



ترمودینامیک

مدرس: مسعود رهنمون

سال تفصیلی: ۹۶-۹۵

ترمودینامیک:

در ترمودینامیک نه از روی اطلاعات مربوط به رفتار اجزای مولکولی دستگاه بهره می‌گیریم و نه در این مورد می‌توان از آن اطلاعاتی به دست آورد. اما چنان که می‌دانیم در نهایت پاسخ دینامیکی و حرکت همین مولکول هاست که به شکل تغییرات فشار یا دما آشکار می‌شود. ترمودینامیک را می‌توان به یک تابلوی نقاشی تشبیه کرد که آثار بسیار ریز قلم مو نقطه‌ها در آن اثر کلی را نمایان می‌کنند. وقتی به تابلو به عنوان یک مجموعه نگاه کنیم، این نقطه‌ها دیده نمی‌شوند. فقط در صورتی که جزء کوچکی را به دقت بررسی کنیم، می‌توانیم تک تک نقطه‌های رنگی را ببینیم، اما هستند. ترمودینامیک که علم بررسی گرما و تبدیل آن به انرژی مکانیکی است قبل از به وجود آمدن نظریه‌ی اتمی و مولکولی ماده شکل گرفت و افرادی که در این مورد تحقیق می‌کردند، شناخت مناسبی از اتم‌ها نداشتند و از مدل‌های ماکروسکوپی و کمیت‌هایی مانند کار مکانیکی، فشار، دما و نقش آن‌ها در انتقال انرژی استفاده می‌کردند. اساس ترمودینامیک را بایستگی انرژی و این حقیقت تشکیل می‌دهد که: گرما خود به خود از جسم داغ به جسم سرد جریان می‌یابد. این علم اساس ماشین‌های گرمایی چون ماشین بخار، نیروگاه‌های برق، موتور اتومبیل‌ها، یخچال‌ها و پمپ‌های گرمایی را تشکیل می‌دهد. در این علم، فرایندهای فیزیکی به وسیله‌ی گروهی از کمیت‌های مشاهده‌پذیر یا ماکروسکوپی که حتماً شامل دماست، توصیف می‌شود. مثلاً مهندسی که رفتار گازهای احتراقی در موتور یک خودرو را بررسی می‌کند، به کمک کمیت‌هایی مانند دما، فشار، حجم، گرمای ویژه و... رفتار گاز را توضیح می‌دهد، بدون آنکه درگیر جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های گاز شود.

در فرایندهایی که در آنها با مبادله‌ی گرما سروکار داریم، تحولات جسم خاصی را در نظر می‌گیریم که معمولاً گاز یا مایع است. این جسم را دستگاه و پیرامون آن را که می‌تواند با جسم تبادل انرژی داشته باشد، محیط می‌نامیم. بررسی‌های تجربی و نظری نشان می‌دهد رفتار یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را می‌توان برحسب کمیت‌هایی مانند فشار، حجم، دما، گرمای ویژه و... توضیح داد. این کمیت‌ها به جزئیات رفتار تک تک مولکول‌های تشکیل‌دهنده دستگاه وابسته نیستند و تنها به وضعیت دستگاه در مقیاس بزرگ بستگی دارند؛ مثلاً اگر دستگاه را آب درون لیوانی در نظر بگیریم که به تعادل گرمایی رسیده است، دمای آب ثابت می‌ماند، در حالی که مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن پیوسته به اطراف حرکت می‌کنند و سرعتهای تغییر می‌کنند. کمیت‌هایی که وضعیت ماده را در مقیاس بزرگ توصیف می‌کنند، کمیت‌های ماکروسکوپی نامیده می‌شوند.

قوانینی که کمیت‌های ماکروسکوپی را در فرایندهای گرمایی به هم مربوط می‌کنند، اساس علمی به نام ترمودینامیک را می‌سازند. در واقع، علم ترمودینامیک علمی است که قوانین حاکم بین کمیت‌های ماکروسکوپی یک دستگاه در پدیده‌های گرمایی را بیان می‌کند و به مطالعه‌ی مبادله‌ی انرژی و کاربرد آن در چنین دستگاه‌هایی می‌پردازد.

ترمودینامیک: علمی است که به مطالعه‌ی رابطه‌ی بین کار و گرما و تبدیل آنها به یکدیگر می‌پردازد

دستگاه: گازی است که به مطالعه‌ی آن می‌پردازیم.

محیط: به هر چیزی که با دستگاه در ارتباط باشد محیط گفته می‌شود

کمیت میکروسکوپی: کمیت‌های کوچک مقیاسی که نمی‌توان آنها را با حواس پنجگانه حس کرد و نمی‌توان آنها را با وسایل معمولی اندازه‌گیری کرد. مانند سرعت مولکول‌های یک گاز.

کمیت ماکروسکوپی: کمیت‌های بزرگ مقیاسی که بعضاً می‌توانیم آنها را با حواس پنجگانه حس کنیم و آنها را وسایل معمولی اندازه‌گیری کنیم. مانند حجم، فشار، دما و گرمای ویژه.

نکته ۱: در علم ترمودینامیک با کمیت‌های ماکروسکوپی سروکار داریم. علم ترمودینامیک قوانین حاکم بر کمیت‌های ماکروسکوپی یک دستگاه را در پدیده‌های گرمایی بیان می‌کند.

متغیر ترمودینامیکی: کمیت‌هایی که حالت یک دستگاه را توصیف می‌کنند، متغیرهای ترمودینامیکی گفته می‌شود. به کمیت‌های فشار، دما، مطلق و حجم، متغیرهای ترمودینامیکی گفته می‌شود

تعادل ترمودینامیکی: به حالتی گفته می‌شود که مشخصه‌های ترمودینامیکی یک دستگاه به طور خود به خودی تغییر نکنند.

فرایند ترمودینامیکی: فرآیندی که در آن دو یا سه متغیر ترمودینامیکی تغییر کند.
 منبع گرما: جسمی است که اگر گرما مبادله کند، دمای آن تغییر چندانی نکند.
 معادله حالت دستگاه: معادله ای که ارتباط متغیرهای ترمودینامیکی در یک دستگاه را بیان می کند. نوشتن معادله ی حالت دستگاه در حالت کلی بسیار پیچیده است.
 فرایند آرمانی: به فرآیندی گفته می شود که در آن دستگاه همواره نزدیک به حالت تعادل باشد.
 گاز کامل: گازی که به قدری رقیق شده باشد که بتوانیم از اثر ذرات آن بر یکدیگر چشم پوشی کنیم.
 نکته ۲: در یک گاز کامل انرژی درونی تابع دمای مطلق گاز است.

معادله ی حالت گاز کامل

گازها فقط اساسی در فرایندهای ترمودینامیکی دارند. در فرایندهای مختلف، فشار، حجم و یا دمای گاز تغییر می کنند. کمیت های فشار، حجم و دما بیان گر حالت یک گاز می باشند، لذا با تغییر آن ها در یک فرایند، حالت گاز هم تغییر می کند.

معادله ی حالت (رابطه ی بین حجم، فشار و دمای یک گاز کامل به صورت زیر است و به جنس گاز بستگی ندارد):

$$\frac{PV}{T} = nR$$

که در این رابطه، n تعداد مول های گاز و R یک مقدار ثابت (در SI: $\frac{J}{mol \cdot K}$) است که ثابت گازها نامیده می شود.

از کمیت های V ، P و T برای توصیف حالت دستگاه استفاده می کنیم. این کمیت های ماکروسکوپی را که حالت دستگاه با آنها توصیف می شود، متغیرهای ترمودینامیکی می نامیم.
 متغیرهای ترمودینامیکی از یکدیگر مستقل نیستند و با هم رابطه دارند. رابطه بین متغیرهای ترمودینامیکی را معادله حالت می نامیم. معادله حالت یک دستگاه می تواند پیچیده باشد؛ ولی آزمایش نشان می دهد که اگر گازها بسیار رقیق باشند، معادله حالت آنها ساده و مستقل از نوع گاز است. در این صورت، گاز را گاز کامل (آرمانی) می نامیم.

گاز کامل گازی است که بر هم کنش بین ذرات (نیروهای بین مولکول های) گاز صفر باشد. چنان چه فاصله ی بین مولکول های گاز زیاد باشد، نیز می توانیم با تقریب خوبی از این نیروها صرف نظر کنیم. پس اگر یک نمونه گاز رقیق در اختیار داشته باشیم، بر هم کنش بین مولکول های آن ناچیز خواهد بود و از رابطه ی فوق تبعیت خواهد کرد.
 یک نمونه از یک ماده « یعنی مقدار مشخصی از آن ماده: یعنی جرم مشخصی از آن ماده: یعنی تعداد مول های مشخصی از آن ماده. پس برای یک نمونه گاز کامل، مقدار n مقداری ثابت خواهد بود و در نتیجه

$$\frac{PV}{T} = (K) \quad \text{مقدار ثابت} \quad \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \text{به قولی دیگر:}$$

در روابط فوق باید دما را برحسب کلونین قرار دهید. برای تبدیل دما برحسب درجه ی سلسیوس (θ) به دما برحسب کلونین (T) از رابطه ی زیر استفاده می شود:

$$T = \theta + 273$$

مثال:



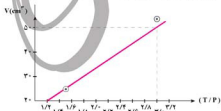
نتیجه های یک آزمایش برای تغییرات حجم برحسب نسبت $\frac{T}{P}$ دمای مطلق به فشار در نمودار زیر دیده می شود.

الف) شیب نمودار معرف چه کمیتی است؟

ب) چرا نمودار خط راست است؟

پ) با توجه به مقدارهای تجربی روی نمودار تعیین کنید آزمایش مربوط به چند مول گاز است؟

$$(R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K})$$



الف) nR

ب) بر طبق معادله ی حالت گاز کامل $PV = nRT$

$$V = nR \left(\frac{T}{P} \right)$$

رابطه ی V بر حسب T/P، معادله ی خط راست است.

$$\frac{PV}{T} = nR \quad 5 \times 10^{-9} = n \times 8 / 311 \times (3 \times 10^{-7}) \Rightarrow n = 0.002 \text{ mol}$$

فرایند ترمودینامیکی ایستوار (آرمانی):

هنگامی که دستگاه از یک حالت به حالت دیگر می رود، می گوییم فرایند ترمودینامیکی انجام شده است. اکنون فرض کنید که گاز ابتدا در حالت P_1, V_1, T_1 باشد و در اثر گرم کردن آن با ثابت نگه داشتن حجم، گاز به حالت P_2, V_1, T_2 برسد. در این فرایند ترمودینامیکی حالت دستگاه در حجم ثابت از (a) به دمای، T و فشار P_1 به b با دمای T_2 و فشار P_2 تغییر کرده است. اگر حالت های بین دو حالت های تعادلی نباشند، نمودار این فرایند ترمودینامیکی را نمی توان رسم کرد؛ زیرا در این حالت ها گاز در حال تعادل نیست و در نتیجه فشار و دمای گاز را نمی توان در این حالت ها تعیین کرد. به همین دلیل، این فرایند را با نقطه چین نمایش می دهیم (شکل الف)

اکنون فرض کنید دستگاه را در تماس با یک منبع گرما قرار می دهیم. ابتدا دمای منبع گرما را برابر با T یعنی دمای اولیه گاز، انتخاب می کنیم. در این صورت، تبادل گرما بین منبع و دستگاه رخ نمی دهد. سپس دمای منبع را کمی افزایش می دهیم. در این صورت گرمای اندکی به گاز منتقل می شود، چون این گرما بسیار کم است، تغییر کمی در حالت گاز ایجاد می شود و گاز پس از مدت کوتاهی به حالت تعادل می رسد. وضعیت دستگاه در این حالت با نقطه 'a' در شکل ب نشان داده شده است.

هرچه اختلاف دما بین دستگاه و منبع کمتر باشد، 'a' به 'b' نزدیک تر خواهد بود و رسیدن به حالت تعادل جدید سریعتر رخ خواهد داد. به عبارت دیگر می توان گفت که در فرایند تحول دستگاه از 'a' به 'b' دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. اگر گرمادی را به همین روش ادامه دهیم، و در هر نوبت دمای... منبع اندکی زیاد شود، نقاط 'a'، 'a''، 'a''، 'a''، 'a''، 'a''، 'b' به دست می آیند. هرچه دمای منبع را در هر نوبت کمتر تغییر دهیم، این نقاط به یکدیگر نزدیکتر خواهند بود و دستگاه زودتر به حالت تعادل می رسد. در حدی که گرمای داده شده به دستگاه در هر مرحله بسیار کوچک است، فرایند گرمادی را می توان مانند شکل ج به صورت یک خط نمایش داد. در طول این فرایند، دستگاه همواره بسیار نزدیک به حالت تعادل می ماند. چنین فرایندی را فرایند ایستوار (آرمانی) می نامند.



شکل ج نمودار تغییرات فشار بر حسب حجم، هنگامی که دستگاه به صورت ایستوار حجم ثابت گرمای دریا دریافت می کند و در نتیجه نمودار فرایند به صورت خط رسم می شود.



شکل ب دستگاه با دریافت مقادیر کوچک گرما تغییر حالت می دهد.



شکل الف گاز در فرایندی ترمودینامیکی از حالت 'a' به حالت 'b' رفته است.

تبادل انرژی:



زنبورهای سرخ زنبورهای عسل را شکار می کنند، اما زنبورهای عسل برای دفاع از خود روش جالبی دارند: هر گاه زنبور سرخی به کندوی عسل حمله کند، چند صد زنبور کارگر در اطراف آن جمع می شوند و یک گلوله ی متراکم را تشکیل می دهند و بعد از چند دقیقه زنبور سرخ بدون آن که مورد حمله ی مستقیم زنبورهای عسل قرار گیرد، می میرد. زیرا صدها زنبور عسل گلوله ی متراکمی را در اطراف یک زنبور سرخ حمله کننده به کندوی خود تشکیل دهند، می توانند دمای بدنشان را از دمای عادی 35°C به سرعت تا 47°C بالا ببرند، این دمای بالا برای زنبور سرخ مزاحم کشنده است، اما برای زنبورهای عسل

خطری ندارد. در واقع هر زنبور باید به طور متوسط مقداری انرژی اضافی تولید کند تا دما به مقدار 47°C برسد. دمای سطح گلوله ی حاصل از زنبورها پس از تشکیل شدن گلوله بالا می رود و زنبورهای عسل انرژی اضافی را به صورت تابش گرمایی از دست می دهند، بد نیست بدانید انرژی حاصل از بال زدن زنبور آن قدر زیاد است که می تواند خود بالها را خوب کند.

نبادل انرژی بین محیط و دستگاه از دو طریق گرما و کار صورت می گیرد:
 الف) گرما: انرژی است که به علت اختلاف دما بین دو جسم مبادله می شود.

گرما هنگامی بین محیط و دستگاه مبادله می شود که این دو با هم اختلاف دما داشته باشند، طبق قرارداد گرمایی را که دستگاه می گیرد با علامت + و گرمایی را که دستگاه از دست می دهد با علامت - نشان می دهیم.

Q: گرمای داده شده به دستگاه توسط محیط

$$Q' = -Q$$

Q': گرمای داده شده به محیط توسط دستگاه

$$Q' < 0, Q > 0$$

اگر محیط به دستگاه گرما دهد:

$$Q' > 0, Q < 0$$

اگر دستگاه به محیط گرما دهد:

هنگامی که دستگاه با محیط تبادل گرما می کند، معمولاً فرض می شود که با یک منبع گرما (جسمه ی گرمایی) در تماس است.

منبع گرما:

جسمی است که اگر گرما از دست بدهد یا بگیرد، دمای آن تغییر قابل ملاحظه ای نکند، به عنوان مثال هوای یک اتاق را می توان برای یک استکان جای داغ به عنوان منبع گرما در نظر گرفت، اگرچه دمای جای داغ تغییر زیادی می کند ولی دمای هوای اتاق، تغییر قابل ملاحظه ای نمی کند.

مثال: آیا از منبع آب و یخ می توان به عنوان منبع گرما استفاده به عمل آورد؟

حل:

تا هنگامی که تمام یخ آب نشود، با تمام آب یخ نشده باشد دمای مخلوط آب و یخ حتی در صورت تبادل گرما صفر می ماند و تغییر نمی کند پس می توان آن را به عنوان منبع گرما در نظر گرفت.

ب) کار: ممکن است در یک فرآیند ترمودینامیکی حجم گاز نیز تغییر کند و گاز متراکم یا منبسط شود، در این حالت کار صورت می گیرد. اگر گاز متراکم شود؛ یعنی محیط روی دستگاه کار انجام داده است و اگر گاز منبسط شود؛ دستگاه روی محیط کار انجام داده است، داریم:

W: کار انجام شده روی دستگاه توسط محیط

$$W' = -W$$

W': کار انجام شده روی محیط توسط دستگاه

$$W' < 0, W > 0$$

تراکم

اگر محیط روی دستگاه کار انجام دهد:

$$W' > 0, W < 0$$

اگر دستگاه روی محیط کار انجام دهد:



مثال :

در شکل زیر :

- علامت کار محیط و کار دستگاه را در هر حالت مشخص کنید.
- برای پاسخ خود دلیل بیاورید.



کار گاز انجام می دهد. کار روی گاز انجام می شود.

پاسخ: در شکل سمت چپ کار محیط مثبت است. زیرا جابه جایی پیستون در جهت نیروی وارد از طرف محیط بر پیستون است و کار دستگاه منفی است زیرا جابه جایی پیستون به سمت پایین و نیروی وارد از طرف گاز بر پیستون به سمت بالاست. در شکل سمت راست، برعکس است.



مثال :

در هر یک از آزمایش های زیر علامت کاری که پیستون (محیط روی دستگاه) انجام می دهد و کاری را که گاز (دستگاه) روی پیستون انجام می دهد، تعیین کنید.



پاسخ:

الف) مطابق شکل بالا نیرویی که پیستون بر گاز وارد می کند با بردار جا به جایی هم جهت و کار این نیرو مثبت است. اما نیرویی که گاز بر پیستون وارد می کند در خلاف جهت جابه جایی و کار آن منفی است.
ب) گاز منبسط می شود پس جابه جایی آن در خلاف جهت نیرویی است که پیستون بر آن وارد می کند. پس کار پیستون منفی است. درحالی که نیروی وارد از گاز بر پیستون یا جابه جایی پیستون هم جهت و کار آن مثبت است.

انرژی درونی و قانون اول ترمودینامیک:

تغییرات انرژی درونی دستگاه برابر است با مجموع گرمایی که دستگاه دریافت می کند و کاری که روی آن انجام می شود.

در واقع هرگاه دستگاه (گاز) در اثر کار یا گرما تحول یابد و از حالت a به حالت b برود مطابق شکل) برای مسیره های مختلف مقدار Q و W متفاوت اما همواره مجموع $Q + W$ یعنی تغییر انرژی

درونی در تمام مسیره ها یکسان است.



$$\Delta U = Q + W$$

این رابطه که بیان می دارد انتقال انرژی بین دستگاه و محیط از طریق تبادل کار و گرما صورت می گیرد، قانون اول ترمودینامیک نامیده می شود. در این رابطه، Q می تواند مثبت (دستگاه گرما بگیرد) یا منفی (دستگاه گرما از دست بدهد) باشد. W نیز می تواند مثبت (محیط روی دستگاه کار انجام دهد) یا منفی (دستگاه روی محیط کار انجام دهد) باشد بنابراین، هنگامی که دستگاه با محیط تبادل کار و گرما دارد، ممکن است انرژی درونی آن افزایش ($\Delta U > 0$)، یا کاهش ($\Delta U < 0$) یابد یا اینکه تغییر نکند ($\Delta U = 0$) گرما و کاری که بین دستگاه و محیط مبادله می شود فقط در طی فرایند معنا دارد؛ یعنی نمی توانیم پس از انجام هر فرایند از کار یا گرمای موجود در دستگاه صحبت کنیم.

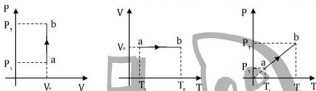
تغییر انرژی درونی مقدار معینی گاز کامل فقط به اختلاف دمای مطلق گاز بستگی دارد و به نوع فرآیندها در مسیر بستگی ندارد. قانون اول ترمودینامیک بیانی از قانون پایستگی انرژی است.

فرایندهای خاص:

الف) فرایند هم حجم:

حجم گاز طی این فرایند ثابت نگه داشته می شود و بنابراین، کار صفر است. در این فرایند گاز با محیط فقط تبادل گرما می کند. به این منظور گاز را در تماس با منبع گرمایی یا دمای قابل تنظیم قرار می دهیم طوری که دمای اولیه منبع و گاز با هم برابر باشد. دمای منبع را به آرامی و به تدریج تغییر می دهیم تا گاز با گذر از حالت های تعادلی، طی یک فرایند ایستوار به حالت نهایی مورد نظر برسد.

برای فرایند هم حجم می توانیم سه نمودار فشار بر حسب دما (P-T) و حجم بر حسب دما (V-T) و فشار بر حسب حجم (P-V) را به صورت زیر رسم کنیم. (نمودارهای مقابل مربوط به افزایش فشار است).



شیب نمودار P-T در فرایند هم حجم بیانگر $\frac{dP}{dT}$ است. پس با افزایش حجم، شیب کم و با کاهش حجم شیب افزایش می یابد. $(\tan \alpha = \frac{nR}{V})$

حاله محاسبه گرمایی می پردازیم که در فرایند هم حجم با دستگاه مبادله می شود. در فرایند هم حجم $Q = mc_V \Delta T$

ظرفیت گرمایی ویژه گاز در حجم ثابت (به جنس گاز بستگی دارد) $\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}$ یا $\frac{J}{Kg \cdot K}$

ظرفیت گرمایی ویژه گاز در حجم ثابت: مقدار گرمایی که باید به 1 Kg گاز در حجم ثابت داده شود تا دمای آن 1 K افزایش یابد.

$$Q = mc_V \Delta T \quad \left. \begin{aligned} Q &= nMC_V \Delta T \\ m &= nM \end{aligned} \right\}$$

$$Q = nC_V \Delta T$$

ظرفیت گرمایی مولی گاز در حجم ثابت $\frac{J}{mole \cdot K}$ یا $\frac{J}{mole \cdot ^\circ C}$

ظرفیت گرمایی مولی گاز در حجم ثابت: مقدار گرمایی که باید به 1 مول گاز در حجم ثابت داده شود تا دمای آن 1 K افزایش یابد.

$$\left. \begin{aligned} C_V &= \frac{5}{2}R = 12.5 \frac{J}{mol \cdot K} && \dots \text{ برای گازهای تک اتمی، He, Ar, Ne} \\ C_V &= \frac{5}{2}R = 12.5 \frac{J}{mol \cdot K} && \dots \text{ برای گازهای دو اتمی، O}_2, \text{H}_2, \text{N}_2 \text{ و هوا} \\ C_V &= \frac{7}{2}R = 28.7 \frac{J}{mol \cdot K} && \dots \text{ برای گازهای سه اتمی، CO}_2 \end{aligned} \right\} C_{MV}$$

شیب نمودار P-T در فرایند هم حجم با حجم گاز نسبت وارون دارد.

پس در نمودار P-T - یا $V_1 < V_2 < V_3$ است.

هنگام گرما گرفتن از گاز جهت فلش ها وارون می شود.



مثال:



چقدر گرما به ۲ مول گاز کامل تک اتمی داده شود تا در حجم ثابت دمای آن از ۲۰ درجه ی سلسیوس به ۱۲۰ درجه برسد؟

پاسخ

$$Q = n c_v \Delta T \Rightarrow Q = 2 \times \frac{5}{2} \times 8 \times 100 = 4000 \text{ J}$$

مثال:



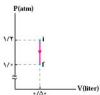
با در اختیار داشتن یک سرنگ که انتهای آن مسدود است، منبع گرمای قابل تنظیم چراغ گاز و یک ظرف آب چگونه می توان در گاز درون سرنگ، فرآیند افزایش دمای هم حجم به وجود آورد.

پاسخ: دسته ی سرنگ یا پیستون را ثابت می کنیم دور دهانه ی پیستون را چسب می زنییم تا حرکت نکند و حجم گاز درون دستگاه ثابت باقی بماند. بدنه ی سرنگ را به منبع گرما تماس می دهیم و آرام آرام دمای منبع را افزایش می دهیم.

مثال:



شکل روبه رو نمودار یک فرآیند هم حجم آرمانی را نشان می دهد هرگاه گاز کامل و تک اتمی باشد گرمای مبادله شده چه مقدار است؟ گاز گرما از دست داده یا دریافت کرده است؟



$$Q = n c_v \Delta T = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T = \frac{3}{2} (n R T_2 - n R T_1) = \frac{3}{2} (P_2 V_f - P_1 V_f) \\ = \frac{3}{2} [(2.0 \times 10^5 \text{ Pa})(0.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3) - (1.0 \times 10^5 \text{ Pa})(0.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3)] = 15 \text{ J}$$

گرمای مبادله شده ۱۵J است. چون مقدار Q منفی شده است، بنابراین گاز گرما از دست داده است.

مثال:

دمای n مول گاز با ظرفیت گرمایی مولی C_v در یک فرآیند هم حجم از T_1 به T_2 رسیده است.

الف) تغییر انرژی درونی گاز در این فرآیند را بیابید.

ب) اگر این گاز، گاز کامل و تک اتمی باشد، تغییر انرژی درونی آن به چه صورتی نوشته می شود؟

الف) از قانون اول ترمو دینامیک و گرمای مبادله شده در فرآیند هم حجم استفاده می کنیم:

$$\Delta U = Q + W = Q = n C_v \Delta T \quad \text{یا توجه به اینکه در فرآیند هم حجم } W = 0 \text{ است، داریم:}$$

بنابراین، تغییر انرژی درونی گاز برابر است با:

$$\Delta U = n C_v (T_2 - T_1)$$

ب) برای گاز های تک اتمی ، ظرفیت گرمایی مولی

در حجم ثابت با تقریب خوبی برابر $\frac{3}{2} R$ است. بنابراین، ΔU را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta U = n \left(\frac{3}{2} R \right) \Delta T$$

مثال:



از هوای درون یک اتاق به حجم 4.0 m^3 در شرایط متعارفی 1.0°C گرما دریافت می شود فشار نهایی هوا

چقدر می شود؟ (هوا را گاز دو اتمی فرض کنید.)

$$Q = n C_{mv} \Delta T = n \times \frac{5}{2} R \Delta T = \frac{5}{2} n R \Delta T = \frac{5}{2} \Delta P \Delta V$$

$$\Rightarrow -1.0^\circ \text{C} = \frac{5}{2} \times 4 (P_2 - P_1) \Rightarrow -1.0^\circ = 10 (P_2 - 1.0^\circ) \Rightarrow P_2 - 1.0^\circ = -0.10000 \Rightarrow P_2 = 0.90000 \text{ Pa} = 0.9 \text{ atm}$$

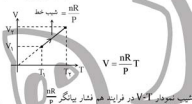
۲- انبساط هم فشار:

در این فرآیند فشار دستگاه ثابت می‌ماند، بنابراین V و T تغییر می‌کنند.

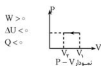
$$\begin{cases} P_i = P_f \\ V_i \neq V_f \\ T_i \neq T_f \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_i = P_f \\ V_i \neq V_f \\ T_i \neq T_f \end{cases}$$

$$\frac{PV}{T} = \text{cte} \Rightarrow \begin{cases} \text{انبساط} & V \uparrow \Rightarrow T \uparrow \\ \text{تراکم} & V \downarrow \Rightarrow T \downarrow \end{cases}$$

نمودارهای فرایند هم فشار (در حالت انبساط)



نمودارهای فرایند هم فشار (در حالت تراکم)



$$\begin{aligned} W &> 0 \\ \Delta U &< 0 \\ Q &< 0 \end{aligned}$$

شیب نمودار $V-T$ در فرایند هم‌فشار با فشار گاز نسبت وارون دارد و در نمودار $V-T$ $P_f < P_i < P_f$ است. اگر گاز منبسط شود سوی فشارها وارون می‌شود.

روش ایجاد فرایند هم فشار:

دمای منبع را از T_1 به T_2 زیاد می‌کنیم در این صورت منبع به دستگاه گرمای Q می‌دهد. دمای دستگاه با گرفتن گرمای Q زیاد می‌شود ($T \uparrow$) با افزایش دما جنب و جوش مولکول‌های گاز زیاد می‌شود و مولکول‌ها ضربات محکومتری به پیستون وارد می‌کنند پس فشار داخلی از فشار بیرونی بیشتر می‌شود ($P \uparrow$) پس پیستون به سمت راست حرکت می‌کند یعنی حجم گاز زیاد می‌شود ($V \uparrow$). با افزایش حجم تعداد مولکول‌های کمتری به پیستون ضربه وارد می‌کنند پس فشار وارد بر پیستون کم می‌شود تا به مقدار اولیه‌اش برسد، پیستون تا آن جایی حرکت می‌کند که فشار داخل با فشار بیرون برابر شود. برای این که بتوانیم نمودار واقعی را با خط نمودار قبلی تقریب بزنیم باید عمل دادن گرما به دستگاه را به آرامی انجام دهیم.



محاسبه کار در فرایند هم فشار:

چون در این حالت پیستون جابه‌جا می‌شود پس کار انجام می‌گیرد، برای محاسبه‌ی کار داریم: (به شکل صفحه بعد توجه شود)

$$|W| = |F \cdot \Delta x| = |P \cdot A \Delta x| = |P \Delta V| \rightarrow W = -P \Delta V$$

علامت منفی در فرمول برای تطبیق علامت ΔV و W در حالت‌های تراکم و انبساط است.



Δx جابه‌جایی پیستون

$$\left. \begin{aligned} \Delta V > 0 \\ W < 0 \end{aligned} \right\} \text{انبساط} \quad \left. \begin{aligned} \Delta V < 0 \\ W > 0 \end{aligned} \right\} \text{تراکم}$$

بنا به رابطه فوق اگر گاز منبسط شود ($\Delta V < 0$) کار محیط روی دستگاه (W) منفی و اگر گاز متراکم شود ($\Delta V > 0$) کار محیط روی دستگاه (W) مثبت است.

محاسبه Q در فرایند هم فشار:

در فرآیند هم فشار داریم: $Q = mC_p \Delta T$ که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار ثابت نامیده می‌شود.

ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار ثابت $\frac{J}{kg \cdot K}$: مقدار گرمایی که باید به یک کیلوگرم گاز بدهیم تا در فشار ثابت دمای آن 1K

افزایش یابد.

- واضح است که برای هر گاز دلخواه داریم: $C_p > C_v$

چرا که در فرآیند هم فشار مقداری از گرمای داده شده به دستگاه صرف حرکت دادن پیستون می‌شود پس برای افزایش دما به اندازه 1 K باید گرمای بیشتری نسبت به حالت هم حجم داده شود چون در حالت هم حجم تمام گرمای داده شده صرف بالا بردن دما می‌شود.

$$\left. \begin{aligned} Q &= mC_p \Delta T \\ m &= nM \end{aligned} \right\} \Rightarrow Q = nMC_p \Delta T \Rightarrow Q = nC_{MP} \Delta T \quad Q = nC_p \Delta T$$

C_p ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت نام دارد.

ظرفیت گرمایی مولی گاز در فشار ثابت $\frac{J}{mole \cdot K}$: مقدار گرمایی که باید به یک مول گاز بدهیم تا در فشار ثابت دمای آن 1 K

افزایش یابد.

$$C_{MP} > C_{MV}$$

واضح است که برای هر گاز داریم:

$$C_p \cong \frac{5}{2} R = 20.8 \frac{J}{mol \cdot K}$$

برای گازهای تک اتمی:

$$C_p \cong \frac{7}{2} R = 29.1 \frac{J}{mol \cdot K}$$

برای گازهای دو اتمی:

$$C_p \cong \frac{9}{2} R = 37.4 \frac{J}{mol \cdot K}$$

برای گازهای سه اتمی:

مثال:



یک فرایند هم فشار را شرح دهید. سیلندر متحرک بر از هوای محبوس را مطابق شکل در یک طرف پر از آب قرار می‌دهیم. با گرم شدن تدریجی آب پیستون به آرامی به بالا حرکت می‌کند پس از رسیدن به تعادل یک فرایند هم فشار خواهیم داشت

مثال:



در نمودار مقابل کاری را که گاز انجام می‌دهد را به دست آورید؟



$$W = -P \Delta V = -P(V_B - V_A) = -AP \quad PV = nRT \Rightarrow P \times A = 0.1 \times A \times 5000 \Rightarrow P = 50 \text{ Pa}$$

$$W = -AP = -0.1 \times 50 = -5 \text{ J}$$

کار انجام شده توسط گاز $W = 5 \text{ J}$

مثال:



نمودار V-T را برای فرایند هم فشار آرمانی یک گاز کامل رسم کنید.

پاسخ: چون گاز، کامل است با استفاده از معادله حالت گاز کامل داریم:

$$V = \left(\frac{nR}{P} \right) T$$

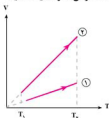
چون $\frac{nR}{P}$ ثابت است رابطه بالا معادله یک خط راست است که امتداد آن از

مبدأ مختصات می‌گذرد. نمودار این رابطه در شکل روبه رو نشان داده شده است.





پرسش: نمودار $P-T$ برای دو فرایند انبساط هم فشار مطابق شکل داده شده است. فشار آن‌ها را مقایسه کنید.



پاسخ: فشار در فرایند ۱ که شیب نمودار T - P آن کمتر است، بیشتر از فرایند ۲ است

برای محاسبه ی گرمایی که در فرایندهای هم فشار مبادله می شود باز هم به سراغ رابطه ی $Q = m C \Delta T$ می رویم اما باید توجه داشته باشیم که گرمای مبادله شده در دستگاه به نوع فرایند بستگی دارد. پس در رابطه ی اخیر گرمای ویژه در فشار ثابت را جایگزین می کنیم

مثال:



ته یک سرنگ را می بندیم. آن را درون مقداری آب می اندازیم و آب را به تدریج گرم می کنیم. هوای درون سرنگ چه فرایندی را طی می کند؟

علت اختلاف دمای بین منبع و هوای درون سرنگ، گرمای کمی به هوای محبوس منتقل می شود و هوا اندکی منبسط می شود و پیستون سرنگ را اندکی به بالا می راند. اگر گرما دادن را به همین روش تدریجی ادامه دهیم، پیستون سرنگ بسیار آهسته به بیرون حرکت می کند در این وضعیت، شتاب حرکت پیستون، بسیار کوچک و نزدیک به صفر است و بنابراین می توان گفت که در طی گرما دادن همواره فشار هوای داخل سرنگ ثابت می ماند. بنابراین، آنچه رخ می دهد نمونه ای از فرایند انبساط هم فشار است.

مثال:



مقداری گاز کامل تک اتمی در یک انبساط هم فشار، ۰.۰۱ کالری انجام می دهد. الف) گرمایی که گاز در این فرایند مبادله کرده چقدر است؟ ب) تغییر انرژی درونی گاز را محاسبه کنید.

$$Q = n C_p \Delta T = n \left(\frac{5}{2} R \right) \Delta T$$

الف:

که در آن از ظرفیت گرمایی مولی در فشار ثابت گازهای کامل تک اتمی استفاده کرده ایم. در رابطه بالا $T \Delta n$ مجهول است و آن را باید به طریقی محاسبه کنیم. به این منظور از رابطه کار در فرایند هم فشار استفاده می کنیم:

$$W = -P \Delta V = -P(V_2 - V_1) = -(P V_2 - P V_1) = -(n R T_2 - n R T_1) = -n R \Delta T$$

که در آن از قانون گازهای کامل ($PV = nRT$) استفاده کرده ایم. از صورت مسئله می دانیم که گاز منبسط شده و $n R \Delta T = 100 \text{ J}$ [۱۰۰ کالری انجام داده است. بنابراین $W = -100 \text{ J}$ است و در نتیجه داریم:

$$Q = \left(\frac{5}{2} \right) (n R \Delta T) = \left(\frac{5}{2} \right) (100) = 250 \text{ J}$$

با قراردادن این مقدار در رابطه Q خواهیم داشت:

گرمای مبادله شده $|Q| = 250 \text{ J}$ است. علامت مثبت Q نشان می دهد که این گرمایی است که گاز (دستگاه) گرفته است .

ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$\Delta U = Q + W$$

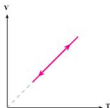
که در آن Q گرمایی است که دستگاه گرفته و W کاری است که روی دستگاه انجام شده است. بنابراین:

$$\Delta U = 250 \text{ J} + (-100 \text{ J}) = 150 \text{ J}$$



مثال:

برای فرایند انبساط یا تراکم هم فشار نمودار $T-V$ رسم کنید و تعیین کنید شیب نمودار معرف کدام کمیت است؟ پاسخ:



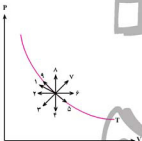
$$\left. \begin{aligned} \frac{PV}{T} &= nR \\ P &= \text{cte} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{V}{T} = \frac{nR}{P} \Rightarrow V = \frac{nR}{P} T \Rightarrow$$

یعنی شیب نمودار $T-V$ متناسب با عکس فشار گاز است. به عبارت دیگر هر چه فشار گاز بیشتر باشد، شیب نمودار کمتر است.

نسبت این نمودار برابر با $\frac{nR}{P}$ است یعنی هر چه فشار گاز بیشتر باشد شیب نمودار کمتر است.



مثال:

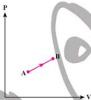


پرست: شکل مقابل حالت اولیه ی گازی کامل و منحنی هم دمای عبوری از آن حالت را نشان می دهد. الف) کدام یک از مسیرهای نشان داده شده به کاهش دمای گازی منجراند؟
ب) در کدام مسیرها تغییر دما صفر است؟
پاسخ: الف) مسیرهای ۳، ۲، ۱ و ۴ ب) ۵ و ۹



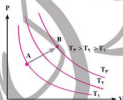
مثال:

شکل مقابل نمودار فشار دمای فرایندی نامشخص است. دمای گاز را در حالت A و B به صورت کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.

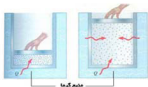


مثال:

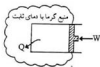
می توانیم از طرح واژه ی نمودارهای هم دما استفاده کنیم و نتیجه بگیریم که دمای گاز در حالت B از A بیشتر است.



۳- فرایند هم دما:



در طی این تحول، دمای دستگاه تغییر نمی‌کند. این فرایند در مجاورت یک منبع گرما (منبع گرما جسمی است که اگر گرما از آن گرفته شود یا به آن داده شود، دمای آن تغییر محسوسی نداشته باشد، مانند مخلوط آب و یخ در حال تعادل) رخ می‌دهد. در فرایند هم دما کار انجام می‌شود و گرما نیز مبادله می‌شود. در انبساط هم دما، دستگاه گرما گرما از دست می‌دهد.

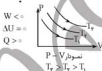


برای این‌که فرایند به صورت هم دما انجام شود، باید متعلق شکل دستگاه را در کنار یک منبع با دمای ثابت قرار داد. اگر اندک اندک روی سیستم کار انجام دهیم و گاز را کمی فشرده کنیم، گاز متراکم می‌شود و اندکی دمای آن بالا می‌رود. ولی بلافاصله گاز با منبع اطراف خود تبادل گرما می‌کند و دمای دوباره با دمای منبع یکی می‌شود. پس اگر دامن (یا گرفتن) گاز به سیستم بسیار آرام و تدریجی باشد، گاز با دمای تقریباً ثابت متراکم (و یا منبسط) می‌شود.

در این حالت دستگاه به منبع گرمای Q' می‌دهد و دمای خودش کاهش می‌یابد تا به T برسد؛ در این صورت دما ثابت می‌ماند و داریم:

$$W = Q' \Rightarrow W = -Q$$

همان‌طور که مشاهده کردیم در حین فرایند هم دما، دمای دستگاه افزایش و کاهش دارد و در همین تغییرات جزئی است که گرما بین دستگاه و محیط مبادله می‌شود و برای این‌که بتوان فرایند را هم دما در نظر گرفت باید این تغییرات دما بسیار جزئی باشد به همین خاطر باید حرکت دادن بیستون به آرامی صورت گیرد، نمودار واقعی به شکل زیر است:



نمودارهای فرایند هم دما (انبساط) را می‌توانیم به صورت زیر رسم کنیم

توجه بفرمایید که چون $P \propto \frac{1}{V}$ ، نمودار P-V یک منحنی هموگرافیک است.

مثال: در شکل مقابل، نمودار P-V مربوط به انبساط هم دمای یک گاز کامل در دماهای مختلف رسم شده است. نشان دهید: $T_2 > T_3 > T_1$.



$$PV = nRT \Rightarrow P = \left(\frac{nR}{V}\right)T$$

حال خطی عمودی بر محور حجم رسم کنید به گونه‌ای که هر چهار نمودار را قطع کند. از رابطه بالا درمی‌یابیم که به‌ازای این مقدار ثابت، فشار کمتر مربوط به دمای کمتر است

بنابراین، منحنی T_1 که محور فشار را در جای پایین‌تری قطع کرده است، کمترین دما را دارد و منحنی T_3 که محور فشار در جای بالاتری قطع کرده است، بیشترین دما را دارد و بدین ترتیب $T_4 > T_3 > T_2 > T_1$ است؛ البته می‌توانستیم مسئله را به‌ازای یک فشار معین نیز بررسی کنیم. در آن صورت، معادله حالت گاز کامل را

$$V = \left(\frac{nR}{P}\right)T$$

به صورت زیر می‌نویسیم:

حال اگر خطی افقی بر محور فشار رسم کنیم، به گونه ای که هر چهار نمودار را قطع کند، از رابطه بالا درمی یابیم که کمترین حجم مربوط به کمترین دما و بیشترین حجم مربوط به بیشترین دما است. بنابراین داریم:

$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1$$

از این تمرین درمی یابیم که نمودارهای هم دما برای ما حکم یک دماسنج را دارند و با مشاهده آنها در مقایسه با یکدیگر می توان درباره دما اظهار نظر کرد.



مثال: مقداری گاز داخل ظرفی قرار دارد یک بار دستگاه به منبع گرمایی با دمای T_1 وصل کرده و فرایند هم دمای تراکمی انجام می دهیم و بار دیگر دستگاه را به منبع گرمایی با دمای $T_2 > T_1$ وصل می کنیم و فرایند هم دمای تراکمی انجام می دهیم. نمودارهای این دو حالت را در دستگاه مختصات $P-V$ رسم کرده و با هم مقایسه کنید.
حل: واضح است که در هر دو حالت نمودار هموگرافیک داریم که در حالت T_2 نمودار بالاتر



از حالت T_1 قرار می گیرد و شکل روبه رو را خواهیم داشت:

علت این که نمودار T_2 بالای T_1 قرار می گیرد در روابط زیر مشخص است:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_1 V_1}{T_1} &= nR \\ \frac{P_2 V_2}{T_2} &= nR \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \xrightarrow{T_2 > T_1} P_2 > P_1$$

پس نمودار مربوط به T_2 باید بالای T_1 قرار گیرد.



سرنگ ته بسته ی حاوی مقداری هوا را در عمق یعنی از طرف آبی قرار دهید و مقدار آب طرف را آرام آرام زیاد کنید (باید آب اضافه شده با آب اولیه هم دما باشد). به پیستون و سرنگ بادقت توجه کنید و به پرسش های زیر پاسخ دهید:

- آیا پیستون جا به جا می شود؟ ۲- آیا کار انجام می شود؟ ۳- تغییرات هر یک از کمیت های P و V چگونه است؟
- تغییر دمای گاز درون سرنگ به چه صورت است؟ ۵- آیا گرما مبادله می شود

پاسخ ۱: پیستون به طرف داخل حرکت می کند و گاز متراکم می شود.

۲- کار انجام می شود. ($W < 0$)

- چون ارتفاع آب زیاد شده است فشار افزایش می یابد و چون گاز متراکم شده است حجم آن کاهش می یابد.
- وقتی پیستون جلو برود و حجم گاز کم شود با افزایش فشار دما قدری افزایش می یابد و به دلیل اختلاف دما بین گاز و آب، گرما به آب داده می شود. اما چون مقدار گاز در مقایسه با آب ناچیز است این گرما تغییر قابل ملاحظه ای در دمای آب نمی دهد پس دمای گاز ثابت می ماند
- گاز گرما از دست می دهد.



یک فرایند هم دما را شرح دهید؟

در ظرفی مقدار یخ می ریزیم و کمی آب به آن اضافه می کنیم. حال دهانه یک سرنگ را بسته و درون مخلوط آب و یخ قرار می دهیم. سپس به آرامی پیستون را به جلو حرکت می دهیم. تا یک فرایند هم دمای تراکم داشته باشیم



مثال:



الف) آزمایشی طراحی کنید که در آن دستگاه مورد نظر مقداری گاز باشد و فرایند اتساع هم دما رخ دهد.
 ب) علامت های Q و W را در این فرایند تعیین کنید.

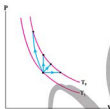


پاسخ:

الف) از تعادل به آرامی پیستون را بیرون می کشیم. و یا دستگاهی مطابق شکل روبه رو تدارک می بینیم: استوانه ای که پیستون آن آزادانه حرکت می کند را طوری قرار می دهیم که پیستون بتواند عمودی جابه جا شود. کیسه ای پر از شن را روی پیستون و استوانه را در تماس با منبع گرمایی با دمای ثابت قرار می دهیم. کیسه را سوراخ می کنیم تا شن آن به آرامی خارج شود. با کاهش فشار روی پیستون، پیستون به سمت بالا حرکت می کند. گاز منبسط و دچار افت دما می شود که با سرنگ سربسته را در مقداری آب و یخ قرار می دهیم پس گرفتن گرما از منبع دوباره به دمای اولیه می رسد.

ب) چون گاز منبسط شده است پس دستگاه روی محیط: کار انجام می دهد و $W < 0$ است. از طرفی پراثر اتساع گاز دمای آن کاهش می یابد که با گرفتن گرما از محیط دوباره دمای آن به مقدار اولیه می رسد. پس چون دستگاه از محیط گرما می گیرد $Q > 0$ است.

مثال:



در شکل روبه رو گاز کاملی را از طریق چند فرایند مختلف از جمله یک فرایند هم حجم و یک فرایند هم فشار از دمای T_1 به دمای T_2 رسانده ایم.
 الف) نشان دهید تغییر انرژی درونی در تمام فرایندها از رابطه $\Delta U = nC_V \Delta T$ به دست می آید.

ب) با استفاده از فرایندهای هم حجم و هم فشار نشان دهید $C_p - C_v = R$

فرایند هم حجمی را در نظر بگیرید. با توجه به اینکه در این فرایند $W = 0$ است. از قانون اول ترمودینامیک خواهیم داشت: $\Delta U = nC_V \Delta T$

اما از طرفی دیدیم که انرژی درونی مستقل از مسیر است و برای کلیه فرایندهایی که حالت اولیه و نهایی یکسانی دارند، برابر است. به عبارت دیگر، تغییر در انرژی داخلی یک گاز فقط به تغییر دمای گاز بستگی دارد و نه به نوع فرایندی که موجب تغییر دما شده است. بنابراین، این رابطه برای هر فرایندی نیز برقرار است.

ب) اکنون قانون اول ترمودینامیک را برای فرایندی هم فشار بررسی می کنیم:

$$U = Q + W$$

برای فرایند هم فشار، W را می توانیم به صورت $W = P \Delta V$ در نظر بگیریم که با توجه به قانون

گازهای کامل ($PV = nRT$) به صورت $W = -nR \Delta T$ درمی آید. در نتیجه:

$$\Delta U = nC_V \Delta T - P \Delta V = nC_V \Delta T - nR \Delta T$$

از طرفی، در قسمت الف) نشان دادیم که $\Delta U = nC_V \Delta T$ برای هر فرایندی برقرار است. بنابراین داریم:

$$nC_V \Delta T = nC_V \Delta T - nR \Delta T$$

و در نتیجه:

$$C_p - C_v = R$$

۴- فرایندی بی دررو:

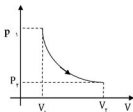
فرایندی است که در آن سیستم با محیط تبادل گرما نمی کند.

این فرایند هنگامی رخ می دهد که دستگاه به خوبی عایق بندی شده باشد. به طوری که مبادله ی گرما انجام نشود. حالت دیگر این است که تراکم یا انبساط به قدری سریع انجام شود که دستگاه زمان کافی برای تبادل گرما با محیط نداشته باشد.

$$\text{در فرایندی بی دررو} \begin{cases} \text{به شدت زیاد می شود } P \uparrow \uparrow \Leftrightarrow \text{ انقباض } T_f > T_i \Leftrightarrow W > 0 \\ \text{به شدت کم می شود } P \downarrow \downarrow \Leftrightarrow \text{ انبساط } T_f < T_i \Leftrightarrow W < 0 \end{cases}$$

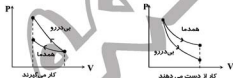
در فرایندی بی دررو $Q = 0$ است. بنابراین، قانون اول ترمودینامیک برای این فرایند به صورت زیر درمی آید:

$$\Delta U = Q + W = 0 + W \quad \text{یا} \quad W_{\text{درو}} = \Delta U$$



نمودار فشار - حجم در انبساط بی دررو مانند شکل مقابل است

نکته: به دو شکل زیر توجه کنید:



به دلیل اینکه در فرایندی بی دررو هیچ گرمایی با محیط مبادله نمی شود لذا تمام کار داده شده یا گرفته شده صرف افزایش یا کاهش انرژی درونی سیستم می شود و از این روست که تغییرات فشار در فرایندی بی دررو نسبت به فرایند هم دما در حجم مشابه بیشتر است و دیده می شود که شیب بی دررو بیشتر از شیب هم دماست.

فرایندی بی دررو را می توان به ۲ طریق انجام داد:

الف) تراکم: فشار محیط را افزایش می دهیم. با این کار بیستون به سمت داخل حرکت می کند. پس: $\left. \begin{matrix} V \downarrow \\ P \uparrow \end{matrix} \right\}$ از طرفی چون در این

عمل محیط کار انجام داده است: انرژی دستگاه زیاد می شود، پس دمای دستگاه نیز زیاد می شود: $T \uparrow$

ب) انبساط: فشار محیط را کاهش می دهیم با این کار بیستون به سمت خارج حرکت می کند. پس: $\left. \begin{matrix} V \uparrow \\ P \downarrow \end{matrix} \right\}$ در این عمل گاز کار انجام

داده است پس انرژی آن کم می شود پس دمای آن نیز کم می شود: $T \downarrow$

نکته ی ۳. در فرایندی بی دررو چون P, V و T هر سه تغییر می کنند، نمی توان نمودارهای دقیق در دستگاه های مختصات $P-V$.

$P-T$ و $V-T$ رسم کرد. به همین خاطر در این حالت از نمودارهای مقایسه ای مخصوصاً با نمودار هم دما استفاده می شود.

مثال:



گاهی اوقات وقتی یک نوشابه خیلی سرد را از یخچال بیرون می آوریم و در آن را بلافاصله باز می کنیم، مشاهده می شود که مه رقیقی در اطراف دهانه نوشابه ایجاد می شود. این پدیده را توجیه کنید.

وقتی در نوشابه باز می شود، گاز محبوس در بالای آن انبساط می یابد. این انبساط چنان سریع صورت می گیرد که آن را می توان تقریباً بی دررو پنداشت. بنابراین، تنها انتقال انرژی ممکن برای انبساط گاز، ناشی از انرژی گرمایی خود گاز است. بنابراین، گاز انرژی گرمایی از دست می دهد و سردتر می شود که این باعث می شود بخار آب موجود در گاز در حال انبساط به صورت قطرات آب درآید. این قطرات موجود در هوا، حالت رقیقی را تشکیل می دهند که در اطراف دهانه بطری دیده می شود. توجه کنید اگر دمای مایع در نزدیک نقطه انجماد باشد، یخ زدن نوشابه نیز ممکن است. چرا که وقتی در بطری باز می شود، فشار داخل آن ناگهان تا فشار جو کاهش می یابد و با بالا رفتن نقطه انجماد، مایع که دمای آن اکنون زیر آن نقطه فرار دارد، شمایل پیدا می کند که یخ بزند.

مثال:



مقداری گاز در فشار P_1 و حجم V_1 داخل محفظه‌ای محبوس است. حجم گاز را یک بار از روش فرایند هم دما و بار دیگر به روش بی دررو تا حجم V_2 کاهش می دهیم. نمودار این فرایند را با هم مقایسه کنید:



پس نمودار فرآیند بی‌دررو بالای نمودار فرآیند هم دما قرار می‌گیرد و داریم:
(چون سطح زیر نمودار P-V فرآیند بی‌دررو بیشتر است.)

$$W_{\text{هم دما}} > W_{\text{بی‌دررو}}$$

مثال:



مثال قبلی را در حالت تراکم محاسبه کنید؟

حل:

هم دما $\Rightarrow W < 0$ انرژی دستگاه کم می‌شود \Leftarrow دستگاه از منبع گرما می‌گیرد. \Leftarrow دمای دستگاه در T اولیه باقی می‌ماند.

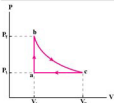
انبساط

بی‌دررو $\Rightarrow W < 0$ انرژی دستگاه کم می‌شود \Leftarrow دمای دستگاه کاهش می‌یابد.

$$\left(\frac{P_{\text{هم دما}}}{T_{\text{هم دما}}} \right) = \left(\frac{P_{\text{بی‌دررو}}}{T_{\text{بی‌دررو}}} \right) = nR \quad \frac{P_{\text{هم دما}}}{T_{\text{هم دما}}} < \frac{P_{\text{بی‌دررو}}}{T_{\text{بی‌دررو}}} \rightarrow P < P$$

هم دما \Rightarrow $T < T$ \Rightarrow $\frac{P}{T} < \frac{P}{T}$ \Rightarrow $\frac{P}{T} < \frac{P}{T}$

پس نمودار فرآیند بی‌دررو در این حالت پایین نمودار هم دما قرار می‌گیرد و داریم:
 $|W| < |W|$ چون سطح زیر نمودار فرآیند بی‌دررو از سطح نمودار فرآیند هم‌دما کوچک‌تر است.



چرخه ترمودینامیکی. حلقه بسته ای را در صفحه P-V تشکیل می دهد.

چرخه ترمودینامیکی دستگاهی می تواند فرایندی را طی کند که از مجموع چند فرایند تشکیل شده باشد. برای مثال، فرایندی را که در شکل زیر می بینید، از سه فرایند هم حجم، بی دررو و هم فشار تشکیل شده است. طی این فرایند، دستگاه نخست از طریق یک فرایند هم حجم از حالت a با حجم V_1 و فشار P_1 به حالت b با حجم V_1 و فشار P_2 می رود. سپس از طریق یک اتبساط بی دررو به حالت c با حجم V_2 و فشار P_1 می رسد. در ادامه، دستگاه با فرایندی هم فشار به حالت اولیه a باز می گردد. مجموعه این فرایندها یک چرخه ترمودینامیکی را تشکیل می دهد. در چرخه ترمودینامیکی دستگاه پس از طی چند فرایند به حالت اولیه خود برمی گردد؛ چون در چرخه ترمودینامیکی حالت نهایی با حالت ابتدایی یکسان است تغییر انرژی درونی برابر صفر است $\Delta U = 0$. بنابراین از قانون اول ترمودینامیک برای چرخه های ترمودینامیکی داریم: $Q = -W$

کار انجام شده در چرخه برابر با مساحت داخل چرخه در صفحه P-V است و می توان نشان داد در چرخه های ساعتگرد در صفحه P-V کار انجام شده بر روی دستگاه، منفی و در چرخه های پاد ساعتگرد، مثبت است.

مثال:



چرخه شکل مقابل را در نظر گرفته و نشان دهید قدر مطلق کار انجام شده روی دستگاه در طول چرخه برابر مساحت داخل چرخه است؟

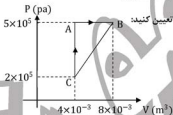
حل:



$$\begin{aligned} \text{چرخه } W &= W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} \\ &= -P_1(V_2 - V_1) + (-P_2(V_2 - V_1)) \\ &= (V_2 - V_1)(P_1 - P_2) \\ &= -(V_2 - V_1)(P_2 - P_1) = -S \end{aligned}$$

$$|W| = S$$

مثال:



یک مول گاز کامل تک اتمی چرخه ای مطابق شکل مقابل را طی می کند. تعیین کنید:

(a) دمای گاز در حالت C

(b) گرمای دریافت شده توسط دستگاه در طی چرخه.

$$PV = nRT \Rightarrow 2 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-3} = 1 \times \Delta \times T \Rightarrow T = 100 \text{ K} \quad (a)$$

$$\Delta u = Q + W \Rightarrow \dots = Q + W \Rightarrow \dots = Q + \left(-\frac{2 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-3}}{2} \right) \Rightarrow Q = 100 \text{ J} \quad (b)$$

مثال:



چرخه ای مقابل متعلق به ۰/۵ مول گاز کامل تک اتمی است.

(a) دمای گاز در حالت B چند کلوین است؟

(b) کار انجام شده روی دستگاه در این چرخه چقدر است؟

پس‌خ:

$$T = \frac{PV}{nR} \Rightarrow T_B = \frac{2 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-3}}{0.5 \times 8} = 200 \text{ K} \quad (a)$$

$$W = -\frac{2 \times 10^{-3} \times 10^5}{2} = -100 \text{ J} \quad (b)$$

مثال:

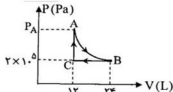


در شکل مقابل نمودار P-V برای یک مول گاز کامل تک اتمی رسم شده است. (فرایند AB بی در رو است)

(a) کار انجام شده در فرایند BC را محاسبه کنید

(b) چه مقدار گرما در هر چرخه تلف می شود؟

پاسخ:



$$W = -P\Delta V = -2 \times 10^5 \times (12 - 24) \times 10^{-3} = 2400 \text{ J}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow P_A = \frac{2 \times 10^5 \times 24}{12} = 4 \text{ atm}$$

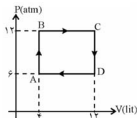
مثال:



یک مول گاز کامل تک اتمی چرخه ای مطابق شکل مقابل را طی می کند. تعیین کنید:

(۳) دمای گاز در نقطه های A، B، C و D.

(ب) گرمای مبادله شد: در مسیرهای AB و DA.



(الف)

$$R \square_A \frac{J}{\text{mol.K}}, \quad C_{MV} = \frac{\gamma}{\gamma} R \frac{J}{\text{mol.K}}$$

$$C_{MP} = \frac{\delta}{\gamma} R \frac{J}{\text{mol.K}}$$

$$P_A V_A = nRT_A \Rightarrow T_A = \frac{P_A V_A}{nR} = \frac{6 \times 10^5 \times 12 \times 10^{-3}}{1 \times 8} = 900 \text{ K} \quad V_A = V_B \Rightarrow \frac{P_B}{P_A} = \frac{T_B}{T_A} \Rightarrow T_B = 20 \times \frac{12}{6} = 600 \text{ K}$$

$$P_C = P_B \Rightarrow T_C = \frac{V_C}{V_B} T_B = \frac{24}{12} \times 600 = 1200 \text{ K}$$

$$V_D = V_C \Rightarrow T_D = \frac{P_D}{P_C} T_C = \frac{6}{12} \times 1200 = 600 \text{ K}$$

$$Q_{AB} = nC_{MV}(\Delta T) = 1 \times \frac{\gamma}{\gamma} R(T_B - T_A)$$

$$= \frac{\gamma}{\gamma} \times 8 \times (600 - 900) = -2400 \text{ J}$$

(ب) در مسیر AB حجم ثابت است؛ داریم:

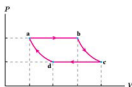
گاز در این حالت گرما دریافت کرده است.

$$Q_P = Q_{DA} = nC_{MP}(\Delta T) = n \times \frac{\delta}{\gamma} R(T_A - T_D)$$

$$= 1 \times \frac{\delta}{\gamma} \times 8 \times (900 - 600) = -1200 \text{ J}$$

در مسیر DA فرآیند هم فشار است؛ داریم:

معلوم می شود که در فرآیند DA گاز گرما از دست داده است.

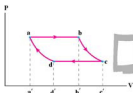


شکل روبه رو یک چرخه ترمودینامیکی فرضی را نشان می دهد.
الف) کار انجام شده روی دستگاه در هر فرایند را برحسب سطح زیر نمودار آن بیان کنید.

ب) نشان دهید مقدار کار کل انجام شده روی دستگاه برابر با مساحت داخل چرخه است.

پ) کار کل انجام شده روی دستگاه مثبت است یا منفی؟ توضیح دهید.

برای آنکه منظور مشخص شود، محل های تقاطع نقاط چین با محور V را به ترتیب با a' ، b' ، c' و d' نمایش می دهیم:



بنابراین، قدر مطلق کار انجام شده در فرایند da برابر مساحت سطح $add'a'$ ، قدر مطلق کار انجام شده در فرایند ab برابر مساحت سطح $abb'a'$ و قدر مطلق کار انجام شده در فرایند bc برابر مساحت سطح $bcc'b'$ و قدر مطلق کار انجام شده در مسیر bc بر مساحت سطح $dec'd'$ است.

اما علامت های کار با توجه به اینکه در فرایندهای da و ed از حجم کاسته شده، منفی و در فرایندهای ab و bc که به حجم

افزوده شده، مثبت است.

ب) کار انجام شده در چرخه برابر جمع جبری کارهای انجام شده در هر چهار فرایند است. اگر مساحت ها و علامت های کار را که در قسمت الف بررسی کردیم، لحاظ کنیم، درسی بایم که اندازه کار برابر با مساحت محصور داخل چرخه می شود.

پ) چون چرخه به طور ساعتگرد پیموده شده است، علامت کار محیط منفی می شود. توجه کنید که این نتیجه بر اساس

رابطه $W = -P\Delta V$ مثبت می شود. به عبارت دیگر، شکلی شبیه زیر داریم که در آن علامت منفی غالب شده است.



ماشین های گرمایی:

ماشین گرمایی وسیله‌ای است که با استفاده از برخی فرآیندهای ترمودینامیکی، گرمای حاصل از سوخت را به انرژی مکانیکی (کار) تبدیل می‌کند انرژی مکانیکی حاصل از ماشین گرمایی می‌تواند به طور مستقیم و برای حرکت دادن وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گیرد یا این که با تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی توسط ژنراتور الکتریکی انرژی مورد نیاز در محل کار و زندگی انسان‌ها تأمین می‌شود.

ماشین‌های گرمایی به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شوند:

- ۱- ماشین گرهای بیرون‌سوز: در این ماشین گرمایی، دستگاه (ماده کاری) انرژی گرمایی را از خارج دریافت می‌کند و کوره یا چشمه‌ی گرمایی یا دستگاه مستقیماً در تماس نمی‌باشد مانند ماشین بخار
- ۲- ماشین گرمایی درون‌سوز: در این ماشین گرمایی دستگاه با منبع گرما مستقیماً در تماس است. مثلاً در موتور اتومبیل که مخلوط هوا و بنزین به عنوان دستگاه داخل سیلندر با زدن چرخه توسط شمع به حالت انفجار درمی‌آید و گرما تولید می‌شود. در ماشین گرمایی دستگاه مفداری گرما دریافت می‌کند و بخشی از آن را به کار روی محیط تبدیل می‌کند و از آن‌جا که این تبدیل انرژی باید دائماً انجام شود طراحی این ماشین‌ها به گونه‌ای است که دستگاه پس از طی چند فرآیند به حالت اولیه‌ی خود برمی‌گردد یعنی ماشین گرمایی در یک چرخه‌ی معین کار می‌کند.

حال به بررسی دو نوع ماشین گرمایی متداول می‌پردازیم:

الف- ماشین بخار: ماشین بخار در نیروگاه‌های بخاری تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در ماشین بخار دستگاهی که چرخه را طی می‌کند آب است.

ماشین بخار دارای اجزایی به شکل زیر است:



از آن‌جا که گرما توسط کوره یعنی از بیرون دستگاه به

آب داده می‌شود این ماشین را بیرون‌سوز می‌نامند. مراحل

که آب در ماشین بخار طی می‌کند را به صورت زیر خلاصه می‌کنیم:

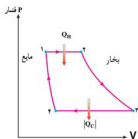
- ۱) آب درون دیگ بخار در فشار ثابت از کوره گرما می‌گیرد و به بخار تبدیل می‌شود و دما و حجم آن تا مقدار معینی افزایش می‌یابد.
- ۲) شیر ورودی باز می‌شود و بخار آب که دما و فشار آن بسیار زیاد است وارد اتانک ابسط می‌شود و با وارد کردن نیرو به پیستون، آن را به حرکت در آورده و بخار آب به سرعت منبسط می‌شود و فشار آن کاهش می‌یابد و چون کار انجام داده است انرژی درونی آن پایین می‌آید و دمای آن کم می‌شود و چون این فرآیند بسیار سریع انجام می‌گیرد، آن را بی‌دررو در نظر می‌گیریم. در این مرحله دستگاه روی محیط کار انجام می‌دهد.

۳) وقتی پیستون به انتهای خود می‌رسد، شیر ورودی بسته شده و شیر خروجی باز می‌شود و طراحی ماشین به گونه‌ای است که پیستون برگرداند می‌شود و بخار را به سمت جگانه (منبع سرد) هدایت می‌کند. بخار آب در جگانه که لوله‌های آن سرد آن را خنک می‌کنند، در فشار ثابت گرما از دست می‌دهد و به مایع تبدیل می‌شود. در این فرآیند دما و حجم بخار کاهش می‌یابد و تبدیل به آب می‌شود.

۴) پمپ، آب حاصل از میعان را به دیگ بخار برمی‌گرداند و فشار آن را به حالت اولیه می‌رساند و در این حالت یک چرخه ترمودینامیکی کامل می‌شود.

دستگاه در طول چرخه با دو منبع گرمایی (کوره و جگانه) تبادل گرمایی می‌کند که کوره را منبع گرم، و جگانه را منبع سرد

می‌نامیم. نمودار P-V ماشین بخار به شکل زیر است:

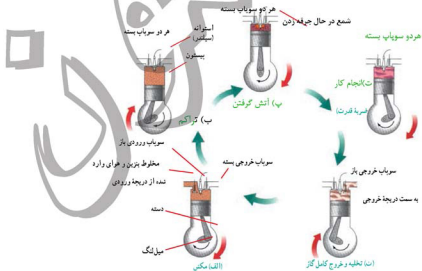


اگر تمام فرایندها را ایده آل فرض کنیم، نمودار P-V ماشین بخار که به نمودار رانکین معروف است به صورت مقابل است. فرایندها ۱-۲ و ۳-۴ معادل مرحله تبدیل آب به بخار، مرحله ی ۲-۳ معادل مرحله ی انجام کار و مرحله ی ۳-۴ معادل مرحله ی تبدیل بخار سرد به آب است. در مرحله ی ۱-۴ آب توسط تلمبه به دیگ بخار بر می گردد.

(ب) ماشینی گرمایی درون سوز: موتورهای بیستونی از متداولترین انواع موتورهای درون سوز هستند. موتور گرمایی درون سوز در دو نوع بنزینی و دیزلی می باشد که در این جا نوع بنزینی را بررسی می کنیم. قسمت اصلی این موتور از یک استوانه (سیلندر) که بیستون داخل آن حرکت می کند تشکیل شده است و اجزاء مختلف آن عبارتند از:

سیلندر، بیستون، شمع، دریچه ی ورود مخلوط هوا و بنزین، دریچه (سوپاپ) خروج دود مراحل مختلف ماشینی درون سوز:

- مرحله مکش: در این مرحله مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه ورودی وارد سیلندر می شود و پس از این که بیستون به پایین ترین وضعیت خود می رسد، دریچه بسته می شود.
- مرحله تراکم: بیستون بالا می آید و مخلوط را متراکم می کند و دمای مخلوط بالا می رود.
- مرحله آتش گرفتن: شمع جرقه می زند، مخلوط آتش می گیرد و دما و فشار آن نا مقدار بسیار زیادی بالا می رود، چون آتش گرفتن مخلوط در داخل سیلندر رخ می دهد و مخلوط از بیرون گرما نمی گیرد، این موتورها را درون سوز می نامند.
- مرحله انجام کار: در این مرحله در اثر فشار زیاد دستگاه متبسط می شود و بیستون را به طرف پایین می راند. در این مرحله دستگاه روی محیط کار انجام می دهد.
- مرحله تخلیه: در این مرحله بخشی از دود حاصل از سوختن مخلوط بنزین و هوا از طریق دریچه خروج دود خارج می گردد و سپس بیستون بالا آمده و بقیه دود را خارج می کند و مقدار زیادی گرما به هوای بیرون داده می شود که جزء تلفات انرژی محسوب می شود.



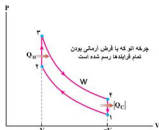
چرخه اتو و مراحل آن:

عبارت‌اند از:

۱- دستگاه (مخلوط بنزین و هوا) همواره یک گاز کامل است و بنابراین، اشتعالی برابر واکنش شیمیایی در آن رخ نمی‌دهد. ولی با گرفتن گرمای Q_H از محیط به همان دما و فشار گاز در پایان مرحله آتش گرفتن ماشین واقعی می‌رسد.

۲- تمام فرایندها آرمانی‌اند.

۳- مرحله تخلیه گاز رخ نمی‌دهد، گاز در داخل استوانه باقی می‌ماند و با دادن گرمای $|Q_C|$ به محیط، دما و فشار آن کاهش می‌یابد.

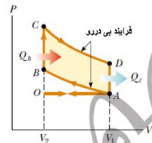


۱ تا ۲- دستگاه به سرعت متراکم می‌شود. فشار و دمای آن افزایش و حجم آن کاهش می‌یابد (مرحله تراکم).

۲ تا ۳- دستگاه گرمای Q_H را می‌گیرد و دما و فشار آن به مقدار زیادی بالا می‌رود (معادل مرحله آتش گرفتن).

۳ تا ۴- دستگاه به سرعت منبسط می‌شود. دما و فشار آن کاهش می‌یابد و بیستون را به طرف پایین می‌راند (مرحله انجام کار).

۴ تا ۱- دستگاه گرمای $|Q_C|$ را از دست می‌دهد و دما و فشار آن کاهش می‌یابد (معادل مرحله تخلیه).



نمودار P-V ماشین بنزینی:

با فرض ایده آل بودن فرایندها و حذف مراحل ورود بنزین و خروج دود (بدلیل اینکه جرم آنها با هم برابر است)، نمودار به صورت مقابل است. حذف کردن مرحله ی ورود و خروج گاز مستلزم این است که فرض کنیم درون سیلندر دستگاهی (گازی) وجود دارد که از محیط گرما می‌گیرد (به جای احتراق) و مقداری از گرما را به منبع سرد می‌دهد (به جای مرحله ی خروج دود). با این توضیح، مرحله ی DC معادل احتراق و مرحله ی CB معادل انجام کار و مرحله ی DA معادل خروج دود است.

بازده ماشین گرمایی:

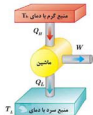
هدف از ساخت هر ماشین آن است که انرژی گرفته شده را تا بیشترین مقدار ممکن به انرژی مفید خروجی تبدیل کند. بنابراین بازده هر ماشین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\text{انرژی مفید خروجی}}{\text{انرژی داده شده به ماشین}}$$

در ماشین های گرمایی، انرژی مفید خروجی همان کار W و انرژی داده شده به ماشین، همان گرمای Q_H است. بنابراین، برای بازده هر ماشین گرمایی داریم:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H}$$

در بررسی هر یک از ماشین های بیرون سوز بخار و درون سوز بنزینی برای ساده سازی محاسبات، یک چرخه آرمانی فرض می‌کنند که در آنها هیچ هدر رفتی نداریم و فرایندها به طور ایستوار انجام می‌شوند. در طی این چرخه ها مقداری گرما از یک منبع با دمای بالاتر گرفته می‌شود Q_H و مقداری کار انجام می‌شود W و مقداری گرما به منبع با دمای پایین Q_L داده می‌شود



طرز کار همه ماشین های گرمایی آرمانی را می توان مانند شکل مقابل به صورت طرح و نشان داد.

هدف هر ماشین گرمایی آن است که انرژی گرمایی گرفته شده Q_H را تا آنجا که ممکن است به کار بیشتری تبدیل کند. برای اندازه گیری اینکه در چرخه ماشین گرمایی چقدر از انرژی داده شده به دستگاه، به کار مکانیکی تبدیل می شود، بازده گرمایی η را تعریف می کنیم. بازده یک ماشین گرمایی با نسبت کار انجام شده در چرخه ماشین به انرژی گرمایی که ماشین دریافت می کند، تعریف می شود:

قانون اول ترمودینامیک $U\Delta = Q + W$ برای چرخه ماشین های آرمانی به صورت زیر درمی آید

$$Q_H + Q_L + W = 0$$

در این رابطه Q_H مثبت و Q_L و W ، منفی است. بنابراین: (ماشین های گرمایی آرمانی)

در نتیجه بازده برای ماشین های گرمایی آرمانی چنین می شود:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{Q_H} \quad (\text{برای ماشین های گرمایی آرمانی})$$

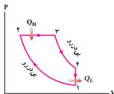
بازده ماشین های گرمایی واقعی از بازده ماشین های آرمانی کمتر است. بازده واقعی ماشین های درون سوز بنزینی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، بازده ماشین های درون سوز دیزلی در حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد، و بازده ماشین های بیرون سوز بخار ۳۰ تا ۴۰ درصد است.

محاسبه نشان می دهد که با بالا بردن نسبت تراکم τ می توان به بازده بیشتری برای ماشین های درون سوز بنزینی دست یافت. اما در عمل ممکن نیست به نسبت تراکم بالاتر از ۴ یا ۵ دست یافت؛ زیرا در نسبت های تراکم بالاتر، مخلوط سوخت و هوا چنان گرم می شود که بیش از چرخه زدن شمع، آتش می گیرد. این مشکل را رولاند کریستین کارل دیزل مخترع و مهندس آلمانی با طراحی ماشین نا حدودی برطرف کرد. در ماشین دیزل به جای مخلوط سوخت و هوا، خود هوا متراکم می شود. نسبت تراکم به ۱۱ تا ۱۲ می رسد و هوا تا حدود 600°C گرم می شود. در پایان تراکم، سوخت مایع به درون سیلندر پاشیده می شود. مرحله های مختلف چرخه این ماشین و نمودار آن در صفحه V-P را می توان در زیر بررسی کرد

در ماشین های دیزلی فقط هوا در قسمت ورودی پذیرفته می شود. هوا به طور بی دررو متراکم می شود تا اینکه دما به قدر کافی بالا رود و بتواند گازوئیلی را که به داخل استوانه پاشیده می شود، پس از تراکم مشتوق کند. میزان پاشیده شدن گازوئیل طوری تنظیم می شود که احتراق تقریباً به طور هم فشار — در حالی که در حین احتراق بیستون به سمت خارج حرکت می کند — انجام گیرد. بقیه چرخه — یعنی ضربه قدرت، خروج گاز از دریچه و ضربه خروج — دقیقاً مثل ماشین بنزینی است. در ماشین دیزلی نیز مانند ماشین بنزینی از اثرهای اتلافی چشم پوشی می شود. توجه کنید که چون در ماشین دیزلی فقط هوا متراکم می شود و در مرحله تراکم سوختی در سیلندر نیست، سوختن در این ماشین ها بیش از موقع اتفاق نمی افتد و لذا می توان نسبت تراکم را تا مقادیر زیادی بالا برد.

شکل روبه رو طرحی از نوع جدید این ماشین ها را نشان می دهد.

نمودار V-P چرخه ماشین های دیزلی چنین است:



مثال: در یک ماشین گرمایی در هر دقیقه ۱۰ گرم سوخت مصرف می‌شود و گرمای حاصل از سوخت $18 \cdot \frac{\text{KJ}}{\text{gr}}$ است. اگر ۵۰ درصد از گرمای حاصل از سوخت مورد استفاده قرار گیرد و توان خروجی موتور ۶ Kw باشد بازده گرمایی موتور چند درصد است؟

$$\eta = \frac{|W|}{Q_H} = \frac{P \cdot t}{\frac{\Delta \theta}{100} Q_f} = \frac{6000 \times 60}{\frac{50}{100} \times 180000 \cdot \frac{1}{\text{gr}} \times 10 \cdot \text{gr}} = \frac{360000}{900000} \quad \eta = 40\%$$

مثال:

بازده نمودار مقابل را به دست آورید.



$$\eta = \frac{|W|}{Q_L} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = \frac{2|Q_C| - |Q_C|}{2|Q_C|} = \frac{1|Q_C|}{2|Q_C|}$$

مثال: اگر در یک ماشین حرارتی، ۲۵ درصد از گرمایی که از چشمه گرم گرفته می‌شود به کار تبدیل گردد کار انجام شده توسط این ماشین در هر چرخه چند ژول است به شرطی که در هر چرخه ۳۰۰ ژول گرما به چشمه سرد داده شود؟

$$\eta = \frac{|W|}{Q_L} = \frac{|W|}{|W| + |Q_C|} \Rightarrow \frac{25}{100} = \frac{|W|}{|W| + 300} \Rightarrow 4|W| = |W| + 300 \Rightarrow 3|W| = 300 \Rightarrow |W| = 100 \text{ J}$$

یک ماشین گرمایی آرمانی در هر چرخه $4/10$ گرما از منبع گرم دریافت می‌کند و $2/4$ گرما به منبع سرد می‌دهد.

(الف) در هر چرخه چقدر کار روی محیط انجام می‌شود؟

(ب) بازده این ماشین چقدر است؟

پاسخ: الف)

$$|W| = Q_H - |Q_C|$$

$$|W| = 4/10 \text{ kJ} - 2/4 \text{ kJ} = 1/6 \text{ kJ}$$

$$\eta = \frac{|W|}{Q_L}$$

$$\eta = \frac{1/6 \text{ kJ}}{4/10 \text{ kJ}} = 0/40$$

(ب)

پنابراین در این ماشین گرمایی ۶۰ درصد از گرمای دریافت شده از منبع گرم، به منبع سرد داده شده و تنها ۴۰ درصد آن به کار تبدیل شده است.

قانون دوم ترمودینامیک (به بیان ماشین گرمایی) :

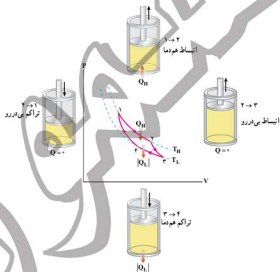
هیچ یک از ماشین های گرمایی که تاکنون ساخته شده اند، نمی توانند همه گرمای دریافتی را به کار تبدیل کنند. به عبارت دیگر: ممکن نیست دستگاه چرخه ای را بییماید که در طی آن مقداری گرما را از منبع گرم جذب و تمام آن را به کار تبدیل کند.

بیان بالا، قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی نامیده می شود؛ یعنی ممکن نیست بازده یک ماشین گرمایی برابر یک (۱۰۰ درصد) شود.

توجه داریم که، اگر در چرخه یک ماشین گرمایی، تمام گرمای گرفته شده از منبع گرم به کار تبدیل شود، قانون اول ترمودینامیک نقض نمی شود؛ اما براساس قانون دوم ترمودینامیک امکان طراحی و ساخت ماشینی که این تبدیل را انجام دهد، غیرممکن است. اگر قانون دوم ترمودینامیک بر فرایندهای ترمودینامیک حاکم نبود، می توانستیم لطاری بسازیم که از هوا گرما بگیرد (هوا را سرد کند) و با تبدیل کامل آن به کار حرکت کند، پائیروگا های در کنار دریا بسازیم که با سرد کردن آب دریا انرژی الکتریکی تولید کند.

ماشین و چرخه کارنو:

همانطور که در قانون دوم ترمودینامیک مشاهده کردیم امکان ندارد که بازده یک ماشین گرمایی ۱۰۰٪ باشد، حال برای ما مهم است که حال که نمی توانیم بازده ۱۰۰٪ داشته باشیم تا آنجا که ممکن است بازده را بالا ببریم. کارنو بیشترین بازده یک ماشین گرمایی را مشخص کرده است. کارنو ثابت کرده است یک ماشین گرمایی که بین دو منبع گرمایی، منبع گرم با دمای T_H و منبع سرد با دمای T_C کار می کند در صورتی حداکثر بازده را خواهد داشت که از چرخه ای کارنو تبعیت کند.



۱- گاز در دمای T_H انبساط هم‌دما می‌یابد و گرمای Q_H را از منبع گرم می‌گیرد (۱→۲).

۲- گاز به‌طور بی‌دررو منبسط می‌شود و دمای آن تا T_C کاهش می‌یابد (۲→۳).

۳- گاز در دمای T_C به‌طور هم‌دما متراکم می‌شود و گرمای $|Q_C|$ را به منبع سرد می‌دهد (۳→۴).

۴- گاز به‌طور بی‌دررو متراکم می‌شود، دمای آن تا T_H افزایش می‌یابد و به حالت اول باز می‌گردد (۴→۱).

محاسبه نشان می دهد که بازده ماشین کارنو از رابطه زیر به دست می آید:

$$\eta_{\text{کارنو}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad \text{یا} \quad \eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

که در آن T_H و T_C برحسب کلوین است .

همان طور که می بینید بازده ماشین کارنو به جنس ماده ای که چرخه را می پیماید بستگی ندارد و تنها به دمای دو منبع یا دمای بالا و پایین که ماشین بین آن دو کار می کند وابسته است بنا به قضیه کارنو، بازده یک ماشین گرمایی که بین دو منبع یا دماهای T_H و T_C کار می کند هرگز نمی تواند بیشتر از بازده ماشین کارنویی باشد که بین همین دو منبع کار می کند؛ یعنی برای هر ماشین گرمایی (کارنو) $\eta \leq \eta_{\text{کارنو}}$ است.

بازده ماشین گرمایی به کمک تعریف بازده به صورت زیر خواهد بود

$$\eta_{\text{max}} = \frac{|W|_{\text{کارنو}}}{|Q_H|_{\text{کارنو}}} = 1 - \frac{|Q_C|_{\text{کارنو}}}{|Q_H|_{\text{کارنو}}}$$

مثال:



یک ماشین گرمایی در یک چرخه کارنو میان دو جسمه با دماهای 300°C و 900°C کلوین کار می کند ماشین در هر چرخه از جسمه گرم 2000 ژول انرژی می گیرد. این ماشین در هر چرخه چند ژول کار انجام داده است؟

$$\eta_{\text{max}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{|W|}{|Q_H|} \Rightarrow 1 - \frac{300}{900} = \frac{|W|}{12000} \Rightarrow \frac{2}{3} = \frac{|W|}{12000} \Rightarrow |W| = 8000 \text{ J}$$



یک ماشین گرمایی درون سوز در هر چرخه 8000 J گرما از سوزاندن سوخت دریافت می کند و 2300 J کار تحویل می دهد. گرمای حاصل از سوخت 5000 J/g است و ماشین در هر ثانیه 40 چرخه را می پیماید .

با فرض آرماتی بودن ماشین، کمیت های زیر را حساب کنید الف) بازده ماشین ب) گرمای تلف شده در هر چرخه ب) سوخت مصرف شده در هر چرخه ت) توان ماشین.

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{2000 \text{ J}}{8000 \text{ J}} = 0.25$$

الف) برای بازده ماشین داریم :

$$|Q_C| = (1 - \eta) |Q_H| = (1 - 0.25)(8000) = 6000 \text{ J}$$

پس بازده 25% است

ب)

که آن را با استفاده از قانون اول ترمودینامیک نیز می توانستیم به دست آوریم:

$$|Q_C| = |Q_H| - |W| = 8000 \text{ J} - 2000 \text{ J} = 6000 \text{ J}$$

ب) مقدار سوخت مصرف شده در هر چرخه چنین می شود: $W = |Q_H| - |Q_C| = (173 \times 10^3 \text{ J}) - (97 \times 10^3 \text{ J}) = 76 \times 10^3 \text{ J}$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{76 \times 10^3 \text{ J}}{6 \text{ s}} = 1.27 \times 10^4 \text{ W}$$

بنابراین، توان چنین می شود:

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{97 \times 10^3 \text{ J}}{76 \times 10^3 \text{ J}} = 1.27$$

ب) ضریب عملکرد برابر است با:

یخچال:

وسیله ای است که با استفاده از کار، گرما را از منبعی سرد می گیرد و به منبعی گرم می دهد. در یخچال نیز مانند ماشین های گرمایی یک چرخه ترمودینامیکی طی می شود.

در یخچال مجموعه ی فرایند ها عکس فرایند ها در ماشین گرمایی است. به عنوان مثال چرخه در ماشین های گرمایی ساعتگرد ولی در یخچال پاد ساعت گرد است. نمودار کلی یخچال مطابق شکل زیر است. یخچال نیز مانند ماشین گرمایی از چرخه بیرونی می کشد. چرخه ی یخچال پاد ساعت گرد است.

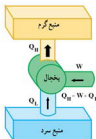
منبع سرد در یخچال همان محیط داخل یخچال است و منبع گرم محیط بیرون (مثلاً آشپزخانه) .
در یخچال گرما از منبع سرد گرفته می شود ($Q_C > 0$) گرما به منبع گرم داده می شود ($Q_H < 0$)

تغییر انرژی درونی دستگاه در هر چرخه صفر است ($\Delta U = 0$). از طرفی Q شامل دو جمله Q_H و Q_L است. پس می توان نوشت:

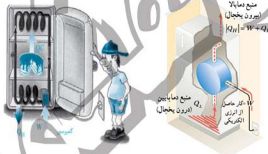
$$0 = Q_H + Q_C + W$$

$$|Q_H| = W + Q_C$$

در این رابطه، Q_H منفی و Q_L و W مثبت است. بنابراین:



طرز کار یخچال آرمانی



یخچال های خانگی، کولرهای گازی و تلمبه های گرمایی نمونه هایی از یخچال ها هستند؛ مثلاً در یخچال خانگی انرژی الکتریکی سبب انجام کار W توسط کمپرسور (متراکم کننده) می شود، گرمای Q_L از هوا و مواد داخل یخچال گرفته می شود و گرمای Q_H به هوای بیرون یخچال داده می شود. طرز کار کولر گازی نیز شبیه یخچال خانگی است، با این تفاوت که

در کولر گازی منبع دمایی پایین، هوا و اجسام داخل اتاق و منبع دمایی بالا، هوای بیرون اتاق است

ضریب عملکرد: عبارت است از نسبت گرمایی که از داخل یخچال گرفته می شود به کاری که موتور انجام می دهد:

$$K = \frac{Q_L}{W}$$

هر چه ضریب عملکرد یخچال بیشتر باشد، استفاده از آن مقرون به صرفه تر است.

ضریب عملکرد یخچال های خانگی در حدود ۵ و کولرهای گازی در حدود ۵/۲ است.

ضریب عملکرد یخچالی که در آن فرایندها آرمانی است، از رابطه زیر به دست می آید:

$$K = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{|Q_H| - Q_L}$$

یخچال آرمانی

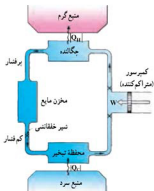
مانند ماشین های گرمایی که بازده آنها حدّ بالایی دارد، برای ضریب عملکرد یخچال ها نیز حدّ بالایی وجود دارد. به این حدّ بالا، ضریب عملکرد یخچال کارنو گفته می شود و نشان داده می شود که از رابطه زیر به دست می آید.

$$K_{\text{کارنو}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

یخچال کارنو

در این رابطه T_H و T_L به ترتیب، دمای منبع های دمایی پایین و دمایی بالا برحسب کلوین است.

نمودار طرز کار یخچال خانگی:



قانون دوم ترمودینامیک به بیان ماشین گرمایی:

هیچ ماشین گرمایی نمی توان ساخت که بازده آن صد در صد باشد، یعنی تمام گرمایی را که از منبع گرم می گیرد به کار تبدیل کند.

قانون دوم ترمودینامیک به بیان یخچالی:

هیچ یخچالی وجود ندارد که بدون انجام کار، گرما را از محیط سرد بگیرد و به محیط گرم بدهد.

دو بیان فوق به یک معنی هستند، یعنی اگر بنویسیم ماشین گرمایی بسازیم که بازده آن صد در صد باشد، با اتصال آن به یک یخچال به عنوان موتور، یخچالی ساخته ایم که بدون انجام کار خارجی، گرما را از محیط سرد می گیرد و به محیط گرم می دهد.

مثال: توان یک یخچال ۲۵۰ وات و ضریب عملکرد آن ۴ است. چه مدت طول می کشد تا در این یخچال ۱ کیلوگرم آب ۲۵

درجه ی سلسیوس به آب ۱۵ تبدیل کند؟

$$Q = mc\Delta\theta = 1 \times 4200 \times 10 = 42000\text{J}$$

$$K = \frac{Q_c}{W} \Rightarrow Pt = \frac{Q_c}{K} \Rightarrow 1000t = \frac{42000}{4} \Rightarrow t = 42\text{s}$$

پاسخ:



مثال:

ضریب عملکرد یک یخ ساز (فریزر) $K = 4/0$ است. این یخ ساز در هر ساعت، $1\text{kg}/\text{h}$ آب با دمای $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ را به یخ با دمای $\theta_2 = -10^\circ\text{C}$ تبدیل می کند.

(الف) چه مقدار گرما در هر ساعت باید از آب گرفته شود؟

(ب) یخ ساز در هر ساعت چه مقدار انرژی الکتریکی مصرف می کند؟

(پ) چه مقدار گرما در هر ساعت به بیرون داده می شود؟

$$L_f = 3.3 \times 10^5 \text{J/kg} \quad \text{و} \quad C_p = 4.2 \times 10^3 \text{J/kg}\cdot\text{K} \quad \text{و} \quad C_w = 4.2 \times 10^3 \text{J/kg}\cdot\text{K}$$

(الف) توجه کنید که برای تبدیل آب با دمای 20°C به یخ با دمای 10°C - چه فرایندهایی طی می شود:

یخ 10°C - به یخ 0°C - \rightarrow آب 0°C - \rightarrow آب 20°C - بنابراین، مقدار گرمایی که در هر ساعت باید از آب گرفته

$$Q_c = |Q| = mc_w \Delta\theta + mL_f + mc_p \Delta\theta' \rightarrow$$

$$(1/\text{kg}) (4.2 \times 10^3 \text{J/kg}\cdot\text{K}) (20\text{K}) + (1/\text{kg}) (3.3 \times 10^5 \text{J/kg}) + 1/\text{kg} (4.2 \times 10^3 \text{J/kg}\cdot\text{K}) (10\text{K}) = 6.5 \times 10^4$$

$$K = \frac{Q_c}{W} \rightarrow W = \frac{Q_c}{K} = \frac{6.5 \times 10^4}{4}$$

(ب)

ب) از قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$|Q_{II}| = Q_C + W = 6/5 \times 10^5 J + 1/6 \times 10^5 J = 10^5 J \times 8/6$$



مثال: برای این که در یک ماشین گرمایی، گرما بتواند شارش کند،

الف) دستگاه باید حداقل با چند منبع در تماس باشد؟

ب) دمای منبع ها را مقایسه کنید.

پاسخ: همه ی ماشین های گرمایی بین دو منبع گرما با دماهای متفاوت کار می کنند و این اختلاف دما سبب شارش گرما می شود.



مثال:

فکر می کنید در چه مناطقی و با چه ویژگی هایی می توان ماشین گرمایی بدون مصرف سوخت طراحی کرد؟ یعنی فقط از انرژی طبیعت استفاده کرد.

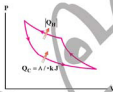
پاسخ: ۱) مناطقی که انرژی زمین گرمایی آن ها نسبتاً زیاد است مثلاً در نزدیکی محل آتش فشان و... در این مناطق دمای زیر سطح زمین بسیار بیشتر از دمای سطح زمین است دو چشمه ی گرم و سرد
۲) چشمه های آب گرم که دمای آن بیشتر از دمای اطراف آن هاست.
۳) استفاده از اختلاف دمای بین لایه های مختلف آب دریا

پرسش: آیا می توان با باز گذاشتن در یخچال در آشپزخانه، هوای آشپزخانه را خنک کرد؟

پاسخ: اگر در یخچال باز باشد، در هر چرخه، گرمای Q_C از آشپزخانه گرفته می شود و گرمای Q_H به آن داده می شود. با توجه به این که $|Q_H| = Q_C + W$ است، $|Q_H| > Q_C$ است و آشپزخانه به تدریج گرم می شود.

پرسش: از نظر اقتصادی بهترین یخچال، چه یخچالی است؟

پاسخ: یخچالی که با انجام کار کمتر (صرف انرژی الکتریکی کمتر) گرمای بیشتری را از یخچال (منبع سرد) به بیرون منتقل کند.



فرض کنید نمودار $P-V$ ی چرخه ای که دستگاه در یک یخچال

فرضی طی می کند، به صورت شکل روبه رو است .

اگر دستگاه در هر چرخه $8/0 \text{ kJ}$ گرما از منبع سرد بگیرد و مساحت داخل چرخه $2/0 \text{ kJ}$ باشد ،

الف) این یخچال در هر چرخه چه مقدار گرما به محیط می دهد ؟

ب) ضریب عملکرد آن چقدر است؟

$$|Q_{II}| = W + Q_C \quad \text{الف)}$$

$$= 2/0 \text{ kJ} + 8/0 \text{ kJ} = 10 \text{ kJ}$$

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{8/0 \text{ kJ}}{2/0 \text{ kJ}} = 4/0 \quad \text{ب)}$$

یک کولر گازی در هر دقیقه $9/0 \times 10^5 \text{ J}$ گرما از اتاق می گیرد و در همان مدت، $1/3 \times 10^5 \text{ J}$ گرما به فضای بیرون می دهد.

الف) توان مصرفی این کولر چند وات است؟

ب) ضریب عملکرد آن چند است؟

$$|Q_{II}| = W + Q_C \quad W = |Q_{II}| - Q_C = (1/3 \times 10^5 J) - (9/0 \times 10^5 J) = 4/0 \times 10^5 J$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{4/0 \times 10^5 J}{6 \text{ s}} + 6 \times 10^5 W \quad \text{بنابراین، توان چنین می شود:}$$

$$K = \frac{Q_C}{W} = \frac{9/0 \times 10^5 J}{4/0 \times 10^5 J} = 1/2 \quad \text{ب) ضریب عملکرد برابر است با:}$$