبدیل به معادله زیر با علامت تساوی می شود و جمله کار به صورت $\int P dV$ در می آید:

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

معادله بالا را معادله موازنه انتروپی برای جرم کنترل و هم شکل با معادله انرژی است. و می تواند چند زیرسیستم داشته باشد. این معادله را به شکل کلی زیر می توان نوشت:

$$\Delta \text{Entropy} = +\text{in} - \text{out} + \text{gen}$$

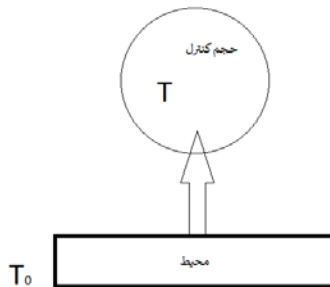
این رابطه می گوید انتروپی را می توان خلق کرد ولی نمی توان از بین برد در حالی که انرژی را نه می توان خلق کرد و نمی توان از بین برد. از معادلات بالا چند نتیجه مهم گرفته می شود. اولاً، انتروپی یک سیستم را با دو روش می توان افزایش داد- با انتقال گرما به آن و با انجام فرایند برگشت ناپذیر. چون تولید انتروپی نمی تواند کمتر از صفر باشد، برای کاهش انتروپی فقط یک راه وجود دارد و آن دفع گرما از سیستم است. ثانیاً، در فرایند ادیاباتیک $\delta Q = 0$ ، و لذا افزایش انتروپی همواره با برگشت ناپذیری همراه است.

سرانجام، وجود برگشت ناپذیری ها باعث می شود مقدار کار، در مقایسه بامقدار آن در فرایند برگشت پذیر، کمتر شود. یعنی، در فرایند انبساط کار کمتر و در فرایند تراکم کار بیشتری به جرم کنترل داده می شود.

اصل افزایش انتروپی

در قسمت قبل، فرایندهایی را بررسی کردیم که در آنها داخل سیستم (جرم کنترل) برگشت ناپذیری روی می داد. هم چنین، دیدیم تغییر انتروپی یک جرم کنترل می تواند مثبت یا منفی باشد، زیرا انتروپی را با تولید انتروپی داخلی می توان افزایش داد و با انتقال گرما می توان افزایش یا کاهش داد. که این موضوع بستگی به جهت انتقال گرما دارد. در این قسمت، تاثیر انتقال گرما را بر تغییر حالت اطراف، و نیز بر خود جرم کنترل بررسی می کنیم.

فرایند داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل 6-8 شماتیک حجم کنترل و محیط

محیط گرم تر از حجم کنترل است پس داریم:

$$T > T_0$$

$$ds_{c.v.} < \frac{\delta Q}{T}$$

اما برای محیط داریم:

$$D_{S_{surr}} = \frac{-\delta Q}{T_0}$$

تغییر انتالپی کل برابر است با:

$$ds_{net} = ds_{c.v.} + ds_{surr}$$

و با جمع کردن رابط بالا داریم:

$$ds_{net} = ds_{c.v.} + ds_{surr} < \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

چون دمای محیط از دمای حجم کنترل بیشتر است:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} > 0$$

از طرفی چون $\delta Q > 0$ می باشد پس $ds_{net} > 0$ به عبارت دیگر فارغ از اینکه چه نوع فرایندی انجام شده است، انتروپی خالص (کل) همیشه افزایش می یابد.

مثال. یک کیلوگرم بخار آب اشباع با دمای 100 C در فرایند فشار ثابتی با انتقال گرما به هوای اطراف، که در 25 C است، به مایع اشباع 100 C تبدیل می شود. افزایش خالص انتروپی مجموعه آب و اطراف چقدر است؟

حل. برای جرم کنترل اب، از جداول بخار اب :

$$\Delta S_{c.m.} = -ms_{fg} = -1 \times 6.0480 = -6.0480 \text{ kJ/K}$$

با در نظر گرفتن اطراف، داریم:

$$Q_{to \text{ surroundings}} = mh_{fg} = 1 \times 2257.0 = 2257 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{surr} = \frac{Q}{T_0} = \frac{2257}{298.15} = 7.5700 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{gen \text{ total}} = \Delta S_{c.m.} + \Delta S_{surr} = -6.0480 + 7.5700 = 1.5220 \text{ kJ/K}$$

انتروپی افزایش یافته است و، همانطور که به تجربه می دانیم این فرایند می تواند روی می دهد.

انتقال گرما از آب به اطراف می تواند به طور برگشت پذیر روی دهد. فرض کنید ماشینی که بر مبنای سیکل کارنو عمل می کند از آب گرما دریافت کند و به اطراف گرما دفع نماید کاهش انتروپی آب با افزایش انتروپی اطراف برابر است.

پس داریم:

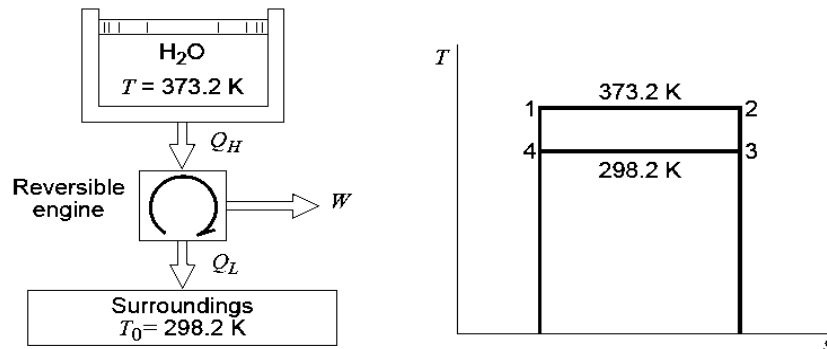
$$\Delta S_{c.m.} = -6.0480 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{surr} = 6.0480 \text{ kJ/K}$$

$$Q_{\text{to surroundings}} = T_0 \Delta S = 298.15(6.0480) = 1803.2 \text{ kJ}$$

$$W = Q_H - Q_L = 2257 - 1803.2 = 453.8 \text{ kJ}$$

چون این یک سیکل برگشت پذیر است، ماشین را می توان به طور معکوس و به صورت پمپ گرما به کار انداخت. در این سیکل، کار داده شده به پمپ گرما 453/8 کیلو ژول است.



تغییر انتروپی جامدات و مایعات

در جامدات و مایعات:

$$dV = 0$$

پس داریم:

$$Tds = du + PdV \rightarrow ds = \frac{du}{T} = \frac{CdT}{T}$$

با انتگرال گیری از روابط فوق داریم:

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 C \frac{dT}{T} = C \ln \frac{T_2}{T_1} \rightarrow \Delta S = C \ln \frac{T_2}{T_1}$$

تغییر انتروپی در مایعات و جامدات وابسته به ظرفیت گرمایی و تغییر دما می باشد.

مثال: یک کیلوگرم آب مایع از دمای 20C تا 90C گرم میشود. تغییر انتروپی را با فرض حرارت مخصوص ثابت، محاسبه و نتایج را با مقادیری که از جدول بدست می آید مقایسه کنید؟

$$S_2 - S_1 = C \ln \frac{T_2}{T_1} = 4.18 \ln \frac{363.2}{293.2} = 0.8958 \frac{kJ}{kgK}$$

از جدول

$$S_2 - S_1 = S_{F@90C} - S_{F@20C} = 1.1925 - 0.2966 = 0.8959 \frac{kJ}{kgK}$$

تغییرات انتروپی گازهای ایده ال

می دانیم:

$$T ds = du + P dv$$

و برای گاز ایده ال داریم:

$$du = C_{v0} dT \quad \text{and} \quad \frac{P}{T} = \frac{R}{v}$$

لذا:

$$ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

و به طور مشابه:

$$T ds = dh - v dP$$

برای گاز ایده ال:

$$dh = C_{p0} dT \quad \text{and} \quad \frac{v}{T} = \frac{R}{P}$$

لذا:

$$ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

و با انتگرال گیری داریم:

$$s_2 - s_1 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$s_2 - s_1 = C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

با تفریق دو رابطه داریم:

$$C_p - C_v = R$$

امکان دوم، استفاده از تابع تحلیلی C_{p0} بر حسب دماست.

امکان سوم، انتگرال گیری از نتایج محاسبات ترمودینامیک آماری از دمای مرجع T_0 تا دمای دلخواه T و تعریف انتروپی استاندارد است.

$$s_T^0 = \int_{T_0}^T \frac{C_{p0}}{T} dT$$

این تابع را در جدول گازهای ایده ال بر حسب دما می توان فهرست کرد. تغییرات انتروپی بین هر دو حالت 1 و 2 رابطه زیر داده می شود.

$$s_2 - s_1 = (s_{T_2}^0 - s_{T_1}^0) - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

فرض گرمای ویژه ثابت نیز به عنوان یک حالت خاص در بعضی تحلیل ها به کار می رود. در این حالت داریم:

$$s_2 - s_1 = 0 = C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

این عبارت را به صورت زیر می توان نوشت:

$$\ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{R}{C_{p0}} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

یا:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_{p0}}$$

ولی:

$$\frac{R}{C_{p0}} = \frac{C_{p0} - C_{v0}}{C_{p0}} = \frac{k-1}{k}$$

که در آن K نسبت گرمای ویژه به صورت زیر تعریف می شود:

$$k = \frac{C_{p0}}{C_{v0}}$$

حال معادله بالا را بصورت زیر می نویسیم:

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

از این عبارت و معادله حالت گاز ایده ال داریم:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

و:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$$

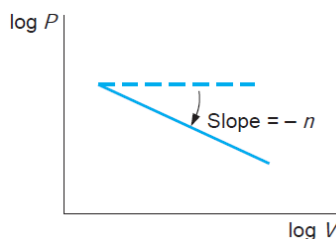
از عبارت آخر:

$$PV^k = \text{constant}$$

این حالت خاصی از فرایند پلی تروپیک است که در آن نمای پلی تروپیک n با نسبت گرماهای ویژه K برابر است.

فرایند پلی تروپیک برگشت پذیر برای گاز ایده ال

وقتی گازی فرایند برگشت پذیری با انتقال گرما را طی می کند، این فرایند اغلب طوری روی می دهد که نمودار log P بر حسب log V یک خط مستقیم است. (شکل زیر) در این فرایند PV^n ثابت است.



فرایندی را که در آن PV^n ثابت است **فرایند پلی تروپیک** می گویند. انبساط گازهای احتراق در سیلندر موتورهای احتراق رفت برگشتی آب-خنک نمونه ای از فرایند پلی تروپیک است. با اندازه گیری فشار و حجم در کورس انبساط فرایند پلی تروپیک، که توسط اندیکاتور موتور انجام می شود، و با ترسیم لگاریتم فشار بر حسب لگاریتم حجم، خط مستقیمی مطابق شکل بالا به دست می آید. از این شکل دیده می شود:

$$\frac{d \ln P}{d \ln V} = -n$$

$$d \ln P + n d \ln V = 0$$

اگر n ثابت باشد با انتگرال گیری از رابطه بالا:

$$PV^n = \text{constant} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

از این معادله روابط زیر را در فرایند پلی تروپیک می توان بدست آورد:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

برای جرم کنترل متشکل از یک گاز ایده ال، کار انجام شده در مرز متحرک را در فرایند پلی تروپیک برگشت پذیر برای هر مقدار n ، به جز $n=1$ از روابط زیر می توان به دست آورد:

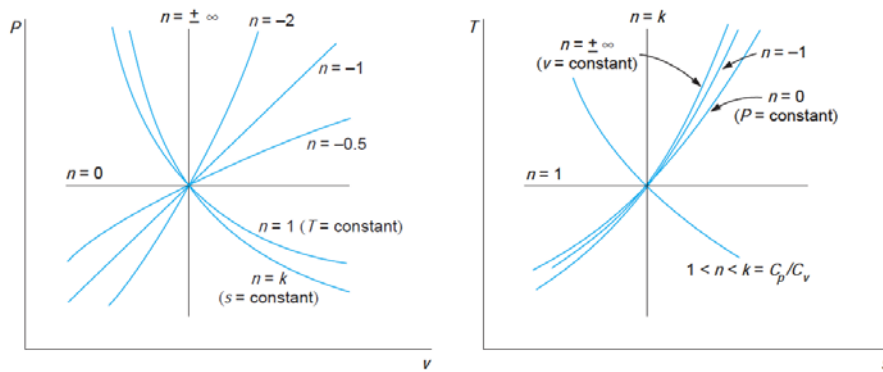
$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \quad \text{and} \quad PV^n = \text{constant}$$

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \text{constant} \int_1^2 \frac{dV}{V^n}$$

$$= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n}$$

فرایند های پلی تروپیک برای مقادیر مختلف n در شکل زیر نشان داده شده است. مقادیر n برای چند فرایند آشنا عبارت است از:

Isobaric process:	$n = 0,$	$P = \text{constant}$
Isothermal process:	$n = 1,$	$T = \text{constant}$
Isentropic process:	$n = k,$	$s = \text{constant}$
Isochoric process:	$n = \infty,$	$v = \text{constant}$



شکل 9-6 نمودار فرایند های پلی تروپیک

فرایند تک دمای برگشت پذیر برای گاز ایده ال یکی از حالت های خاص است. در این فرایند:

$$PV = \text{constant} = P_1 V_1 = P_2 V_2$$

کار انجام شده در مرز یک جرم تراکم پذیر ساده را در فرایند تک دمای برگشت پذیر با انتگرال گیری از معادله زیر می توان بدست آورد:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$$

در نتیجه:

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV = \text{constant} \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

یا:

$${}_1W_2 = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

چون در فرایند تک دما تغییر انرژی داخلی یا تغییر انتالپی نداریم، انتقال گرما (با صرف نظر از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل) با کار برابر است. لذا، با محاسبه انتقال گرما می توان دو معادله بالا را به دست آورد.

مثال: نیتروژن در درون یک سیلندر و طی یک فرایند برگشت پذیر از فشار 100Kpa و درجه حرارت 20C تا فشار 500Kpa متراکم میگردد. طی فرایند تراکم رابطه ی فشار و حجم $pv^{1/3} = cte$ است. کار و انتقال حرارت را در هر کیلوگرم نیتروژن محاسبه کنید و این فرایند را در نمودار P-V و T-S رسم کنید.

$$PV^{1/3} = cte$$

$$w = \int Pdv = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

$$\text{گاز کامل} = \frac{mR(T_2-T_1)}{1-n}$$

$$w_2 = \frac{0.2968(T_2-T_1)}{1-\frac{1}{3}}$$

T_2 هدف یافتن

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{K-1/K} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{K-1} \quad \frac{T_2}{93.15} = (5)^{1.3-1/1.3}$$

$$T_2 = 425K$$

$$W = \frac{0.296(425)(293.150)}{1-1.3} = -130.4 \text{ Kj/Kg}$$

معادله قانون اول ترمو دینامیک:

$$Q - W = \Delta U$$

$$q - w = u_2 - u_1$$

$$q = w + C_V(T_2 - T_1)$$

$$q = -130.4 + 0.745(425 - 293.15) = 32.2 \text{ Kj/Kg}$$

مثال: یک کیلوگرم آمونیاک (NH_3) در یک سیلندر و پیستون و در دمای $50C$ و فشار $1000Kpa$ وجود دارد

تحت فرایند انبساط قرار می گیرد تا به فشار $100kpa$ برسد کار و انتقال حرارت را در این پروسه بیابید

فرایند را ایزو ترم و برگشت پذیر در نظر بگیرید.

فرضیات: 1: فرایند ایزونتروپیک نیست

2: از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر کنید

3: چون فرایند برگشت پذیر است $S_{gen}=0$ است

و $Q = T\Delta S$ است

معادله قانون اول ترمودینامیک

$$Q - W = U_2 - U_1 \rightarrow W = Q - \Delta U = \int PdV$$

چون کار مرزی داریم

مرحله اول:

$$S_1 = 5.265 \text{ KJ/Kg} \quad u_1 = 1391.3 \text{ kJ/Kg}$$

مرحله دوم:

$$S_2 = 6.494 \text{ KJ/Kg} \quad u_2 = 1424.7 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = 1\text{kg}(273 + 50)(6.494 - 5.265) = 396.97\text{kJ}$$

$$W = Q - \Delta U = 396.97 - 1(1424.7 - 1391.3) = 363.75\text{Kw}$$

انترپوی به صورت معادله آهنگی

قانون دوم ترمودینامیک را برای تغییرات دیفرانسیلی انترپوی و تغییرات معین انترپوی به کار بردیم. برای استنتاج معادله موازنه انترپوی در تحلیل کلی حجم کنترل در حالت گذرا از شکل آهنگی استفاده می شود.

تغییر نموی S را در معادلات قبل، بر δt تقسیم می کنیم:

$$\frac{dS}{\delta t} = \frac{1}{T} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta S_{\text{gen}}}{\delta t}$$

در یک حجم کنترل معین، ممکن است بیش از یک منبع انتقال گرما، هر یک در دمای معین وجود داشته باشد. چون در معادله انرژی مجبور نبودیم دمایی را که در آن گرما از سطح کنترل انتقال می یافت در نظر بگیریم، تمام جمله ها را به آهنگ انتقال گرمای خالص اضافه می کردیم. با استفاده از این مطلب و با کاربرد علامت نقطه برای شکل آهنگی، شکل نهایی معادله انترپوی در حد عبارت است از:

$$\frac{dS_{\text{c.m.}}}{dt} = \sum \frac{1}{T} \dot{Q} + \dot{S}_{\text{gen}}$$

معادله بالا آهنگ تغییر انترپوی را بر اثر شار انترپوی ورودی به داخل جرم کنترل، که از انتقال گرما ناشی می شود، و افزایش انترپوی ناشی از فرایندهای برگشت ناپذیر در داخل جرم کنترل را نشان می دهد. اگر فرایندهای برگشت پذیر در داخل حجم کنترل روی دهند، آهنگ تغییر انترپوی توسط آهنگ انتقال گرما تقسیم بر جمله های دما به دست می آید

مثال: یک سیلندر و پیستون حاوی آمونیاک در فشار 200Kpa و دمای 80C در حجم اولیه 0.1m^3 می باشد پیستون توسط یک فنر خطی بارگذاری شده است و دمای محیط 20C است. آمونیاک آن قدر سرد میشود تا به دمای محیط برسد و در این حالت $x=0.1$ می باشد کار و انتقال حرارت و انترپوی تولیدی را محاسبه کنید.

فرضیات: از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر می گردد.

تغییرات حجم و فشار خطی است.

قانون اول ترمودینامیک

$$Q - W = U_2 - U_1$$

قانون دوم ترمودینامیک

$$\Delta S = \frac{Q}{T_\infty} + S_{gen}$$

$$P=A+BV \quad w = \int p dv$$

$$w = \frac{m}{2}(p_1 + p_2)\Delta v \quad W = \left(\frac{p_1+p_2}{2}\right)\Delta v \rightarrow$$

$$\text{State1: } v_1 = 0.07595 \frac{m^3}{kg}$$

$$u_1 = 1421.6 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 5.070 \frac{kJ}{kgK}$$

$$m = \frac{V}{v} \quad \frac{0.1}{0.07595} = 13166 \text{Kg}$$

$$\text{State2: } T_2 = 20C$$

$$x=0.1$$

$$v_2 = 0.01634 \frac{m^3}{kg}$$

$$s_2 = 1.4453 \frac{kJ}{kgK}$$

$$u_2 = 378.82 \frac{kJ}{kg}$$

$$W = 0.5(1.3166)(2000 + 857)(0.01639 - 0.07545) = 112 \text{Kj}$$

قانون اول ترمودینامیک

$$Q = \Delta U + W = -1.3166(378.82 - 1421.6) - 112 = -1484.98$$

$$S_{gen} = \Delta S - \frac{Q}{T_\infty} = 1.3166(1.4453 - 5.070) - \frac{-1489.98}{293.3} \frac{KJ}{KgK}$$

تمرین: یک سیلندر و پیستون دارای یک کیلوگرم آب در دمای 20 درجه سانتی گراد و یک کیلوگرم دیگر در دمای 100 درجه سانتی گراد و فشار 500 کیلوپاسکال می باشد که با یک غشا از هم جدا شده اند ، غشا برداشته می شود و دو آب با یکدیگر ترکیب می شود و فرایند ادیاتیکی انجام میگیرد دمای نهایی و انتروپی تولیدی را بدست آورید؟

مثال: تغییر انتروپی کل را محاسبه کنید

$$T_{fe} = 350c \quad m_{fe} = 5kg \quad C_{fe} = 0.45 \frac{kJ}{kgK}$$

$$m_w = 100kg \quad T_w = 22c \quad C_w = 4.184 \frac{kJ}{kgK}$$

قانون اول ترمودینامیک

$$Q - W = U_2 - U_1$$

$$U_2 = U_1 = U_{1A} + U_{1B}$$

$$(U_{fc} + U_w) = U_{1fe} + U_{1w}$$

$$m_{fe} C_{fe} T_2 + m_w C_w T_2 = m_{fe} C_{fe} T_{1fe} + m_w C_w T_{1w}$$

$$T_2 = \frac{m_{fe} C_{fe} T_{1fe} + m_w C_w T_{1w}}{m_{fe} C_{fe} + m_w C_w} = 23.75C$$

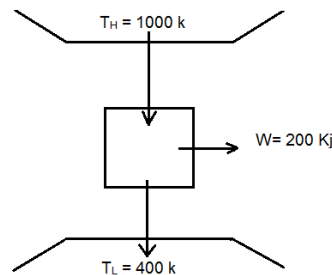
قانون دوم ترمودینامیک

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{fe} + \Delta S_w$$

$$\Delta S = m_c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{total} &= m_{fe} C_{fe} \ln \frac{T_2}{T_1} + m_w C_w \ln \frac{T_2}{T_1} = 5(0.45) \ln \frac{296.75}{623} + 100(4.18) \ln \frac{296.75}{245} \\ &= -1.67 + 2.47 = 0.8 \frac{kJ}{k} \end{aligned}$$

مثال : مشخص کنید که موتور حرارتی که در شکل زیر نشان داده شده است قابل اجرا است یا نه؟



$$Q_H = 325 \text{ KJ}, Q_L = 125 \text{ KJ}$$

نا برابری کلازیوس مطرح میکند :

$$0 \leq \oint \frac{\delta Q}{T}$$

انتگرال به دو بخش تقسیم میشود : 1- منبع بالای سیکل 2- منبع پایین سیکل

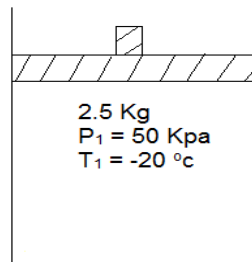
$$= \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = \frac{325 \text{ KJ}}{1000 \text{ k}} - \frac{125 \text{ KJ}}{400 \text{ k}} = 0.0125 \oint \frac{\delta Q}{T}$$

غیر ممکن

>0 سیکل : 1- (<) فرایند های واقعی

3- (=) برگشت پذیر می بود.

مثال: یک پیستون و سیلندر حاوی 2.5 kg آمونیاک در فشار 50Kpa پاسکال و دمای -20°C وجود دارد. به مجموعه مذکور حرارت داده میشود تا در فشار ثابت دما به 50°C برسد دمای منبع گرم 200°C میباشد مقدار انتقال حرارت انجام شده و آنتروپی تولید شده را در این فرآیند بیابید.



$$v_1 = 2.4463 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \quad h_1 = 1434.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad s_1 = 6.3187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{از جدول}$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow T_2 = 50^\circ \text{C}$$

$$Q - W = (\Delta kE = 0) + (\Delta pE = 0) + \Delta U$$

قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل بسته:

$$Q = m(u_2 - u_1) + W$$

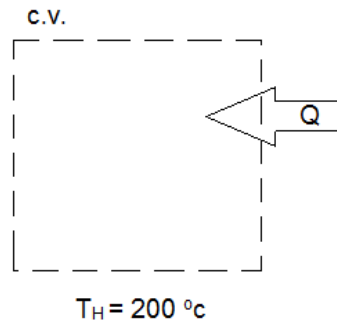
کار مرزی است :

$$W = P \Delta V$$

$$Q = \Delta H$$

$$v_2 = 3.1435 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \quad h_2 = 1585.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad s_2 = 6.8379 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$Q = m(h_2 - h_1) = 25(1593.5 - 1434.6) = 372.25 \text{ KJ}$$



فرایند فشار ثابت بازگشت پذیر نیست.

$$\Delta S_{\text{sys}} = \int \frac{\delta Q}{T})_{\text{rev}} + S_{\text{gen}}$$

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}}$$

$$S_{\text{gen}} = m(S_2 - S_1) - \frac{Q}{T_{\infty}} = 2.5 (6.8379 - 6.3187) - 372.25/473.15 = 0.511 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

یادداشت

یادداشت

فصل هفتم

تغییر آنتروپی در حجم کنترل باز:

در حجم کنترل تغییر آنتروپی به سه عامل بستگی دارد:

1. انتقال حرارت

2. بازگشت ناپذیری

3. انتقال جرم

تغییر آنتروپی به دلیل انتقال جرم + تغییر آنتروپی به واسطه بازگشت ناپذیری + تغییر آنتروپی به دلیل انتقال حرارت =

شدت تغییرات آنتروپی

$$\Rightarrow \frac{DN}{Dt} = \frac{\sigma}{\sigma t} \iiint_{c.v} \eta \rho dV + \iint_{c.s} \eta \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

قانون انتقال رینولز

C.V حجم کنترل، C.S سطح کنترل، V سرعت

$$\eta = \frac{N}{m}$$

$$\xrightarrow{\text{خاصیت } N=S} \frac{DS}{Dt} = \frac{\sigma}{\sigma t} \iiint_{c.v} \eta \rho dV + \iint_{c.s} s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

$$ds = \frac{dQ}{T} + ds_{\text{gen}} \quad (2)$$

از طرفی داشتیم

با ترکیب روابط (1) و (2) داریم:

$$\iint_{c.v} \frac{Q}{T} + S_{\text{gen}} = \iint_{c.s} s \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} + \frac{\sigma}{H} \int_{c.v} s \rho dV$$

رابطه تولید آنتروپی در حجم کنترل باز:

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{\text{gen}} = \sum \dot{M}_e s_e - \sum \dot{M}_i s_i + \frac{ds_{c.v}}{dt}$$

اگر فرایند u.s.u.f باشد:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i + \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_1 s_1$$

اگر فرایند SSSF باشد:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i$$

می دانیم $\sum \frac{Q_i}{T_i} = -\frac{Q_{surr}}{T_{surr}}$ پس می توان نوشت:

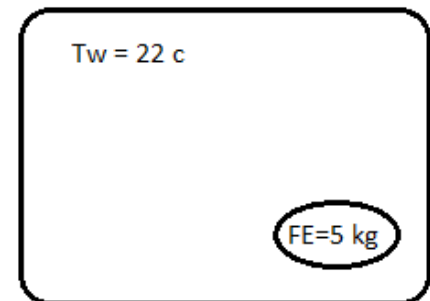
$$-\frac{Q_{surr}}{T_{surr}} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i + \frac{ds_{c.v}}{dt}$$

مثال: سیستم بسته ی زیر را در نظر بگیرید مقدار ΔS_{total} را به دست آورید:

$$T_{Fe} = 350^\circ C, T_{water} = 22^\circ C, m_{Fe} = 5kg, C_{Fe} = 0.45,$$

$$m_{H_2O} = 100kg, C_{H_2O} = 4.184 \frac{kJ}{kg^\circ C}$$

$$\Delta S_{total} = ?$$



حجم کنترل بسته:

$$(W=0 \text{ و } Q=0) \text{ عایق } Q - W = \Delta u \Rightarrow \Delta u = 0$$

$$\Delta u = \Delta u_{Fe} + \Delta u_{H_2O} = 0$$

$$\Delta u_{Fe} = m_{Fe} C_{Fe} (T_{2Fe} - T_{1Fe})$$

$$\Delta u_{H_2O} = m_{H_2O} C_{H_2O} (T_{2H_2O} - T_{1H_2O})$$

$$T_{2Fe} = T_{2H_2O} = T_2$$

$$\Rightarrow 5 * 0.45 * (T_2 - (350 + 273)) + 100 * 4.184 * (T_2) - 295 = 0$$

$$T_2 = 23.75^\circ\text{C}$$

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{C.V}} + \Delta S_{\text{surr}} > 0$$

$$\Delta S_{\text{surr}} = 0 \text{ چون انتقال حرارت نداریم}$$

$$\Delta S_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe}} \cdot C_{\text{Fe}} L_n \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\text{Fe}}$$

$$\Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} L_n \left(\frac{T_2}{T_1} \right)_{\text{H}_2\text{O}}$$

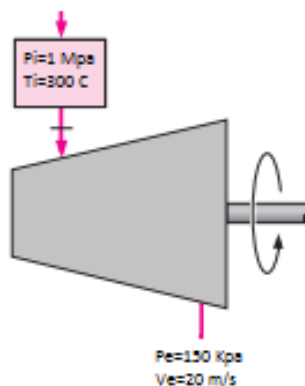
$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta S_{\text{Fe}} = 5 * 0.45 L_n \frac{296.75}{623} = -1.67 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{K}} \\ \Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = 100 * 4.184 * L_n \frac{296.75}{295} = 2.47 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{K}} \end{array} \right\}$$

$$\Delta S_{\text{C.V}} = -1.67 + 2.47 = 0.8 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{K}}$$

مثال: بخار در شرایط $P_i = 1 \text{ Mpa}$ و دمای 300°C وارد یک توربین می شود. (با سرعت ورودی $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ بخار آب در شرایط $P_e =$

150 Kpa و سرعت $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ توربین را ترک می کند. کار واحد جرم توربین را اگر فرایند آیزنتروپیک باشد به دست آورید:

(ب) آنتروپی تولیدی را محاسبه کنید:



$$\text{آیزنتروپیک} \Rightarrow S = \text{Cte}$$

$$P_i = 1 \text{ Mpa}, T_i = 300^\circ\text{C}, P_e = 150 \text{ Kpa}, V_e = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$W_{\text{turb}} = ?, S_{\text{gen}} = ?$$

فرضیات:

1. حجم کنترل باز

2. تغییرات انرژی پتانسیل صرف نظر می کنیم:

3. فرایند آیزنتروپیک ($S=Cte$): $\Delta PE = 0$

فرایند SSSF:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e \theta_e - \sum \dot{m}_i \theta_i + \frac{dec.v}{dt} \quad (\text{الف})$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{turb} = \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} \right) - \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} \right)$$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e (\text{بقاء جرم}) \Rightarrow -\dot{W}_{turb} + \dot{m} \left(h_e - h_i + \frac{V_e^2 - V_i^2}{2 * 1000} \right)$$

$$\text{ورودی} \left\{ \begin{array}{l} P_i = 1 \text{Mpa} \\ T_i = 300^\circ\text{C} \end{array} \Rightarrow T > T_s \Rightarrow \text{سوپرهیت} \right. \left. h_i = ?, s_i = ? \right\}$$

$$\text{خروجی} \left\{ \begin{array}{l} P_e = 150 \text{kpa} \\ S_e = S_i \end{array} \Rightarrow S_F < S_e < S_g \Rightarrow \text{دوفازی} \right\}$$

$$x_e = \frac{S_e - S_F}{S_{Fg}} = \frac{7.1228 - 1.4335}{5.7897} = 0.9827$$

$$h_e = h_F + x h_{Fg} = 468.1 + 0.9827(2226.5) = 9655 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = W \quad h_e - h_i = \frac{V_e^2 - V_i^2}{2 * 1000} = 377.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

(ب)

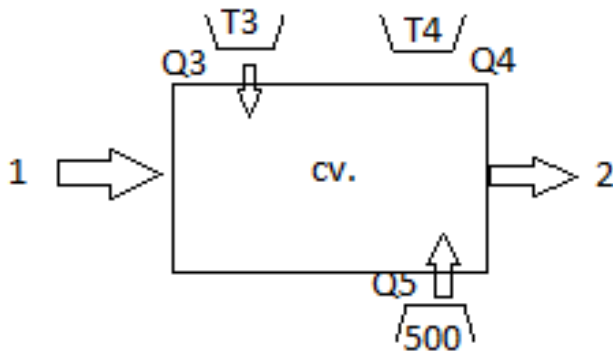
معادله تولید آنتروپی برای حجم کنترل باز

$$\sum \frac{\dot{Q}}{T_i} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e S_i - \sum \dot{m}_i S_i + \frac{ds_{c.v}}{dt}$$

\dot{m} ها با هم برابرند، ای خروجی برابرند از طرفی آیزنتروپیک $S_e = S_i$ و $S_{gen} = 0$

مثال: یک ماشین که در حالت دائم کار می کند و فرایند های آن بازگشت پذیر می باشد را همانند شکل زیر در نظر بگیرید جریانی از سیال بادبی $1 \frac{kg}{s}$ در دمای 400k و فشار 450kpa وارد شده و هوا با دمای 600k و فشار 1000kpa از دستگاه خارج می شود. نرخ انتقال حرارت \dot{Q}_5 (در دمای 500k) و نرخ کار تولید شده را محاسبه کنید.

$$T_3 = 1000K, T_4 = 350K$$



فرضیات:

حالت دائم ← SSSF

بازگشت پذیر ← $\dot{S}_{gen} = 0$

معادله بقاء انرژی ← $\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_e \theta_e - \sum \dot{m}_i \theta_i$

بقاء جرم ← $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$

$$\dot{Q}_3 + \dot{Q}_5 - \dot{Q}_4 - \dot{W} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 = \dot{m} h_2 - \dot{m} h_1$$

$$\rightarrow \dot{m} h_1 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_5 - \dot{Q}_4 = \dot{W} + \dot{m} h_2 \quad (1)$$

قانون دوم ترمودینامیک:

$$\sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i$$

$$\dot{m} s_1 + \frac{\dot{Q}_3}{T_3} - \frac{\dot{Q}_4}{T_4} + \frac{\dot{Q}_5}{T_5} = \dot{m} s_2 \quad (2)$$

$$\dot{Q}_5 = T_5 (s_2 - s_1) \dot{m} + \frac{T_5}{T_4} \dot{Q}_4 - \frac{T_5}{T_3} \dot{Q}_3$$

سیال عامل هواست

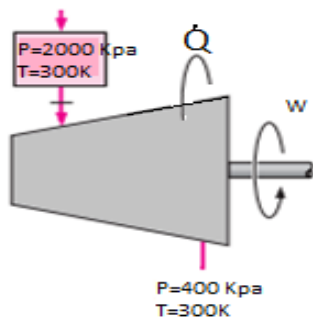
$$Q_5 = 167.2 \text{ Kw}$$

$$\dot{W} = 1 * (401.3 - 607.3) + 800 - 100 + 167.2 = 661.2 \text{ kw}$$

مثال: یک توربین هوا را بادبی $0.5 \frac{kg}{s}$ در فشار 200Kpa و دمای $300^\circ K$ وارد می کند، خروجی دارای شرایط دمای $300^\circ K$ و فشار 400Kpa می باشد. با فرض این که این پروسه

بازگشت پذیر و هم دما باشد نرخ انتقال حرارت و کار انجام شده را با صرف نظر از انرژی جنبشی و پتانسیل بیابید.

فرضیات:



1. سیال عامل هوا

2. فرایند بازگشت پذیر و هم دما

3. از انرژی های جنبشی و پتانسیل صرف نظر می شود.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1: \quad \text{معادله بقاء انرژی:}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m} \rightarrow \dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad \text{جرم بقاء:}$$

قانون دوم ترمودینامیک:

$$\sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \dot{m}_2 S_2 - \dot{m}_1 S_1$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{Q}}{T_{surr}} = \dot{m}(S_2 - S_1) \Rightarrow \dot{Q} = \dot{m}T(S_2 - S_1)$$

$$S_2 - S_1 = C_p L_n \frac{T_2}{T_1} - R L_n \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \dot{m}T \left(-R L_n \frac{P_2}{P_1} \right) = 0.5 * 300 * 0.287 * L_n \frac{400}{2000} = -69.3kw$$

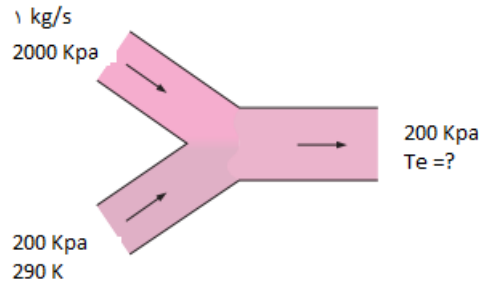
با قرار دادن مقدار \dot{Q} در معادله انرژی خواهیم داشت:

$$\dot{W} = \dot{Q} - \dot{m}(h_2 - h_1), \xrightarrow{\text{هواگاز کامل}} \Delta h = C_p \cdot \Delta T$$

$$\dot{W} = \dot{Q} - 0 = 69.3kw$$

از رابطه ی قانون دوم ترمودینامیک \dot{Q} به دست می آید.

مثال: دو سیال هر دو هوا و در هر دو فشار 2000kpa اولی بادبی $1 \frac{kg}{s}$ و دمای $400^\circ K$ و دومی بادبی $2 \frac{kg}{s}$ و دمای $290^\circ K$ با یک دیگر مخلوط می گردد فرایند شده در یک مخلوط عایق می باشد و سیال ترکیب شده دارای فشار 200kpa است دمای خروجی و نرخ آنتروپی تولیدی را محاسبه نمایید:



$$\dot{S}_{gen}, T_e = ?$$

←W کار مرزی، کار الکتریکی و کار صفت نداریم پس کار صفر است.

فرایند SSSF:

از انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر

$$\sum \dot{m}_1 = \sum \dot{m}_e \text{ معادله بقاء جرم:}$$

$$\dot{m}_e = 1 + 2 = 3 \frac{kg}{s}$$

معادله بقاء انرژی (SSSF):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g_2 z \right) - \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + g z_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + g z_2 \right)$$

$$\dot{m}_e h_e = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$$

هوا گاز کامل (تا فشار 50) در نظر گرفته شود.

$$h_w = C_p T_e \leftarrow \text{هوا گاز کامل}$$

$$\dot{m}_e C_p T_e = \dot{m}_1 C_p T_1 + \dot{m}_2 C_p T_2$$

$$\Rightarrow T_e = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_e} T_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_e} T_2 = \frac{1}{3} * 400 * \frac{2}{3} * 290 = 326.67K$$

قانون دوم ترمودینامیک:

*در سوال برگشت پذیری را نگفته است: $\dot{S}_{gen} \neq 0$

$$\sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_i S_i + \frac{dsc.v}{dt}$$

$$\frac{dsc.v}{dt} = 0 \text{ دائم: SSSF}$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_e S_e - \dot{m}_1 S_1 - \dot{m}_2 S_2 = 3S_e - S_1 - 2S_2 = 2S_e + S_e - S_1 - 2S_2 = (S_e - S_1) = 2(S_e - S_2) (*)$$

$$S_2 - S_1 = C_p L_n \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R L_n \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

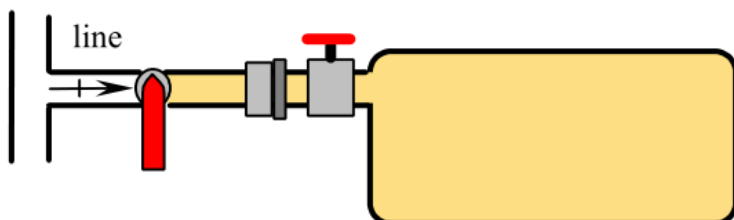
$$\left\{ \begin{array}{l} S_e - S_1 = C_p L_n \left(\frac{T_e}{T} \right) - R L_n \left(\frac{P_e}{P_1} \right) = C_p L_n \left(\frac{T_e}{T_1} \right) (**) \\ S_e - S_1 = C_p L_n \left(\frac{T_e}{T_2} \right) - R L_n \left(\frac{P_e}{P_2} \right) = C_p L_n \left(\frac{T_e}{T_2} \right) \end{array} \right.$$

با جا گذاری رابطه (*) و (**)

$$\dot{S}_{gen} = C_p L_n \left(\frac{T_e}{T_1} \right) + 2 C_p L_n \left(\frac{T_e}{T_2} \right) = 1.004 L_n \frac{326.7}{400} + 2 * 1.004 L_n \frac{326.7}{290}$$

$$= 0.0358 \frac{kw}{k}$$

مثال: مخزن خالی با حجم $0.2m^3$ را که در ابتدا خالی است و به خطی از CO_2 با فشار $1000 kpa$ و دمای $500k$ متصل است را در نظر بگیرید فرض کنید مخزن طی یک فرایند ادیاباتیکی با دی اکسید کربن پر گردد و به صورت خودکار فرایند پر شدن قطع گردد انتروپی تولید شده در این فرایند را محاسبه کنید؟



فرضیات:

1- فرایند به صورت آدیباتیک انجام میشود.

2- از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل صرف نظر کنید.

3- فرایند usuf است.

$$\sum m_i - \sum m_e = m_2 - m_1 \Rightarrow m_1 = m_2$$

$$Q - W = \sum m_e \theta_e - \sum m_i \theta_i + m_2 \theta_2 + m_2 u_2 - m_1 u_1 \Rightarrow m_2 u_2 = m_i h_i$$

$$\sum \frac{Q}{T_{surr}} + S_{gen} = \sum m_e s_e - \sum m_i s_i + (m_2 s_2 - m_1 s_1) \Rightarrow$$

$$S_{gen} = m_2 s_2 - m_i s_i$$

$$u_2 = h_i = h_{line} = h_2 - RT_2 \quad \text{گاز ایده ال}$$

$$h_2 - h_{line} = C_p(T_2 - T_{line})$$

$$C_p = (T_2 - T_{line}) - R_2 T_2 = 0$$

$$\Rightarrow T_2 = T_{line} \times \frac{C_{po}}{C_{po} - R} = T_{line} \frac{C_{po}}{C_{pv}} = k T_{line}$$

$$\text{از جدول} \Rightarrow C_p = 0.842 \text{ kJ/kgK} \quad k = 1.28 \Rightarrow T_2 = 1.289 * 500 = 644.5$$

$$p_2 v_2 = m_2 r T_2 \quad m_2 = \frac{p_2 v_2}{r T_2} = \frac{100 * 0.2}{0.1889 * 644.5} = 1.643$$

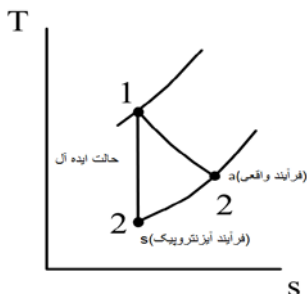
$$S_{gen} = m_2 (s_2 - s_1) = m_2 \left[C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - r \ln \frac{p_2}{p_1} \right] = 1.643 [0.842 \ln(1.289) - 0] = 0.351 \text{ kJ/kg}^\circ$$

$$\Delta S_{net} = S_{gen} = \text{انرژی خالص}$$

راندمان آیزنتروپیک:

علاوه بر راندمان قانون اول راندمان آیزنتروپیک نیز در واقع انحراف راندمان واقعی از حالت ایده ال میباشد در توربین به صورت زیر تعریف

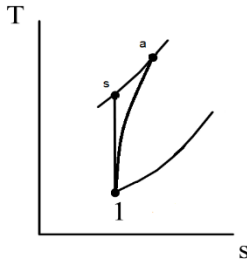
میشود:



$$\eta_{is,turbine} = \frac{W_{t,a}}{W_{t,s}} = \frac{h_1 - h_a}{h_1 - h_s}$$

شکل 7-1 نمودار راندمان آیزنتروپیک در توربین

اما در کمپرسور به صورت زیر تعریف میگردد:



$$\eta_{is,comp} = \frac{W_{c,s}}{W_{e,a}} = \frac{h_s - h_1}{h_a - h_1}$$

شکل 7-2 نمودار راندمان آیزنتروپیک در کمپرسور

لازم به ذکر است که راندمان آیزنتروپیک عددی است کوچکتر از یک که بیانگر میزان انحراف فرایندهای واقعی انجام شده در توربین کپسول نازل نسبت به فرایندهای ایده ال (ادیاباتیک برگشت پذیر میباشد)

کار برگشت پذیر: در یک فرآیند دایم و برگشت پذیر داریم:

$$\begin{cases} \delta q_{rev} = T d_s \\ T d_s = d_h - V d_p \end{cases} \Rightarrow \delta q_{rev} = d_h - v d_p$$

$$\delta q_{rev,ss} - \delta w_{rev,ss} = d_h + dk_e + dp_e \quad \text{در یک فرایند دایم و برگشت پذیر:}$$

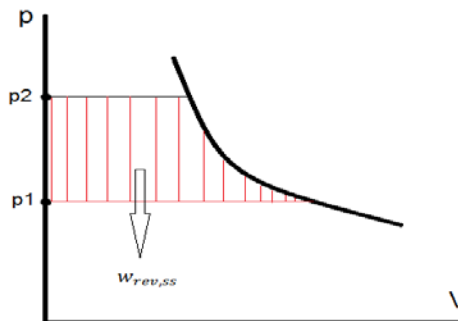
با ترکیب دو رابطه ی فوق و صرف نظر از ترم های انرژی جنبشی و پتانسیل:

$$d_h - v d_p - \delta w_{rev,ss} = d_h + dk_e + dp_e$$

$$\delta w_{rev,ss} = -v d_p$$

$$\int \Rightarrow w_{rev,ss} = - \int_{p_1}^{p_2} v d_p$$

$$w_{rev,ss} = -m \int_{p_1}^{p_2} v d_p \quad (kj)$$



شکل 7-3 نمودار فشار بر حسب حجم در کمپرسور

از رابطه ی فوق کار تولید شده در جریان پایدار به حجم مخصوص بستگی دارد و هر قدر که بزرگتر گردد کار تولید شده یا مصرف شده بیشتر میشود لذا توربین برای افزایش کار تولیدی بایستی حجم مخصوص سیال را افزایش داد که در این عمل با گرمایش میانی صورت میپذیرد اما در کمپرسور ها عکس این مطلب صادق است

نحوه ی کاهش کار کمپرسور: در کمپرسور ها برای کاهش کار مصرفی از اینتر کولر استفاده میشود با فرض اینکه گاز ایده ال و تراکم پذیر است

$$rev. ss = \int -vdp$$

اگر تحول به صورت پلی تروپیک انجام گردد:

$$\begin{cases} pv^n = cte \\ w_{rev.ss} = - \int vdp \Rightarrow w_{rev.ss} = \frac{nRT_1}{n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\} = \frac{nR(T_1 - T_2)}{n-1} \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \end{cases}$$

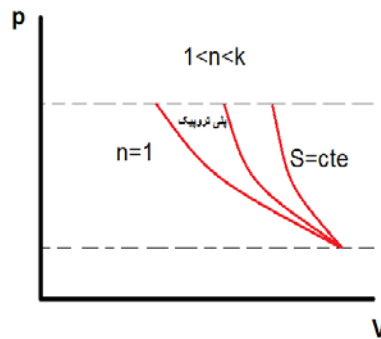
اگر فرایند آیزنتروپیک باشد:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, pv^k = cte$$

$$\Rightarrow w_{rev,ss} = - \int vdp = \frac{kR(T_2 - T_1)}{k-1} = \frac{kRT}{k-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right\}$$

اگر فرایند هم دما باشد:

$$T = cte, \quad pv = RT$$



شکل 7-4 نمودار تحلیلی فرایندهای مختلف

$$w_{rev,ss} = - \int vdp = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} * RT = RT \ln \frac{p_2}{p_1}$$

همانگونه که از شکل فوق مشخص است:

$$w_{rev.ss}(s = cte) > w_{rev.ss}(s = poly) > w_{rev.ss}(T = cte)$$

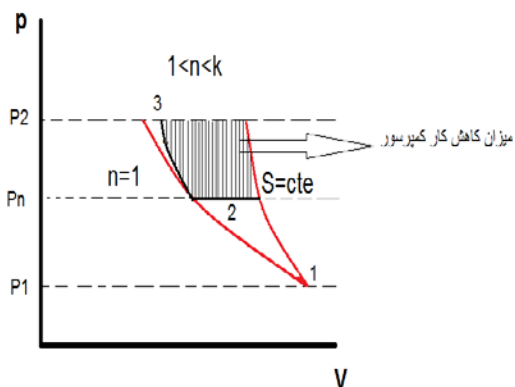
در نتیجه برای کاهش کار کمپرسور و یا پمپ باید فرایند را به فرایند هم دما نزدیک ساخت برای این کار از وسیله ای بنام خنک کننده میانی استفاده میگردد

$$w_{optimize} \Rightarrow \frac{p_2}{p_x} = \frac{p_x}{p_1}$$

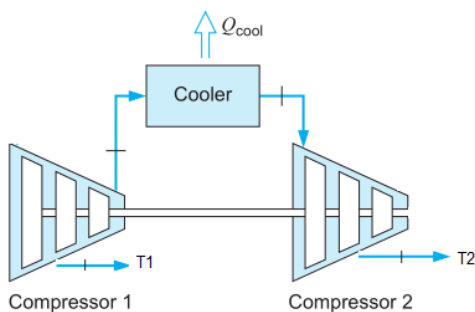
$$p_x = \sqrt{p_1 p_2}$$

$$\frac{dw}{dp_x} = 0$$

$$w = w_I + w_{II}$$



شکل 5-7 نمودار تحلیلی جهت کاهش کار پمپ



شکل 6-7 استفاده از کولر میانی جهت کاهش کار کمپرسور

مثال: یک مخزن صلب با حجم 1 m^3 شامل 100 kg گاز R2 در دمای محیط 15°C است شیری در بالای مخزن قرار دارد و باز میگردد در طی این فرایند خفقان بخار اشباع به فشار محیطی 100 k pa میرسد در طول این فرایند دما در داخل مخزن ثابت می ماند شیر بسته میگردد انتقال حرارت در تانک و انتروپی تولیدی را محاسبه کنید؟

فرضیات:

1- فرآیند usuf

2- $\Delta p_E = \Delta k_E$

3- $w_{c.v} = 0$

$$\Delta m = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

$$Q_{c.v} - w_{c.v} = \sum m_e \left(h + \frac{V_0^2}{2} + gz \right)_e - \sum m_i \left(h + \frac{V_0^2}{2} + gz \right)_i + (m_1 u_1 - m_2 u_2)$$

$$\rightarrow Q = m_e h_e + (m_1 u_1 - m_2 u_2)_{c.v} \quad (2)$$

$$s_{gen} + \frac{\sum Q_{c.v}}{T} = m_e s_e - m_e s_e + (m_1 s_1 - m_2 s_2)$$

$$\rightarrow s_{gen} = \frac{\sum Q_{c.v}}{T} + m_e s_e + (m_1 s_1 - m_2 s_2)_{c.v} \quad (3)$$

مقادیر u ، s ، h را از جدول می خوانیم.

$$m_1 = \frac{V}{v} \rightarrow v_1 = v_f + x v_{fg} \rightarrow x = 0.3149$$

$$\text{جدول } R22 \rightarrow u = u_f + x u_{fg} \rightarrow 61.88 + 0.3149 * 162.47 = 115.25$$

$$s = s_1 + x s_{fg} = 0.2382 + 0.3149 * 0.668 = 0.4485 \text{ Kj/Kg.K}$$

$$m_2 = \frac{V_2}{v_2} = \frac{1}{0.029} = 34.48$$

$$u_2 = u @ T 15^\circ C = 231.35 \text{ Kj/Kg}$$

$$s_2 = s @ T 15^\circ C = 231.35 \text{ Kj/Kg}$$

$$\Delta m = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e = 100 - 33.34 = 66.66 \text{ KJ}$$

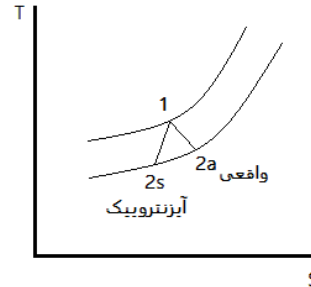
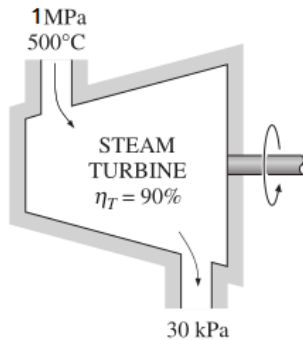
با جایگزاری u_1 ، u_2 در معادله 2 داریم.

$$Q = 66.66 * 255 + (33.33 * 23.35 - 100 * 115.25) = 13.186 \text{ Mj} = 13186 \text{ kj}$$

با جایگزاری u_1 ، u_2 در معادله 3 داریم.

$$S = (-13186 + 6.67 * 1.917) + (33.34 * 0.9062 - 100 * 0.485) = 12.37 \text{ KJ/K}$$

مثال: توربینی با شرایط زیر موجود است. میزان کار انجام شده روی سیال را حساب کنید. لازم به ذکر است سیال عامل بخار آب و راندمان آیزنتروپیک توربین 90٪ میباشد:



با فرض اینکه فرایند 1-2s به صورت آیزنتروپیک باشد .

$$s_f = 0.9439, h_f = 289.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{fg} = 6.8248, h_{fs} = 2336.1 \text{ kJ/kg}$$

$$s_2 = 6.724, p_2 = 30 \text{ Kpa}$$

در شرایط ثانویه:

$$\rightarrow (A_5) : s_f < s_{2s} < s_g \rightarrow \text{فازی 2}$$

$$\rightarrow X = s_{2s} - s_f / s_{fg} = 6.724 - 0.9439 / 6.8248$$

$$\Rightarrow \text{از طرفی } \eta_{is,turb} = 0.9 = \frac{h_1 - h_{2a}}{h_1 - h_{2s}} \rightarrow h_{2a} = 2381.23 \text{ KJ/Kg}$$

$$P_2 = 30 \text{ Kpa}, h_2 = 2381.23 \text{ KJ/Kg} \rightarrow T_2 = 69.1 \text{ } ^\circ\text{c}$$

$$\text{بقا جرم} : \sum m_i = \sum m_e = m_1 = m_2 = 3 \text{ kg/s}$$

$$\text{بقا انرژی} : Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i$$

$$-W = m(h_e - h_i) = m(h_{2s} - h_1) \Rightarrow$$

$$W = m(h_1 - h_{2a}) = 2(3398.8 - 2263.23) \Rightarrow$$

مثال: سیال R-134a توسط یک کمپرسور - پمپ در دمای 10- درجه سانتی گراد به فشار 1 مگا پاسکال با دبی 0.5 کیلوگرم بر ثانیه میرسد. (تحت یک فرایند آدیاباتیک بازگشت پذیر) مقدار توان مورد نیاز و دمای خروجی را برای 2 حالت زیر بدست آورید.

الف (کیفیت 100%

ب (کیفیت 0%

حل: اگر $x=1$ باشد باید از کمپرسور استفاده کرد.

$T_1 = 10^\circ\text{C}$, $x_1=1 \Rightarrow p_1 = p_g = 202\text{Kpa}$, $h_1 = h_g = 392.3 \text{ Kj/Kg}$ از جدول B-5-1 :

$s_1 = s_g = 1.7319 \text{ kj/kg}\cdot\text{k}$

فرض آیزنتروپیک بودن فرایند :

$p_2 = 1\text{Mpa}$, $s_2 = s_1 = s_g = 1.7319$

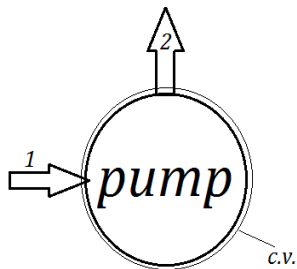
$\rightarrow h_2 = 425.7 \text{ Kj/kg}$, $T_2 = 45^\circ\text{C}$

$q - w_{comp} = h_2 - h_1$ بقای انرژی

$w_{comp} = -h_2 + h_1 = -33.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\dot{w} = \dot{m}w = \dot{w}_{comp} = 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 33.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 16.7 \text{ kw}$

b) $x=0\%$



جدول $\rightarrow \begin{cases} n = 0 \\ T_1 \end{cases} = \begin{cases} P_1 = P_f = 202 \text{ kpa} \\ h_1 = h_f = 186.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ v_1 = v_f = 0.000755 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{cases}$

بقای انرژی: $q - w = h_2 - h_1$, $q_p = 0$

با فرض این که پمپ به صورت آدیاباتیک و دائم کار می کند...

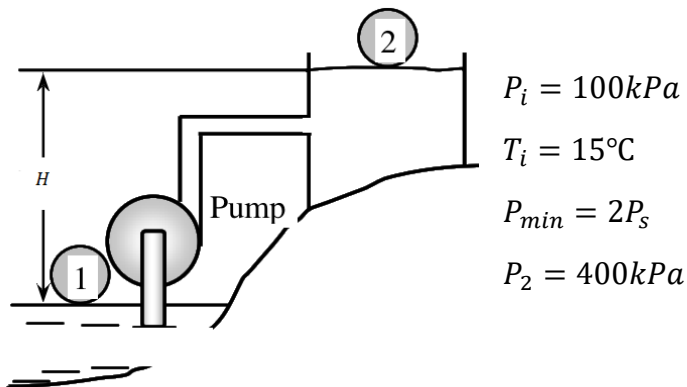
$\rightarrow w_p = h_2 - h_1$

$\rightarrow -w_p = - \int v dp = -v \Delta p = -0.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

$\rightarrow h_2 = h_1 - w_p = 186.72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

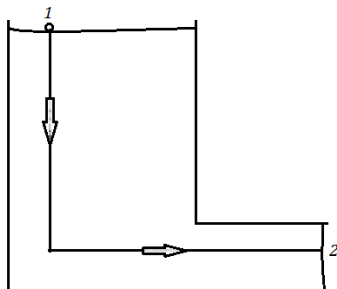
$T_2 = -9.6^\circ\text{C}$

مثال: یک پمپ کوچک آب بر روی زمین قرار گرفته است تا آب را به طبقات بالاتر ساختمان پمپ می کند؛ پمپ مذکور قرار است آب را به فشار 400kPa برساند. برای اینکه کاپیتاسیون در پمپ اتفاق نیفتد فشار مطلق آب می بایست حداقل 2 برابر فشار اشباع باشد. حداکثر طول خط لوله کشی را بیابید.



* فشار داخل پمپ باید حداقل 2 برابر فشار اشباع باشد.

سیال غیر قابل تراکم باشد
 معادله برنولی \Rightarrow ایده آل ($\mu = 0$)
 دائم



$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{(v_1)^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{(v_2)^2}{2} + gz_2 = cte$$

$$P_{min} = P_{in} = 2P_{s(15^\circ C)} = 2 \times 1.705 = 3.41kPa$$

با صرف نظر از سرعت (انرژی جنبشی در معادله برنولی):

$$\Rightarrow \frac{P_1}{\rho} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + gz_2$$

$$\Rightarrow v(P_i - P_2) = g(z_2 - z_1) \Rightarrow z_i = z_1 = \frac{v(P_i - P_2)}{g} = \frac{1000 \times (100 - 314)}{9.81}$$

مثال: یک خط نیتروزن به یک توربین متصل است. خروجی توربین نیز برای پرکردن یک مخزن مورد استفاده قرار میگیرد. توربین در فشار 75 $\frac{Lbf}{in^2}$ برای پرکردن مخزن مورد استفاده قرار میگیرد. اگر تمام فرایندها آدیاباتیک باشند کار توربین را محاسبه کنید:

$$T_{\text{ورودی}} = 540R \quad m = 75 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$T_{\text{خروجی}} = 450R \quad V_{\text{تانک}} = 2000 \text{ft}^3$$

حجم کنترل توربین و تانک را باهم فرض میکنیم:

فرایند در کل usuf است

آدیباتیک است $Q=0$



$$m_i - m_e = (m_2 - m_1) \rightarrow m_e, m_1 = 0 \rightarrow m_i = m_2 = M$$

$$Q - W = \sum m_i \theta_i - \sum m_e \theta_e + m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$\rightarrow -W = -m_i h_i + m_2 u_2 \rightarrow -m_2 = (h_i - u_2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{ورودی} \\ P_i = 75 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \\ T_i = 540R \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \text{نهایی} \\ T_2 = 450R \\ P_2 = 75 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \end{array} \right\}$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{P} = \frac{55.5 \times 450}{75 \times 144} = 2.298 \frac{\text{ft}^3}{\text{lbm}}$$

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{2000}{2.298} = 870.32 \text{lbm}$$

$$h_i - u_2 = u_i + RT_i - u_2 = RT_i + u_i - u_2 = RT_i + C_v(T_i - T_2)$$

$$-W = m_2 u_2 - m_2 h_i = m_2 (RT_i + C_v(T_i - T_2)) = 870.32 \left(\frac{55.5}{778.17} \times 540 + 0.178(540 - 450) \right)$$

$$W_{cv} = 47250 \text{ Btu}$$

مثال: یک سیلندر خالی با هوایی با دمای 70 F و فشار 15Psi پر میگردد. با فرض این که هیچگونه انتقال حرارتی صورت نگیرد به دو سوال زیر پاسخ دهید:



الف) آیا دمای ثانویه >= < دمای اولیه می گردد؟

ب) آیا دمای نهایی به ابعاد مخزن ارتباطی دارد؟

$$Q - W = \sum m_e \theta_e - \sum m_e \theta_e + m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$m_i h_i = m_2 u_2 \text{ و } m_i = m_2 \quad \text{پس در نتیجه } h_i = u_2$$

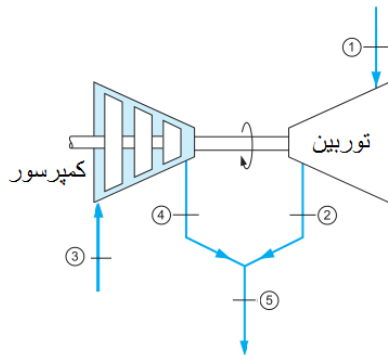
$$C_p T_i = C_v T_2$$

$$T_2 = \frac{C_p}{C_v} T_i = k T_i$$

$$K > 1 \text{ پس } T_2 > T_i$$

ب) در رابطه آخر وابسته به T_i است. دمای ثانویه از دمای اولیه بیشتر می شود و به ابعاد مخزن بستگی ندارد و در هر حال دمای مخزن بالا می رود.

مثال: مجموعه زیر برای یک سیکل سرمایشی با مبرد آمونیاک طراحی شده است. شرایط ورودی توربین $T=70\text{ c}$, $P=2\text{ mpa}$ و ورودی کمپرسور 1.2 mpa است بخار اشباع در دمای -20 c است خروجی فشار هر دو می باشد نسبت دبی جرمی خروجی توربین به کل دبی جرمی 0.62 میباشد. آیا این فرایند انجام شدنی است؟ چرا؟



فرضیات:

فرایند $SSSF$ و آدیاباتیک

مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر شده است.

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad \dot{m}_1 + \dot{m}_3 = \dot{m}_5$$

$$\dot{Q} - W_{net} = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_5 h_5$$

$$\dot{S}_{gen} + \sum \frac{\dot{Q}}{T_{amb}} = \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_i S_i$$

$$S_{gen} = -\dot{m}_1 S_1 - \dot{m}_3 S_3 + \dot{m}_5 S_5$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_2 + \dot{m}_4} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_3} = 0.62$$

$$h_1 = 1542.7, S_1 = 4.98, h_3 = h_g = 1418.1, S_3 = S_g = 5.616$$

$$h_5 = \frac{\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3}{\dot{m}_5} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_3} h_1 + \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1 + \dot{m}_3} h_3 = 0.62 h_1 + (1 - 0.62) * 1418.1 = 1495.4, p_5 = 1200 \text{ kpa}$$

$$S_5 = 5.056$$

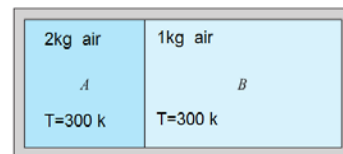
جایگذاری قانون اول ترمودینامیک $\frac{S_{gen}}{\dot{m}_5} = S_5 - 0.62 S_2 - (1 - 0.62) = -0.1669$ غیر ممکن

مثال: یک کیلوگرم هوا در فشار 100 Kpa با یک کیلوگرم هوا در فشار 200Kpa با هم ترکیب می شوند و هر دو در دمای 300 K قرار دارند. دما و فشار نهایی و آنتروپی تولیدی را در این فرایند پیدا کنید.

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1 \quad \text{پس} \quad U_2 = U_1$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sum \frac{Q}{T} + S_{gen} \rightarrow \Delta S = S_{gen} \quad \text{قانون دوم}$$

$$P_1 V_A = m_A R T_1 \quad V_A = \frac{m_A R T_1}{P_{A1}}, V_B = \frac{m_B R T_1}{P_{B1}}$$



مخزن صلب

$$\text{بقا انرژی} \quad m_2 u_2 = m_A u_{A1} + m_B u_{B1} \quad \text{پس} \quad u_2 = \frac{u_{A1} + u_{B1}}{2}, u_{A1} = u_{B1}$$

$$\text{حالت ثانویه} \quad T_1 = T_2 = 300 \text{ k}, m_2 = m_A + m_B = 2 \text{ kg}, V_2 = \frac{m_2 R T_2}{P_2} = V_A + V_B = \frac{m_A R T_1}{P_{A1}} + \frac{m_B R T_1}{P_{B2}}$$

$$\text{در نتیجه} \quad \frac{2}{P_2} = \frac{1}{P_{A1}} + \frac{1}{P_{B1}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{200} = \frac{3}{200} = 133.33 \text{ Kpa}$$

$$S_{gen} = S_2 - S_1 = -m_A R \ln \frac{P_2}{P_{A1}} - m_B R \ln \frac{P_2}{P_{B1}} =$$

$$-1 * 0.287 \left[\ln \frac{133.3}{100} + \ln \frac{133.3}{200} \right] = 0.034 \frac{\text{kg}}{\text{kg k}}$$

یادداشت

یادداشت

یادداشت